

3. Sistemas estructurales industrializados en UHPFRC

En este capítulo se analiza un ejemplo de sistema estructural de edificación compuesto por elementos prefabricados en UHPFRC y se comentan las principales características de los modelos de estructura industrializada en este material.

Fig. 3.0. Proceso de montaje de pórtico con componentes prefabricados en UHPC-Dura.

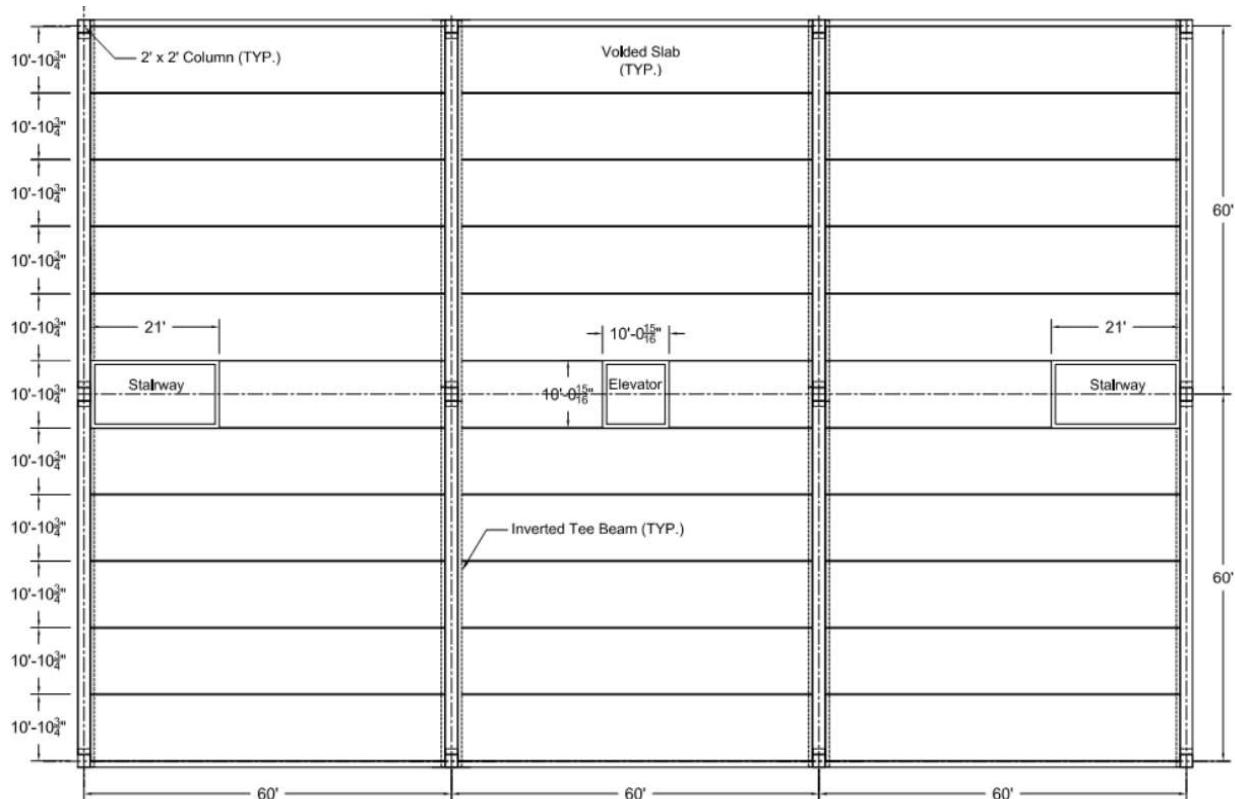
3.1. Ejemplo de sistema

Se presenta un sistema de superestructura propuesto por el PCI en su proyecto de investigación sobre el UHPFRC [5] para la construcción industrializada de edificios multiplanta residenciales o de oficinas.

Consiste en vigas en T invertida hueca como estructura horizontal primaria, y losas huecas como estructura de piso unidireccional que apoya sobre ellas. Tanto las vigas en T invertida como las losas huecas tienen una longitud, sin apoyos intermedios, de 18 metros. Los soportes, configurados en retícula de 18 x 18, se plantean en hormigón armado prefabricado convencional.

Se toma como planta ejemplo del sistema una de dimensiones 36 x 54 metros (Fig. 3.1.). En ella encontramos 4 ejes transversales, con una separación de 18 m (60 pies) entre ellos, que corresponden con las vigas primarias en T invertida. En su dirección perpendicular se desarrollan los ejes longitudinales, igualmente separados 18 metros entre sí. En los cruces de ejes se ubican los pilares del sistema, 12 en total en esta planta ejemplo. Las losas huecas apoyan perpendicularmente en los pórticos, formados por 2 pilares extremos, un pilar central y 2 vigas en T invertida. En el pórtico se busca la continuidad de la viga a través del pilar central. La estructura de piso entre pórticos se completa con 11 losas huecas.

Fig. 3.1. Planta ejemplo del sistema estructural industrializado en UHPFRC propuesto por el PCI. Medidas en sistema imperial.



Elementos estructurales del sistema

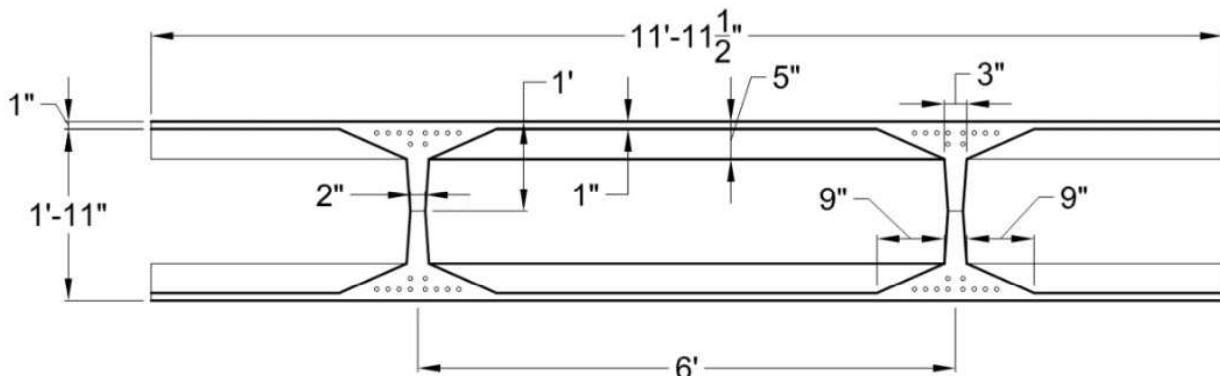
- Losa hueca:

La estructura de piso del sistema es la losa hueca en UHPFRC. Este componente ya ha sido presentado en el capítulo 2.5. de este trabajo.

La altura total de la losa es de 61 cm y su longitud es de 18 metros (realmente menos, 18 m de eje a eje de viga de apoyo), estando capacitada para una carga de 4,8 kN/m². El ancho total del componente en este ejemplo es de 3,32 m, aunque el diseño de este elemento permite un ancho de pieza de hasta 3,65 m. Los nervios interiores, desarrollados longitudinalmente en el hueco de la losa, 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. Esta optimización supone un miembro rígido, a pesar de su reducido canto, y ligero.

La losa hueca tiene un proceso de fabricación en dos partes. La sección de la losa (Fig. 3.2.) 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. No se especifica como es este proceso de unión de mitades, ya que este componente no fue producido ni testado, pero se presupone en taller, garantizando la calidad de la unión, y con la intervención de UHPFRC fresco de conexión entre las caras rugosas del alma.

Fig. 3.2. Sección transversal de losa hueca PCI, prefabricada en UHPFRC. Medidas en sistema imperial.



- Viga en T invertida hueca:

La viga primaria del sistema, sobre la que apoya la estructura de piso, es la viga en T invertida hueca. Este componente ya ha sido presentado en el capítulo 2.4 de este trabajo, es una optimización de las jácenas en T invertida en hormigón armado convencional.

