

Trabajo Fin de Grado

Hormigón de Ultra Alta Capacidad en la arquitectura contemporánea

Autor/es

Miguel Ángel Ondevilla Gómez

Director/es

Begoña Genua Díaz de Tuesta
José Ignacio Palomero

Facultad de Arquitectura / EINA
2016



(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. Miguel Angel Ondevilla Gómez,

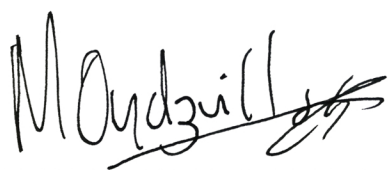
con nº de DNI 73017705L en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) Grado _____, (Título del Trabajo) Hormigón de Ultra Alta Capacidad en la arquitectura contemporánea.

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 23 de septiembre de 2016

Fdo: 

"La arquitectura es la lucha constante entre el hombre y la naturaleza, la lucha por dominar la naturaleza, por poseerla"

Mario Botta.



Figura 1. Obrero sobre la cubierta prefabricada del MuCEM.

RESUMEN

El presente trabajo profundiza en la historia del Hormigón de Ultra Alta Resistencia (HUAC) que pretende revolucionar la ingeniería y la arquitectura. Este material mejora a su predecesor, el hormigón tradicional, en todos los campos de manera abrumadora. Permite la creación de elementos imposibles de realizar con el hormigón tradicional con mínimo espesor y ligero peso.

El presente documento intenta responder a la pregunta: ¿Por qué no se utiliza de manera masiva este material si mejora en

todos los aspectos al hormigón tradicional? Para responder esta pregunta se estudia la historia del hormigón desde sus primeros usos hasta finales del siglo XX donde se descubrió el nuevo material. Seguidamente profundizaremos en las características del nuevo material para entender todas sus ventajas frente al hormigón tradicional. Después abordaremos una serie de ejemplos de varios ingenieros y arquitectos que utilizan el material para sus creaciones. Finalmente se plasman una serie de conclusiones positivas sobre el material y su uso en la arquitectura.

Palabras clave: UHPC, HUAC, hormigón, material, sostenibilidad.

RESUMEN Y PALABRAS CLAVE

1. PROLOGO, MOTIVACIONES Y METODOLOGIA

2. HISTORIA DEL HORMIGON

2.1 Antecedentes y Prehistoria

2.2 Los grandes imperios

2.3 Ostracismo

2.4 Cemento Portland

2.5 El hormigón se arma

2.6 Generalización de su uso

3. HORMIGON DE ULTRA ALTA CAPACIDAD

3.1 Introducción y descubrimiento

3.2 Composición típica del Hormigón de Ultra Alta Capacidad

3.3 Materiales

3.4 Propiedades

4. APLICACIONES

4.1 Obra civil

4.2 Uso en la arquitectura

4.3 Rudy Ricciotti, el pionero en el uso del HUAC

4.4 Caso estudio

5. COSTES, MANTENIMIENTO Y SOSTENIBILIDAD

6. CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

1. PRÓLOGO, MOTIVACIONES Y METODOLOGÍA

El material en la arquitectura es una parte vital e imprescindible en un proyecto. En algunos casos se utiliza como estructura bruta y se oculta, en otros se deja visto mostrando su belleza al mundo. En nuestra profesión nuevos materiales se van incorporando cada cierto tiempo gracias a las recientes necesidades que la sociedad solicita. Estos materiales nuevos derivan regularmente de experiencias en el mundo de la ingeniería que posteriormente los arquitectos atreven a utilizar, no sin antes pasar un sinfín de pruebas y errores.

Durante mi estancia en el programa Erasmus + tuve la oportunidad de que la Universidad de Spittal an der Drau cuenta en el mismo edificio con clases de arquitectura e ingeniería de caminos. Una de las asignaturas que elegí, “Bau mit UHPC”, es cursada normalmente por los alumnos de ingeniería pero los arquitectos estábamos también invitados a cursarla. Personalmente, el mundo de los materiales y la materialidad me fascina y esta asignatura me descubrió un mundo desconocido. En dicha asignatura se nos explicó el material objeto de este Trabajo Final de Grado (TFG en adelante), el Ultra High Performance Concrete (Hormigón de Ultra Alta Capacidad en español, HUAC en adelante). En un principio pensaba que el hormigón era un material ya conocido, explorado y sin evolución desde hace años pero en la asignatura se explicaron hormigones que se comportaban como aceros tanto en resistencia como en posibilidades de

realizar formas extrañas o imposibles. Hicimos diferentes pruebas con el material creando finalmente una pieza de mobiliario de solo 3 cm de espesor que aguantaba más de 1300 kg sin problemas sin ningún tipo de armado. Mejora al hormigón tradicional en todos los aspectos por lo que me puse a buscar arquitectura realizada con este material para aprender más de él. La sorpresa fue el encontrar cientos de ejemplos de su uso en el campo de la ingeniería pero no encontrar nada más que usos muy puntuales en la arquitectura¹ por lo que me hice la pregunta eje del TFG ¿Por qué no se utiliza de forma masiva en la arquitectura si mejora en todos los aspectos al hormigón tradicional?

Para llegar a responder esta pregunta primero vamos a analizar la historia del material desde su primer uso en la antigüedad hasta nuestros días para comprender su origen y ver la evolución del material. Vamos a hacer una descripción exhaustiva del material desde su descubrimiento donde se conocerán todos los componentes que lo conforman y su función dentro de la mezcla para así entender sus propiedades; compararemos las dosificaciones y los comportamientos en diferentes pruebas de resistencia y durabilidad del HUAC con el hormigón tradicional. Vamos a mostrar una serie de ejemplos en el mundo de las infraestructuras donde se utiliza este material para más adelante llegar a los usos en la arquitectura donde

¹ Durante el trabajo se descubre un arquitecto que lo utiliza varias veces en sus proyectos.

hablaremos, entre otros ejemplos, del arquitecto e ingeniero Rudy Riccotti pionero en el uso de este material primero en sus obras de ingeniería y posteriormente en sus obras de arquitectura. Realizaremos un pequeño *caso estudio* donde compararemos una obra de hormigón tradicional con una de HAUC. También hablaremos del coste del HUAC, de su huella de carbono, energía embebida... todo lo relacionado con el medio ambiente y su posibilidad de ser un material ecológico. Finalmente ofreceremos una serie de conclusiones sacadas a raíz de la realización de este TFG.

Para realizar este trabajo se contará primero con una bibliografía histórica consultada en la biblioteca Hypatia y en internet. Hemos intentado contactar con la compañía pionera en la creación de este material, Lafarge, para que nos puedan dar información técnica y de los proyectos realizados con este material. También se ha consultado la bibliografía que existe de este material y sus aplicaciones en diferentes sitios de internet (Google, Youtube, Google Academics, Blogs, Institutos de investigación...) donde están colgadas tanto estudios sobre el material como conferencias donde explican diferentes aspectos relacionados con el HUAC. Cabe añadir que el 99% de la información se encuentra en inglés, no existiendo prácticamente bibliografía en español, por lo que este trabajo puede ayudar a personas que no conocen el idioma a empezar a descubrir y trabajar con este material. Además cuento con mi propia experiencia vital trabajando este material durante el Erasmus +. La metodología a seguir se resumiría en estos puntos:

- Fase 1. Investigación, búsqueda y lectura de la bibliografía existente.
- Fase 2. Recopilación de datos de algunas empresas punteras en este material.
- Fase 3. Estudio, descripción y caracterización del nuevo material y comparación del nuevo material con el hormigón tradicional.
- Fase 4. Usos de este material en la actualidad, posibles usos, proceso constructivo.
- Fase 5. Conclusiones.

2. HISTORIA DEL HORMIGÓN

El uso del hormigón como elemento constructivo ha estado presente en multitud de estructuras y edificaciones desde la antigüedad hasta nuestros días. Paralelamente han ido evolucionando con él, tanto los elementos básicos de las obras en

las que ha sido utilizado este material como la propia puesta en obra del mismo, los ensayos que se realizan sobre éste para asegurar su calidad y los aditivos utilizados en la elaboración del propio hormigón.



Figura 2. Posible organización del asentamiento de Lepenski Vir.



Figura 3. Yacimiento arqueológico en Lepenski Vir.

2.1 Antecedentes y Prehistoria

A lo largo de la historia el hombre ha intentado resguardarse de manera segura tanto de los elementos como de las posibles agresiones exteriores. En un principio buscó refugio en las cuevas de piedra, resistentes lugares donde el cobijo estaba asegurado. Pero, en su afán de exploración y de desarrollo, se da cuenta de que la cueva es un lugar inmóvil y se pone a la búsqueda de cómo poder reproducir dicha cueva, dicho cobijo, allá donde él vaya.

Hace aproximadamente 8000 años, se realizó la primera mezcla de agua, arena, áridos y conglomerante a base de caliza que dio como resultado un nuevo material que observaron podía ser moldeado con facilidad y que cuando endurecía adquiría características muy parecidas a las de nuestros hogares prehistóricos, las cuevas. Empezaron utilizando este material como cimiento sólido y como unión entre las diferentes piedras, maderas, etc. aportando una resistencia y estabilidad extras a la construcción.

Se tiene constancia de que materiales que pueden recordarnos al cemento fueron utilizados en el año 6500 a.C. por los comerciantes de Nabatea y los Beduinos que tuvieron un pequeño imperio entre Siria y Jordania.

Lo más interesante es que ya se dieron cuenta de que había que mantener la mezcla lo más “seca” posible es decir, que la relación agua/cemento fuera lo más baja posible, ya que observaron que así obtenían estructuras más resistentes y duraderas evitando la aparición de grietas, vacíos y puntos débiles en sus estructuras.

Otras fuentes históricas indican que la construcción más antigua realizada en hormigón es el suelo de las cabañas de Lepensky Vir, situado en el este de Serbia, en el año 5600 a.C. En Chile se tiene constancia también del uso de las primeras obras de piedra unidas por un conglomerante hidráulico procedente de la calcinación de algas entorno al año 3500 a.C.



Figura 4. Pirámide de Guiza en Egipto.



Figura 5. Gran muralla China en China.



Figura 6. Panteón de Agrippa en Roma, Italia.

2.2 Los grandes imperios

1.21 Egipto

Sobre el año 3000 a.C. el antiguo pueblo egipcio empezó utilizando barro mezclado con paja para fabricar sus ladrillos. Conforme fue creciendo el imperio, las necesidades de edificios y construcciones más ambiciosas fueron aumentando, por lo que necesitaban de otros materiales más resistentes. El investigador Michael W. Barsoum afirma que utilizaron el hormigón 2500 años antes que los romanos.

