

2. Elementos estructurales prefabricados en UHPFRC

En este capítulo se analizan diseños de elementos estructurales prefabricados en UHPFRC, comparándolos con sus homólogos en hormigón convencional y/o acero. Se muestran los componentes más relevantes encontrados según tipología estructural: cimentaciones, contenciones, soportes, vigas y estructuras de piso.

Fig. 2.0. Componentes-
viga en U para puentes,
almacenados en fábrica
de UHPC-Dura, Malasia.

2.1. Cimentaciones



Las aplicaciones observadas del UHPFRC en cimentaciones prefabricadas se limitan a elementos de cimentación profunda, concretamente pilotes prefabricados pretensados hincados, en los que se rentabilizan las características estructurales del material.

En contraposición, no se han encontrado prototipos de cimentaciones superficiales prefabricadas en UHPFRC, debido a que es difícil optimizar un diseño para esta tipología en la que se ponga en juego la mayor virtud del material, su capacidad a flexión. Además, el mayor peso de la zapata es positivo para la estabilidad de la superestructura, y con el UHPFRC lo que se consiguen son soluciones más ligeras.

No obstante, existe un sistema de cimentación superficial prefabricada en cierto grado, consistente en “pre-zapatas” o cáscaras armadas que sirven como encofrado de la cimentación final (Fig. 2.1.), en el que es fácil imaginar una optimización del elemento utilizando UHPFRC. Con este material, las cáscaras serían más ligeras y resistentes en el tiempo.



Fig. 2.1. Hormigonado de zapata prefabricada Monachino. Sistema de cimentación con “pre-zapata” en hormigón armado tradicional.

Volviendo a las cimentaciones profundas, los pilotes prefabricados pretensados hincados en hormigón armado, así como los pilotes en H de acero, son muy utilizados en construcción, especialmente en obra civil, pero pueden presentar una serie de limitaciones [11].

La primera limitación tiene que ver con el proceso de hincado, en el que habitualmente se emplea más fuerza de la que el componente puede resistir, produciendo roturas, ya sea por el impacto directo del martillo o por el encuentro con un estrato muy duro (Fig. 2.2.). En pilotes en

Fig. 2.2. (Izq.) Daños en la parte superior de pilotes hincados de hormigón armado por uso de tamaño incorrecto de martillo.

Fig. 2.3. (Der.) Parte inferior de pilote en acero tras impacto repetido contra estrato muy duro de permafrost.



H de acero, se pueden observar pandeos locales en los delgados perfiles del componente, deformando e inutilizando el elemento (Fig. 2.3.).

La segunda limitación importante se refiere a la durabilidad del elemento. En hormigón armado, a veces el recubrimiento de armaduras no es suficiente debido a la porosidad del material, especialmente en entornos corrosivos como el marino (Fig. 2.4.). En pilotes de acero el problema es incluso más evidente (Fig. 2.5.), en este caso se deben aplicar, inicial y periódicamente a lo largo de su vida útil, medidas de protección como pinturas anticorrosivas, aumentando el coste de la solución a largo plazo.

Fig. 2.4. (Izq.) Pilote de hormigón armado pretensado con pérdida de recubrimiento y corrosión de armaduras en entorno marino.

Fig. 2.5. (Der.) Pilotes de acero corroídos con pérdida de sección en entorno marino.



El UHPFRC resulta ser un material prometedor en esta aplicación, por solventar los problemas que presentan los pilotes prefabricados convencionales de hormigón armado y acero. La gran resistencia a compresión del material evita las fracturas en el proceso de hincado y permite un pretensado aún más potente, y su durabilidad le otorga al componente una larga vida útil sin necesidad de mantenimiento. Además, las secciones del elemento pueden reducirse considerablemente mientras ofrezcan suficiente resistencia a flexión, esto supone miembros más ligeros y mayor facilidad en el proceso constructivo.

A continuación, se presentan dos prototipos diferentes de pilote prefabricado en UHPFRC: pilote en H y pilote octogonal hueco.

Pilote en H



Lámina 01 (pág. siguiente):
Pilote en H de UHPFRC,
comparativa con pilote
en H de acero.

Este componente se extrae de la Universidad Estatal de Iowa (ISU), fue diseñado en 2008 como alternativa a los pilotes en H de acero para cimentaciones profundas en obra civil [11].

Se decide desarrollar un pilote de UHPFRC con sección en H, frente a una sección hueca, por su mayor facilidad de fabricación y por su capacidad de reducir el área manteniendo una gran superficie perimetral en contacto con el terreno. Al compartir forma en H, se ponen de manifiesto las semejanzas entre las propiedades estructurales del UHPFRC pretensado y el acero.

Se plantea una sección con las mismas dimensiones que las del pilote de acero más empleado por el Departamento de Transporte de Iowa (IDOT), el HP 10 x 57 (sección en H de 10 x 10 pulgadas, es decir, 25 x 25 cm, y 57 libras de peso por pie lineal, es decir, 85 kg por metro lineal), de esta forma podrá emplearse la misma maquinaria de hincado para el componente en UHPFRC.

Las dimensiones de la sección optimizada son de 25 x 25 cm, con un espesor de 5 cm en el alma y de 4,5 a 7 cm en las alas. El espesor creciente hacia el alma, «tapered H-shaped», se debe a la necesidad de facilitar la salida de burbujas de aire en el hormigonado en fábrica. La sección en el extremo superior del pilote es macizada una longitud de 22,5 cm para asegurar el elemento en el proceso de hincado, aunque se demostraría que este refuerzo ni siquiera sería necesario. Encontramos un total de 10 redondos de acero de 13 mm de diámetro pretensados 1860 MPa. No es necesario el armado a cortante.

El pilote en H prefabricado en UHPFRC, y el pilote de acero HP 10 x 57, tienen el mismo peso aproximadamente, siendo la solución en UHPFRC ligeramente menos resistente a flexión que el anterior, pero casi dos veces más resistente en carga axial, esto supone una reducción en el número total de componentes necesarios para la cimentación. El factor realmente diferencial es la durabilidad y la falta de mantenimiento que ofrecen las soluciones en hormigón de ultra-alta resistencia.

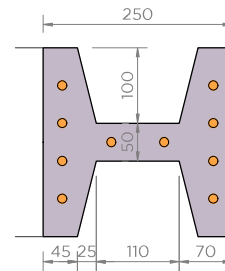
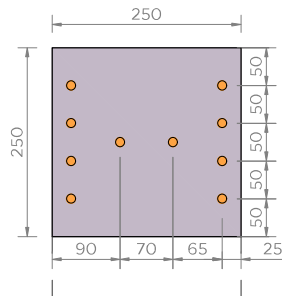
Después de su exitosa fabricación, en la que se produjeron pilotes de hasta 10,7 m de longitud, se realizaron numerosas pruebas de laboratorio y de campo. En ellas se demuestra la resistencia del componente en las exigencias estructurales de servicio, así como en el hincado con maquinaria convencional, necesitando menor amortiguamiento que los pilotes convencionales.

Hoy en día, encontramos fabricantes en EE.UU. que ofrecen pilotes prefabricados en UHPFRC con sección en H. Es el caso de Cor-Tuf UHPC, empresa que ha desarrollado una mezcla propia de este material y lo emplea para producir pilotes pretensados de grandes dimensiones.

Sección A-A:
Sección transversal por
cabeza de pilote H 25x25 de
UHPFRC pretensado

Sección B-B:
Sección transversal por
cuerpo de pilote H 25x25 de
UHPFRC pretensado

● 13 mm acero pretensado 1860 MPa



Datos de sección:

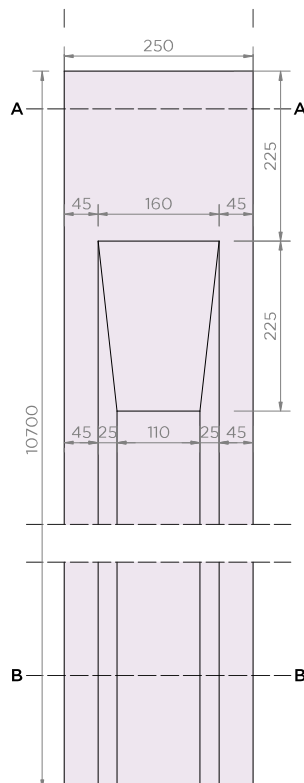
Área total: 366 cm²

Peso: 90,9 kg/m

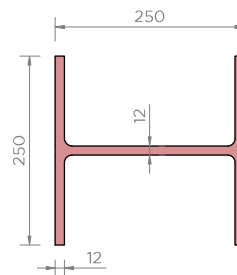
Momento de inercia: 3,31 x 10⁸ mm⁴

Rigidez: 1,83 x 10¹⁵ N mm²
(módulo elástico x m. de inercia)

**Alzado de pilote en
en H 25x25 de
UHPFRC pretensado**



Sección comparativa:
Sección transversal de pilote
HP 10X57 (25x25) de acero



Datos de sección:

Área total: 108 cm²

Peso: 85,1 kg/m

Momento de inercia: 1,22 x 10⁸ mm⁴

Rigidez: 2,25 x 10¹⁵ N mm²
(módulo elástico x m. de inercia)

Basado en VANDE VOORT [11].

Pilote octogonal hueco



Lámina 02 (pág. siguiente):
Pilote octogonal hueco
de UHPFRC, comparativa
con pilote de hormigón
armado convencional.

Presentamos un diseño concreto desarrollado por SCP (Standard Concrete Products), fabricado en la planta que esta ingeniería tiene en Tampa, Florida.

El objetivo era producir un pilote hueco en UHPFRC empleando el mismo encofrado que se utiliza para fabricar los pilotes estándar de 61 x 61 cm del Departamento de Transporte de Florida (FDOT). La solución se consigue bloqueando las esquinas del encofrado, resultando en un perímetro octogonal, y situando un tubo de cartón perdido de 40 cm de diámetro para generar el hueco interior.

Las secciones tubulares tienen mejor comportamiento a flexión que las secciones sólidas, por concentrar el material en los extremos. Además, estos pilotes, con su área total de sección incluyendo el vacío, consolidan el terreno a medida que lo penetran, igual que si fueran elementos macizos, mejorando la propia resistencia del suelo.

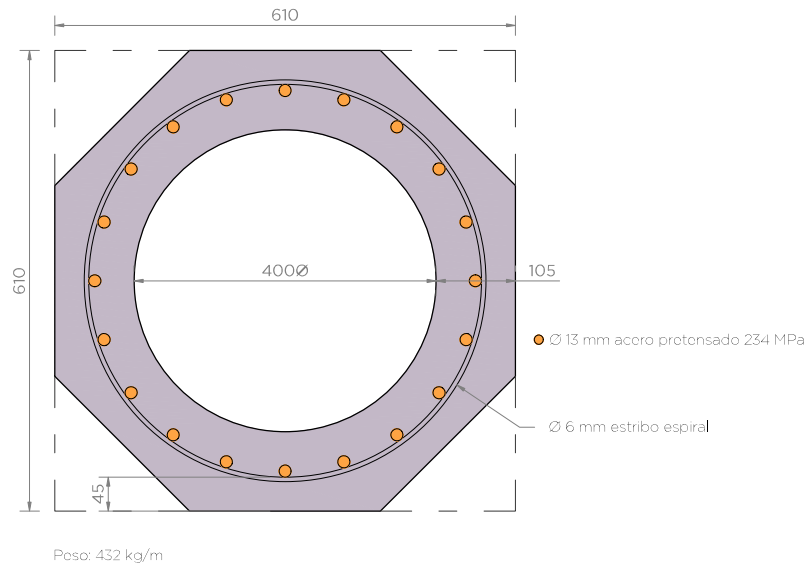
La sección optimizada tiene un espesor mínimo de 10,5 cm, reduciendo el peso del elemento en más de la mitad, mientras que la capacidad a flexión se mantiene y la capacidad axial del pilote aumenta considerablemente. Por lo tanto, también es superior la resistencia del componente en el proceso de hincado. Ambas secciones tienen 20 cordones de acero de 13 mm de diámetro (pretensado a 234 MPa en el pilote de UHPFRC), pero el armado en espiral de cortante, presente en los pilotes convencionales, podría ser innecesario en el elemento en UHPFRC gracias a la presencia de fibras metálicas en el material.

Los pilotes fueron testeados exitosamente (testeo de pilotes de 9,14 m de longitud) en el Centro de Investigación de Estructuras del FDOT (Fig. 2.6.), demostrando que es posible la producción de elementos totalmente funcionales en UHPFRC empleando materiales y equipamientos propios de la industria del prefabricado en hormigón convencional [12].

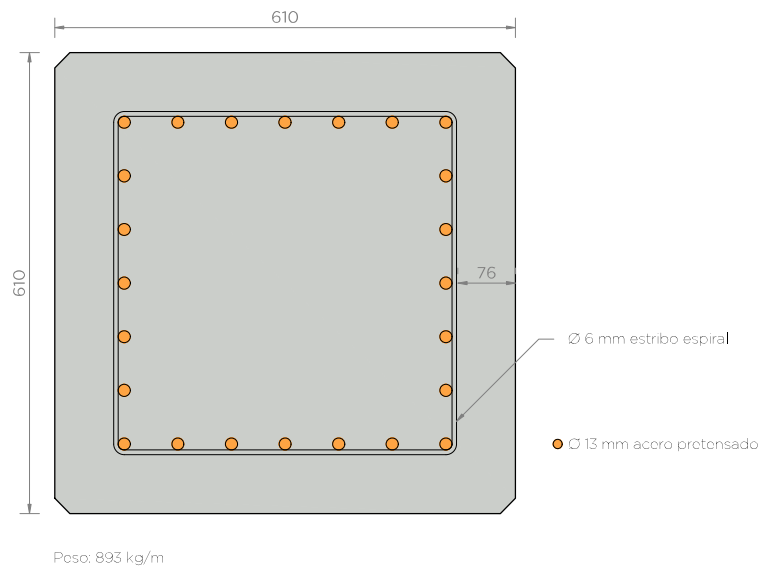


Fig. 2.6. Test a flexión del pilote octogonal hueco de UHPFRC en el Centro de Investigación de Estructuras del FDOT.

Sección transversal de pilote octogonal hueco
61x61 SCP en UHPFRC

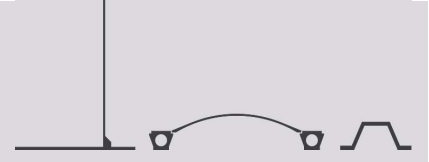


Sección comparativa:
Sección transversal de pilote cuadrado 61x61
FDOT en hormigón armado pretensado



Basado en LAWLER, TADROS, LAMPTON, WAGNER, SEVENKER [12].

2.2. Contenciones



En las estructuras de contención, al igual que en las de cimentación, la durabilidad del material es de capital importancia, por ser una tipología en contacto constante con las tierras que soporta. La humedad del terreno, o los distintos agentes agresivos que contiene, pueden acabar dañando el elemento de contención hasta provocar su fallo estructural.