Tienen sección en L, es decir, ménsula en una sola de las caras, cuando se trata de pórticos extremos o de borde, y en T invertida en el caso de pórticos centrales. En cualquier caso se trata de un componente hueco, optimizado. Este vaciado se consigue con un molde de EPS (poliestireno expandido), que varía en su forma para engordar o adelgazar los espesores de las paredes verticales según requerimientos de cortante y torsión. El EPS queda asegurado dentro del molde por espaciadores no convencionales, diseñados específicamente para la producción con UHPFRC. El diseño prescinde del refuerzo de estribos, es suficiente con las fibras de acero y el delgado espesor de sus paredes. Es un elemento ligero y rígido para su poca altura.

Esta viga tiene un canto de 71 cm, 79 cm añadiéndole el hormigón vertido de nivelación con losa, y un ancho de 81 cm, 122 contando con las ménsulas. La longitud del elemento es de 18 m (realmente menos, 18 m de eje a eje de pilar).

Las ménsulas de la T invertida tienen 15 cm de espesor. El espesor de las almas es de 7,6 cm a mitad de vano (Fig. 3.4.). Este espesor aumenta hasta 12,7 cm en los extremos del componente simplemente apoyado (Fig. 3.6.), o hasta 20,3 cm si la viga tiene continuidad con la siguiente a través del pilar (Fig. 3.5.). En la solución de continuidad, también se le practica a la sección un canal en la cara superior (Fig. 3.3.), con el objetivo de alojar en él armados para momentos negativos, los cuales atraviesan a su vez el pilar. Este detalle se explica en el siguiente apartado, hablando del proceso constructivo. Este canal tiene una longitud que va desde el extremo de apoyo de la viga hasta 4,27 m hacia el interior de vano. Su ancho es de 40,6 cm y su profundidad es de 7,6 cm.

Se ubican 39 cordones de 15,2 mm de diámetro de acero pretensado en la cara inferior y 4 cordones similares en la parte superior para soportar el potente pretensado inferior antes de entrar en carga.

Fig. 3.3. Planta de viga en T invertida PCI, en UHPFRC, con un extremo simplemente apoyado (izq.) y otro preparado para continuidad a través de pilar (der.).
Medidas en sistema imperial.
Escalas distorsionadas.

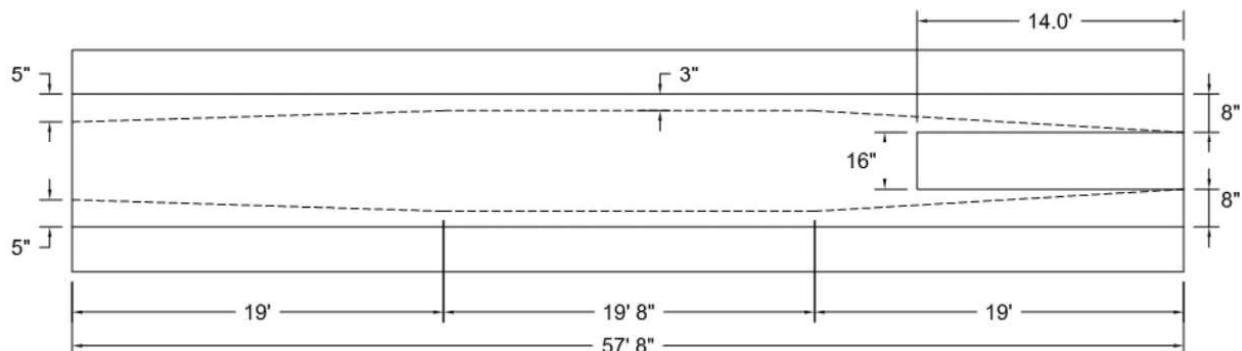


Fig. 3.4. Sección transversal de tramo medio de viga en T invertida PCI, en UHPFRC. Medidas en sistema imperial.

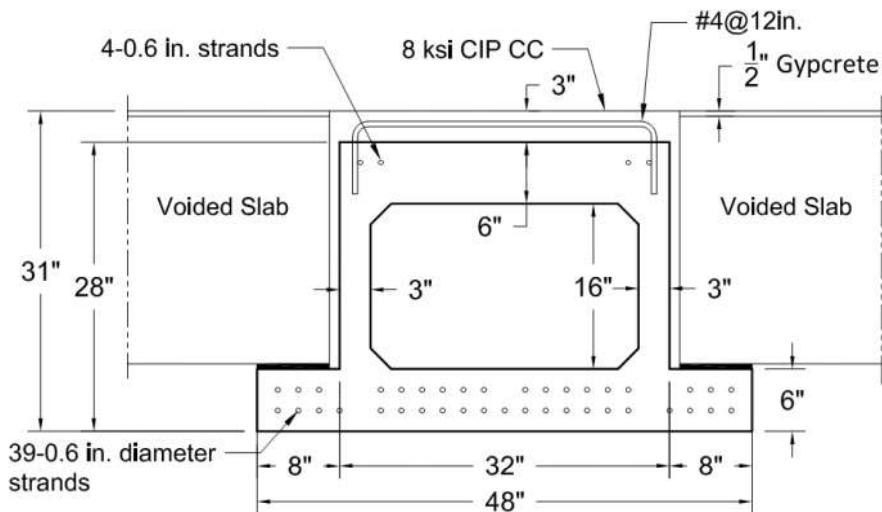


Fig. 3.5. Sección transversal de tramo final con continuidad a través de pilar, de viga en T invertida PCI, prefabricada en UHPFRC. . Medidas en sistema imperial.

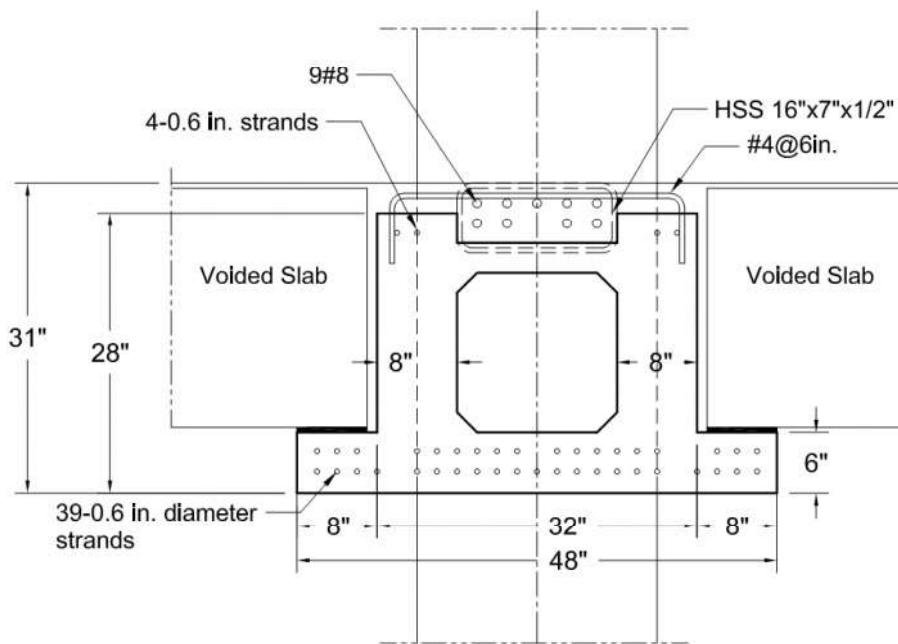
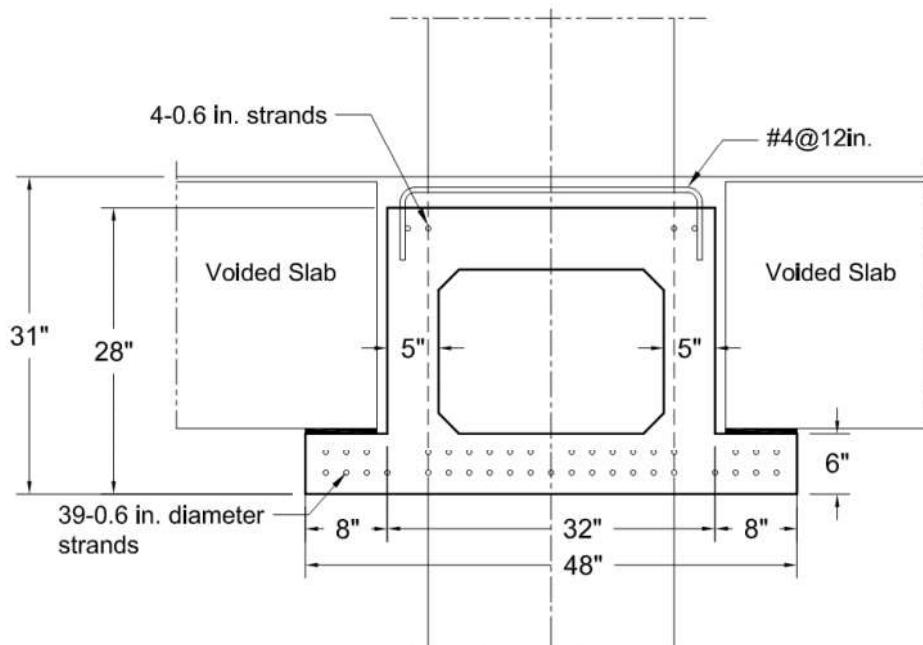