Los egipcios descubrieron que podían utilizar el mortero de cal como aglomerante en sus construcciones ya que éste tenía una resistencia aceptable. Para fabricar la cal, se quemaba la roca caliza hasta convertirla en polvo. Posteriormente era mezclado con arena y agua en proporciones ideales hasta formar un mortero con el cual se fijaban los ladrillos de arcilla o se enlucían las paredes.

Para hacer sus grandes monumentos, entre otros avances, desarrollaron la mezcla de cal y yeso como mortero para la construcción de las pirámides. En la gran pirámide de Giza (2570 a.C.) se utilizaron más de 500.000 toneladas de este mortero tanto para la unión de las piedras entre sí como para la superficie final de la pirámide.

1.22 China

El imperio chino ejecutó la construcción de la Gran Muralla utilizando un mortero pegajoso con base de arroz glutinoso. Se puede comprobar su gran resistencia pues ha resistido el paso del tiempo e incluso a efectos modernos de demolición.

1.23 Roma

Durante el periodo Republicano², hace aparición uno de los materiales más revolucionarios, por su importancia, en la construcción: El opus caementitium³. Con este extraordinario material, podían permitirse erigir edificios y monumentos mucho mayores y espectaculares. Esta mezcla tiene una calidad excepcional puesto que muchos de los edificios de aquella época nos han llegado en condiciones más que dignas.

El Coliseo de Roma (70 d.C. – 80 d.C.) es uno de ellos. Este edificio de forma ovalada, de cuatro niveles, construido sobre arcos y con unas dimensiones de 188 por 156 metros, se construyó para una capacidad aproximada de 45.000 espectadores. Contiene hormigón en los cimientos, los muros interiores y en la estructura principal.

Otro gran ejemplo del uso de este material es el Panteón de Agrippa (118 d.C. - 127 d.C.) erigido durante la época del Emperador Romano Adriano. Se trata de la cúpula realizada en hormigón sin armar más grande jamás construida con una dimensión en diámetro de 43m. Para que no colapsara, conforme iba creciendo en altura, los ingenieros romanos fueron reduciendo el espesor de la cúpula hasta dejar en el centro un hueco por donde pasa la luz siendo esta obra un *“Diseño angélico y no humano”* (Miguel Ángel).

² Existen en la historia de Roma 3 periodos: la Monarquía (753-509 a.C.), el periodo Republicano (509 a.C.- 27 a.C.) y el Imperio Romano (27 a.C. - 476 d.C.).

³ El opus caementitium es el hormigón, constituido de grava mezclada con cal, arena, agua y tierra volcánica de Pozzuoli, sacada de las faldas del Vesubio.



Figura 7. Cúpula de Santa María del Fiore. Florencia, Italia.

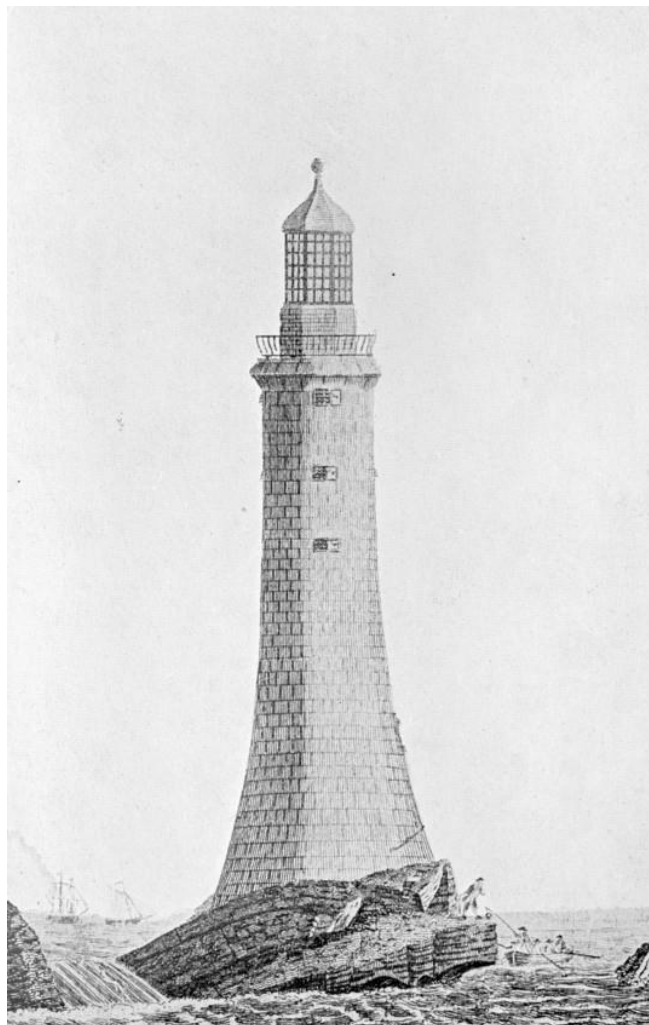


Figura 8. Reconstrucción del faro de Eddystone en Inglaterra por Jhon Smeaton.

2.3 Ostracismo

Después de la caída del Impero Romano en el año 476 d.C, el hormigón pasa a una época de olvido. Su caída provoca el final del sistema social de aquella época y consecuentemente un cambio radical en las necesidades estructurales entre el imperialismo romano y la posterior ruralización del territorio. El sistema de construcción del Imperio se nutría por un lado de un dominio de la técnica y por otro de la mano de obra esclava. El fin del imperio y la tradición romana derivan en un empobrecimiento de la calidad de los cementos en comparación con la época imperial, y por ende, en un paulatino decaimiento de las construcciones realizadas con hormigón, sustituidas en los edificios emblemáticos por la antigua piedra.

No se encuentran muestras del uso del hormigón hasta el año 1200 d.C., cuando se emplea para cimentar la Catedral de Salisbury en Inglaterra.

En el siglo XV, La construcción de la cúpula (1420 d.C. -1436 d.C.) de la Basílica de Santa Maria del Fiore por parte del arquitecto renacentista Filippo Brunelleschi supone un hito en la historia de la construcción. La concepción original del autor de utilizar material cerámico, requería de un material cohesivo como el empleado por los romanos. Así pues, el autor toma conciencia del legado técnico y constructivo de la época romana⁴ y realiza la cúpula basándose en las técnicas del hormigón romano.

⁴ Un siglo después, Miguel Ángel sería el encargado de la construcción de la cúpula central de la Basílica de San Pedro. Se inspiró en la cúpula del Panteón de Agrippa y en la cúpula de la Basílica de Santa María del Fiore pero optó por realizarla en piedra en vez de hormigón.

2.4 Cemento Portland

A partir de finales del siglo XVIII se entra en el período definitivo en la recuperación del hormigón, con el descubrimiento de lo que se conocen como los aglomerantes modernos gracias al estudio de los escritos de Vitruvio. El ingeniero inglés John Smeaton descubrió, en la obra de reconstrucción del faro de Eddystone (1759 d.C.-1877 d.C.) en Inglaterra, el buen comportamiento hidráulico de una mezcla de cal y arcilla utilizada por los ingenieros romanos que resistía la acción del agua del mar.

En 1824 d.C., James Parker y Joseph Aspdin patentaron un nuevo cemento hidráulico artificial, fabricado por la combustión conjunta de caliza y carbón, que denominaron Cemento Portland por su color oscuro, similar a la piedra de la isla de Portland.

El Cemento Portland, era una mezcla de clinker⁵ molido con una cierta adición de yeso. Este clinker se obtiene con una mezcla química de 80% de material calcáreo y un 20% de material arcilloso. Para Aspdin, era pues una masa sólida que, una vez reducida a polvo y mezclada con agua, se convertía en el cemento conocido como Portland. En sus inicios este material no fue demasiado empleado a causa de su complejo procedimiento de fabricación, que encarecía su producción. Hacia finales del siglo XIX, el proceso de industrialización y la introducción de hornos rotatorios propiciaron la extensión de su uso para todo tipo de aplicaciones.

⁵ El clinker es un material que se obtiene previamente en la fabricación del cemento. El crudo de cemento es sometido a molienda, después calcinado en un horno rotatorio a temperaturas superiores a 1.400°C y posteriormente enfriado hasta obtener el clinker.

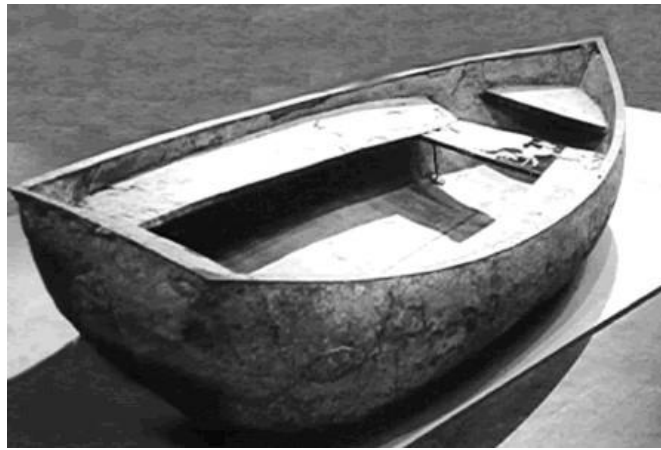


Figura 9. Barca realizada en hormigón en la exposición de 1854.



Figura 10. Casa realizada en hormigón por William Ward en 1875.



Figura 11. Viviendas de la Rue Franklin realizadas por August Perret en 1902.

2.5 El hormigón se arma

La invención del hormigón armado se suele atribuir a Joseph-Louis Lambot, que publicó el libro «Les bétons agglomérés appliqués á l'art de construire», en donde patentó su sistema de construcción, expuesto en la exposición mundial en París el año 1854.

En dicha exposición, mostró una barcaa de remos fabricada en hormigón armado con alambres. Más adelante, François Coignet en 1861 ideó la aplicación en estructuras como techos, paredes, bóvedas y tubos. A su vez, el francés Joseph Monier patentó varios métodos en la década de 1860.

Aunque hubo excepciones, durante siglo XIX el hormigón se utilizaba exclusivamente para edificios industriales e infraestructuras por lo que no estaba socialmente aceptado para construcción de viviendas. La primera vivienda - para los sirvientes- construida en hormigón armado data de 1854 en Inglaterra. Más adelante, en 1875, el Ingeniero William Ward construyó la primera vivienda hecha de hormigón armado en Port Chester, Estados Unidos, la cual todavía resiste el paso del tiempo de manera notable, pero realizada con todo tipo de ornamento de una época pasada.