El UHPFRC ofrece la seguridad de que estos daños no van a suceder, al menos en el período de mínimo 2 veces la vida útil de una contención en hormigón armado convencional, gracias a la ausencia de poros y a la altísima densidad de su matriz.

Estos beneficios en durabilidad, sumado a las ventajas del UHPFRC en relación con la construcción industrializada, han hecho que este material haya sido empleado exitosamente en algunos proyectos civiles de contención en Malasia, de la mano de Yen Lei Voo, CEO de Dura Technology Sdn Bhd, sede en Perak.

Es el caso del canal de drenaje de monzón para un proyecto residencial, ejecutado en la localidad de Ipoh, en 2010 [13]. El canal, de 90 m de longitud, está formado por muros de contención laterales de 1,5 m de altura. Resultó ser una solución ideal por su nivel de industrialización y ligereza: muros en L prefabricados en DURA-UHPC con un espesor de 3 - 5 cm, un peso de 260 kg/m, frente a los 1200 kg/m del muro en hormigón convencional, y una longitud de pieza de 3 metros, frente al metro de longitud del muro en hormigón convencional, reduciendo el número de componentes necesarios (Fig. 2.7., 2.8., 2.9.).

Otro proyecto de ingeniería civil ejecutado con muro de contención prefabricado de DURA-UHPC es la protección del río en Sungai Ara, Perak, 2013 [14]. Construido por el Departamento de Riego y Drenaje de Malasia (JPS), consiste en un muro continuo de 120 m de longitud completado en un tiempo récord gracias al grado de industrialización del proceso, empleando muros en L.



Fig. 2.7. Carga de muros prefabricados DURA-UHPC en L en camión para transporte a lugar de construcción.

Fig. 2.8. Comparativa entre muro de contención prefabricado con hormigón armado convencional y muro de contención ultraligero prefabricado en DURA-UHPC.



Fig. 2.9. Construcción de canal de drenaje de monzón para un proyecto residencial, empleando muro en L de contención ultraligero prefabricado en DURA-UHPC.



En este capítulo se presentan tres elementos estructurales prefabricados de contención diseñados en UHPFRC. El primero es el muro en L empleado por el JPS para el ya mencionado proyecto de protección del río en Perak, Malasia.

Los otros dos componentes han sido desarrollados en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), en el entorno del Profesor Serna Ros, especialista en el estudio de hormigones especiales. Se trata de un muro de contención compuesto viga-placa, y un diseño de tablestaca con configuración en omega.

Muro en L



Lámina 03 (pág. siguiente):
Muro de contención en L
de UHPFRC, comparativa
con muro de hormigón
armado convencional.

Este componente fue desarrollado por Dura Technology Sdn Bhd, en Malasia. Yen Lei Voo y su equipo diseñaron un muro de contención en voladizo, prefabricado en DURA-UHPC, que destaca por su extraordinaria ligereza. Este elemento ha sido utilizado en distintos proyectos de ingeniería civil y actualmente está en el mercado de soluciones estructurales de contención en el sureste asiático.

El componente tiene sección transversal en L, con una altura de 2,5 m y un ancho de 2 m. La L está formada por dos delgados paneles integrados, uno es la pared vertical, de 30 mm de espesor y el otro es la base del muro, de 40 mm de espesor. Tanto la pared como la base están reforzadas por costillas continuas de 100 mm de espesor, en estos contrafuertes encontramos el único armado tradicional del componente. El muro cuenta con 6 orificios drenantes de 75 mm de diámetro en su pared, para evitar la presión del agua de lluvia acumulada en el terreno.

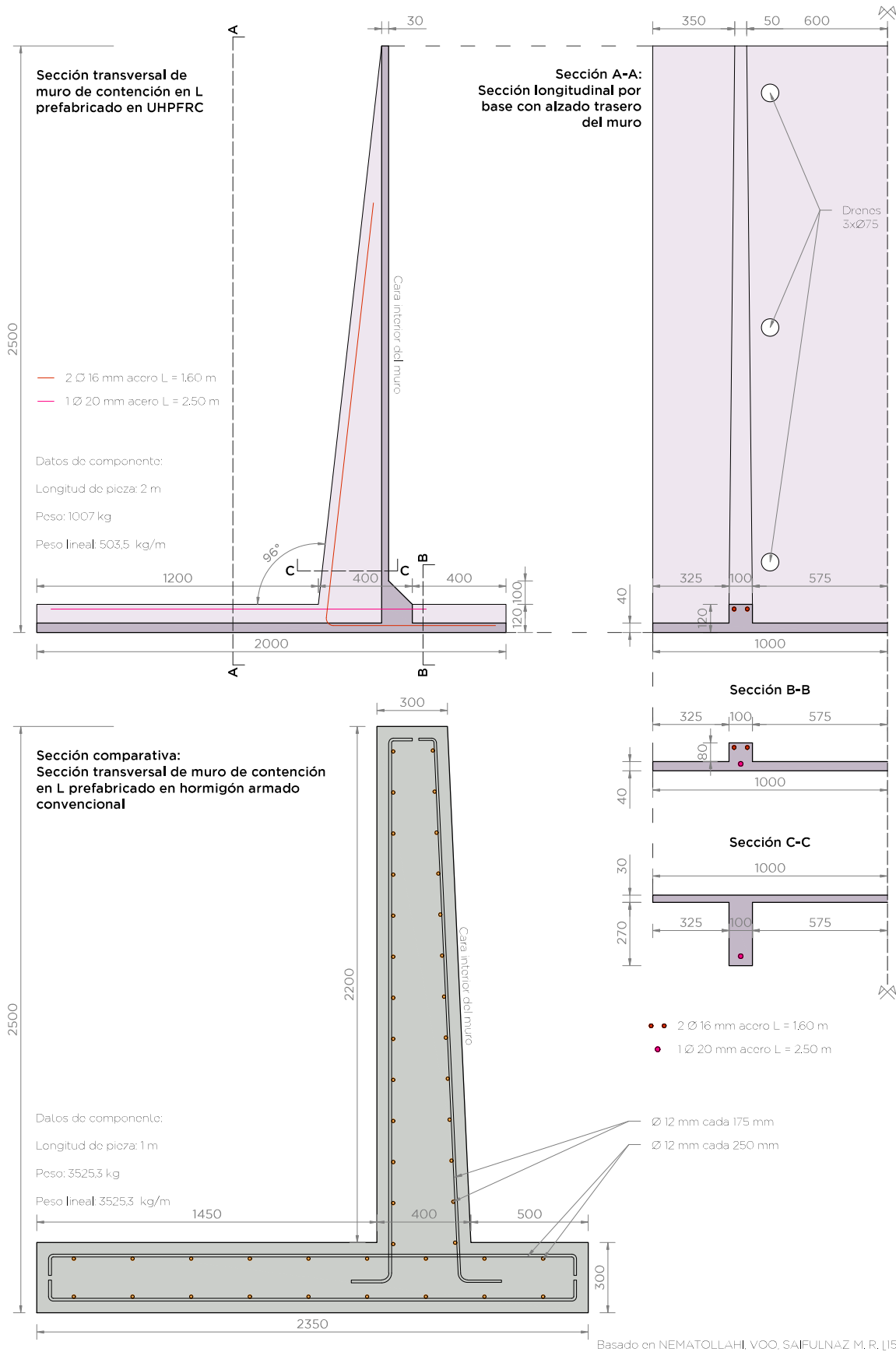
Se realizaron estudios [15][16] para justificar estructuralmente el diseño ultraligero del muro. También se diseñó paralelamente un muro de contención prefabricado con hormigón armado convencional, de la misma altura y con los mismos requerimientos estructurales. En este caso el ancho de la sección es de 2,35 m.

El resultado comparativo desvela que la solución en UHPFRC es 7 veces más ligera que en hormigón convencional (503,5 kg/m frente a 3525,3 kg/m). El bajo peso del componente permite que la profundidad de la pieza sea de 2 m, mientras que, en el muro prefabricado con hormigón tradicional, esta se reduce a un metro por la dificultad en el manejo del elemento. Los muros de contención en UHPFRC son tan ligeros y resistentes que pueden apilarse uno encima del otro.

También destaca comparativamente la simplificación del armado de la pieza, gracias a la presencia de fibras en el material, que se reduce a dos redondos de 16 mm de diámetro y 1,6 m de longitud y un redondo de 20 mm de diámetro y 2,5 m de longitud por contrafuerte de muro (dos por pieza).

Además, se demuestra la sostenibilidad de este elemento frente a una estructura de contención en hormigón tradicional, mediante datos de emisiones de CO₂, consumición de materiales no renovables, mantenimiento de la estructura, etc.

Por último, se documenta en estos trabajos el proceso de fabricación de las piezas, así como las distintas pruebas estructurales aplicadas al componente para certificar sus capacidades de contención.



Muro compuesto



Lámina 04 (pág. siguiente):
Muro de contención
compuesto de UHPFRC,
comparativa con muro
de hormigón armado
convencional.

Este diseño procede de la Universidad Politécnica de Valencia [17] [18], donde se ha trabajado en propuestas estructurales para extender el uso del UHPFRC a aplicaciones de obra civil, edificación e incluso del entorno urbano.

El sistema consiste en una nueva solución para muro de contención basado en dos tipos de elementos prefabricados en UHPFRC. El primero es una viga vertical prefabricada pretensada, con una sección hueca y sujeta al terreno con anclajes. El muro se completa con el segundo elemento, que consiste en una delgada placa curva situada entre las vigas.

La viga primaria tiene un canto de 30 cm e incluye un total de 6 rondos de 15,2 mm de diámetro pretensados. La viga es aligerada gracias a un hueco tubular de 20 cm de diámetro, excepto en el extremo de anclaje. La placa curva tiene 3 cm de espesor, y su curvatura tiene una relación canto/luz de 1/7. La delgada placa trabaja a flexo-compresión, conteniendo el terreno y biapoyándose en las vigas verticales pretensadas, que recogen todos los empujes y soportan la estructura, ancladas al terreno (Fig. 2.10.).

La solución aprovecha la capacidad a compresión y la ductilidad del UHPFRC. El diseño reduce aproximadamente en 4 veces el volumen total de hormigón empleado respecto a una solución convencional, teniendo la misma capacidad estructural y mejorando la durabilidad. Esto implica una reducción en el consumo del material, y mayor facilidad en los procesos de transporte y montaje. Además, al tratarse de una solución industrializada, es posible la sustitución rápida de piezas dañadas o componentes defectuosos.

Los componentes fueron fabricados a escala real y testados exitosamente en la UPV (Fig. 2.11. y 2.12.), verificando los métodos de diseño empleados para concebir estos elementos en hormigón de ultra-altas prestaciones reforzado con fibras.

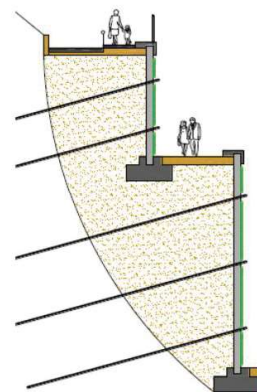


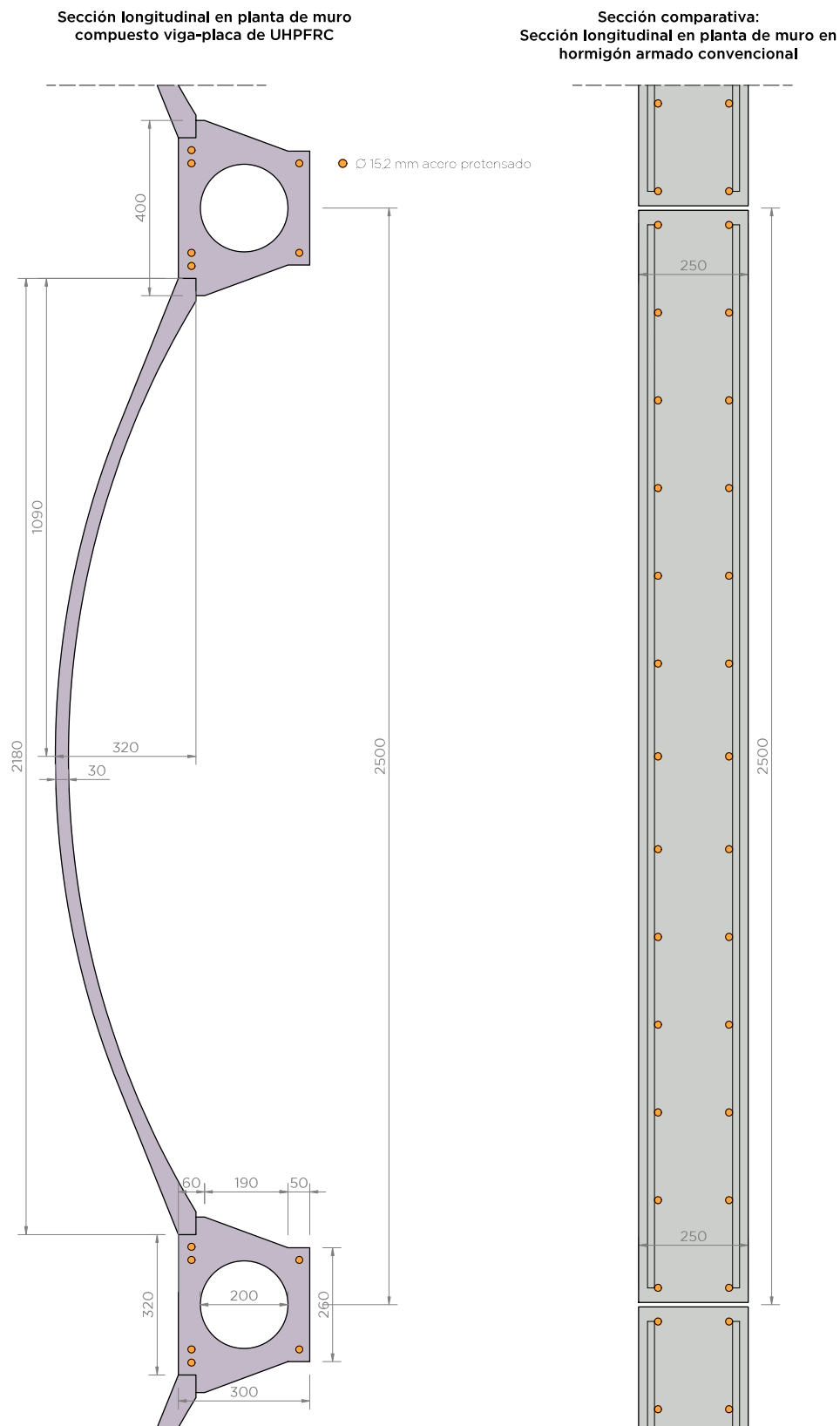
Fig. 2.10. Esquema del sistema de contención compuesto viga-placa en UHPFRC, sección general.