Fig. 3.6. Sección transversal de tramo final simplemente apoyado de viga en T invertida PCI, en UHPFRC. Medidas en sistema imperial.



- Pilar rectangular:

El componente de soporte del sistema es el pilar rectangular, prefabricado en hormigón armado convencional (Fig. 3.7.). Sección maciza cuadrada de 61 x 61 cm. Los pilares se fabrican con ménsulas incorporadas para el apoyo de las vigas en T invertida, ya sea en una única cara, si se trata de un pilar de borde, o en caras opuestas en pilares intermedios. No se dan más detalles sobre este elemento, podría plantearse como un soporte continuo y monolítico en toda la estructura, es decir, con la longitud de la altura del edificio, o como una serie de tramos de pilar conectados verticalmente, con la altura de una o dos plantas.

También, cabría la posibilidad de proponer este elemento soporte como un componente en UHPFRC, aligerando la sección y simplificando el armado pasivo.



Fig. 3.7. Instalación de pilares prefabricados de hormigón armado con ménsula.

Proceso constructivo del sistema

- Apoyo de vigas primarias en ménsulas de pilar:

Las vigas en T invertida de UHPFRC son elevadas e instaladas apoyando en las ménsulas del pilar prefabricado de hormigón armado. El ancho de la ménsula es el del propio pilar, 61 cm, y su longitud es de 30,5 cm, pero el apoyo se realiza sobre taco de neopreno centrado de 20,3 cm de longitud. Al ser el ancho de la viga, 81 cm, 122 cm contando las alas de la T invertida, mayor que el ancho del pilar, la viga envuelve el pilar prolongándose por los laterales del pilar hasta encontrarse a eje con la siguiente viga, o hasta la altura de la cara opuesta a la de la ménsula si es un pilar extremo. De esta forma las losas pueden seguir apoyando independientemente de la presencia del elemento soporte, sin necesidad de estructura adicional, y ahorrando encofrado auxiliar para este detalle en el hormigonado de nivelación.

- Apoyo de estructura de piso en alas de viga primaria:

Una vez la viga en T invertida está apoyada correctamente en sus dos extremos sobre las ménsulas de los soportes, se procede a la instalación de la estructura de piso en UHPFRC. Las losas huecas apoyan simplemente en las ménsulas o alas de las vigas en T invertida. Estas son continuas en la longitud de la viga y tienen un ancho de 20,3 cm y un espesor de 15 cm. El apoyo se realiza de nuevo sobre goma, con una longitud de apoyo de 17,8 cm, situados desde el borde más exterior de la ménsula.

Hay que tener en cuenta que la estructura de piso se instala progresivamente, vano a vano, por lo que en el cálculo de la viga primaria se debe comprobar su resistencia a torsión por apoyo asimétrico de estructura de piso, en una sola de las alas, teniendo en cuenta el proceso constructivo.

Fig. 3.8. Ejemplo de apoyo elastomérico de viga de puente.



- Hormigonado sobre vigas primarias para nivelación con estructura de piso, y continuidad de negativos a través de pilar:

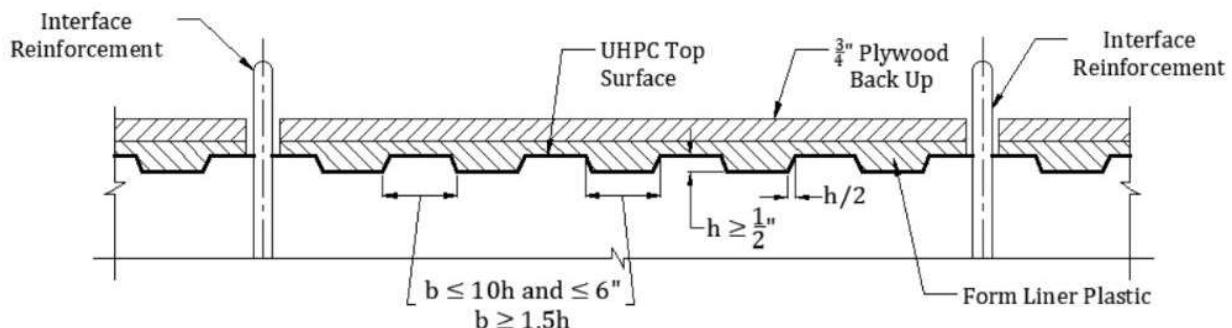
Con la estructura de piso apoyada en las vigas primarias, la diferencia de cota entre la cara superior de las losas y la cara superior de la T invertida es de 7,6 cm, quedando la losa a una altura superior. Se procede al hormigonado in situ, con hormigón convencional, sin necesidad de encofrados auxiliares, de este hueco longitudinal de 40,6 cm de ancho, de forma que la superficie de piso quede nivelada.

Esta capa de hormigón de 7,6 cm de espesor sobre la viga primaria, también colabora con su resistencia a compresión, pero para ello, su junta con la cara superior del componente en UHPFRC debe ser suficientemente resistente a cortante (Fig. 3.9). Para que así sea, la superficie de la viga en T invertida es rugosa, con un patrón estriado conseguido gracias a un encofrado con relieve de madera o similar. Conseguir este estriado después de la fabricación de la pieza es más complejo. Este patrón de rugosidad tiene ciertas condiciones de ancho y altura para ser eficaz (Fig. 3.9.): 7,6 cm y 1,3 cm respectivamente, en este ejemplo. Además, la viga en T invertida incorpora refuerzos transversales de acero que sobresalen en su cara superior, situados cada 30,5 cm y cada 15,2 cm en los 1,52 m extremos de la viga.

En los extremos de viga primaria en los que se busca continuidad a través del pilar, se utiliza un sistema parecido al empleado en puentes. Encontramos un canal en la cara superior de la viga, con la función de alojar en él armados para momentos negativos, los cuales atraviesan a su vez el soporte por un conducto incorporado en el pilar, formado por una vaina de acero rápido (HSS) de 1,3 cm de espesor, 40,6 cm de ancho y 17,8 cm de alto. El canal tiene una longitud que va desde el extremo de apoyo de la viga hasta 4,27 m hacia el interior de vano, su ancho es de 40,6 cm y su profundidad es de 7,6 cm. Este canal, así como la vaina del pilar, se rellena de hormigón vertido, junto con los 7,6 cm de espesores superiores de nivelación, envolviendo y protegiendo así los armados a negativos: barras de acero de alta resistencia.

- Vertido de fina capa superficial de hormigón de yeso, «gypcrete», para conseguir una superficie de piso totalmente plana.

Fig. 3.9. Sección longitudinal de cara rugosa de UHPFRC, para resistencia a cortante. Medidas en sistema imperial.



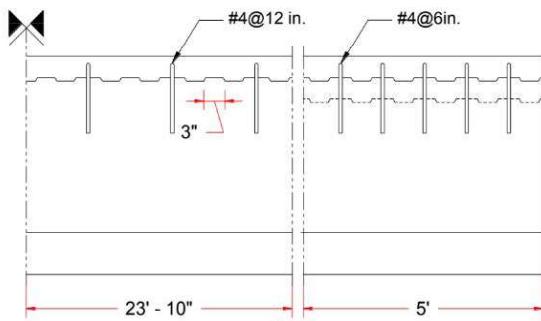


Fig. 3.10. (sup. izq.) Sección longitudinal de viga en T invertida PCI de UHPFRC, con superficie rugosa y armado para cortante con hormigón convencional. Medidas en sistema imperial.