François Hennebique empezó a construir en Francia viviendas en hormigón armado durante los años 70 del siglo XIX y, poco a poco, fue extendiendo sus patentes a toda Europa, generalizando así el uso de este material, primero para la industria y después en la vivienda. Hennebique impulsa el hormigón armado en 1892 gracias a la patente del sistema de hormigón prefabricado, mucho más rápido y limpio que el hormigón ejecutado in situ.

A partir de 1897 empiezan a aparecer en las universidades profesores que imparten clases sobre este novedoso y revolucionario material.

La entrada definitiva del hormigón en la historia de la construcción se produce cuando el arquitecto francés Anatole de Baudot, siguiendo las corrientes neogóticas imperantes, construye la emblemática iglesia de Saint-Jean de Montmartre (1897-1904), que no deja de ser una estructura de hormigón armado. Los arquitectos adoptan el hormigón armado y le otorgan carta de naturaleza en la construcción. Un gran campo de posibilidades se abre ante los creadores; las estructuras y las formas sólo están limitadas por las tensiones que el nuevo material pueda soportar. El hormigón armado permite disociar los sistemas constructivos: desaparece de esta manera el muro de carga, apareciendo el pilar, mucho más estrecho y menos molesto, permitiéndose la construcción de ménsulas y voladizos, ampliando así el catálogo de soluciones estructurales. El hormigón armado libera al arquitecto de los antiguos imperativos técnicos. Sólo queda por resolver el programa que se beneficiará de la libertad de la innovación. En 1902 August Perret diseñó el edificio de viviendas de la Rue Franklin en París. Utilizó para su construcción hormigón armado pero de manera diferente a su uso en los edificios industriales. Dotó al edificio de una fachada elegante para que el hormigón fuera socialmente aceptado. El edificio fue un éxito rotundo, potenciando el uso del hormigón para este tipo de construcciones.

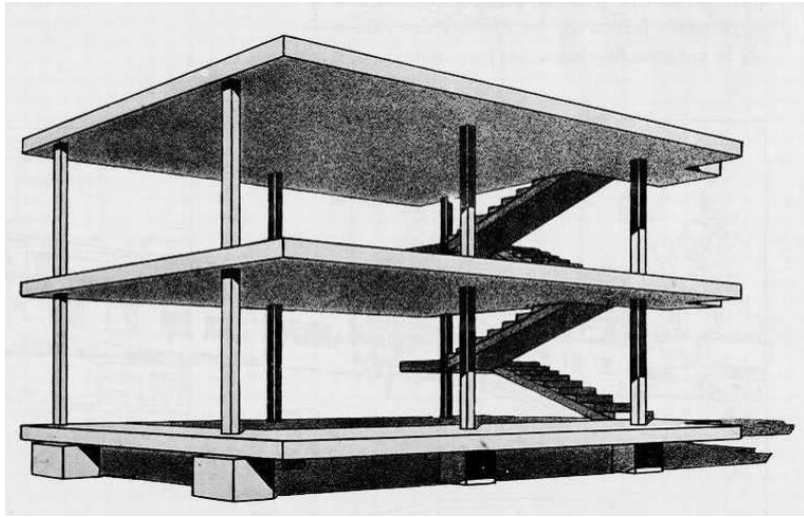


Figura 12. Sistema Casa Domino concebido por Le Corbusier.



Figura 13. Cubierta del Mercado de Abastos en Algeciras.



Figura 14. Cubierta del Hipódromo de la Zarzuela de Eduardo Torroja.

2.6 Generalización de su uso

La etapa de entre guerras convierte al hormigón armado en un material apto e ideal para la expansión de las infraestructuras en Europa. Aprovechando la aparición del hormigón armado, en 1914 Le Corbusier concibió un nuevo sistema de construcción industrializado llamado Casa Domino, pensado para reconstruir Flandes, devastada por la guerra, de manera rápida y económica. La idea era construir una estructura "armazón" que integrara solamente suelos y escaleras, de manera que la zona interior quedara libre, pudiéndose colocar las particiones interiores allí donde fuera necesario sin restricción estructural. En 1923 Le Corbusier publica su manifiesto *Vers une Architecture*, una recopilación de artículos publicados en la revista *L'Esprit Nouveau*, reconociendo la armonía que demuestran las nuevas estructuras de hormigón armado. El uso del hormigón se internacionaliza.

En 1928 Freyssinet presenta la patente definitiva del hormigón pretensado. Desde finales del siglo XIX se había estado estudiando esta posibilidad para dotar de mayor resistencia al hormigón armado. El mérito de Freyssinet fue entender el mecanismo de la fluencia del hormigón, necesario para el diseño del hormigón pretensado.

En este punto, no podemos dejar de nombrar el excelente uso del material por parte de tres grandes personalidades: Eduardo Torroja Miret, Pier Luigi Nervi y Felix Candela. Hablaremos solo del primero y de algunas de sus obras.

La cubierta del Mercado de Abastos en Algeciras (1935) está compuesta de una gran cúpula central con 8 pequeñas marquesinas cilíndricas

en sus extremos. Dispone de un espesor de apenas 9 cm salvando una distancia de 45 metros. Utiliza un anillo tensor formado por cables de acero para conseguir este hito. Esta cúpula fue la más grande de la historia durante 30 años.

Otro gran ejemplo es el Hipódromo de la Zarzuela (ca. 1941) donde emplea el hormigón como una fina lámina que cubre de manera sensible las tribunas.

Desde el principio del siglo XX hasta bien entrados los años ochenta, el hormigón que se ha utilizado ha sido un material muy similar en todas partes. Lógicamente existían diferencias de dosificación, pero las propiedades intrínsecas del hormigón puesto en obra eran muy parecidas y constantes. La gran revolución se está librando actualmente, y comenzó en la década de 1980.

En la actualidad el hormigón es un material programable. Es posible actuar sobre cuatro parámetros que conforman las cualidades de un hormigón: la consistencia y la trabajabilidad, la durabilidad, sus propiedades mecánicas y, finalmente, su aspecto exterior. Sobre la consistencia y la trabajabilidad se han conseguido hormigones autocompactantes y autonivelantes. La durabilidad del hormigón es hoy en día uno de los factores más importantes a modificar. En los últimos años, la durabilidad del material contra los agentes exteriores ha sido incrementada de manera exponencial. En cuanto a las propiedades mecánicas, se ha conseguido pasar de una resistencia de 30 Mpa a resistencias medias de 100 Mpa. Además se ha conseguido mejorar su aspecto gracias al control de factores como la retracción y la fisuración.



Figura 15 Fachada realizada con HUAC en Nueva York.

3. HORMIGÓN DE ULTRA ALTA CAPACIDAD

Uno de los avances más recientes en el mundo del hormigón es el Hormigón de Ultra Alta Capacidad (HUAC en español y UHPC en inglés). Se trata de un hormigón con unas características especiales que iremos comentando a lo largo del

capítulo. Este material ofrece nuevas ventajas sobre los hormigones tradicionales destacando una resistencia superior a 100 MPa a compresión, una durabilidad excepcional y una ductilidad propia del acero.

3.1 Introducción y descubrimiento.

Gracias a la gran demanda de infraestructuras en el periodo de la Guerra Fría (ca. 1945-1991) poco a poco los ingenieros fueron demandando un material que tuviera una resistencia mayor para poder realizar infraestructuras más ambiciosas, ya que el hormigón tradicional cuenta solamente con una resistencia aproximada de entre 20 y 40 MPa a compresión. En dicho periodo se fue desarrollando el predecesor del material que nos ocupa, el Hormigón de Alta Capacidad (HAC). Su éxito reside en que los materiales que se emplean para fabricarlo son exactamente los mismos que los utilizados en el hormigón tradicional, necesitando únicamente la adición de superplastificantes (en los primeros HAC, posteriormente se añadirían otros materiales para conseguir mejores características). No podemos hablar del HAC sin explicar detenidamente los superplastificantes ya que éstos son la clave de todas sus características. Se trata de un aditivo descubierto en los años 60 realizado mediante un polímero que actúa

evitando la segregación de las partículas de grava y arena, mejorando su fluidez. Hace posible reducir la relación agua cemento para aumentar drásticamente la resistencia del hormigón sin afectar a su trabajabilidad. Esto permite seguir utilizando toda la tecnología, maquinaria y métodos de puesta en obra del hormigón tradicional. De este descubrimiento también nace el hormigón autocompactante, que cuenta con un uso muy amplio actualmente.

En los años 80, se empezaron los experimentos de lo que finalmente sería el Hormigón de Ultra Alta Capacidad (HUAC en español UHPC en inglés). Se empezó a experimentar con otros aditivos que, junto con los superplastificantes, mejoran la resistencia final del hormigón.

En esencia, para conseguir un hormigón cada vez más resistente tienen que suceder que los materiales sean más finos, que la cantidad de agua utilizada sea cada vez menor y que la cantidad de oclusiones de aire y oquedades tienda al mínimo.

	Hormigón (kg/m ³)	HUAC (kg/m ³)
Árido grueso	1032	-
Árido fino	847	1020
Cemento	356	720
Humo de sílice	-	230
Cuarzo molido	-	210
Fibras de acero	-	160
Agua	178	110
Superplastificante	-	30
Acelerantes	-	30
Relación agua cemento	0,5	0,15

Figura 16. Dosificaciones típicas del hormigón tradicional y el Hormigón de Ultra Alta Capacidad.

3.2 Composición típica del Hormigón de Ultra Alta Capacidad

El HUAC tiene una dosificación típica que puede modificarse para conseguir diferentes propiedades. Aquí exponemos la dosificación canónica.

- **Arena fina.** 1020 kg/m³ y un porcentaje en peso del 41%. Tiene que tener un tamaño de entre 150 y 600 micrómetros, siendo éste el material granular más grande dentro de la mezcla.
- **Cemento Portland.** 720 kg/m³ y un porcentaje en peso del 28%. Tiene un tamaño medio de 15 micrómetros.
- **Humo de sílice.** 230 kg/m³ y un porcentaje en peso del 9. Tamaño medio menor de 1 micrómetro.
- **Cuarzo molido.** 210 kg/m³ y un porcentaje en peso del 8,7%. Tamaño medio de 10 micrómetros.
- **Fibras de acero.** 160 kg/m³ y un porcentaje en peso del 6%. Tienen unas dimensiones medias de 13 mm de largo y 0,2 mm de radio. Es el material más grande de toda la mezcla.
- **Agua.** 110 kg/m³ y un porcentaje en peso del 4,7%.
- **Superplastificante.** 30 kg/m³ y un porcentaje en peso del 1,3%.
- **Acelerantes.** 30 kg/m³ y un porcentaje en peso del 1,3%.