Fig. 2.11. (Izq.) Hormigonado con UHPFRC de viga pretensada de muro de 3 metros de longitud.



Fig. 2.12. (Der.) Test de compresión de 4 puntos aplicado a la placa curva de 3 cm de espesor de UHPFRC.



Basado en SERNA ROS, CAMACHO TORREGROSA, [17][18].

Lámina

04.

Muro compuesto

Elementos estructurales prefabricados en UHPFRC. Contenciones.

Esc. 1:15

Medidas en mm.

Tablestaca



Lámina 05 (pág. siguiente):
Tablestaca omega en UHPFRC, comparativa con tablestaca en acero y tablestaca en hormigón armado pretensado.

Encontramos distintos estudios sobre el desarrollo de tablestacas en hormigón de ultra-altas prestaciones reforzado con fibras. En este caso presentamos el componente diseñado, fabricado y testado en la UPV. Así introducían la alternativa del UHPFRC en esta tipología estructural [19]:

Las tablestacas de acero han copado la práctica totalidad del mercado de tablestacas recuperables dada su elevada esbeltez, reducido peso, excelentes propiedades resistentes y su posible extracción mediante métodos de vibrado. Sin embargo, la durabilidad de las tablestacas de acero definitivas se ve muy penalizada en ambientes agresivos, especialmente en obras portuarias o de ferrocarril interurbano, en las que el acceso para un correcto mantenimiento queda comprometido.

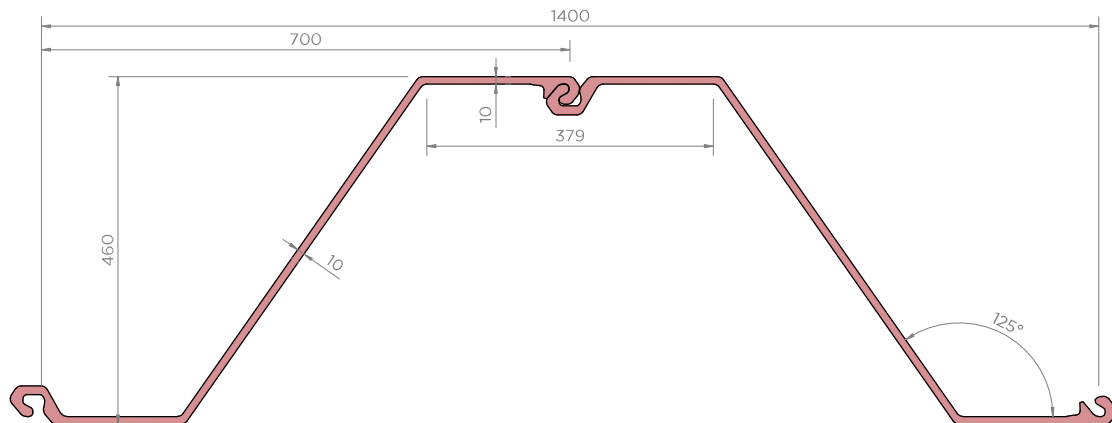
El UHPFRC aparece como una alternativa viable a este tipo de elementos, especialmente para la fabricación de muros hincados de carácter definitivo. Su elevada durabilidad y resistencia a compresión, junto con la combinación de pretensado, fibras metálicas y ausencia de armadura secundaria, permiten crear tablestacas de gran esbeltez con un peso comparable a las de acero a un precio competitivo.

El objetivo era desarrollar una solución competitiva en el mercado de las tablestacas permanentes, en el que predominan los componentes en hormigón armado por la pobre durabilidad de las soluciones en acero. Las tablestacas en UHPFRC tienen la ligereza del componente en acero, y una durabilidad muy superior a la de las tablestacas en hormigón armado convencional. Además, su resistencia permite un mayor nivel de pretensado y asegura el proceso de hincado.

La sección de la tablestaca en UHPFRC, con configuración en omega, tiene un espesor de tan solo 6 cm. Este espesor basta para recubrir los cordones pretensados, por criterios de durabilidad y transmisión de esfuerzos, y supone un peso del elemento muy próximo al de su homólogo en acero. La pieza está armada con 12 cordones pretensados de acero 0.6' Y-1860-S7, dispuestos simétricamente en ambos ejes respecto al centro de gravedad. Se fabricaron piezas de 6 m de longitud para los tests.

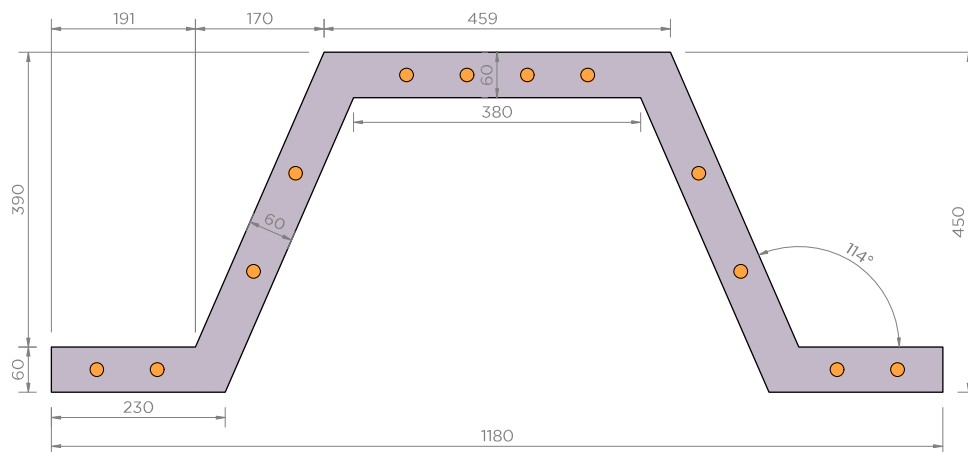
El sistema de fabricación del prototipo consiste en un molde base en el que se tesan los cordones y se vierte el UHPFRC. Después se coloca un contramolde que, aprovechando la autocompactabilidad del material, eleva la cota de la mezcla fresca y consigue la forma de la sección final de la pieza. Resulta un proceso simple e idóneo para la producción industrializada.

Sección comparativa 1:
Sección transversal de tablestaca de acero AZ 24-700
AcerlorMittal Sheet Piling

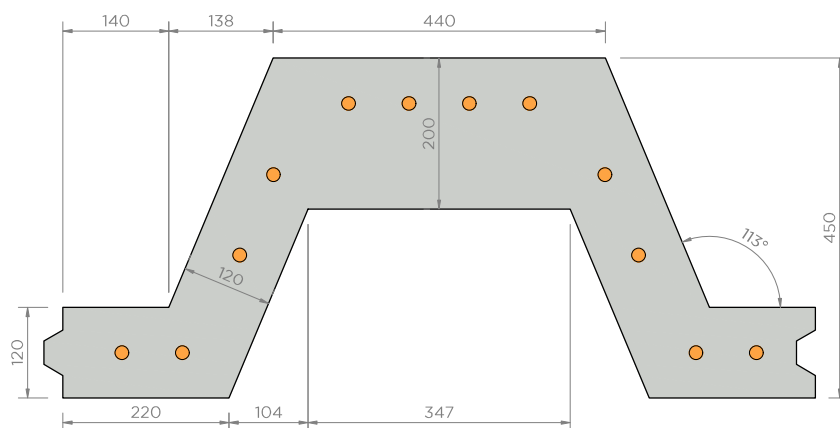


Sección transversal de tablestaca omega en UHPFRC

● Ø 15,2 mm acero pretensado 0,6' Y-1860-S7



Sección comparativa 2:
Sección transversal de tablestaca W-450 JHS System
de hormigón armado pretensado



Basado en COLL, LÓPEZ, GALÁN, SERNA ROS [19].

2.3. Soportes



Los miembros estructurales a compresión son fuertes candidatos para la aplicación del UHPFRC. Este material tiene una resistencia a compresión de entre 150 y 250 MPa, es decir, 4 o 5 veces la capacidad a compresión de un hormigón armado convencional. Esto supone la posibilidad de una reducción contundente del área de sección en este tipo de componentes.

A pesar de sus ventajas estructurales, no se encuentran muchos ejemplos de elementos de soporte fabricados en UHPFRC para su empleo en obra civil o edificación. Probablemente, esta ausencia de casos se deba a la falta de investigación en el comportamiento a pandeo del material, siendo este fenómeno el principal y más relevante a la hora de diseñar componentes a compresión con hormigón de ultra-altas prestaciones [20]. Los estudios en torno al pandeo en este material son muy reducidos en comparación con la literatura encontrada al respecto de su comportamiento a flexión.

La aplicación en tipología de soporte más reproducida del UHPFRC en este momento, es el refuerzo de pilares preexistentes de hormigón armado convencional mediante un encamisado perimetral de UHPFRC de cierto espesor. Este sistema, conocido como «retrofitting», se produce habitualmente mediante el vertido o proyectado del hormigón de refuerzo in-situ, pero en el caso del hormigón de ultra-altas prestaciones reforzado con fibras, puede plantearse como un encamisado prefabricado en taller e instalado finalmente en la estructura a reforzar, industrializando el proceso constructivo. Este es el caso del innovador sistema ExoLeaf de Freyssinet UK [21], con el que se consigue una solución de refuerzo ligera y con un acabado estético superior (Fig. 2.13. y 2.14.).



Fig. 2.13. (Izq.) Mitades separadas de encamisado de refuerzo ExoLeaf Freyssinet en UHPFRC.



Fig. 2.14. (Der.) Mitades encajadas de encamisado de refuerzo ExoLeaf Freyssinet en UHPFRC.

En relación con esta configuración de UHPFRC como refuerzo perimetral en sección, existen estudios [22] que contemplan y defienden el diseño de soportes híbridos con hormigón convencional en el núcleo del componente y un recubrimiento de cierto espesor de hormigón de ultra-altas prestaciones reforzado con fibras. Esta estrategia de diseño combinando los dos tipos de hormigón aumenta considerablemente la resistencia del soporte, gracias al confinamiento que produce el UHPFRC, y es mucho más económica que la opción de soporte fabricado exclusivamente en hormigón de ultra-altas prestaciones.

Fig. 2.15. Fotografía del MuCEM, en Marsella, del arquitecto Rudy Ricciotti, en el que se emplean columnas arboladas de UHPFRC para soportar la fachada del edificio.



Respecto a los elementos de soporte prefabricados completamente en UHPFRC, en Francia encontramos algunos ejemplos de grandes proyectos infraestructurales y culturales en los que se emplea este material para sostener la estructura dando rienda suelta a la expresividad que permite su fabricación en taller y su acabado de calidad (Fig. 2.15.).

A continuación, se presentan dos componentes soporte en UHPFRC: soporte octogonal hueco y pilar en I.

Soporte octogonal hueco



Este componente de soporte es extraído de un proyecto de torre mirador ideado para Mason Lampton [23], presidente de SCP, ingeniería establecida en Columbus, Georgia, EE. UU., especializada en soluciones estructurales con hormigón pretensado y prefabricado. En SCP han realizado una gran inversión para el desarrollo de soluciones en UHPC, ofreciendo productos en este material e incluso habiendo desarrollado una mezcla propia de UHPC con materiales locales.

Mason Lampton, gran entusiasta de las carreras de caballos y convencido de la valía del hormigón de ultra-altas prestaciones reforzado con fibras, propone una torre diseñada con elementos prefabricados en UHPC para observar este espectáculo. Estos elementos son el soporte central, y las losas, segmentos de 1/8 de disco que componen las plataformas de observación. Cubierta, barandillas y escaleras son los únicos elementos no propuestos en UHPC (Fig. 2.16.).

El elemento soporte consiste en una columna octogonal hueca de, aproximadamente, 10 m de altura. La sección tiene 90 cm de ancho, diámetro circunscrito del octógono, y 70 cm de diámetro en el hueco circular interior, quedando un espesor mínimo de 10 cm. El elemento se arma a flexión ubicando un total de 16 cordones de acero de diámetro 20 mm.

La alta resistencia a compresión del UHPFRC permite reducir ampliamente la sección del soporte. Las fuerzas horizontales de viento, y asimetrías en cargas verticales, exigen cierto ancho del elemento para afrontar esfuerzos de flexión. Estos factores se traducen en una sección tubular, que además elimina las posibilidades de pandeo del soporte. Los cordones de armado pueden alojarse en el estrecho espesor de las paredes por que este material no exige recubrimientos mayores. Las fibras de acero hacen innecesario el armado de estribos por cortante.

La solución en UHPFRC reduce el peso del elemento en aproximadamente el 60% respecto a un soporte prefabricado de estas condiciones en hormigón armado convencional, facilitando considerablemente los procesos de transporte y montaje. Además, el acabado en UHPFRC es de mayor calidad, y con una durabilidad ampliamente superior para unas condiciones de intemperie como a las que se sometería este proyecto en concreto.

Lámina 06 (pág. siguiente):
Soporte octogonal hueco en UHPFRC, comparativa con soporte octogonal hueco en hormigón armado pretensado.