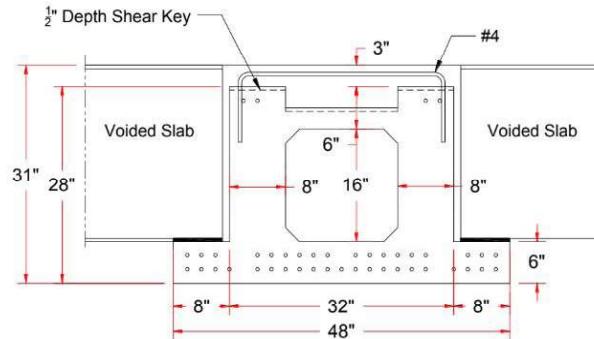
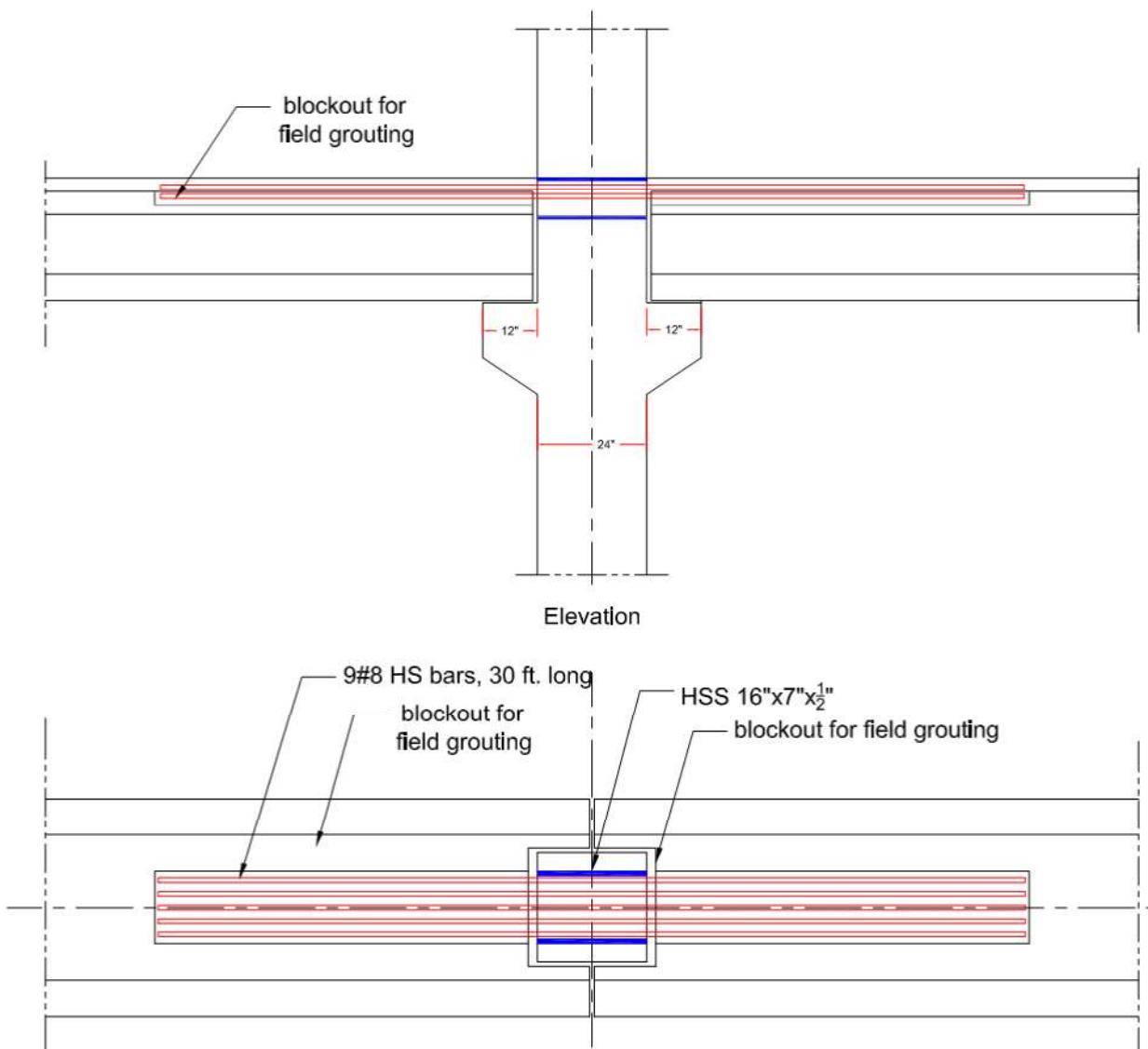


Fig. 3.11. (sup. der.) Sección transversal de viga en T invertida PCI de UHPFRC, con superficie rugosa y armado para cortante con hormigón convencional. Medidas en sistema imperial.

Fig. 3.12. (inf. sup.) Sección longitudinal de continuidad de viga en T invertida PCI a través de vaina en pilar. Medidas en sistema imperial.

Fig. 3.13. (inf. inf.) Vista en planta de continuidad de viga en T invertida PCI a través de vaina en pilar. Medidas en sistema imperial.



3.2. Características generales

A parte de las características propias, ya conocidas, de la estructura industrializada convencional, se comentan en este capítulo las singularidades de las estructuras construidas con prefabricados en UHPFRC.

Las estructuras industrializadas en UHPFRC son más ligeras que las construidas en prefabricado de hormigón convencional, incluso pueden llegar a competir en peso con los sistemas en acero, como han demostrado algunos componentes del capítulo 2 de este trabajo. Esto repercute muy positivamente en la logística de transporte e instalación de los componentes estructurales, abaratando y facilitando los procesos.

Respecto a la protección de estas estructuras frente a incendios, el UHPFRC es más vulnerable que los hormigones convencionales, por su alta densidad. Hay múltiples opciones estándar para mejorar la resistencia a fuego del material: pintura intumescente, proyectado de vermiculita, planchas protectoras de cemento, yeso, etc ... Aunque estas opciones son posibles, anulan la estética del UHPFRC, siendo uno de sus principales atractivos como material constructivo, por eso existe la posibilidad alternativa de incluir fibras de polipropileno en la mezcla: varios estudios [29][30] demuestran que la inclusión de pequeñas cantidades de fibras no metálicas junto a las de acero generan, en caso de incendio, una micro-red de canales por los que escapa el vapor de agua, aumentando el tiempo de duración de resistencia al fuego del componente en UHPFRC [5].

Los sistemas estructurales industrializados en UHPFRC, al igual que los construidos en prefabricados de otros materiales, tienden a retículas organizadoras regulares y a una configuración modulada, siendo estos ejes especialmente espaciados entre sí, si se quiere, por las altas prestaciones a flexión de los componentes con la ayuda del pretensado. Por lo tanto se consiguen largos espacios diáfanos con libertad de distribución para el arquitecto.

A pesar de la monotonía y rigidez de las configuraciones estructurales industrializadas, el hormigón de ultra-altas prestaciones ofrece algo más de variedad en sus formas, gracias a su autocompactabilidad y a la no necesidad de ángulos rectos por estribos en sus piezas. La creatividad es mayor. De hecho, las formas de los encofrados deben ser repensadas totalmente, ya que las formas curvas benefician el fluir de las fibras y su correcta orientación, debiendo huir de los ángulos totalmente rectos. El esquema organizador sigue siendo regular y modulado, pero los propios componentes pueden marcar la diferencia estética con las soluciones industrializadas convencionales.