3.3 Materiales

Arena fina. Se trata del conjunto de partículas que es resultado de la desintegración natural de las rocas o también de la trituración mediante maquinaria. Los granos obtenidos deben de tener dimensiones inferiores a los 0,6 milímetros y no contener partículas alargadas. Se ha de mantener al mínimo las impurezas como grumos de arcilla, materiales orgánicos, álcalis, mica, etc. La sílice o dióxido de silicio es uno de los principales componentes de la arena. En general, los áridos naturales de forma más o menos redondeada dan hormigones más dóciles y de más fácil colocación. La propiedad fundamental de la arena fina en el HUAC es su capacidad para reducir las fisuras que aparecen en la mezcla al endurecerse así como material de relleno.

Cemento Portland. Se trata de un conglomerante o cemento hidráulico que, cuando se mezcla con áridos, agua y fibras de acero, tiene la propiedad de conformar una masa pétreo resistente. Se utiliza como aglomerante ya que como cemento hidráulico tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, al reaccionar químicamente con ella para formar un material de buenas propiedades aglutinantes. Se obtiene mediante el calentamiento hasta 1300 °C de una mezcla de minerales finamente molidos, formados por piedra caliza y arcilla. El calentamiento se efectúa en hornos giratorios levemente inclinados de 3 metros de diámetro y 100 metros de largo. El material que se obtiene es denominado “clinker” y se muele finamente, adicionándole de un 2% a 3% de yeso para evitar que fragüe instantáneamente. Es muy importante

que contenga la menor cantidad de impurezas para que el HUAC no tenga pérdidas de resistencia.

Humo de sílice. Se trata de un material puzolánico muy fino, obtenido como subproducto en la producción de silicio y ferrosilicio en los altos hornos de arco eléctrico. Con la incorporación controlada de este aditivo se consiguen resistencias de casi 100 MPa, multiplicando por 3 la resistencia tradicional del hormigón. Las partículas de humo de sílice son muy pequeñas y actúan de “relleno” en los espacios vacíos del hormigón, provocando mejoras en su adherencia, compacidad y fluidez. Además también mejora la impermeabilidad frente a agentes externos, aumentando la protección de las armaduras -en caso de utilizarlas- y mejorando drásticamente la durabilidad del hormigón. Otra propiedad interesante es que se incrementa la resistencia al ataque de los sulfatos y cloruros reduciendo la posibilidad de este tipo de ataques a casi 0, lo que se traduce en una mayor durabilidad del hormigón, sobretodo en climas extremos, donde éste se someta a ciclos de hielo-deshielo. Este fue un paso de gigante para la consecución de hormigones con gran resistencia al agua marina para su uso en la creciente industria de las plantas petrolíferas en mar abierto que demandaban unos hormigones con estas prestaciones.

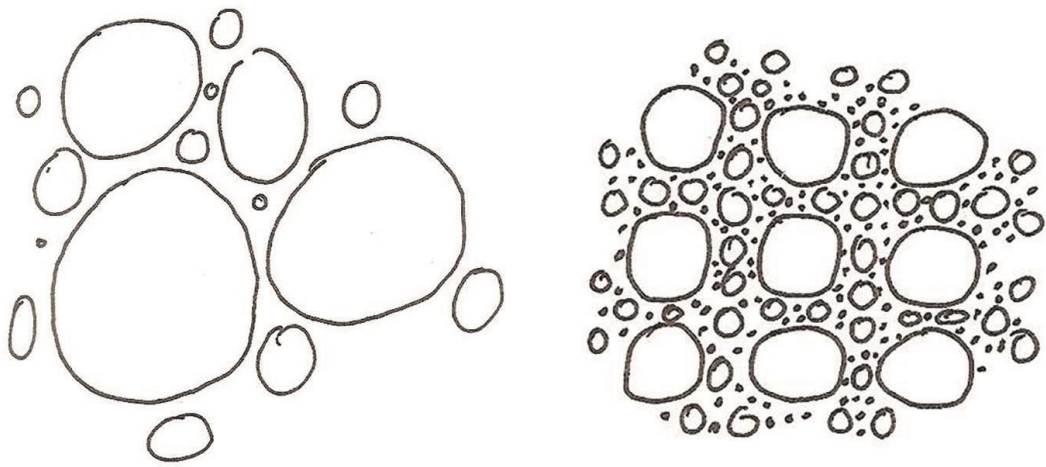


Figura 17. Estructura interna del hormigón tradicional comparada con la del HUAC.

Cuarzo molido. Este aditivo consigue un aumento de la densidad del hormigón (*fig 17*) mediante la teoría del empaquetado de las partículas⁶. Este mineral tiene una dureza de 7 en la escala de Mohs. Produce un aumento de la cohesión de las partículas que forman el HUAC en más de un 10%, lo que se traduce en un menor uso de cemento y, por consiguiente, una bajada del ratio agua-cemento. Se suele reemplazar aproximadamente entre un 10% y un 20% del cemento por cuarzo molido obteniendo un aumento de la resistencia del hormigón entre un 15% y un 25%.

Microfibras de acero. Se añaden fibras en un porcentaje de entre 0,1% al 6% del peso total del hormigón para mejorar su débil resistencia a flexión, tracción y torsión. Gracias a estas fibras, se reduce la presencia de grandes fisuras, que pasan a ser éstas de tamaño menor a 0,1 mm, teniendo así poca importancia en cuanto a la pérdida de la impermeabilidad. A mayor porcentaje de fibras de acero menor será la prevalencia de fisuras, por lo cual será más impermeable. Las fibras tienen un tamaño aproximado de 12,7 mm de longitud y un diámetro de 0,2 mm, con una tensión de servicio de 2600 MPa y una tensión última de rotura de 3200 MPa. Es importante indicar que la dirección de las fibras suele ser la de vertido del HUAC por lo que es importante saber a qué tensiones va a estar sometido para una correcta orientación de las fibras aunque generalmente no tiene importancia la orientación de las fibras superficiales pero si las internas. La correcta

orientación de las fibras ayuda a tener una resistencia superior.

Agua. Cumple una doble función en el hormigón, por un lado participa en la reacción de hidratación del cemento y por otro confiere al hormigón el grado de trabajabilidad necesaria para una correcta puesta en obra. En los hormigones tradicionales, la cantidad de agua de amasado debe limitarse al mínimo necesario para conferirle a la pasta la trabajabilidad requerida. En el HUAC, esta función esta compartida entre el agua y los superplastificantes, lo que permite tener una relación agua-cemento menor, evitando los problemas derivados de su exceso tales como la bajada de resistencias y la capilaridad, que pone en riesgo las armaduras y la resistencia del hormigón al agua y a las heladas. Para el HUAC, se intentará una relación agua-cemento de entre 0,13 a 0,20. El agua deberá ser limpia, no deberá contener residuos de aceites, ácidos, sulfatos de magnesio, sodio, calcio, sales, limos, materias orgánicas u otras sustancias dañinas y estará exenta de arcilla, lodo y algas.

Superplastificantes. Los superplastificantes, conocidos también como reductores de agua, son polímeros añadidos al hormigón para mejorar su manejabilidad al reducir la cantidad de agua en la mezcla en cantidades superiores al 30%. Hicieron su aparición en los años 70 debido a la necesidad de reducir las secciones de los elementos portantes tanto en puentes como en rascacielos. La resistencia del hormigón es inversamente proporcional a la relación agua-cemento ya que a menor agua, menor porosidad y mayor resistencia. Con el fin de producir hormigones más resistentes, se reduce la

⁶ Esta teoría defiende que cuanto más pequeñas son las partículas que formen un compuesto, éstas tenderán a ir cerrando y ocupando todas las zonas vacías aumentando por lo tanto la cohesión, la densidad y la resistencia de dicho compuesto.

cantidad de agua añadida, pero se obtienen mezclas de difícil manejo, haciendo necesario el uso de los aditivos superplastificantes. Este tipo de polímeros se utilizan para evitar la segregación de los materiales y para mejorar la fluidez de la mezcla. Se suele añadir entre el 0,6% y el 2% de superplastificante en la mezcla, dependiendo de la resistencia deseada. Cabe apuntar que una cantidad excesiva de superplastificante puede dar lugar a que el hormigón presente segregación -que es la separación de los componentes una vez amasados, provocando que la mezcla de hormigón fresco presente una distribución de sus partículas no uniforme-. La segregación produce muchos problemas a evitar tanto estéticos -superficies mal acabadas y coque-

como mecánicos -pérdida de durabilidad y resistencia-.

Acelerantes. Los acelerantes incrementan la velocidad de endurecimiento del hormigón. El principal material usado para este efecto es el cloruro cálcico. Hay que tener cuidado ya que el exceso podría causar corrosión a las armaduras, si las hubiera. El cloruro cálcico incrementa la retracción del hormigón y su fluencia, sin embargo, aumenta la resistencia a la abrasión de forma permanente. Existen otros acelerantes con menos efectos secundarios como los aluminatos, sales de aluminio, silicatos, carbonatos... etc., siendo cada uno de ellos adecuado para acelerar o bien el fraguado o bien la resistencia.



Figura 17. Prueba de resistencia a una plancha de HUAC de 3 cm de espesor sin refuerzo pasivo.

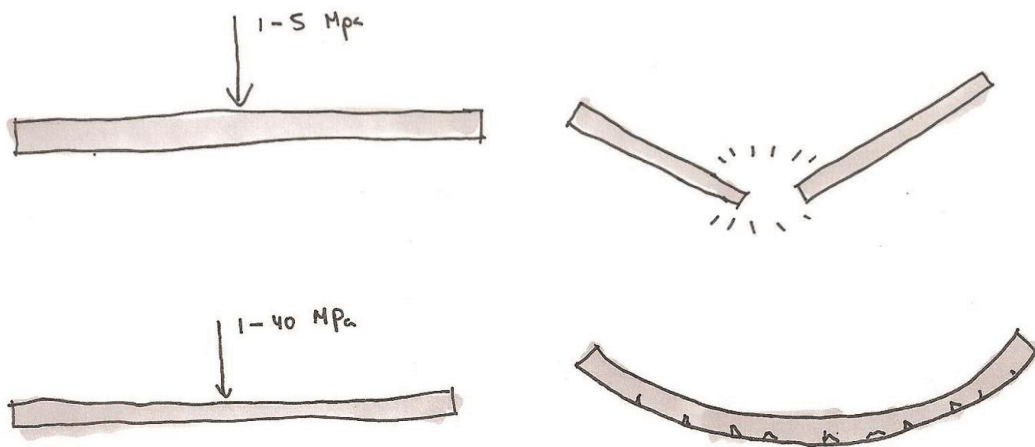


Figura 18. Resistencia a flexión y ductilidad de una pieza de hormigón tradicional y una de HUAC.