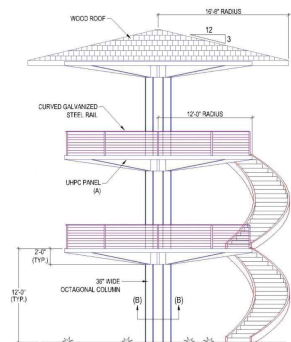
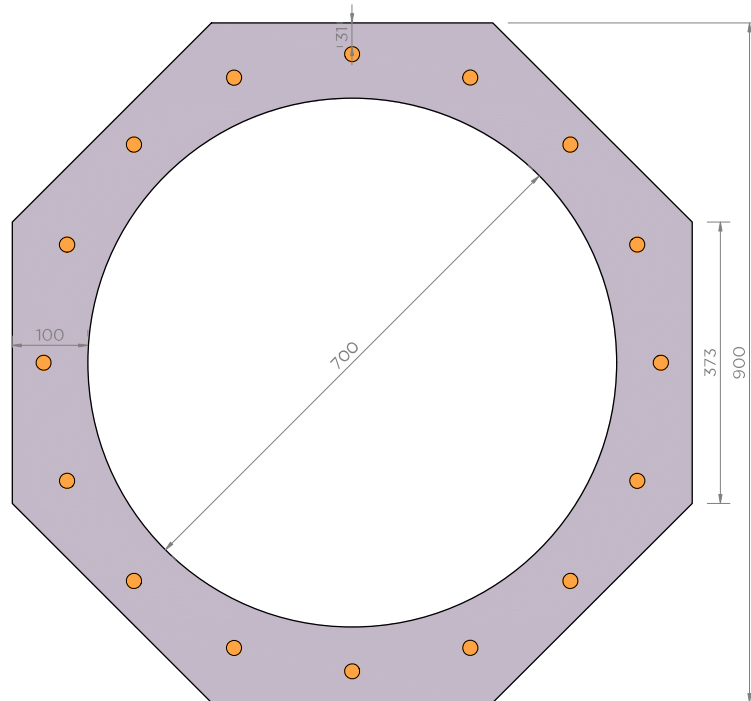


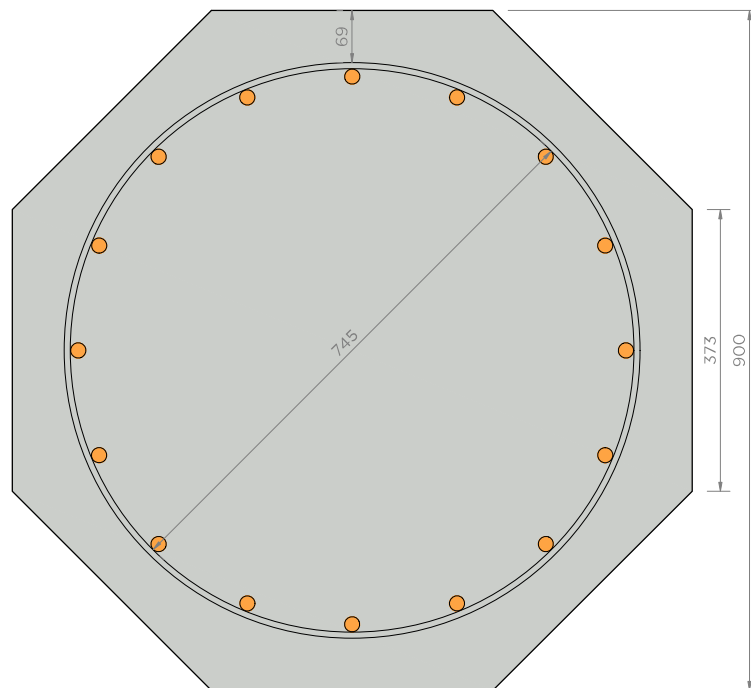
Fig. 2.16. Alzado de torre mirador proyectada con estructura prefabricada en UHPFRC.

Sección transversal de soporte octogonal hueco en UHPFRC

● Ø 20 mm acero pretensado

**Sección comparativa:
Sección transversal de soporte octogonal en hormigón armado convencional**

● Ø 20 mm acero pretensado



Basado en TADROS, SEVENKER, BERRY [23].

Lámina

06.**Soporte octogonal hueco**

Elementos estructurales prefabricados en UHPFRC. Soportes.

Esc. 1:10

Medidas en mm.

Pilar en I



Lámina 07 (pág. siguiente):
Pilar en I prefabricado
en UHPFRC.

Este elemento de soporte fue empleado en la primera nave con pórticos contruidos en UHPFRC del mundo: el Wilson Hall, Chemor, Perak, Malasia, 2008 [13].

El Wilson Hall fue diseñado por el ya mencionado Yen Lei Voo y su equipo, con su marca comercial de UHPFRC, Dura Technology Sdn Bhd. La estructura del edificio consiste en 4 pórticos, con una longitud total de 67 m, espaciados 12 m entre ellos. Cada pórtico está formado por piezas prefabricadas/pretensadas en UHPFRC: 2 pilares, 4 vigas y 3 piezas conectoras, 2 viga-pilar-viga y una en cumbrera viga-viga. Las conexiones se realizaron con barras de acero y atornilladas, permitiendo una unión monolítica de todos los elementos. La construcción se completó en tan solo 6 días. La nave, construida para uso industrial de Dura Technology Sdn Bhd, cubre una superficie total de 2860 m².

Se construyó como experimento alternativo a los pórticos convencionales en acero con vigas/columnas en I, buscando una solución más sostenible y tecnológicamente avanzada. Los resultados del EIC (Environmental Impact Calculation), comparativo entre pórtico en DURA-UHPC y pórtico en acero convencional, demuestran que esta innovadora solución ahorra material, es económica, especialmente si se trata de un entorno industrial con agentes químicos o corrosivos, y más respetuosa con el medio ambiente en medidores de emisiones de CO₂ y GWP (Global Warming Potencial).

Los pilares del pórtico en UHPFRC, igual que las vigas, son de sección en I, asemejándose más a elementos en acero, y tienen una longitud total de 8,60 m. Respecto a la sección de la pieza, el canto total es de 65 cm y la base de 55 cm, el alma tiene un espesor de 5 cm y las alas tienen un espesor que va desde los 5 cm en los extremos hasta los 8 en la parte central. Cada ala cuenta con un armado pretensado de 4 cordones de diámetro 20 mm. No es necesario el armado a cortante.

Los extremos del pilar están macizados, 30 cm hasta sección en I, para facilitar las conexiones atornilladas entre elementos. En las caras extremas rectangulares, de dimensiones 65 x 55 cm, se predisponen 10 orificios para introducir las armaduras de las piezas conectoras y que así las uniones sean monolíticas.



Fig. 2.17. Elevación y colocación del primer pilar de pórtico en la construcción del Wilson Hall.

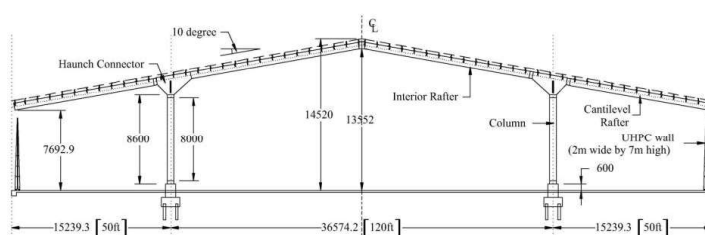
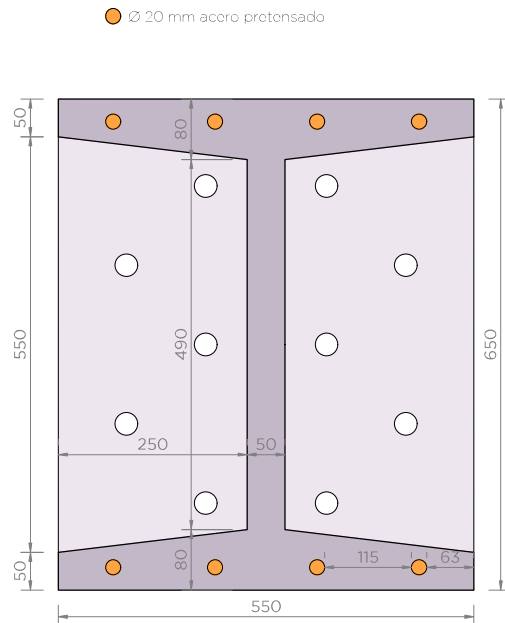
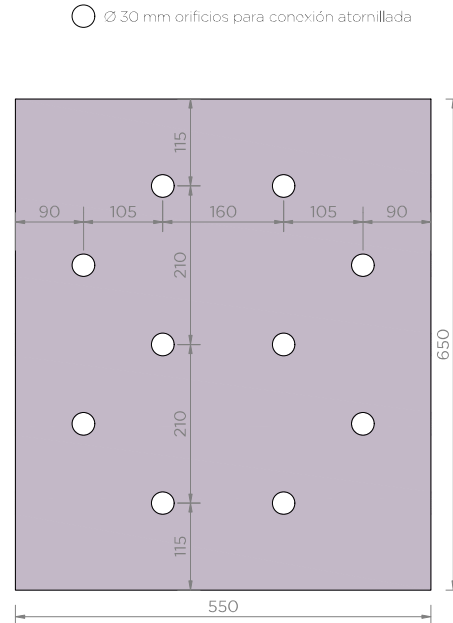


Fig. 2.18. Alzado lateral de pórtico diseñado con elementos prefabricados en UHPFRC para el Wilson Hall.

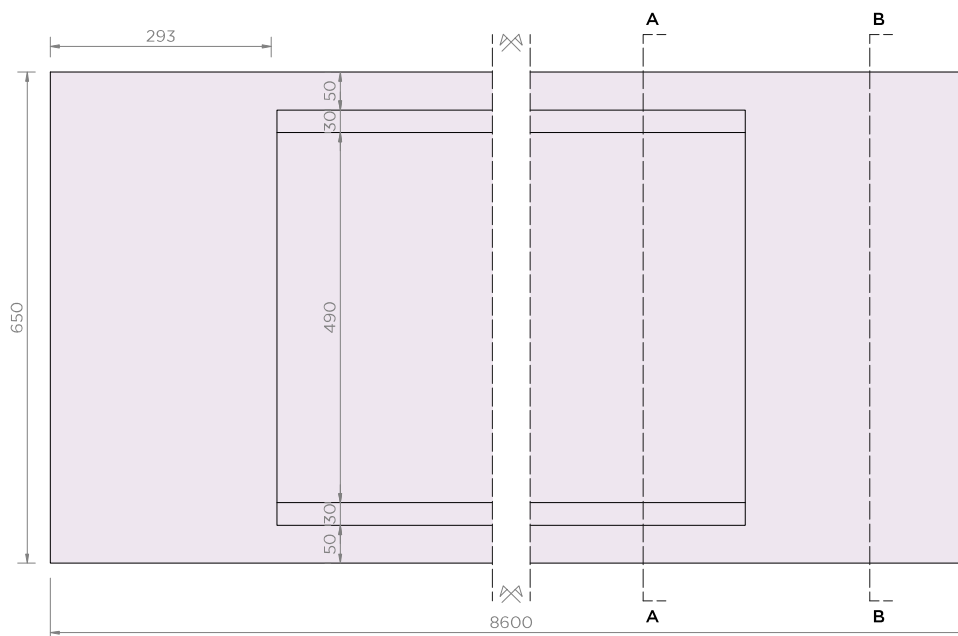
Sección A-A:
Sección transversal por cuerpo de pilar I 55x65
de UHPFRC pretensado



Sección B-B:
Sección transversal por extremo macizado de
pilar I 55x65 de UHPFRC pretensado



Alzado lateral de pilar I 55x65 en UHPFRC pretensado



Basado en VOO, FOSTER [13].

Lámina

07.

Pilar en I

Elementos estructurales prefabricados en UHPFRC. Soportes.

Esc. 1:10

Medidas en mm.

2.4. Vigas



En esta tipología estructural, el UHPFRC ha encontrado su campo de desarrollo más extenso, concretamente en el ámbito de las vigas pretensadas. El pretensado de los elementos explota al máximo las capacidades del material, ya que un pretensado potente exige de una resistencia a compresión equivalente, por ello, en elementos prefabricados en hormigón de ultra-altas prestaciones, el nivel de pretensado que se puede alcanzar es muy superior al de sus homólogos en hormigón tradicional. Además, la presencia de fibras en la mezcla aporta ductilidad al elemento y resistencia suficiente a fenómenos como el cortante, evitando armados pasivos en el diseño de las vigas. En definitiva, las vigas en UHPFRC son más sencillas en su diseño de armado, más ligeras y esbeltas para cubrir la misma luz que un elemento en hormigón armado convencional.

El primer empleo a gran escala de vigas prefabricadas pretensadas en UHPFRC (Ductal) se produjo en el este de Francia, a mediados de los años 90, y el motivo principal de la elección de este material no fueron las ventajas estructurales comentadas en el párrafo precedente, sino sus virtudes en durabilidad, ya que este proyecto consistía en la renovación de la zona de intercambio de calor en una torre de refrigeración en la planta de energía nuclear de Cattenom. EDF (Electricité de France) apostó por el hormigón de ultra-altas prestaciones reforzado con fibras, y se fabricaron alrededor de 2600 vigas pretensadas en este material (Fig. 2.19.). Con el paso del tiempo se ha demostrado que la solución en UHPFRC es idónea, por su ligereza y ahorro en cimentaciones por peso propio, pero sobre todo por su resistencia a los agentes agresivos de la planta [24]. Este fue un proyecto pionero como aplicación industrializada a gran escala del UHPFRC, y sirvió como prueba de campo para numerosos estudios e investigaciones sobre el material.



Fig. 2.19. Instalación y sección de viga prefabricada y pretensada en UHPFRC para proyecto de renovación en la planta de energía nuclear de Cattenom, Francia, 1997.

Fig. 2.20. Construcción industrializada de cubierta de fábrica empleando vigas pretensadas en UHPFRC, Wuhan, China, 2017.



Encontramos ejemplos de estructuras de edificación con vigas totalmente fabricadas en UHPFRC. Es el caso de algunos edificios industriales en China, que emplean vigas pretensadas de canto variable para la cubrición de sus espacios, salvando más de 20 metros de luz (Fig. 2.20.). Estas vigas optimizadas acaban adquiriendo unas proporciones propias de un elemento en acero, incluso muestran similitudes en ciertos comportamientos estructurales, como el de pandeo en el ala superior de componente.

Sin embargo, donde especialmente se emplean este tipo de componentes es en la construcción de puentes. Estas grandes infraestructuras necesitan salvar largas distancias sin apoyos intermedios y con una importante carga permanente de peso propio y variable de transporte. Encontramos en Malasia cientos de ejemplos construidas con grandes elementos viga prefabricados en UHPFRC. En esta tipología suele entrar en juego otra técnica, incluida dentro del concepto de pretensado, capaz de exprimir las capacidades resistentes del UHPFRC: el postensado (Fig. 2.21.). Funciona dejando embebidas vainas de diversos tipos para, después de vertido y fraguado el hormigón, tesar cables en su interior y así someter a un esfuerzo de compresión al elemento viga, de modo que cuando la pieza comienza a trabajar a flexión, las tracciones que aparecen se traducen en una pérdida de la compresión previa.

Fig. 2.21. Postensado in-situ de un puente-viga en U de UHPFRC en Malasia.



Viga en X



Lámina 08 (pág. siguiente):
Viga en X de UHPFRC,
comparativa con perfil
HP en acero, viga de
hormigón pretensado y
viga de hormigón armado.

Esta es una de las diversas configuraciones de sección que pueden adoptar las vigas en UHPFRC. Se trata de una forma en X, o forma en I en la que el alma está definida por arcos de circunferencia. Esta sección permite el alojamiento de un mayor número de cordones pretensados si fuera necesario en comparación con una sección en I convencional. Además, evita las tensiones producidas en los puntos de encuentro entre alas y alma al tener una transición gradual curva [11]. Sobresale su estética elegante como elemento constructivo.

Respecto a la fabricación de la viga, se trata de una forma compleja, y supone la utilización de encofrados curvos, encareciendo el proceso productivo (Fig. 2.22.). El punto positivo en este asunto es que la forma en X de la sección facilita el escape y ascenso de las burbujas de aire formadas en el ala inferior de la viga durante la fabricación de esta.