Sin embargo, cabe mencionar que los elementos optimizados en UHPFRC a menudo tienden a secciones huecas, las cuales no son fá-

ciles de conseguir. Estos huecos aportan una gran ligereza y ahorro de material sin perder la rigidez en al pieza, como hemos observado en el anterior ejemplo, pero su fabricación es compleja, ya que la tolerancia de movimiento del molde (EPS, habitualmente) dentro del encofrado es mínima, teniendo en cuenta las delgadas paredes de los componentes en UHPFRC. Se ha demostrado que el empleo de espaciadores convencionales es problemático, por lo que deben usarse sujetaciones especiales. También es buena práctica realizar orificios cada 1-2 m en el hormigonado de elementos longitudinales huecos para comprobar que el UHPFRC fresco fluye sin problema por la cara inferior de la pieza [5].

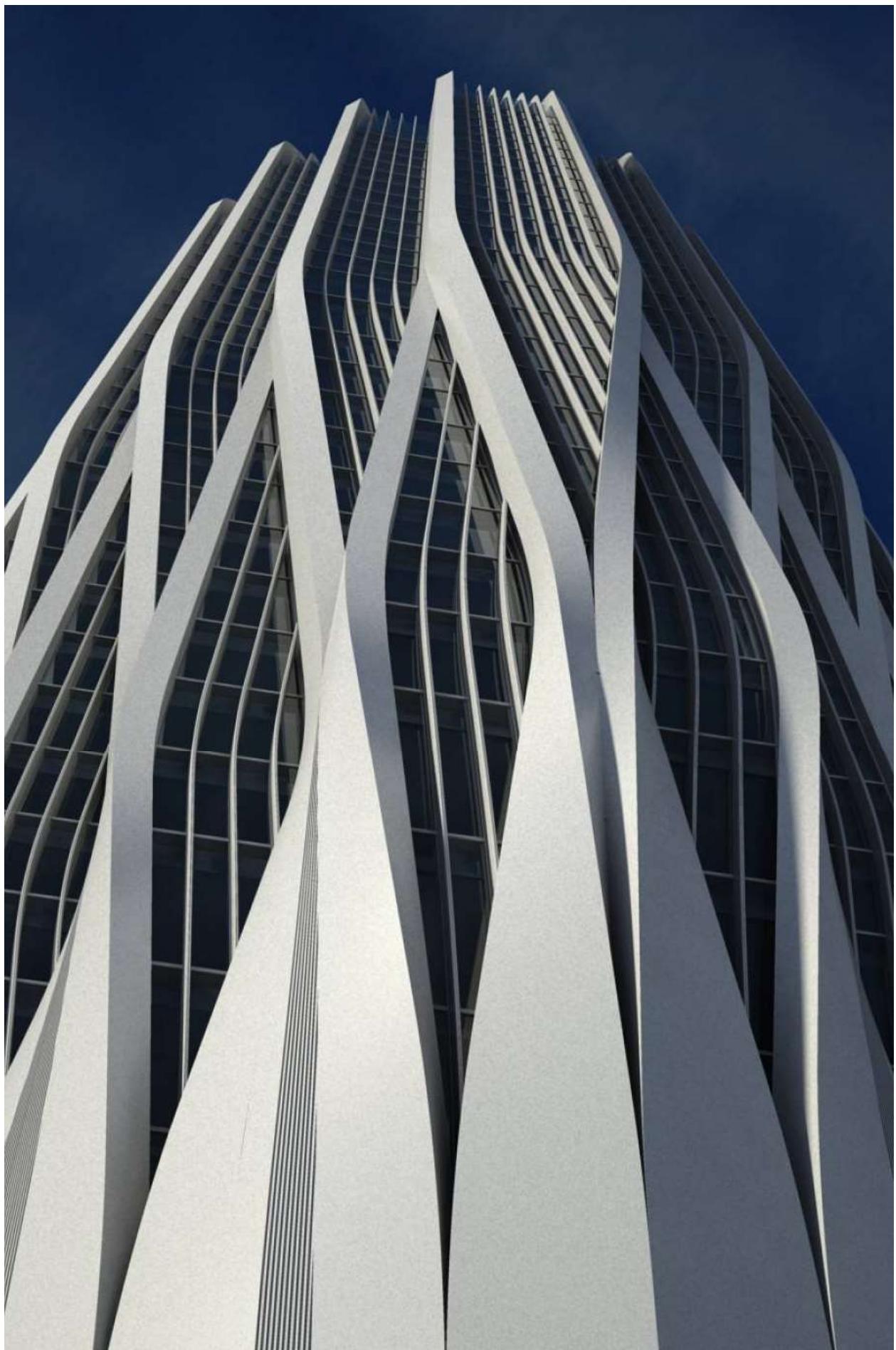
La optimización de los elementos de estructura de piso en UHPFRC aseguran alturas de forjado reducidas, si se tiene en cuenta las grandes luces que salvan, rentabilizando la altura de planta. Además, estas estructuras son huecas y a menudo con fácil accesibilidad a estos espacios técnicos que pueden emplearse como alojamientos de las redes de instalación de la edificación.

Respecto a las conexiones entre elementos, en el ejemplo hemos visto sistemas de uniones relativamente convencionales, pero se han ejecutado estructuras industrializadas en UHPFRC con uniones atornilladas en seco (Fig. 3.10.), incluso articuladas [31]. El arriostramiento necesario en estas estructuras dependerá de cada caso y del nivel de rigidez aportado por la solución de conexión escogida.

Por último, recordar la durabilidad del UHPFRC. Implica estructuras industrializadas con un mantenimiento mínimo. Este alargamiento de la vida útil de los sistemas estructurales, sumado al ahorro en volumen de material empleado en los mismos, lo hacen una opción sostenible.

Fig. 3.10. Unión atornillada en seco de vigía a conector de cumbre en pórtico.





4.

Conclusiones finales del trabajo

Por último, las conclusiones del trabajo.

Fig. 4.0. Central Bank of Iraq,
designed by Zaha Hadid
Architects. Exoskeleton of
tower in UHPC - Ductal.

Conclusiones

Los grandes avances de la tecnología estructural en la arquitectura han sido posibles gracias a la evolución y optimización que aporta la ingeniería de materiales, y, como dice Eduardo Torroja en el prólogo de *Razón y ser*, «Cada material tiene una personalidad específica distinta, y cada forma impone un diferente fenómeno tensional».

En este trabajo se demuestra que la personalidad del UHPFRC tiende a soluciones prefabricadas, ya que de este modo y con el complemento técnico del pretensado, se exprimen al máximo sus amplias virtudes resistentes. El UHPFRC en la estructura industrializada minimiza el material y maximiza las prestaciones, hace más con menos. Las piezas estructurales en hormigón de ultra altas prestaciones reforzado con fibras responden a los grandes retos estructurales con una ligereza impensable y una libertad formal nunca vistas en el prefabricado en hormigón convencional.

A pesar de estas fuerzas, también hemos observado que la producción competitiva de estos elementos es aún un reto para los fabricantes. Primero por el propio desafío técnico de un material con fibras metálicas en su mezcla y con un comportamiento en general poco conocido, y segundo por su elevado precio. Se necesita abaratar el producto y dar con métodos de producción eficaces y adaptados a su naturaleza. En ambas líneas de mejora se está avanzando rápidamente, gracias a proyectos de investigación como el del PCI.

El UHPFRC tiene el potencial de revolucionar la industria del prefabricado, y en un corto plazo si se trata de aplicaciones de grandes luces y donde la durabilidad sea relevante, como ambientes de frío extremo, ambientes marinos, etc. Prueba de este potencial es el caso malasio, en el que el UHPFRC tiene un éxito rotundo en la construcción de grandes estructuras con componentes prefabricados, empleando técnicas de pretensado, y con una magnitud de producción anual a la altura de un material constructivo convencional.

A lo largo de este trabajo se observa la versatilidad del UHPFRC para adaptarse a distintas tipologías estructurales. Es posible plantear estructuras industrializadas completas con elementos prefabricados en hormigón de ultra-altas prestaciones reforzado con fibras.

El futuro de la construcción es la industrialización, y el futuro de la estructura prefabricada ligera, duradera y estética, es el UHPFRC.