3.4 Propiedades

Este nuevo material mejora las características de los hormigones tradicionales en todos los campos, ofreciendo nuevas posibilidades.

Resistencia: Es la característica principal de este nuevo hormigón. Los hormigones tradicionales tienen un espectro de resistencia a compresión entre los 20 MPa y los 50 MPa. El HUAC tiene una resistencia mínima de 100 MPa, llegando incluso a los 230 MPa en condiciones óptimas de temperatura, curado y pureza de materiales (estos valores se consiguen únicamente prefabricando el material). Esto permite la reducción de los elementos en hormigón para la misma resistencia.

La resistencia a tracción y a flexión también se ven mejoradas. Normalmente, la resistencia a tracción y a flexión de un hormigón tradicional llega a ser hasta un 10% de la resistencia a compresión. Esto supone entre 2 MPa a 5 MPa tanto a tracción como a compresión. El HUAC mejora estos valores entre 4 y 10 veces, con valores de hasta 20,4 MPa a tracción y 48 MPa a flexión con un módulo de elasticidad de hasta 65 GPa. Además, cuanto más fino sea, más aguanta a tracción y flexión, permitiendo la creación de finas láminas de hormigón. Estos valores permiten la realización de estructuras más atrevidas, esbeltas y dinámicas, lejos del tradicional monolitismo del hormigón, pero manteniendo todas las ventajas de ser un material pétreo.

Trabajabilidad: La trabajabilidad del material se ve alterada debido a su baja relación agua-cemento y a la adición de las fibras de acero. Cuanto más largas sean estas fibras, menos

porcentaje en peso es admitido ya que empeora la trabajabilidad. Gracias a la adición de superplastificantes este problema se erradica permitiendo una trabajabilidad similar a la del hormigón tradicional y la utilización de la misma maquinaria, evitando así el desembolso para una maquinaria específica. Se admite entre el 0,6% y el 2% en peso ya que a porcentajes mayores, la resistencia disminuye. Además, si se desea una trabajabilidad máxima se puede añadir nanosílica⁷ en un porcentaje de hasta el 1% del peso.

Ductilidad: Se observa un aumento de la ductilidad del HUAC respecto a los hormigones tradicionales. Gracias a la adición de fibras de acero dispuestas de manera aleatoria en la mezcla, evitamos que la rotura del hormigón sea de forma súbita. En el HUAC la rotura del hormigón se produce de forma escalonada y progresiva, apareciendo grietas cada vez mayores (normalmente entre 0,1 y 0,5 mm) permitiendo una mayor seguridad en todo tipo de estructuras ante cargas puntuales colocadas en sitios críticos de la estructura, ante acciones sísmicas, etc., permitiendo su reparación si fuera necesario.

⁷ La nanosílica es un nanoaditivo, a base de sílice con partículas esféricas de alta pureza de tamaño nanométrico, con una distribución de tamaños idónea. Su elevado poder de fluidificación y su capacidad de favorecer la evolución de resistencias, lo hace ideal para su empleo en el HUAC. La nanosílice tiene gran poder plastificante y reductor de agua y permeabilidad nula o casi nula, por lo que aumenta la durabilidad del hormigón, evita la segregación y la excesiva exudación y no produce retrasos de fraguado. Las reacciones químicas en el hormigón convierten las nanopartículas de sílice en nanopartículas de cemento, provocando un aumento de la resistencia del mismo. Además, se consigue reducir en un 12% el empleo de materiales, con lo que se obtiene un beneficio económico considerable.

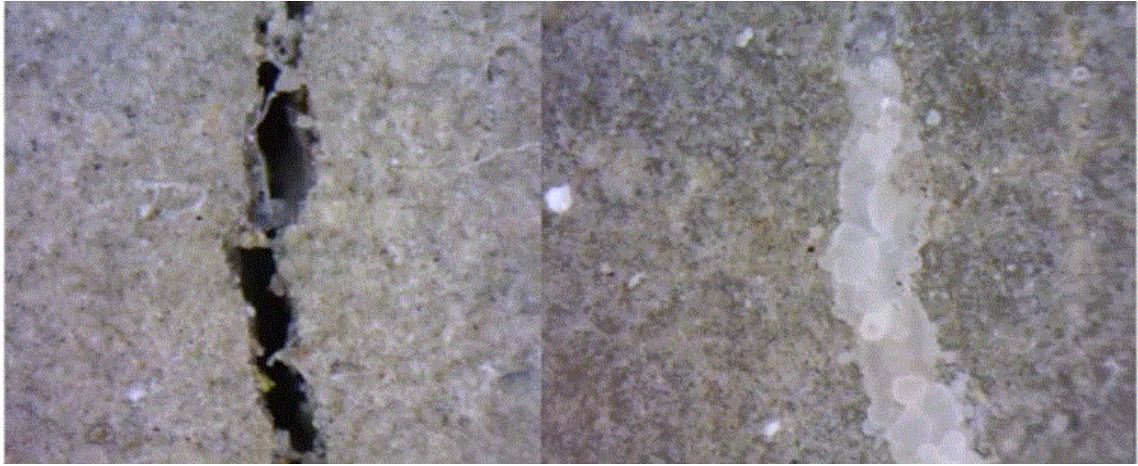


Figura 19. Grieta autoreprada en un elemento de HUAC.

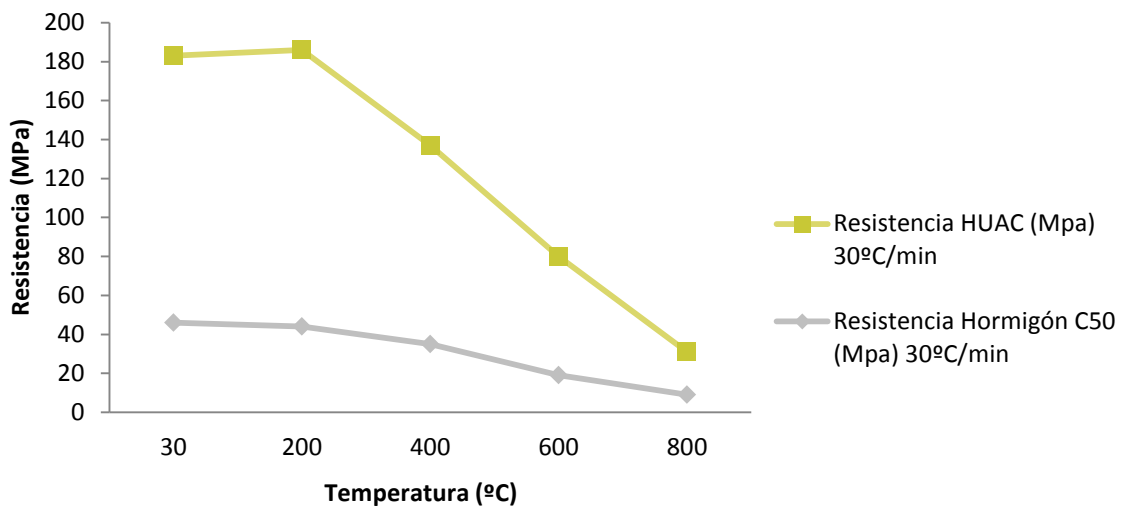


Figura 20. Pérdida de resistencia del HUAC y del hormigón C50 al ser sometidos al fuego.

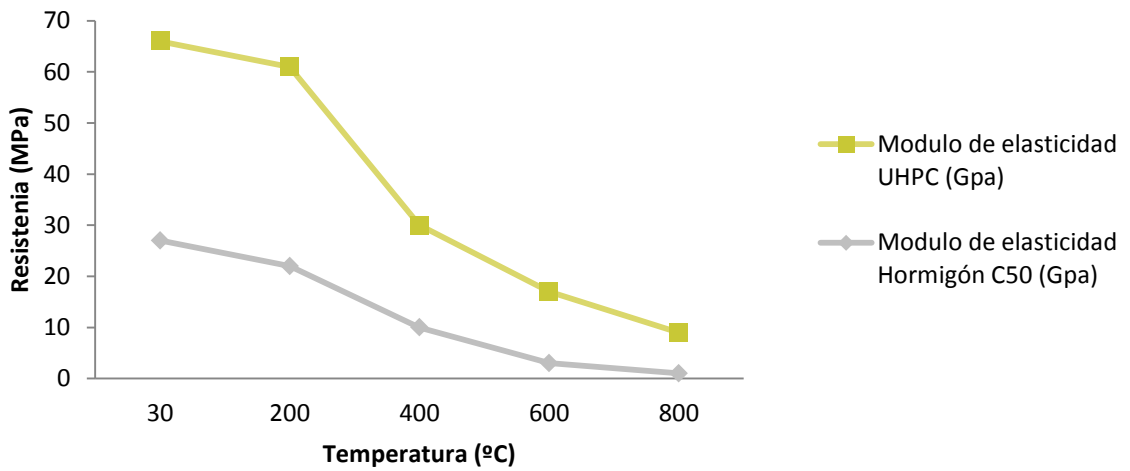


Figura 21. Pérdida de elasticidad del HUAC y del hormigón C50 al ser sometidos al fuego.

Autoreparabilidad: El HUAC tiene un contenido en cemento de aproximadamente el doble que el hormigón tradicional con una relación agua-cemento hasta 4 veces inferior. Esto produce que no todo el cemento se hidrate durante el fraguado del hormigón, por lo que todo el cemento no hidratado se comporta como un agregado más. Cuando el HUAC entra en carga y flexa, pueden aparecer grietas de diferente tamaño, hasta un máximo de 0,5 mm, por las que posteriormente puede penetrar el agua para empezar la corrosión de las microfibras de acero que llevaría al final a la pérdida de resistencia y posterior fallo de la estructura. En el HUAC esto no ocurre puesto que todo el cemento no hidratado cuando se puso en obra ahora se activa y rellena la grieta por completo, recuperando toda la resistencia perdida. Puede ocurrir que las microfibras de acero superficiales queden corroídas pero al no ser continuas, la corrosión solo afectaría a esas fibras en concreto y no a las fibras adyacentes. El problema pasa de ser estructural a un mero problema estético.