En este caso, el componente, fabricado en UHPFRC-Ductal, se compara con otras 3 secciones en distintos materiales: acero, hormigón pretensado y hormigón armado. Los 4 elementos tienen la misma capacidad para resistir momento flector. La viga en X necesita casi la mitad de canto que las secciones en hormigón armado y pretensado, lo que se traduce en una reducción del peso del elemento en más de un 70%. También destaca la simplificación del diseño de armado del componente, prescindiendo de estribos y redondos en el ala superior.

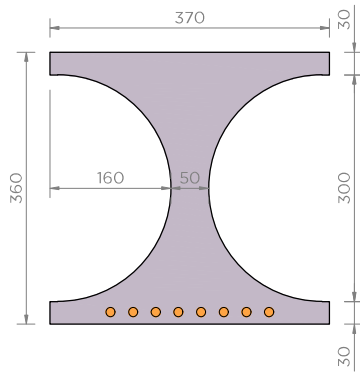
Respecto al perfil en acero, se trata de un HP 14x75 (perfil americano, 14 pulgadas de altura, 36 cm, y 75 libras por metro lineal, 110 kg/m), con la misma altura que el componente en UHPFRC, siendo este último ligeramente más pesado. En ciertas soluciones estructurales optimizadas, los elementos en UHPFRC podrían llegar a ser incluso más ligeros que sus homólogos en acero.



Fig. 2.22. Vertido de UHPFRC en encofrado metálico curvo para producción de viga tipo X.

**Sección transversal de viga X
36x37 UHPFRC pretensado**

● Ø 12 mm acero pretensado

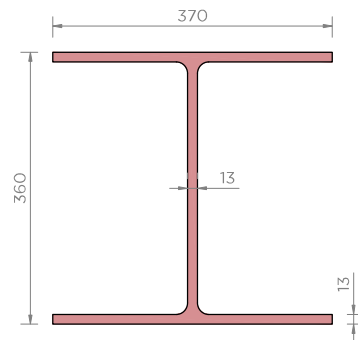


Datos de sección:

Altura: 360 mm

Peso: 141 kg/m

**Sección comparativa 1
(resistencias equivalentes):
Sección transversal de HP
14x75 (36x110) de acero**

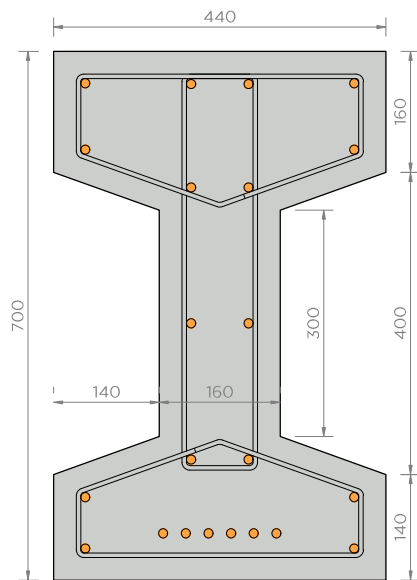


Datos de sección:

Altura: 360 mm

Peso: 110 kg/m

**Sección comparativa 2
(resistencias equivalentes):
Sección transversal de viga pretensada
70x44 de hormigón armado convencional**

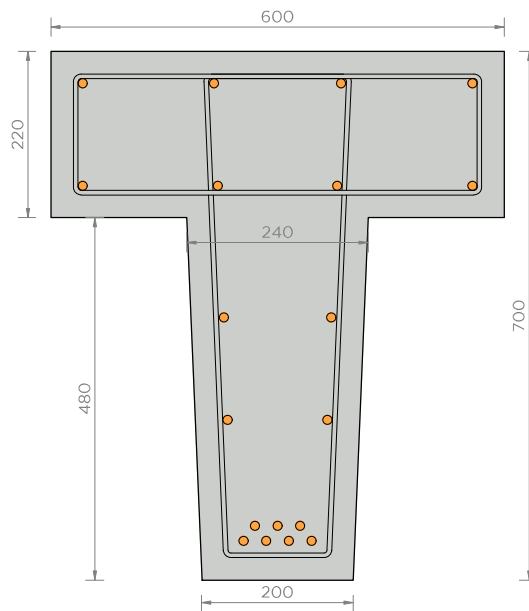


Datos de sección:

Altura: 700 mm

Peso: 466 kg/m

**Sección comparativa 3
(resistencias equivalentes):
Sección transversal de viga 70x60 de
hormigón armado convencional**



Datos de sección:

Altura: 700 mm

Peso: 528 kg/m

Basado en VANDE VOORT [11].

Viga en T invertida hueca



Lámina 09 (pág. siguiente):
Viga en T invertida
hueca en UHPFRC,
comparativa con jácena en
T invertida en hormigón
armado pretensado.

Este diseño se extrae del proyecto llevado a cabo por el PCI, en EE. UU.: Implementación del UHPC en elementos prefabricados pretensados de gran longitud para edificios de hormigón y puentes [5].

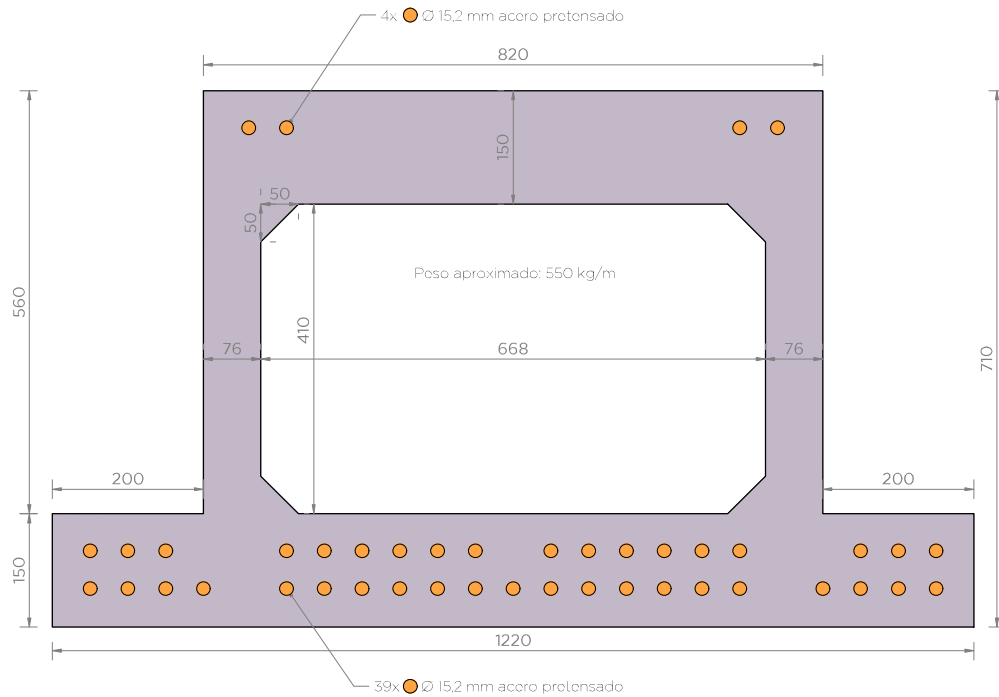
Surge como una optimización de las jácenas en T invertida en las que apoyan las losas doble T, de uso extendidísimo en EE. UU., especialmente para estructuras de aparcamiento. Estas vigas, en T invertida o L, soportan cargas muy pesadas cubriendo una luz relativamente corta. La optimización se plantea en varios actos. Primero una reducción de la altura de las ménsulas, actualmente de alrededor de 30 cm, hasta los 10 - 15 cm, eliminando por lo menos la mitad de material necesario. Segundo, gracias a la resistencia superior del UHPFRC, hacer hueco el elemento, pudiendo aumentar las almas de espesor a medida que la jácena se acerca a los apoyos, para afrontar esfuerzos de cortante y torsión. Por último, aprovechar la resistencia a tracción de las fibras del material para eliminar estribos de refuerzo de torsión y cortante. Estos actos economizan la solución en UHPFRC por la reducción del volumen necesario de material y la simplificación en armado del componente.

El diseño está capacitado para cubrir una luz de 18 m, a lo largo de la cual apoyarán losas doble T de luz 18 m igualmente. La sección dibujada corresponde a mitad de luz, donde el espesor de las almas es de 7,6 cm. Este espesor aumenta hasta 12,7 cm en los extremos del componente simplemente apoyado, o hasta 20,3 cm si la viga tiene continuidad con la siguiente a través del pilar. El cambio en espesores se consigue con un molde de EPS (poliestireno expandido), que varía en su forma, asegurado dentro del molde por espaciadores no convencionales, diseñados específicamente para la producción con UHPFRC. Se ubican 39 cordones de 15,2 mm de diámetro de acero pretensado en la cara inferior (los cordones se omiten justo bajo las almas para facilitar el reparto del UHPC vertido en voladizos) y 4 cordones similares en la parte superior para soportar el potente pretensado inferior antes de entrar en carga.

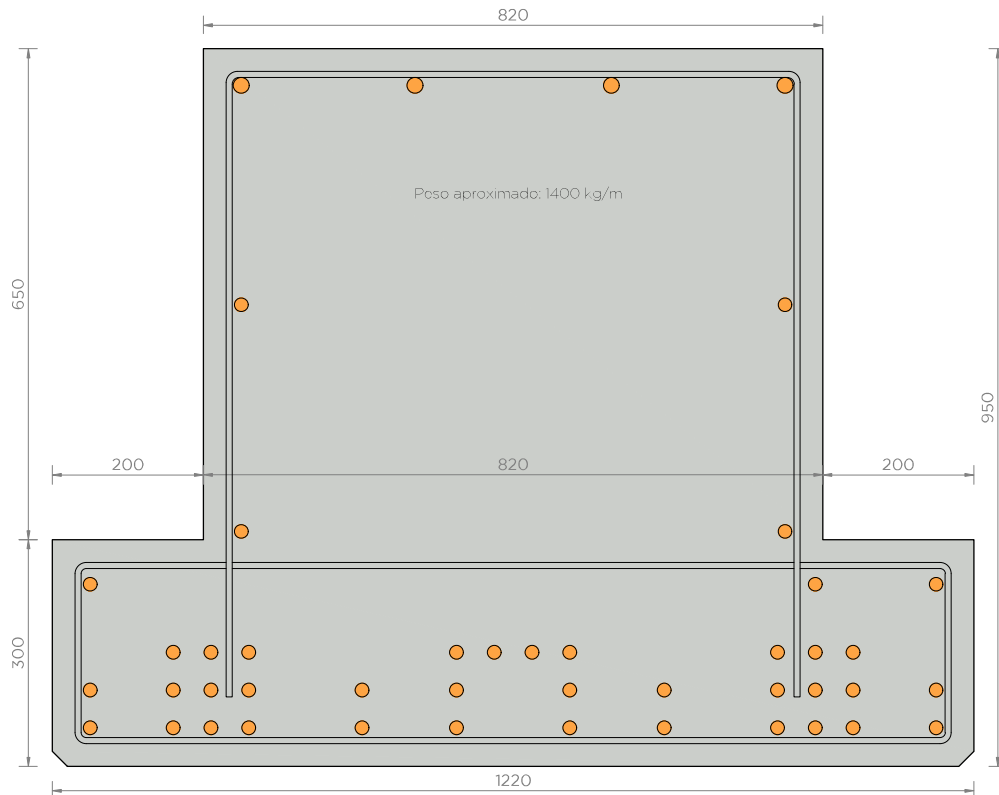
La sección comparativa es de una jácena en hormigón armado pretensado con las mismas capacidades estructurales. La sección es completamente sólida, las dimensiones en ancho son similares, pero tanto la altura de la ménsula como de la pieza en general son necesariamente mayores que las de la solución en UHPFRC, lo que supone que esta última es un 65% más ligera.

Para el diseño del componente en UHPFRC se realizaron pruebas de comportamiento a torsión de la pieza, teniendo en cuenta fases constructivas asimétricas (apoyo de losas en un único lado), así como comprobaciones de la resistencia de las ménsulas. El resultado es un componente muy rígido para su poca esbeltez.

Sección transversal a mitad de vano de viga
71x122 T invertida hueca en UHPFRC



Sección comparativa:
Sección transversal de viga 95x122 T invertida en hormigón armado pretensado



Basado en TADROS, LAWLER [5].

Lámina

09.

Viga en T invertida hueca

Elementos estructurales prefabricados en UHPFRC. Vigas.

Esc. 1:10

Medidas en mm.

Bandeja de cubierta



Lámina 10 (pág. siguiente):
Bandeja de cubierta en
UHPFRC, comparativa
con bandeja en hormigón
armado pretensado.

Fig. 2.23. Elementos
secundarios de cubierta
prefabricados en UHPFRC
para la planta de tratamiento
de aguas de Achères, Francia.

El UHPFRC también funciona en elementos constructivos industrializados de cubierta. Estos suelen ser delgadas estructuras superficiales pretensadas, con un comportamiento a flexión superior al de sus homólogos en hormigón armado convencional. Se benefician de la libertad formal del material producido en taller (Fig. 2.23.), y de la durabilidad sobresaliente frente a agentes externos, especialmente presentes en tipología de cubierta.

Aunque estos elementos no siempre pueden clasificarse como vigas, se presenta a continuación un componente longitudinal que funciona como soporte de las piezas superficiales de cubierta, y recoge las aguas pluviales en su bandeja central, más hundida, quedando una configuración aproximada en V. Este diseño de viga-bandeja surge de un estudio italiano [25] cuyo objetivo es explorar el desarrollo de distintos componentes prefabricados en hormigón reforzado con fibras de acero frente a un armado tradicional.

El elemento en UHPFRC destaca por su delgadez y elegancia formal. Las curvaturas, y la forma global de la sección, benefician el comportamiento estructural de la bandeja, consiguiendo grandes esbelteces para un elemento viga, con bastante superficie, capaz de cubrir una luz de hasta 12 metros con una altura total de 56 cm. Para soportar la exigencia a flexión, las alas de la V trabajan a compresión, mientras que los bulbos en la cara inferior alojan, cada uno, 6 cordones de acero pretensado de 12 mm de diámetro.