En la Escuela

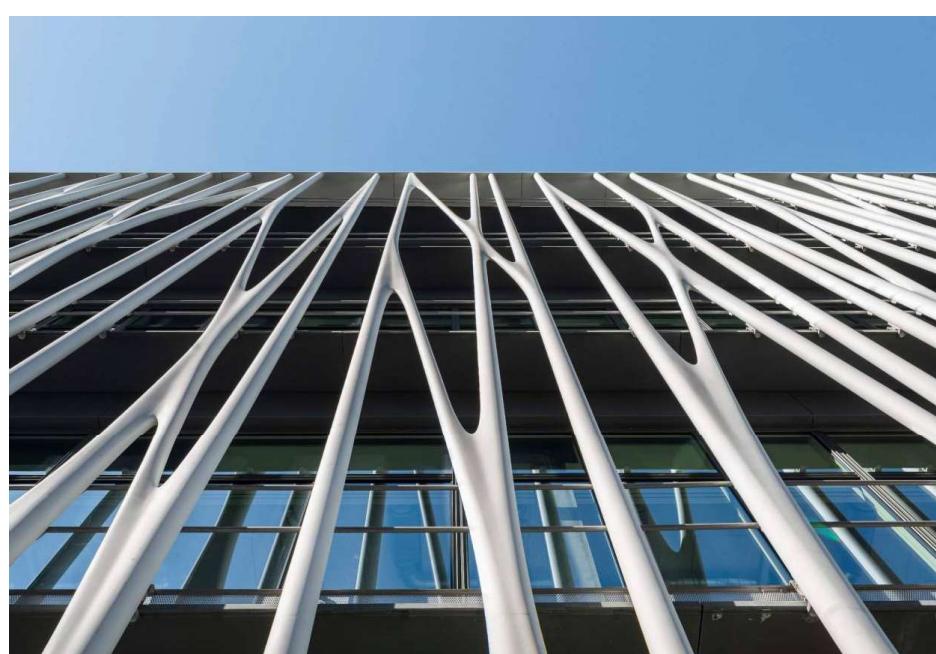
Este material debería ser más conocido en las escuelas técnicas, especialmente en las de arquitectura, por el potencial creativo que posee. Proyectos arquitectónicos como el de la torre del Central Bank of Iraq (Fig. 4.0.) o el MuCEM (Fig. 4.1.) son prueba de ello.

El UHPFRC tiene unas características totalmente distintas a las del hormigón armado o el acero, siendo una especie de híbrido que combina la versatilidad formal y la expresividad del primero, con la densidad y alta resistencia del segundo.

El UHPFRC trae consigo un nuevo lenguaje formal a las grandes estructuras arquitectónicas prefabricadas, diferente de las formas rectas del hormigón armado y de las formas laminares del acero. Este material huye realmente de los ángulos rectos para que las fibras de acero tengan una correcta distribución. Las posibilidades de encofrado curvo, y con formas complejas, hoy en día son infinitas, gracias a tecnologías como las de impresión 3D. Además, las paredes de los componentes en UHPFRC son extremadamente esbeltas, con espesores finísimos por la no necesidad de recubrir armaduras, las cuales son prescindibles en la mayoría de casos. Las secciones estructurales en este material son ligeras y adaptadas al requerimiento estructural del componente, con formas redondeadas.

Además de sus atractivos formales intrínsecos, las prestaciones estructurales del UHPFRC también consiguen espacialidades nuevas para la obra arquitectónica con grandes luces, gracias a las técnicas de pretensado, que explotan las altas capacidades a compresión del material.

Fig. 4.1. MuCEM, en Marsella, del arquitecto Rudy Ricciotti, en el que se emplean columnas arboladas de UHPFRC para soportar la fachada del edificio.



Bibliografía referenciada

- [1] DE DIOS FERNANDEZ, Beatriz, «El proceso del cambio. La industrialización en la arquitectura» (2020). Trabajo de Fin de Grado. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid.
- [2] AUTODESK, «Industrialized Construction in Academia» (2020). Autodesk Reports.
- [3] MARTÍN RAMÓN, Alberto, «Los procesos de industrialización de la construcción tradicional» (2021). Trabajo de Fin de Grado. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid.
- [4] TOUTLEMONDE, François; BERNARDI, Sébastien; BRUGEAUD, Yves; SIMON, Alain, «Twenty years-long French experience in UHPFRC application and paths opened from the completion of the standards for UHPFRC» (2018). 2nd International Conference on UHPC Materials and Structures, Nov 2018, Fuzhou, China.
- [5] TADROS, Maher K.; LAWLER, John S., «Implementation of Ultra-High Performance Concrete in Long-Span Precast Pre-tensioned Elements for Concrete Buildings and Bridges» (2021). Phase II Report, PCI Research Project on UHPC. e.construct-WJE-NCSU-LTU-UNL.
- [6] BRÜHWILER, Eugen, «“Structural UHPFRC” to enhance bridges» (2017). EPFL – Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland.
- [7] GRAYBEAL, Ben, «Design and Construction of Field-Cast UHPC Connections» (2019). FHWA Publication No: FHWA-HRT-19-011.
- [8] BINARD, J.P., «UHPC: A game-changing material for PCI bridge producers» (2017). PCI Journal.
- [9] MAYA DUQUE, Luis Felipe, «Estudio de estructuras aporticadas prefabricadas con uniones basadas en hormigones con fibras» (2011). Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- [10] LYSETT, Tim, «Benefits of UHPC in Precast Concrete Construction» (2020). Cor-Tuf UHPC Blog.

- [11] VANDE VOORT, Thomas L., «Design and field testing of tapered H-shaped Ultra High Performance Concrete piles» (2008). Retrospective Theses and Dissertations.
- [12] LAWLER, John S.; TADROS, Maher K.; LAMPTON, Mason; WAGNER, Elizabeth (Nadelman); SEVENKER, Adam, «Development of Non-Proprietary UHPC for Florida Precast Applications» (2020).
- [13] VOO, Yen Lei; FOSTER, Stephen, «Characteristics of ultra-high performance 'ductile' concrete and its impact on sustainable construction» (2010). The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering. 3. 168-187.
- [14] VOO, Yen Lei; FOSTER, Stephen; PEK, Lian Guan, «Ultra-High Performance Concrete - Technology for Present and Future» (2018).
- [15] NEMATOLLAHI, Behzad; VOO, Yen Lei; SAIFULNAZ M. R., Raizal, «Structural Behavior of Precast Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) Cantilever Retaining Walls: Part I - Analysis and Design Procedures and Environmental Impact Calculations (EIC)» (2014). KSCE Journal of Civil Engineering 18(5):1470-1480.
- [16] NEMATOLLAHI, Behzad; VOO, Yen Lei; SAIFULNAZ M. R., Raizal, «Structural Behavior of Precast Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) Cantilever Retaining Walls: Part II - Full Scale Experimental Testing» (2014). KSCE Journal of Civil Engineering 18(5):1470-1480.
- [17] SERNA ROS, Pedro; LÓPEZ MARTÍNEZ, Juán Ángel; CAMACHO TORREGROSA, Esteban, «UHPFRC: De los componentes a la estructura» (2012). I SILAMCAA.
- [18] CAMACHO TORREGROSA, Esteban, «Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties» (2013). Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia.
- [19] COLL, Hugo; LÓPEZ MARTÍNEZ, Juan Ángel; GALÁN, Sandra; SERNA ROS, Pedro, «Análisis de la viabilidad económica y estructural de tablestacas de UHPFRC» (2015). IV Congreso Iberoamericano sobre Hormigón Autocompactante.
- [20] ABOUKIFA, Mahmoud; MOUSTAFA, Mohamed A., «Structural Response and Buckling Behaviour of Slender Ultra-High Performance Concrete Columns» (2021). Final report submitted to ACI Foundation Concrete Research Council (CRC). University of Nevada, Reno. Department of Civil and Environmental Engineering.