Penetración de cloruros: La inclusión en la mezcla de humo de sílice mejora la resistencia a la penetración de los cloruros. En el HUAC la penetración de los cloruros suele concentrarse en los 3 primeros milímetros de espesor del material y a partir de ahí la penetración es ínfima o inexistente, pasando de una penetración en masa del 0,44% en un hormigón tradicional en la superficie a un 0,01% a partir de los 3 mm. En las pruebas con cargas eléctricas se obtiene una permeabilidad de entre 10-400 culombios, siendo ésta una permeabilidad casi nula

Resistencia a las heladas: El HUAC se trata de un material prácticamente estanco. En los

hormigones tradicionales las heladas van destruyendo poco a poco el hormigón debido a su mayor porosidad. Sin embargo el HUAC tiene una porosidad media del 3,5% siendo además dichos poros al menos un orden de magnitud menor en diámetro que en el hormigón tradicional. Esto permite que exista una resistencia a las heladas de prácticamente el 100%. Además, según estudios consultados, los ciclos de congelación-descongelación a largo plazo aumentan la resistencia del HUAC debido a la hidratación de la fracción de cemento no hidratado durante el fraguado. Existen unas pérdidas máximas de masa menores a 10 gramos/m³ después de 300 ciclos de hielo-deshielo. Concluimos que las heladas pueden llegar a ser hasta beneficiosas para este material.

Retracción: El HUAC tiene una retracción inicial mayor al hormigón tradicional debido a que, al tener mayor contenido en cemento, la reacción es más energética y la temperatura media durante el fraguado es mayor. Pero también debido a la baja porosidad, a la baja relación agua/cemento y a la mayor densidad del HUAC, la contracción autógena es nula o casi nula.

Esta retracción puede ser eliminada completamente si el material se prefabrica y se le hace fraguar en condiciones controladas.

Resistencia al fuego: El hormigón se trata de un material muy resistente al fuego gracias a su condición pétreo. Sin embargo una de las mejores características que tiene el HUAC, su baja porosidad, es también su mayor enemigo cuando el fuego entra en acción hasta temperaturas de 200°C el material se mantiene totalmente inalterado, incluso aumenta

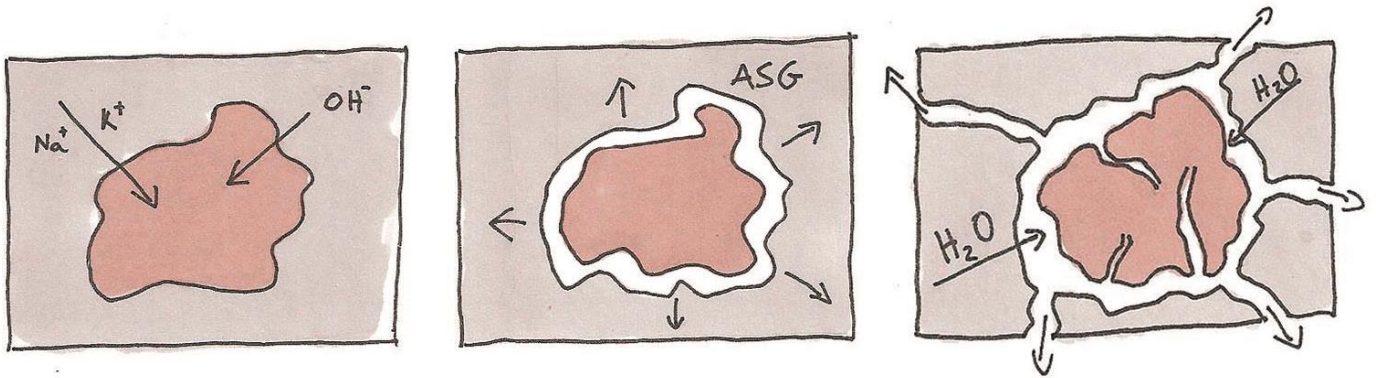


Figura 22. Etapas de la reacción álcali sílice.



Figura 23. Elemento afectado por la relación álcali-sílice.

ligeramente su resistencia, pero a partir de 300°C empiezan a aparecer grietas e incluso desconchones en el material que eventualmente llevan a una pérdida de resistencia poniendo en riesgo la capacidad portante de la estructura. Esto sucede debido a que el HUAC al ser un material muy poco poroso, no deja salir el agua que contiene en forma de vapor al exterior lo que aliviaría las tensiones interiores. Para resolver este problema deben añadirse en la mezcla aproximadamente 2kg/m³ (0,1-0,25% en peso) de fibras de polipropileno de una longitud similar a la de las fibras de acero. Este sistema permite al HUAC alcanzar temperaturas de hasta 500°C sin ningún daño estructural ni superficial y sólo a partir de 500°C se empiezan a apreciar ciertas grietas pero manteniendo buena parte de su capacidad portante. Las fibras de polipropileno durante el incendio se derriten, ocupando menos volumen que su volumen inicial y crean espacios vacíos donde el agua ocluida, que se ha convertido ya en vapor y que no puede escapar debido a la baja porosidad y a la impermeabilidad del HUAC, pueda expandirse sin provocar tensiones inadmisibles dentro del HUAC. Además estas pequeñas cavidades formadas dentro del HUAC permiten ventilar y drenar los líquidos y el vapor evitando puntos de excesiva tensión que podrían derivar en explosiones de la pieza. Gracias a este método evitamos las grietas y la explosión de la pieza produciendo una estructura muy segura que resistiría mucho tiempo expuesta a altas temperaturas que y permita las labores de los bomberos durante más tiempo salvando muchas más vidas.

Porosidad: El HUAC está compuesto por materiales muy pequeños por lo que los espacios entre los mismo son mínimos.

Por ello la porosidad media del HUAC varía entre el 2-6%, estando además estos poros no interconectados. Todo lo anterior provoca que se alcancen niveles de impermeabilidad de prácticamente el 100%.

Reacción álcali-sílice: Uno de los grandes problemas del hormigón tradicional es su durabilidad cuando está expuesto a los elementos. A los pocos años desde su puesta en obra, empiezan a aparecer una serie de grietas en la superficie del hormigón que en un principio son solo un mero problema estético pero con el paso de los años se convierte en un problema de resistencia y durabilidad.

Este fenómeno aparece cuando el silicio reactivo presente en el hormigón se hidrata con iones OH⁻ que penetran a través de los poros y provocan que exista una pequeña capa de gel álcali-sílice alrededor de este silicio reactivo que posteriormente se expande debido a que absorbe el agua de su entorno, apareciendo grietas en la superficie del hormigón por la cual entra más agua agravándose el proceso que continúa y se acelera (*fig 22*).

En el hormigón tradicional, este índice de expansión llega a valores superiores a 0,60% a los 12 meses mientras que en el HUAC tenemos niveles de expansión menores a 0,01% a lo largo de toda la vida útil del material. Se considera que un material es inerte a este efecto cuando arroja valores de menos del 0,10% a los 12 meses. Podemos concluir que la durabilidad del HUAC es muy alta gracias a que rara vez se producirán grietas por este método.

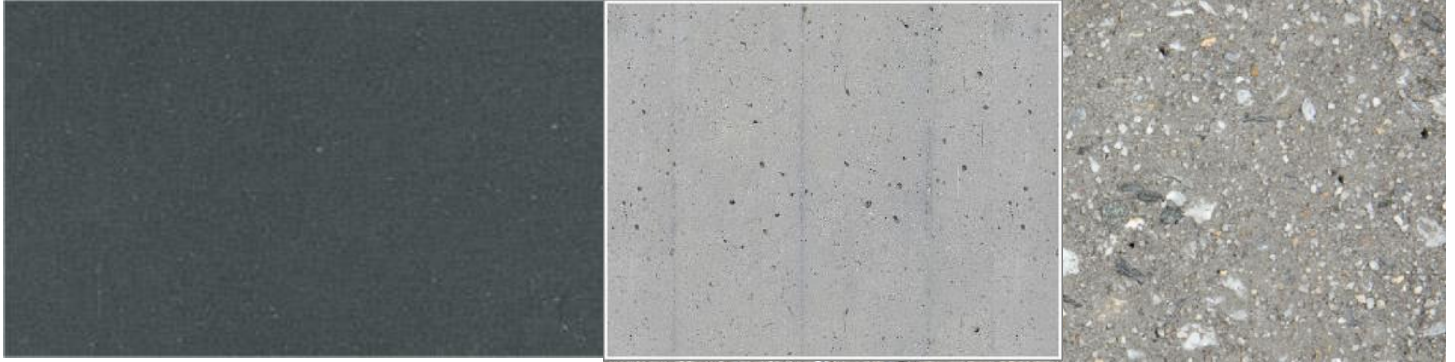


Figura 24: Acabados de un HUAC (izquierda) y de un hormigón tradicional (centro y derecha).

	Hormigón tradicional	HUAC
Resistencia a compresión	20-50 MPa	100-230 MPa
Resistencia a flexión	2-5 MPa	10-48 MPa
Resistencia a tracción	2-5 MPa	10-20,5 MPa
Módulo de elasticidad	15-30 GPa	55-65 GPa
Resistencia a las heladas (300 ciclos)	50-80%	~100%
Retracción post fraguado	<1000 μm	<10 μm
Porosidad	20-25%	2-6%
Resistencia a la abrasión (ASTM C944)	2-5%	0,02-0,30%
Penetración de cloruros (migración)	2000-4000 culombios	10-400 culombios
Penetración de cloruros (espesor)	> 1 cm	<3mm
Reacción álcali-silicio (1^o año)	>0,60%	<0,01%

Figura 25. Resumen de las principales propiedades del hormigón tradicional y del HUAC

Acabado: El HUAC tiene un acabado liso con una gran planimetría debido a su característica autocompactante. Posee un color más uniforme que el hormigón tradicional. No se observa ningún tipo de árido grueso en superficie o desconchones. Debido a la adición de las fibras de acero, es posible que cuando el HUAC entre en contacto con los agentes externos, la superficie presente manchas de óxido que en

ningún momento comprometen la resistencia de la pieza ya que al ser discontinuas nunca progresa el óxido hacia el interior pero pueden tener efectos adversos en la estética del edificio. Existen una serie de sellantes y productos limpiadores que solucionan este problema sin mayor dificultad. También puede ser coloreado con una si se desea con la consiguiente pérdida de resistencia.



Figura 26. Puente prefabricado en Eindhoven.

4. APLICACIONES

Este nuevo material abre un gran abanico de posibilidades nuevas en el mundo de la construcción. Este nuevo material nace en los años 80 siendo concebido en principio para usos ingenieriles como respuesta a la necesidad de un nuevo material capaz de mejorar los existentes

para la construcción de nuevas infraestructuras y la reparación de las existentes. En este apartado vamos a poner en valor algunos ejemplos de su uso primero por ingenieros y posteriormente por arquitectos.