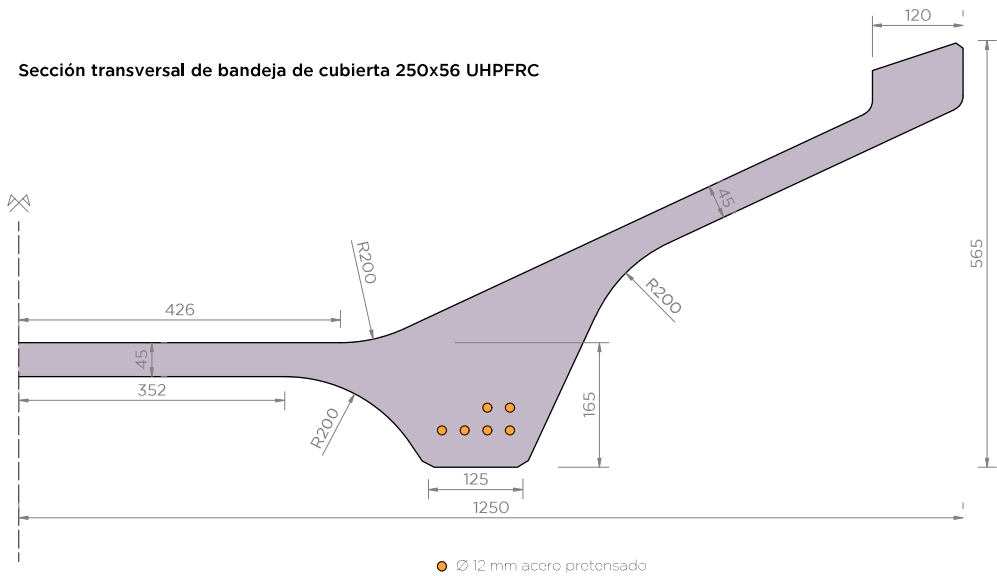
Se compara con un elemento de la misma tipología en hormigón armado pretensado. En esta comparación se observa el ahorro en colocación de armaduras, gracias al refuerzo con fibras de acero del hormigón de ultra-altas prestaciones. Se prescinde de los estribos por cortante, así como del armado a voladizo de las alas de la bandeja. Además, las fibras no necesitan de recubrimientos, por lo que se permiten secciones mucho más delgadas y ligeras, reduciendo el peso propio de la estructura de cubierta.

Para llegar hasta el diseño optimizado final, fueron necesarios múltiples ensayos y pruebas de laboratorio.

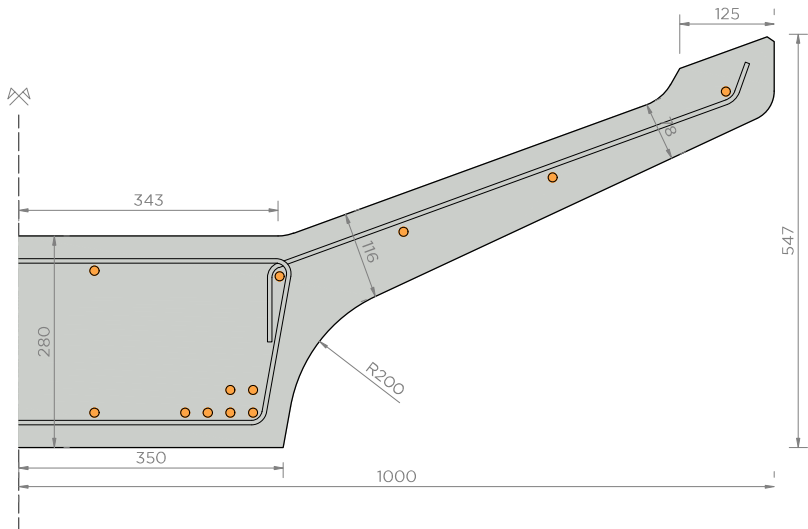
Sección general de cubierta con bandeja 250x56 UHPFRC
Esc. 1:50



Sección transversal de bandeja de cubierta 250x56 UHPFRC



Sección comparativa:
Sección transversal de bandeja de cubierta 200x55 en
hormigón armado pretensado



Basado en DI PRISCO [25].

Grada



Lámina 11 (pág. siguiente): Grada optimizada VSL en UHPFRC, comparativa con grada en L en hormigón armado pretensado.

Siguiendo los recurrentes intereses de sus clientes, la ingeniería VSL, concretamente su grupo en Australia, se aventuró con la optimización de estructuras de grada para estadios en hormigón de ultra-altas prestaciones reforzado con fibras [26]. Esta tipología sirve como base para la instalación de asientos en estadios, y se materializa habitualmente en elementos de hormigón armado convencional, cuyo diseño está dictado principalmente por el peso propio y los requerimientos de confort ante el vibrado de la estructura. En los estadios modernos industrializados, las gradas multinivel se configuran usualmente apoyadas directamente entre ellas para aprovechar al máximo el espacio, por ello el peso propio de los componentes es muy relevante en el diseño global del sistema y de la estructura portante.

Para la optimización experimental se escogió una luz típica de 13 m, en la que la grada estándar de hormigón armado tiene forma de L. La pieza en UHPFRC está diseñada para maximizar el confort ante vibración, minimizar el peso propio y garantizar una durabilidad superior, asegurando una larga vida útil con un mínimo coste de mantenimiento. La reducción en el peso propio, en más de la mitad respecto a la solución estándar, supone un ahorro directo en la estructura soporte, así como en el proceso constructivo: movimiento más rápido de grúas, elevado de piezas múltiples para una instalación más rápida y menos movimiento de camiones en obra. El ensamblado escalonado de las piezas es sencillo, apoyando el vuelo del asiento en el bulbo superior de la pieza inferior (Fig. 2.24.). Este bulbo superior, igual que el inferior, aloja 3 cordones de 12,7 mm de diámetro, pretensados 1100 MPa. En el extremo del voladizo horizontal, de espesor 3 cm, encontramos dos cordones de 6 mm de diámetro, pretensados 800 MPa. El espesor de la pared vertical de la pieza es de 4 cm.

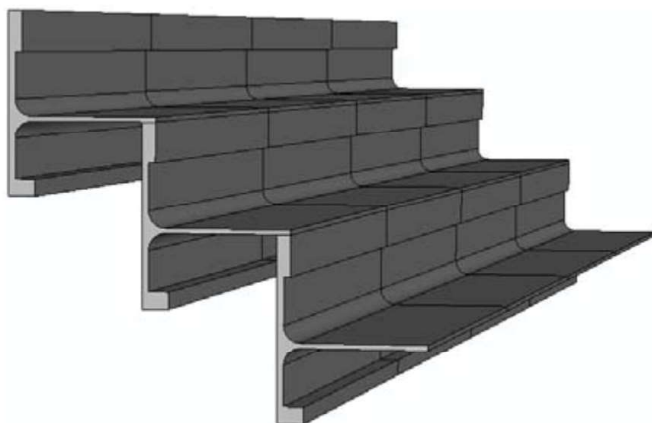


Fig. 2.24. Tres filas de grada VSL en UHPFRC ensambladas.

Sección transversal de grada optimizada VSL en UHPFRC

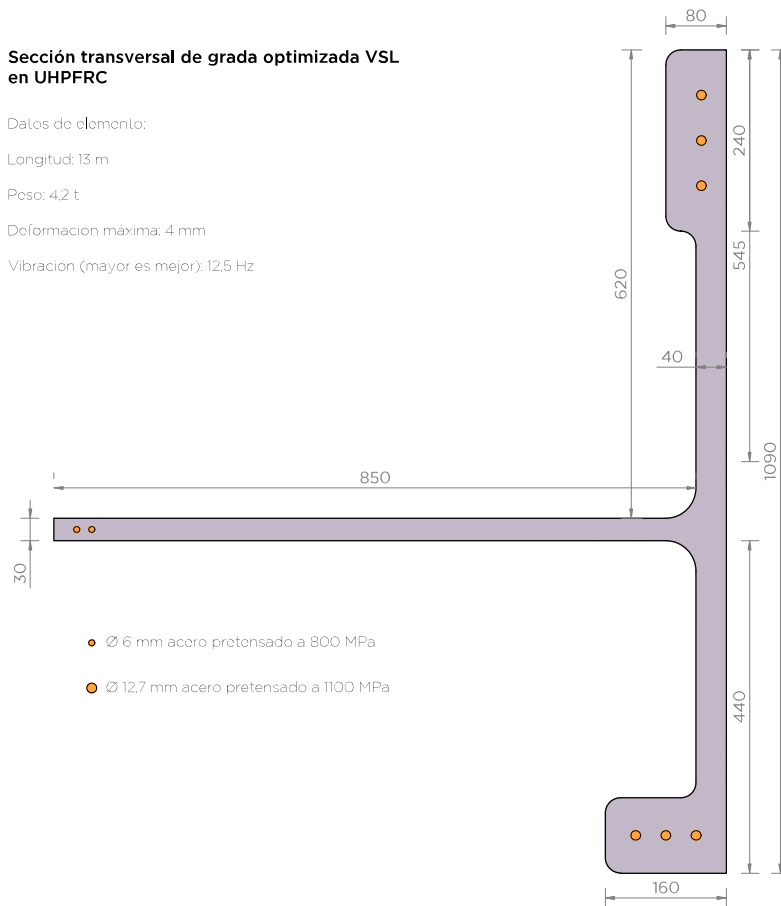
Datos de elemento:

Longitud: 13 m

Peso: 4,2 t

Deformación máxima: 4 mm

Vibración (mayor es mejor): 12,5 Hz



Sección comparativa: Sección transversal de grada en L en hormigón armado pretensado

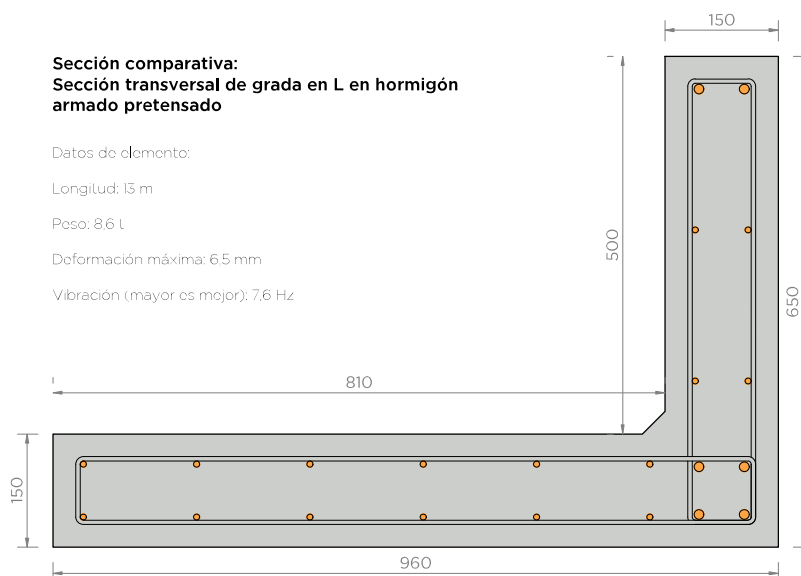
Datos de elemento:

Longitud: 13 m

Peso: 8,6 t

Deformación máxima: 6,5 mm

Vibración (mayor es mejor): 7,6 Hz



Basado en REBENTROST, WIGHT [26].

Lámina

11.

Grada

Elementos estructurales prefabricados en UHPFRC. Vigas.

Esc. 1:10

Medidas en mm.

2.5. Estruct. de piso



Las estructuras prefabricadas de piso empleadas en la construcción industrializada actual están más que consolidadas como soluciones optimizadas en las que se emplea el mínimo material posible para una respuesta estructural máxima. Son componentes fabricados en hormigón armado pretensado, producidos en grandes cantidades y empleados para cubrir luces superiores a las que aspiraría un sistema estructural de piso tradicional. Además, la construcción de la estructura con estos elementos es más sencilla, rápida y segura. Cuando se pretende ahorrar espacio vertical, es decir, se busca el menor canto posible del elemento, predomina el uso de placas alveolares (Fig. 2.25.), mientras que en estructuras en el que este factor es secundario, como puede ser el caso de los aparcamientos, el elemento más empleado para la estructura de piso es la losa en doble T (Fig. 2.26.).

Como ya se ha dicho, estos componentes están optimizados al máximo en hormigón armado convencional, la mejora de su diseño se ha estancado, pero entra en juego el UHPFRC para repensar la configuración de estas estructuras. El hormigón de ultra-altas prestaciones reforzado con fibras permite soñar con estructuras de piso más ligeras, esbeltas y con mayor longitud de trabajo, industrializando más si cabe el proceso constructivo.



Fig. 2.25. Almacenamiento de placas alveolares.

Fig. 2.26. Edificio de aparcamientos con estructura de piso ejecutada en losa de doble T.



Buena parte del proyecto de implementación del UHPC en elementos prefabricados pretensados de gran longitud para edificios de hormigón y puentes [5], llevado a cabo por el PCI, está dedicado al desarrollo de estructuras de piso para edificios en altura.

En EE. UU., el producto más común para estructuras de piso prefabricadas en edificios en altura, ya sean residenciales o de oficinas, es la placa alveolar. Su producción está altamente automatizada, y sus costes son muy razonables. Las placas alveolares más empleadas son las de 20 cm de canto, estas pueden llegar a salvar luces de 9 metros. Se comercializan placas de hasta 50 cm de canto, capaces de abarcar hasta 18 metros de luz, pero su empleo es anecdótico debido a su peso excesivo y la falta de demanda. El aspecto negativo de las placas alveolares es la dificultad a la hora de alojar instalaciones en sus huecos.

El objetivo del PCI en estructuras de piso es desarrollar un producto optimizado en UHPC capaz de competir económicamente con los sistemas de placas alveolares. Con un canto de entre 55-60 cm, deben ser capaces de salvar una luz de 18 metros mientras se les impone una carga de 4.80 kN/m^2 . También es conveniente que este elemento presente huecos transversales en su canto para facilitar el alojamiento de redes de instalaciones. En el proceso de diseño se tiene en cuenta una resistencia a fuego de 2 horas.

En este apartado se presentan los 4 prototipos de estructura de piso más interesantes, a juicio del autor, resultado del proceso de investigación llevado a cabo desde el PCI, estos son: placa nervada, losa hueca, viga-tablero en I, y viga-tablero en Pi. Además, se presenta un componente diseñado en la UPV, para estructuras de piso de luces de alrededor de 9 - 12 m: sistema Pi-placa.

Placa nervada



Lámina 12 (pág. siguiente):
Placa nervada en
UHPFRC, comparativa
con placa alveolar 50 en
hormigón pretensado.

Elemento extraído del proyecto de investigación PCI-UHPC [5]. Este componente es originalmente denominado “Ribbed Slab”, lo cual se traduciría literalmente como “losa acostillada”. El diseño es de e.construct, los modelos fueron fabricados por Tindall Corporation y las pruebas se realizaron en la NCSU (Fig.2.27.).

Se trata de una pieza con sección extrusionable, aunque actualmente no exista un método de producción por extrusión con el UHPFRC para paredes tan delgadas, consistente en una delgada placa superior sobre 4 costillas o nervios pretensados. El ancho total del componente es de 3,66 m y está pensada para cubrir 18 metros de luz, con una carga de $4,8 \text{ kN/m}^2$. La altura total de la placa nervada es de 56 cm.

En principio se planteó como una losa hueca, es decir, con tablero superior e inferior. El tablero inferior aportaba rigidez, pero dificultaba la fabricación, ya que el UHPFRC llega con dificultades a la cara inferior a través de las almas. Por ello se decidió prescindir de la placa inferior, dejando el descuelgue de los refuerzos o costillas.