- [21] FREYSSINET UK, «ExoLeaf: Revolutionary Ultra High Performance Improvement for Structures». ExoLeaf Product Brochure.
- [22] HAMID, Marawan M.; YASSIN, Layla A. G.; MOHAMMED, Alyaa H., «Behavior of hybrid reinforced concrete columns» (2020). Civil Engineering Department, University of Technology, Iraq. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.
- [23] TADROS, Maher K.; SEVENKER, Adam; BERRY, Rick, «Ultra-High-Performance Concrete» (2019). STRUCTURE magazine, Building Blocks.
- [24] TOUTLEMONDE, François; BOUTEILLER, Véronique; PLATRET, Gérard; CARCASSES, Myriam; LION, Maxim, «Field Demonstration of UHPFRC Durability» (2010). The French Technology of Concrete/Congrès fib Washington. AFGC.
- [25] DI PRISCO, Marco, «FRC Structural Applications in Italy» (2007). Politecnico di Milano, Italy.
- [26] REBENTROST, Mark; WIGHT, Gavin, «Experience and Applications of Ultra-high Performance Concrete» (2008). Encontro Nacional Betão Estrutural, Guimarães.
- [27] KURT, Atilla, «Implementation of Ultra-High Performance Concrete in Long-Span Precast Pretensioned Elements for Concrete Buildings and Bridges» (2021). Thesis submitted to the Graduate Faculty of NCSU. Master of Science, Civil Engineering.
- [28] SERNA ROS, Pedro; LÓPEZ MARTÍNEZ, Juán Ángel; CAMACHO TORREGROSA, Esteban, «Hormigón de muy alto rendimiento reforzado con fibras (UHPFRC): innovaciones para la transmisión unidireccional de cargas» (2012). Revista trimestral de ACHE. Volumen 63 - nº264.
- [29] HEINZ, Dehn, «Fire Resistance of Ultra High Performance Concrete (UHPC) - Testing of Laboratory Samples and Columns Under Load» (2004). Kassel University Press, Germany.
- [30] RODRIGUES; LAÍM, CORREIA, «Behaviour of fiber reinforced concrete columns in fire» (2010). Composite Structures.
- [31] VICENZINO, Enzo; CULHAM, Gerry; PERRY, Vic H.; ZAKARIASEN, Don; CHOW, Terry S., «First Use of UHPFRC in Thin Precast Concrete Roof Shell for Canadian LRT Station» (2005). PCI Journal.

Sitios web consultados

Las visitas a estos sitios web se realizaron entre los meses de septiembre de 2021 y enero de 2022.

Cor-Tuf UHPC.

<https://cor-tuf.com/>
<https://cor-tuf.com/blog/>

C&E Construction et Environnement.

<http://www.ceingenierie.fr/en/welcome/>
<http://www.ceingenierie.fr/en/projet/pre-stressed-and-post-tensioned-beams-made-from-ductal-uhpfc-for-huaxin-in-wuhan/>

De Lazzari - Mobiliário Urbano.

<https://www.delazzari.com.br/noticias/concreto-uhpfc>

Divisare Journal.

<https://divisare.com/projects/339882-rudy-ricciotti-johannes-marburg-mucem>

Ductal.

<https://www.ductal.com/en>

Dura Technology Sdn Bhd.

<https://dura.com.my/>
<http://dura.com.my/latest-project/2008-projects/86-construction-of-wilson-hall>

e.construct.

<https://www.econstruct.ae/articles/concrete-increased-functionality>

FHWA.

<https://www.fhwa.dot.gov/bridge/abc/uhpccfm>

FIB.

<https://www.fib-international.org/>

Freyssinet UK.

<https://freyssinet.co.uk/exoleaf/>

Hermo Prefabricados de Hormigón.

<https://www.hermo.net/producto/pilar-prefabricado/>

International Prestressed Hollowcore Association.

<https://hollowcore.org/hollowcore/production/>

MECANOGUMBA.

<https://mecanogumba.com/apoyos-de-neopreno/fotografias-de-juntas-para-puentes/>

Monachino Technology.

<https://www.monachinotechnology.com/zapatas-prefabricadas---cimentaciones-prefabricadas.html>

PCI.

<https://www pci.org/>

Prefabricados Formex.

<https://preffor.com/>

Prefabricados Hermo.

<https://www.hermo.net/producto/pilar-prefabricado/>

Prefabricados Pujol.

<https://www.prefabricatspujol.com/es/>

Research & Development Concretes (RDC).

<https://rdconcrete.com/>

<https://rdconcrete.com/uhpc-for-people/>

Standard Concrete Products (SCP).

<https://standardconcrete.net/>

The Prestressed Group.

<https://www.theprecaster.com/products/double-tees/>

Wiss, Janney, Elstner Associates (WJE).

<https://www.wje.com/>

Lista de figuras

- Figura 1.0. Prefabricado arquitectónico ligero de fachada en UHPFRC Ductal. Fuente: sitio web de Ductal.
- Figura 1.1. Instalación de cerramiento modular prefabricado. Fuente: [2].
- Figura 1.2. Construcción de superestructura industrializada en hormigón armado prefabricado. Fuente: [3].
- Figura 1.3. Elemento de UHPFRC fracturado, en el que se observan las fibras de acero incorporadas en la matriz del material. Fuente: sitio web de De Lazzari - Móobiliário Urbano.
- Figura 1.4. Capacidad a compresión del UHPFRC (Ductal) en comparación con un hormigón convencional. Fuente: sitio web de Ductal.
- Figura 1.5. Capacidad a flexión del UHPFRC (Ductal) en comparación con un hormigón convencional. Fuente: sitio web de Ductal.
- Figura 1.6. Escalera de diseño con peldaños en UHPFRC (Ductal) pretensado. Fuente: sitio web de Ductal.
- Figura 1.7. Hammersmith Flyover. Refuerzo de puente con postensado exterior emplazado cajones de anclaje de UHPFRC (Ductal). Fuente: sitio web de Ductal.
- Figura 1.8. Construcción de puente en Malasia, empleando vigas pretensadas en U de UHPFRC (Dura). Fuente: sitio web de Dura Technology Sdn Bhd.
- Figura 1.9. Vertido de UHPFRC en junta de tableros prefabricados para puente en hormigón armado convencional. Fuente: sitio web de Cor-Tuf UHPC.
- Figura 2.0. Componentes-viga en U para puentes, almacenados en fábrica de UHPC-Dura, Malasia. Fuente: sitio web de Dura Technology Sdn Bhd.
- Figura 2.1. Hormigonado de zapata prefabricada Monachino. Sistema de cimentación con “pre-zapata” en hormigón armado tradicional. Fuente: sitio web de Monachino Technology.
- Figura 2.2. Daños en la parte superior de pilotes hincados de hormigón armado por uso de tamaño incorrecto de martillo. Fuente: [11].
- Figura 2.3. Parte inferior de pilote en acero tras impacto repetido contra estrato muy duro de permafrost. Fuente: [11].