Figura 27. Puente peatonal de Sherbrooke en Canadá, vano principal.

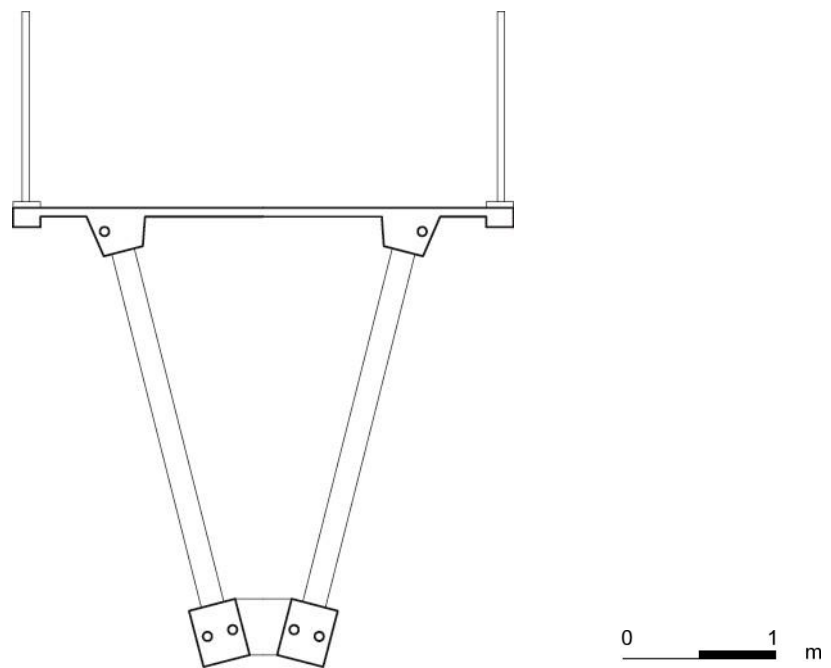


Figura 28. Sección del puente peatonal. Escala 1/50.

4.1 Obra civil

4.1.1 Puente sobre el río Sherbrooke

El primer uso del HUAC se estableció en 1997 cuando la ciudad de Sherbrooke en Canadá concluyó la construcción de su nueva pasarela peatonal que cruza el río Saint François. Se trata de la primera estructura puesta al servicio construida y diseñada específicamente con HUAC. El HUAC utilizado en el puente tiene una resistencia a la compresión de 200 MPa y a la flexión de 40 MPa.

La estructura del puente consiste en una cercha tridimensional siendo el cordón superior el tablero por donde cruza la gente de 3 cm de espesor y 3,3 metros de anchura y los 2

cordones inferiores con dos secciones de 32 cm por 38 cm unidos cada 5 metros con una ligera curvatura para formando un arco estructural que soporta los esfuerzos del puente. Las diagonales de la cercha tridimensional están formadas por tubos metálicos de 15 cm de diámetro rellenos de HUAC. Esta cercha salva 60 metros con una sección de sólo 3,5 metros. El puente está formado por 6 segmentos prefabricados que se ensamblaron in situ antes de la colocación del vano central. Posteriormente dichos segmentos se postesan para que la unión entre ellos sea firme.



Figura 29. Cabina de peaje del puente de Millau, Francia.

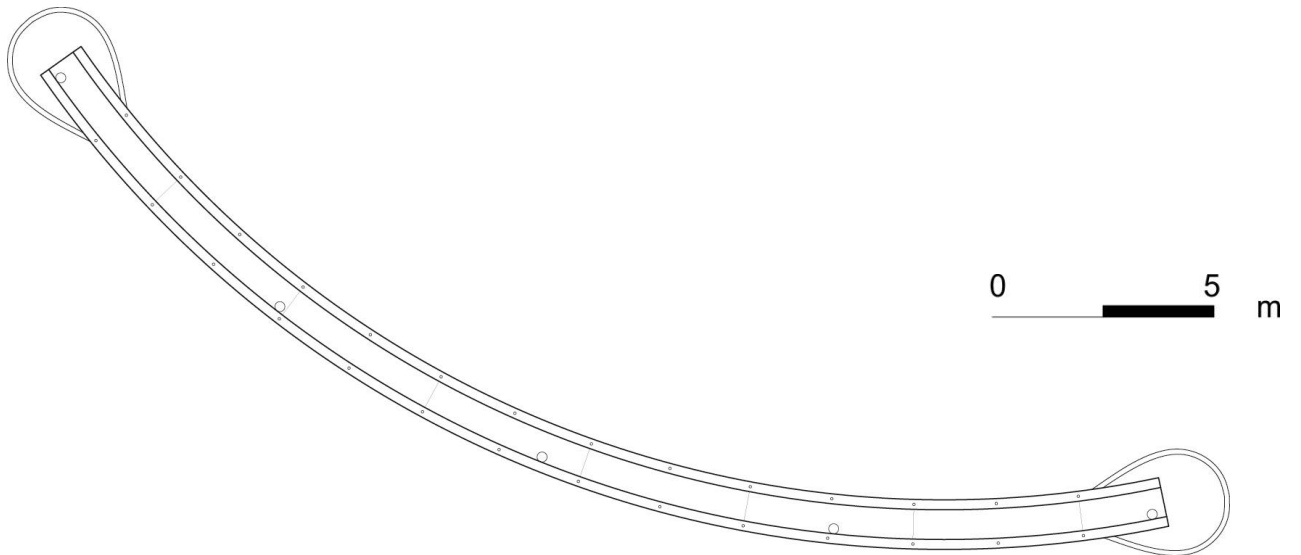


Figura 30. Sección del peaje del puente de Millau. Francia.

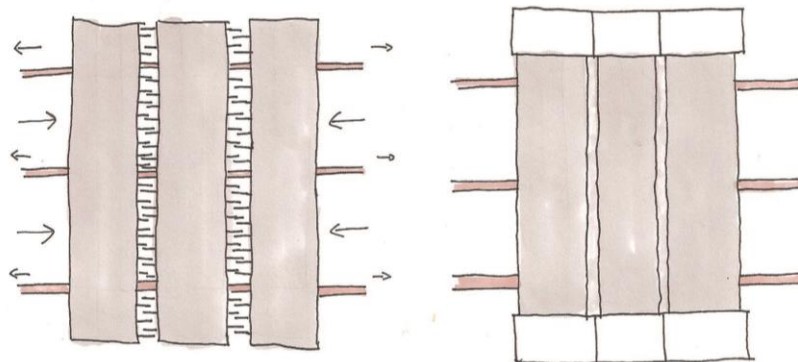


Figura 31. Construcción y montaje de las dovelas.

4.1.2 Cabina de peaje del puente de Millau

En el año 2001 se empieza la construcción del Viaducto de Millau que cruza el río Tarn en Francia. El arquitecto Norman Foster se encarga del diseño del viaducto y de la cabina de peaje. Es en la cabina (2004) donde se utiliza el HUAC como material principal siendo la primera vez que se utiliza este material para hacer una lámina de hormigón. Las 53 dovelas que la forman fueron prefabricadas por la compañía Lafarge, pionera en la fabricación a gran escala del HAUC. La cubierta tiene unas dimensiones de 100 metros de largo y 28 metros de ancho. Cada una de las 53 dovelas consiste en 2 láminas de 10 cm de espesor de HUAC con un relleno de casetones de porexpán produciendo una sección variable de entre 30 y 80 cm. Las 53 dovelas se

conectan entre ellas mediante unos cables pretensados que discurren por el interior para que todas actúen solidarias. Para realizar la unión in situ de las dovelas, éstas disponen una serie de conectores que se unen mediante alambres. Posteriormente se realiza el hormigonado con HUAC in situ para colmatar la brecha. La forma de la lámina recuerda a una hoja de papel helicoidal. Esta lámina está solo sujeta por 4 sets de 6 pilares metálicos circulares separados entre ellos 30 metros. Gracias al poco peso propio de esta lámina, su gran resistencia y el uso de pocos pilares, se consigue una sensación de objeto liviano pero hecho de un material pétreo.



Figura 32, Puente sobre el río Niita en Sakata, Japón.

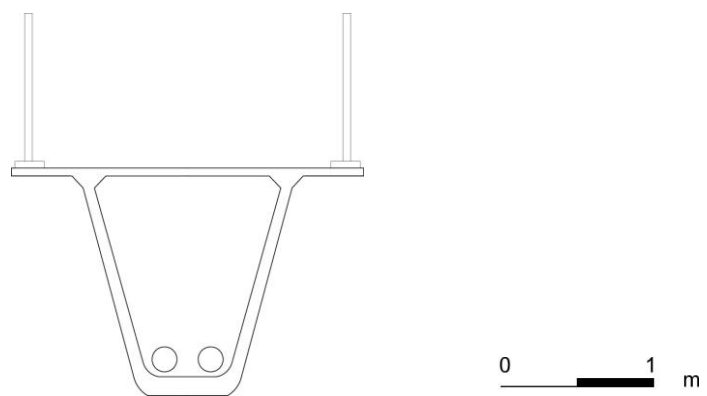


Figura 33. Sección del puente. Escala 1/50.

4.1.3 Puente de Sakata-Mirai

Japón decidió probar también este material en una pasarela peatonal construida en el año 2002 que cruza el río Niita en Sakata, ciudad costera situada al norte de Japón. El puente se compone de dovelas prefabricadas de sección variable con forma de U cerrada y un espesor de dovela de 5 cm en la parte superior y 8 cm en los laterales siendo la luz del puente de 50 m. Las diferentes dovelas se unen entre ellas mediante 2 cables que discurren por el interior de las dovelas, que pretensan la estructura. Este puente cuenta con una resistencia a compresión de 220 MPa y 43 MPa de resistencia a flexión. Como ya ocurriera en el caso anterior, la compañía Lafarge fue la encargada de realizar el hormigón utilizado en este puente. Aquí el HUAC iba a tener su primera gran prueba de fuego puesto que el puente estaría expuesto a corrosivos vientos de que azotan la zona en invierno, la salinidad del mar a escasos kilómetros del puente, la penetración clorhídrica debido a las intensas lluvias...etc que probarán si sus excepcionales características teóricas en cuanto a resistencia se cumplen o son solo logros de laboratorio. Gracias a la gran resistencia del material y a su enorme ductilidad gracias a las fibras de acero, es innecesaria la colocación de armaduras. Desde que se

construyó hasta el día de hoy se han ido realizando diferentes pruebas de durabilidad que han ido confirmando las expectativas; Pasados 14 años desde su ejecución, la penetración clorhídrica es de 2 mm desde la superficie⁸ con un coeficiente de difusión⁹ de 0,0019 cm²/año, los ciclos de congelación-descongelación no han producido desconchones, zonas afectadas ni disgregaciones y no ha habido ningún tipo de evidencia de reacción álcali-sílice. El único inconveniente encontrado son pequeños puntos de oxidación que corresponden a las fibras de acero en superficie no visibles a simple vista afectando mínimamente a la estética del puente.