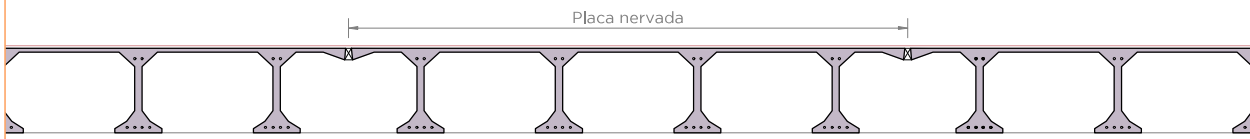
La separación entre costillas es de 91,6 cm de eje a eje. La placa superior cubre esta distancia sin ningún tipo de refuerzo, a parte de las fibras del material, y con un espesor de solo 2,5 cm. El componente no requiere armado a cortante, excepto en los extremos, junto a la estructura soporte.

Los nervios de la placa tienen un alma de 4,8 cm de espesor, adecuado para el empleo de fibras de 19 mm de longitud, pero en estas aplicaciones de paredes delgadas es mejor utilizar las de 12 mm de longitud. Encontramos 8 huecos en el alma de las costillas o refuerzos de dimensiones 25,4 x 61 cm, aligerando la pieza y permitiendo el paso de instalaciones en las dos direcciones, desarrollados a lo largo de los 9 metros centrales de luz. Los bulbos de los nervios alojan los cordones pretensados de 14 mm de diámetro: 2 en el bulbo superior y 4 en el inferior.

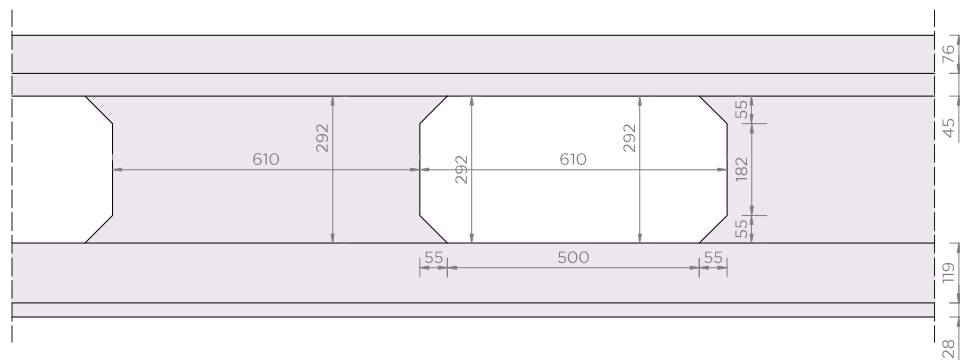


Fig. 2.27. Modelo testado de placa nervada, con la mitad de ancho, 1,83 m, y solo dos costillas o refuerzos.

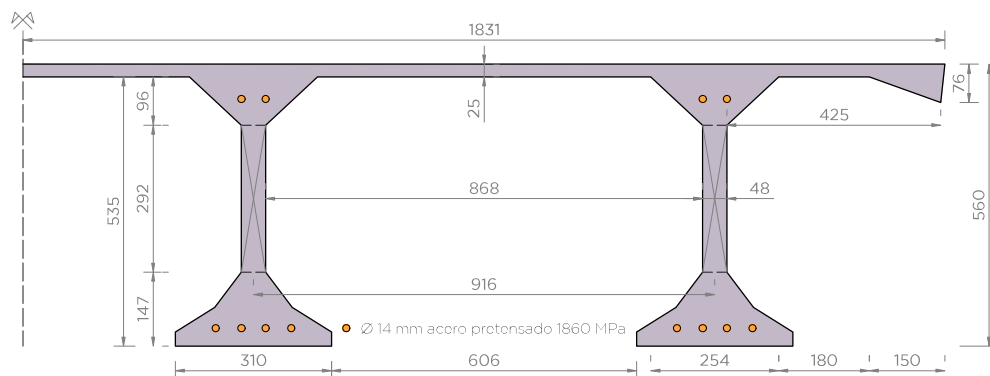
Sección general de forjado con placa nervada 56 PCI en UHPFRC
Esc. 1:50



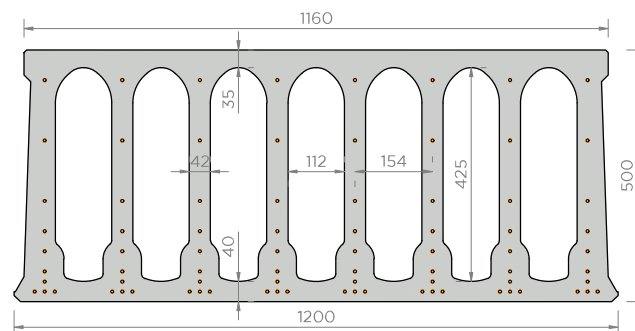
Alzado lateral de placa nervada 56 PCI en UHPFRC. Huecos en alma únicamente a lo largo de los 9 metros centrales



Sección transversal de placa nervada 56 PCI en UHPFRC



Sección comparativa:
Sección transversal de placa alveolar 50 (+capa de compresión 5/10) en hormigón pretensado
Prefabricados Pujol



Basado en TADROS, LAWLER [5].

Losa hueca



Lámina 13 (pág. siguiente):
Losa hueca prefabricada
en UHPFRC, comparativa
con placa alveolar 50 en
hormigón pretensado.

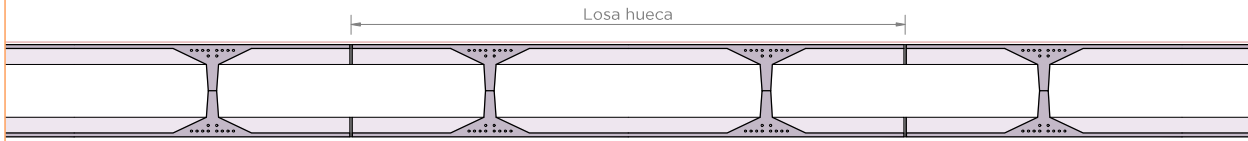
Elemento extraído del proyecto de investigación PCI-UHPC [5]. Este componente es originalmente denominado “Optimized Two-Rib Voided Slab”, lo cual se traduciría literalmente como “losa hueca optimizada de dos costillas”.

La losa hueca tiene un proceso de fabricación en dos partes que le permite tener placa superior e inferior, quedando hueco el interior de la losa, únicamente atravesado por dos nervios continuos. La sección de la losa es simétrica en sus dos ejes, por lo que es posible fabricar las dos mitades, superior e inferior, en procesos separados pero similares, de forma que posteriormente, una de las mitades es rotada 180 grados recibiendo sobre ella la parte superior de la pieza. La unión entre mitades, a través de las almas de los nervios, se garantiza exitosa gracias al buen comportamiento a cortante horizontal del UHPFRC con superficies estriadas, y a la presencia de barras verticales de acero de longitud reducida cada 60 - 120 cm. La fabricación es en dos partes para conseguir un buen resultado en ambas placas. En un proceso de único vertido, la delgada placa inferior tendría problemas para recibir el UHPFRC fresco correctamente a través de las estrechas almas de las costillas. La desventaja principal de este método de fabricación es el inconveniente paso de rotar 180 grados una pieza de 18 metros de longitud.

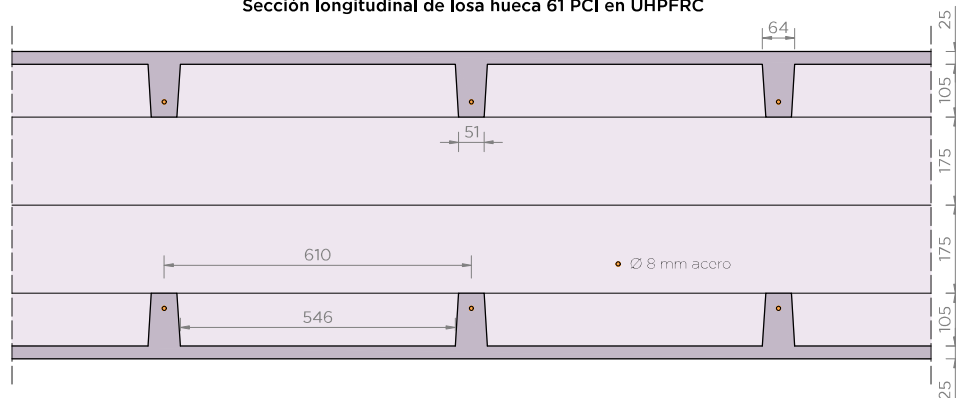
La altura total de la losa hueca es de 61 cm y, como todas las estructuras de piso propuestas por el proyecto PCI-UHPC, está pensada para cubrir 18 metros de luz, con una carga de $4,8 \text{ kN/m}^2$. El ancho total del componente es de 3,65 m, con los nervios ubicados de forma modular para que estén espaciados 1,83 m entre ejes. Estas dos costillas primarias de la pieza, gracias a las capacidades resistentes del UHPFRC, tienen un alma con espesor mínimo de 5,6 cm en su centro, hasta llegar antes de los bulbos de pretensado con 8 cm de espesor. Este pretensado es también simétrico, con 10 cordones de acero de 14 mm de diámetro en cada ala. La losa hueca hace uso de refuerzos nervados en la dirección transversal de las placas superior e inferior cada 61 cm, otorgándoles resistencia suficiente mientras mantienen un espesor muy reducido de 2,5 cm.

El componente resultante es considerado el más eficiente de los desarrollados en el proyecto PCI-UHPC, con un ahorro considerable de material, gran ligereza y un alto grado de rigidez a pesar de su poco canto, gracias a la presencia de un tablero inferior de UHPFRC. Los puntos negativos son su producción compleja y la falta de huecos transversales para instalaciones. Durante el proyecto de investigación del PCI-UHPC no pudo financiarse la fabricación de este producto para su testeo.

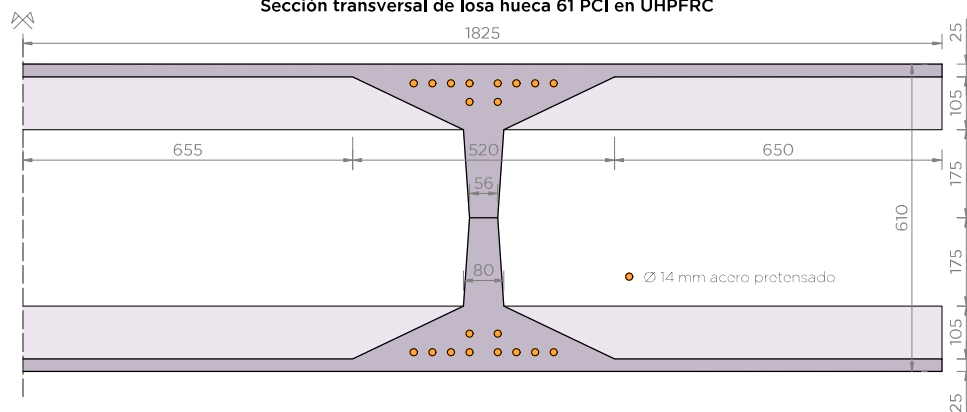
Sección general de forjado con losa hueca 61 PCI en UHPFRC
Esc. 1:50



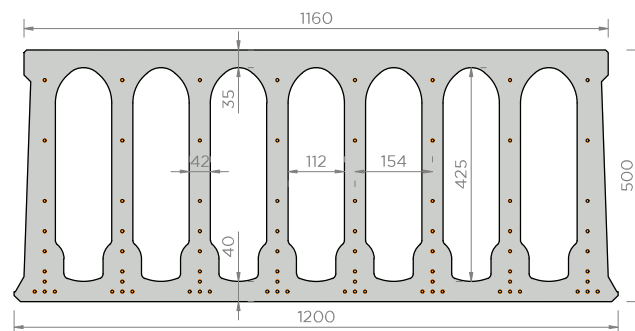
Sección longitudinal de losa hueca 61 PCI en UHPFRC



Sección transversal de losa hueca 61 PCI en UHPFRC



Sección comparativa:
Sección transversal de placa alveolar 50 (+capa de compresión 5/10) en hormigón pretensado
Prefabricados Pujol



Basado en TADROS, LAWLER [5].

Viga-tablero en I



Lámina 14 (pág. siguiente):
Viga-tablero en I en
UHPFRC, comparativa
con placa alveolar 50 en
hormigón pretensado.

Elemento extraído del proyecto de investigación PCI-UHPC [5]. Este componente es originalmente denominado “Residential Decked I-Beam”, lo cual se traduciría literalmente como “viga residencial en I con tablero”. Los modelos fueron fabricados por Metromont Corporation y las pruebas de laboratorio, a flexión y cortante, se realizaron en la NCSU (Fig.2.28.).

Surge de la idea de aplicar la viga-tablero en I para puentes, a la edificación residencial. Esta configuración tiende a ser muy eficiente por su gran bulbo inferior pretensado y la amplia ala superior, con bulbo pretensado incluido para controlar la contra-flecha, que compone el tablero.

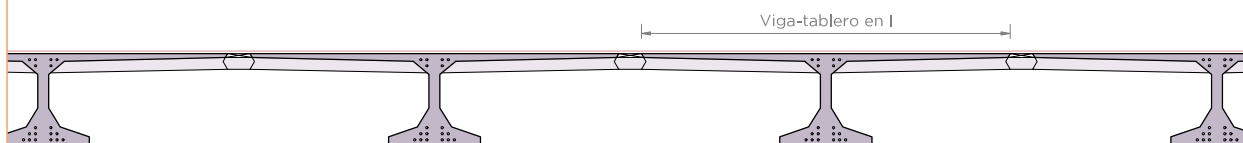
La altura total de la viga-tablero en I es de 61 cm y, como todas las estructuras de piso propuestas por el proyecto PCI-UHPC, está pensada para cubrir 18 metros de luz, con una carga de $4,8 \text{ kN/m}^2$. El ancho de la pieza es de 2,44 m, siendo la distancia entre ejes de 2,59 cm, quedando una junta en UHPC in-situ de 15 cm de ancho. El componente podría hacerse más ancho añadiendo cordones pretensados en el bulbo inferior de la I. La I tiene un ancho de alma de 7,2 cm, y en este caso no se plantean huecos transversales en ella. El pretensado a momento positivo es de 12 cordones de acero de 14 mm de diámetro. En el bulbo superior encontramos 6 del mismo tipo. Todos los cordones están pretensados a 1860 MPa.

El tablero del componente tiene un espesor creciente hacia el centro, empezando con 2,5 cm en los extremos y llegando hasta los 5 cm al inicio del bulbo superior. Este delgado tablero optimizado se consigue gracias al refuerzo de costillas cada 45,7 cm, las cuales están armadas con redondos de acero de 8 mm de diámetro en su parte inferior [27].