- Figura 2.4. Pilote de hormigón armado pretensado con pérdida de recubrimiento y corrosión de armaduras en entorno marino. Fuente: [11].
- Figura 2.5. Pilotes de acero corroídos con pérdida de sección en entorno marino. Fuente: [11].
- Figura 2.6. Test a flexión del pilote octogonal hueco de UHPFRC en el Centro de Investigación de Estructuras del FDOT. Fuente: [12].
- Figura 2.7. Carga de muros prefabricados DURA-UHPC en L en camión para transporte a lugar de construcción. Fuente: sitio web de Dura Technology Sdn Bhd.
- Figura 2.8. Comparativa entre muro de contención prefabricado con hormigón armado convencional y muro de contención ultra ligero prefabricado en DURA-UHPC. Fuente: sitio web de Dura Technology Sdn Bhd.
- Figura 2.9. Construcción de canal de drenaje de monzón para un proyecto residencial, empleando muro en L de contención ultra ligero prefabricado en DURA-UHPC. Fuente: sitio web de Dura Technology Sdn Bhd.
- Figura 2.10. Esquema del sistema de contención compuesto viga-placa en UHPFRC, sección general. Fuente: [17].
- Figura 2.11. Hormigonado con UHPFRC de viga pretensada de muro de 3 metros de longitud. Fuente: [18].
- Figura 2.12. Test de compresión de 4 puntos aplicado a la placa curva de 3 cm de espesor de UHPFRC. Fuente: [18].
- Figura 2.13. Mitades separadas de encamisado de refuerzo ExoLeaf Freyssinet en UHPFRC. Fuente: [21].
- Figura 2.14. Mitades encajadas de encamisado de refuerzo ExoLeaf Freyssinet en UHPFRC. Fuente: [21].
- Figura 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. Fuente: sitio web de DIVISARE.
- Figura 2.16. Alzado de torre mirador proyectada con estructura prefabricada en UHPFRC. Fuente: [23].
- Figura 2.17. Elevación y colocación del primer pilar de pórtico en la construcción del Wilson Hall. Fuente: sitio web de Dura Technology Sdn Bhd.
- Figura 2.18. Alzado lateral de pórtico diseñado con elementos prefabricados en UHPFRC para el Wilson Hall. Fuente: [13].
- Figura 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. Fuente: [4].
- Figura 2.20. Construcción industrializada de cubierta de fábrica empleando vigas pretensadas en UHPFRC, Wuhan, China, 2017. Fuente: sitio web de C&E Construction et Environnement.
- Figura 2.21. Postensado in-situ de un puente-viga en U de UHPFRC en Malasia. Fuente: sitio web de Dura Technology Sdn Bhd.
- Figura 2.22. Vertido de UHPFRC en encofrado metálico curvo para producción de viga tipo X. Fuente: [5].
- Figura 2.23. Elementos secundarios de cubierta prefabricados en UHPFRC para la planta de tratamiento de aguas de Achères, Francia. Fuente: [4].
- Figura 2.24. Tres filas de grada VSL en UHPFRC ensambladas. Fuente: [26].
- Figura 2.25. Almacenamiento de placas alveolares. Fuente: sitio web de International Prestressed Hollowcore Association.
- Figura 2.26. Edificio de aparcamientos con estructura de piso ejecutada en losa de doble T. Fuente: sitio web de The Prestressed Group.
- Figura 2.27. Modelo testado de placa nervada, con la mitad de ancho, 1,83 m, y solo dos costillas o refuerzos. Fuente: [5].
- Figura 2.28. Proceso de testado a cortante de la viga-tablero en I del PCI. Fuente: [27].
- Figura 2.29. Modelo 3D de viga-tablero en Pi, en UHPFRC. Fuente: [5].
- Figura 2.30. Sistema de almacenaje de vigas Pi para forjado unidireccional en UHPFRC. Fuente: [18].
- Figura 3.0. Proceso de montaje de pórtico con componentes prefabricados en UHPC-Dura. Fuente: sitio web de Dura Technology Sdn Bhd.
- Figura 3.1. Planta ejemplo del sistema estructural industrializado en UHPFRC propuesto por el PCI. Medidas en sistema imperial. Fuente: [5].
- Figura 3.2. Sección transversal de losa hueca PCI, prefabricada en UHPFRC. Medidas en sistema imperial. Fuente: [5].
- Figura 3.3. Planta de viga en T invertida PCI, en UHPFRC, con un extremo simplemente apoyado (izq.) y otro preparado para continuidad a través de pilar (der.). Medidas en sistema imperial. Escalas distorsionadas. Fuente: [5].

- Figura 3.4. Sección transversal de tramo medio de viga en T invertida PCI, en UHPFRC. Medidas en sistema imperial. Fuente: [5].
- Figura 3.5. Sección transversal de tramo final con continuidad a través de pilar, de viga en T invertida PCI, prefabricada en UHPFRC, . Medidas en sistema imperial. Fuente: [5].
- Figura 3.6. Sección transversal de tramo final simplemente apoyado de viga en T invertida PCI, en UHPFRC. Medidas en sistema imperial. Fuente: [5].
- Figura 3.7. Instalación de pilares prefabricados de hormigón armado con ménsula. Fuente: sitio web de Prefabricados Hermo.
- Figura 3.8. Ejemplo de apoyo elastomérico de viga de puente. Fuente: sitio web de MECANOOGUMBA.
- Figura 3.9. Sección longitudinal de cara rugosa de UHPFRC, para resistencia a cortante. Medidas en sistema imperial. Fuente: [5].
- Figura 3.10. Sección longitudinal de viga en T invertida PCI de UHPFRC, con superficie rugosa y armado para cortante con hormigón convencional. Medidas en sistema imperial. Fuente: [5].
- Figura 3.11. Sección transversal de viga en T invertida PCI de UHPFRC, con superficie rugosa y armado para cortante con hormigón convencional. Medidas en sistema imperial. Fuente: [5].
- Figura 3.12. Sección longitudinal de continuidad de viga en T invertida PCI a través de vaina en pilar. Medidas en sistema imperial. Fuente: [5].
- Figura 3.13. Vista en planta de continuidad de viga en T invertida PCI a través de vaina en pilar. Medidas en sistema imperial. Fuente: [5].
- Figura 3.10. Unión atornillada en seco de viga a conector de cumbre en pórtico. Fuente: sitio web de Dura Technology Sdn Bhd.
- Figura 4.0. Central Bank of Iraq, diseñado por Zaha Hadid Architects. Exoesqueleto de torre en UHPC - Ductal. Fuente: sitio web de Ductal.
- Figura 4.1. MuCEM, en Marsella, del arquitecto Rudy Ricciotti, en el que se emplean columnas arboladas de UHPFRC para soportar la fachada del edificio. Fuente: sitio web de Ductal.

Lista de láminas

- Lámina 01. Pilote en H de UHPFRC, comparativa con pilote en H de acero. Elaboración propia basada en VANDE VOORT [11].
- Lámina 02. Pilote octogonal hueco de UHPFRC, comparativa con pilote de hormigón armado convencional. Elaboración propia basada en LAWLER, TADROS, LAMPTON, WAGNER, SEVENKER [12].
- Lámina 03. Muro de contención en L de UHPFRC, comparativa con muro de hormigón armado convencional. Elaboración propia basada en NEMATOLLAHI, VOO, SAIFULNAZ M. R. [15][16].
- Lámina 04. Muro de contención compuesto de UHPFRC, comparativa con muro de hormigón armado convencional. Elaboración propia basada en SERNA ROS, CAMACHO TORREGROSA [17][18].
- Lámina 05. Tablestaca omega en UHPFRC, comparativa con tablestaca en acero y tablestaca en hormigón armado pretensado. Elaboración propia basada en COLL, LÓPEZ, GALÁN, SERNA ROS [19].
- Lámina 06. Soporte octogonal hueco en UHPFRC, comparativa con soporte octogonal hueco en hormigón armado pretensado. Elaboración propia basada en TADROS, SEVENKER, BERRY [23].
- Lámina 07. Pilar en I prefabricado en UHPFRC. Elaboración propia basada en VOO, FOSTER [13].
- Lámina 08. Viga en X de UHPFRC, comparativa con perfil HP en acero, viga de hormigón pretensado y viga de hormigón armado. Elaboración propia basada en VANDE VOORT [11].
- Lámina 09. Viga en T invertida hueca en UHPFRC, comparativa con jácena en T invertida en hormigón armado pretensado. Elaboración propia basada en TADROS, LAWLER [5].

- Lámina 10. Bandeja de cubierta en UHPFRC, comparativa con bandeja en hormigón armado pretensado. Elaboración propia basada en DI PRISCO [25].
- Lámina 11. Grada optimizada VSL en UHPFRC, comparativa con grada en L en hormigón armado pretensado. Elaboración propia basada en REBENTROST, WIGHT [25].
- Lámina 12. Placa nervada en UHPFRC, comparativa con placa alveolar 50 en hormigón pretensado. Elaboración propia basada en TADROS, LAWLER [5].
- Lámina 13. Losa hueca en UHPFRC, comparativa con placa alveolar 50 en hormigón pretensado. Elaboración propia basada en TADROS, LAWLER [5].
- Lámina 14. Viga-tablero en I en UHPFRC, comparativa con placa alveolar 50 en hormigón pretensado. Elaboración propia basada en TADROS, LAWLER [5].
- Lámina 15. Viga-tablero en Pi en UHPFRC, comparativa con placa alveolar 50 en hormigón pretensado. Elaboración propia basada en TADROS, LAWLER [5].
- Lámina 16. Sistema Pi-placa en UHPFRC, comparativa con placa alveolar 30 en hormigón pretensado. Elaboración propia basada en SERNA ROS, LÓPEZ MARTÍNEZ, CAMACHO TORREGROSA [28].