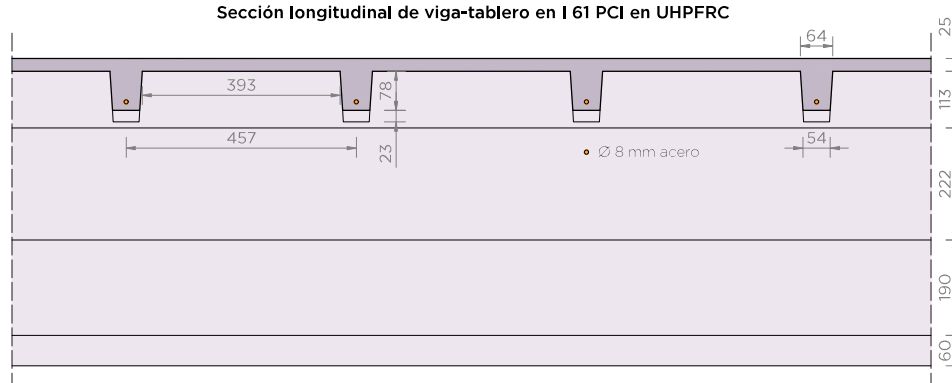


Fig. 2.28. Proceso de testado a cortante de la viga-tablero en I del PCI.

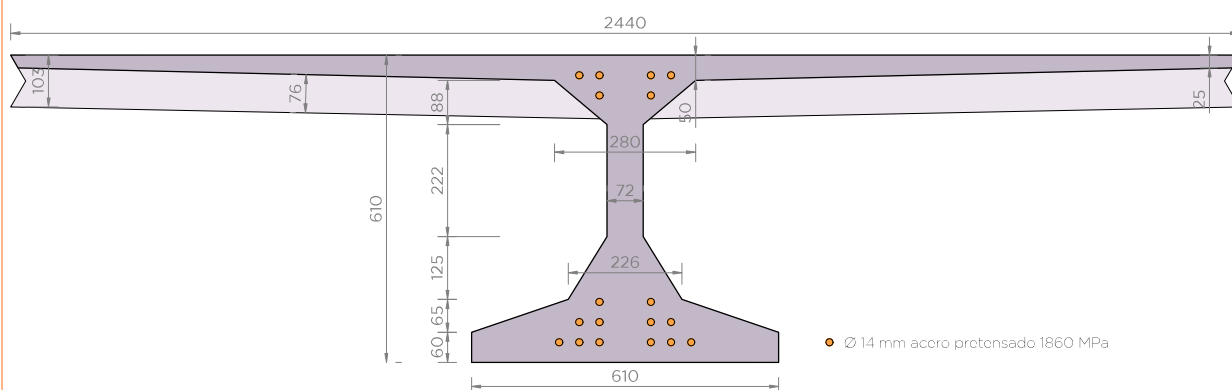
Sección general de forjado con viga-tablero en I 61 PCI en UHPFRC
Esc. 1:50



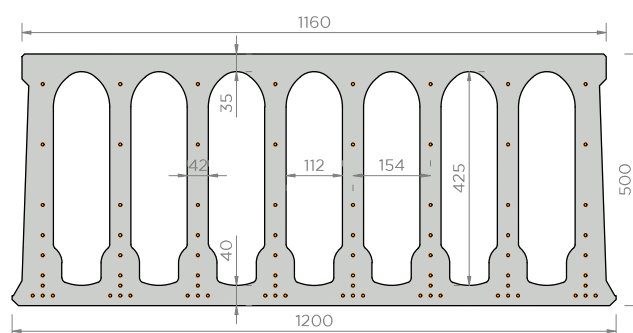
Sección longitudinal de viga-tablero en I 61 PCI en UHPFRC



Sección transversal de viga-tablero en I 61 PCI en UHPFRC



Sección comparativa:
Sección transversal de placa alveolar 50 (+capa de compresión 5/10) en hormigón pretensado
Prefabricados Pujol



Basado en TADROS, LAWLER [5].

Viga-tablero en Pi



Lámina 15 (pág. siguiente):
Viga-tablero en Pi en UHPFRC, comparativa con placa alveolar 50 en hormigón pretensado.

Elemento extraído del proyecto de investigación PCI-UHPC [5], evolución de la viga-tablero en I. Es similar al anterior componente, con tablero nervado, solo que en este caso la I se divide en dos, quedando doble bulbo superior e inferior cerca de los extremos. Resulta en una configuración global en Pi (Fig.2.29.). Este componente no pudo testarse por falta de financiación para su encofrado.

La altura total de la viga-tablero en Pi es de 56 cm y, como todas las estructuras de piso propuestas por el proyecto PCI-UHPC, está pensada para cubrir 18 metros de luz, con una carga de $4,8 \text{ kN/m}^2$. El ancho de la pieza es de 3,5 m. Las paredes verticales tienen un espesor de 5 cm y presentan huecos a lo largo de los 9 metros centrales de luz, facilitando el alojamiento de redes de instalaciones, también en la dirección transversal. El pretensado a momento positivo es de 16 cordones de acero de 14 mm de diámetro, en cada bulbo. En los bulbos superiores encontramos 6 del mismo tipo, para así controlar la contra-flecha del tablero.

Las estructuras de piso diseñadas en el proyecto de investigación PCI-UHPC, para cubrir 18 metros de luz, con una carga de $4,8 \text{ kN/m}^2$, se comparan con un diseño de placa alveolar que responde a la misma exigencia estructural. Se trata de la placa alveolar 50 (altura de 50 cm, a la que habría que añadir el espesor de la capa de compresión en hormigón vertido, de 5-10 cm), producida en hormigón pretensado, con una anchura de pieza de 1,20 m, obtenida del fabricante Pujol Prefabricados. Las placas alveolares son el producto competidor directo al que los componentes en UHPC del PCI aspiran a superar en rentabilidad. En la comparación se observa el ahorro de material en UHPFRC, lo que supone una solución más ligera, permitiendo un ancho de pieza superior y, por tanto, mayor simplificación en el proceso constructivo. También destaca la idoneidad de las soluciones en UHPFRC para el alojamiento de instalaciones a lo largo y ancho de la pieza.

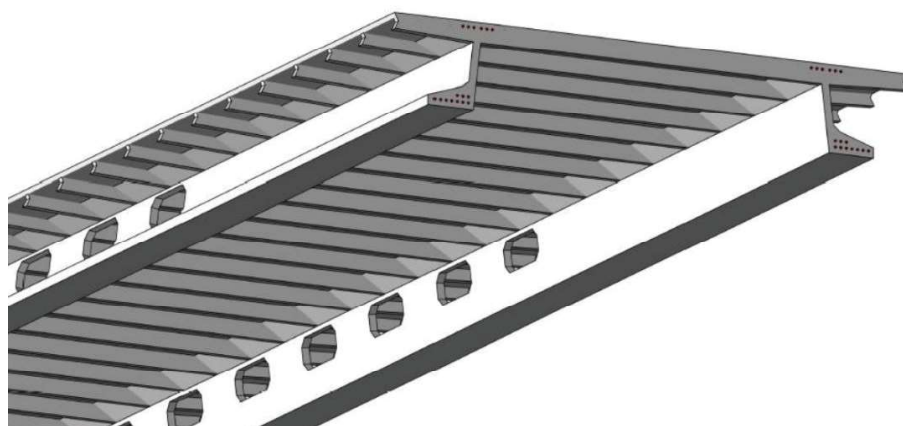
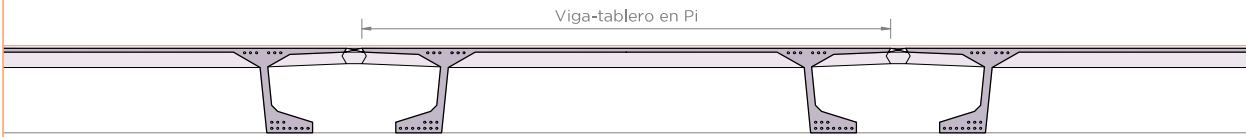


Fig. 2.29. Modelo 3D de viga-tablero en Pi, en UHPFRC.

Viga-tablero en Pi



largo de los 9 metros centrales

1030

25

64

546

610

55

55

250

661

771

449

51

Ø 8 mm acero

432

[illegible]

Technical drawing of a reinforced concrete slab cross-section. The slab has a total width of 1160 mm and a total height of 500 mm. It features six arched openings. The dimensions for the openings and reinforcement are as follows:

- Top reinforcement: 35 mm diameter, spaced at 42 mm.
- Bottom reinforcement: 40 mm diameter, spaced at 112 mm.
- Opening width: 154 mm.
- Opening height: 425 mm.
- Overall width: 1160 mm.
- Overall height: 500 mm.
- Overall length: 1200 mm.

Lámina

15.

Elementos estructurales prefabricados en UHPFRC. Estructuras de piso.

Medidas en mm.

Sistema Pi-placa



Lámina 16 (pág. siguiente):
Sistema Pi-placa en
UHPFRC, comparativa
con placa alveolar 30 en
hormigón pretensado.

Se trata de un sistema para forjado unidireccional, diseñado y testado en la UPV [17] [18] [28], compuesto por vigas primarias pretensadas en Pi, y placas planas apoyadas en ellas. Ambos elementos son prefabricados en UHPFRC, con paredes de espesores mínimos gracias a las características del material: 2 cm en superficie horizontal de viga y placas, 3 cm en paredes inclinadas de Pi, y 5 cm en los tendones inferiores del sistema.

Las vigas en Pi están pretensadas con cordones de acero de 13 mm de diámetro, uno en cada tendón inferior, dos por pieza. Las placas, que cubren la luz entre vigas, componiendo la superficie plana, carecen de cualquier tipo de refuerzo a parte de las fibras del propio material.

Este sistema está testado para luces de 12 m con cargas de alrededor de 5 kN/m², o luces de 9 m para cargas de 10 kN/m². El canto de la viga es de 25 cm y su ancho total es de 72,7 cm.

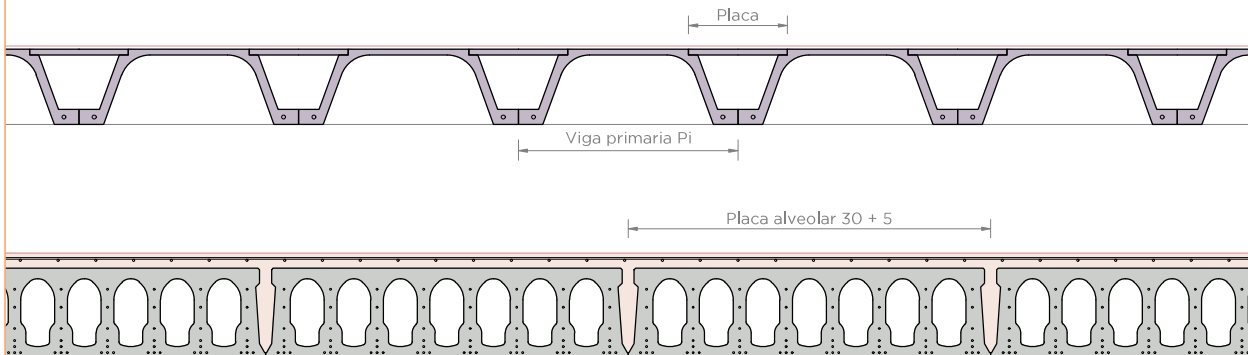
Esta solución se compara con la de placa alveolar 30, de Prefabricados Pujol, de similares prestaciones estructurales, pero 3 veces más pesada que el sistema en UHPFRC. La reducción del peso propio marca la diferencia, exigiendo menos momento flector y facilitando en general las labores de instalación de las piezas.

En resumen, el sistema Pi-placa en UHPFRC minimiza el consumo de material y ofrece una solución de industrialización máxima: no requiere capa de compresión in-situ ni ferrallado, no requiere hormigón vertido para conexiones, no requiere apuntalamiento, el almacenaje de las vigas Pi, una encima de otra (Fig. 2.30.), es eficiente, y la placa de entrevigado puede retirarse para alojar instalaciones y suministros sin necesidad de obra adicional.

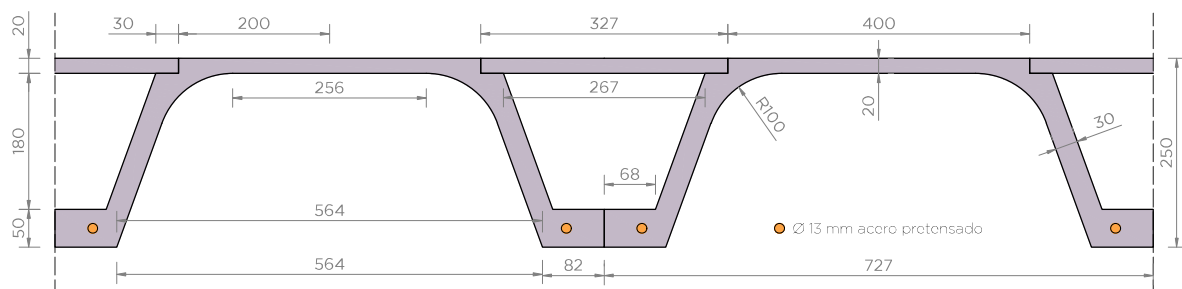


Fig. 2.30. Sistema de almacenaje de vigas Pi para forjado unidireccional en UHPFRC.

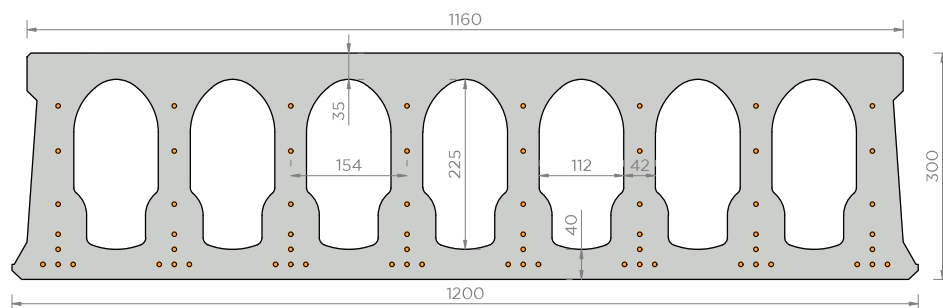
Sección general de forjado con sistema Pi-placa 25 UPV en UHPFRC
y sección general comparativa de forjado con placa alveolar 30 + 5
Esc. 1:25



Sección transversal de sistema Pi-placa 25 UPV en UHPFRC



Sección comparativa:
Sección transversal de placa alveolar 30 (+capa de compresión 5) en hormigón pretensado
Prefabricados Pujol



Basado en SERNA ROS, LÓPEZ MARTÍNEZ, CAMACHO TORREGROSA [28].