A pesar de que el coste del HUAC es unas 4 o 5 veces superior al hormigón tradicional, su uso permitió la reducción del material –y por tanto el peso del puente- hasta en un 80%, por lo que la cimentación fue mucho más barata. Al final de todo el proceso se produjo un ahorro de un 10% respecto a su equivalente en hormigón tradicional

⁸ En el laboratorio se indica que esta penetración es menor a 3 mm.

⁹ En un hormigón normal, este valor se dispara hasta 0,14 cm²/año.



Figura 34. Puente peatonal en Gärtenplatz. Kassel, Alemania.

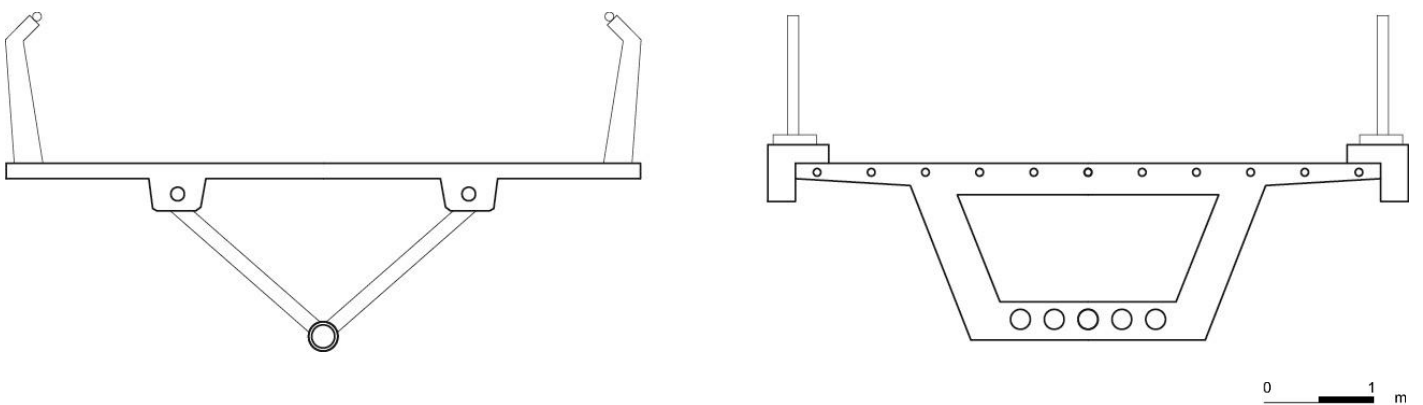


Figura 35. Comparación de las secciones propuestas para el puente. HUAC a la izquierda, hormigón derecha. Escala 1/50.

4.1.4 Puente de Kassel

En el año 2007 en Kassel, Alemania, se construyó el primer puente que utilizaba el sistema híbrido HUAC-acero, el puente Gärtnerplatz. El puente cruza el río Fulda y tiene una longitud de 133 metros en total con una luz máxima, que salva el río, de 36 metros. El tablero del puente se realiza en HUAC y actúa tanto de tablero como de cordones superiores de la estructura tridimensional; el cordón inferior y las diagonales se realizan con perfiles tubulares de acero. El tablero tiene un espesor de 8 cm y una

anchura de 5 metros contando con una resistencia de diseño de 165 MPa. Los tableros utilizados fueron prefabricados y posteriormente conectados entre ellos mediante postesado. La experiencia ha resultado satisfactoria pues se ha probado la combinación de estos 2 materiales con éxito probando que cada uno puede hacer su función dentro de la estructura sin problemas. En la figura n, se observa la sección propuesta en hormigón tradicional pretensado que tiene un peso 8 veces mayor.



Figura 36. Estación de metro ligero de Shawnessy.



Figura 37. Molde para la prefabricación de la cubierta.

4.1.5 Estación de Shawnessy

En Canadá, país pionero en el uso de este material, encontramos la estación de metro ligero de Shawnessy, concluida en el año 2004. Cada vez más, los arquitectos están involucrándose más en la creación de infraestructuras ya que pueden aportar un valor añadido a la obra más allá de lo puramente ingenieril. En este caso, el arquitecto Enzo Vicenzino fue el encargado del diseño de esta estación. La estación consta de unos apoyos metálicos sobre los que descansan las 24 cascaras prefabricadas de HUAC de 5,1 metros de ancho por 6 de alto y solo 2 cm de espesor.

Cada una de ellas está diseñada con HUAC, con una resistencia a compresión de 150 MPa y una resistencia a la flexión de 30 MPa, no contando con ningún refuerzo en acero excepto los enganches para ser montada sobre la estructura metálica que la soporta. Para su fabricación se utilizaron moldes en los que se inyectaba el HUAC a alta presión para su perfecta distribución. Se optó por el uso del HUAC debido a que este tipo de estaciones están sometidas a las inclemencias del tiempo pero apenas tienen mantenimiento.



Figura 38: Estación de autobuses de Thais, Francia.

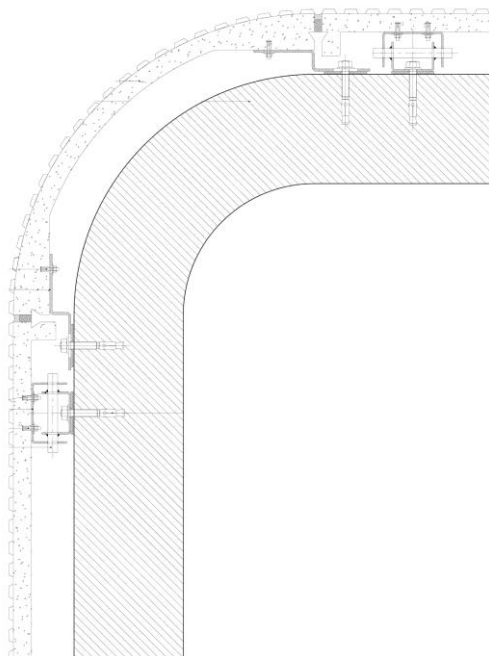


Figura 39. Detalle de las placas de la fachada. Escala 1/50.

4.2 Uso en la arquitectura:

4.2.1 Estación de autobuses de Thais.

En este caso se utiliza la ligereza y resistencia del material para conseguir lo que se proponían. Diseñado por el estudio de arquitectura ECDM en el año 2007 y se encuentra situado en una zona industrial en París, Francia. Los arquitectos querían que el edificio fuera una anomalía en el pavimento, un pliegue que escondiera el edificio. Esto llevó a la necesidad de la creación de una piel que pudiera usarse como pavimento y como fachada para dar una continuidad entre suelo y fachada. La solución consta de 250 paneles

prefabricados de HUAC de 3 cm de espesor que se coloca como pavimento y que posteriormente se dobla para convertirse en fachada. La gran resistencia a la abrasión, la nula permeabilidad al agua, la gran resistencia mecánica y el pequeño espesor, permiten un peso muerto muy bajo en comparación con otras soluciones -lo que lleva a ahorrar en la estructura que ha de portar dicha fachada- y la posibilidad de moldear las piezas a placer para que esa sensación de continuidad entre suelo y fachada se lleve hasta el máximo.

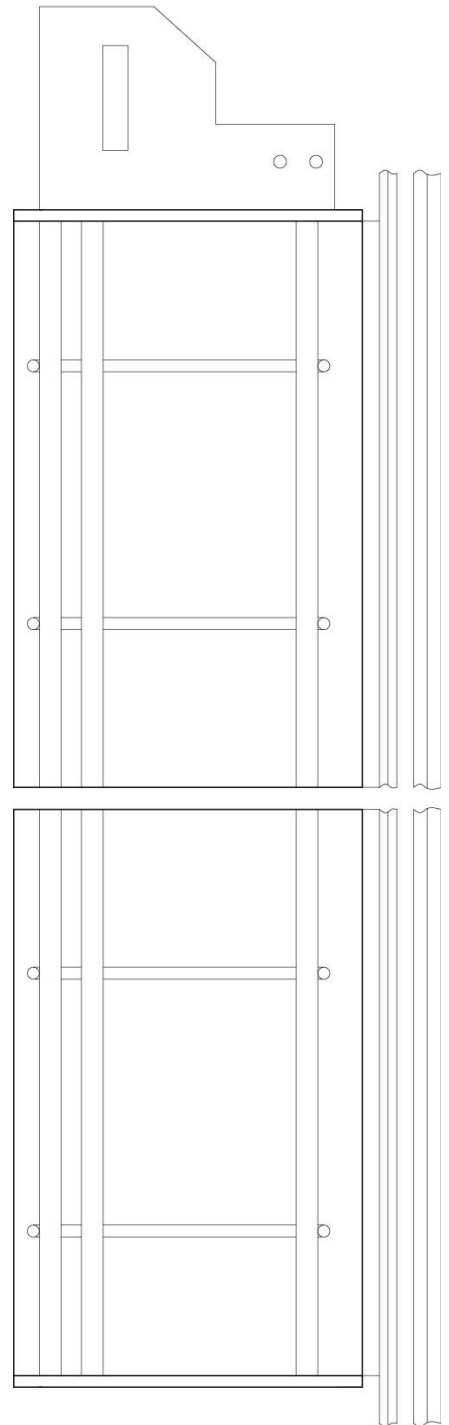
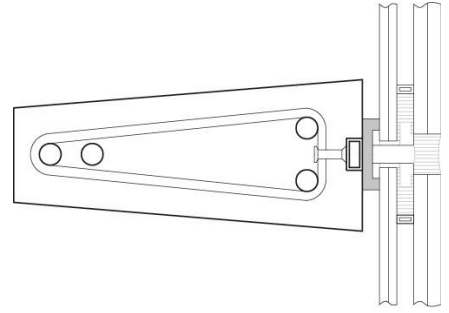


Figura 40. Secciones transversal y vertical de los parteluces.

Escala 1/20.



Figura 41. Museo de arte Pérez, Miami

0 0.5 m

4.2.2 Museo de arte Pérez

En Miami, Estados Unidos, se construyó el Museo de arte Pérez diseñado por Herzog y de Meuron en el año 2013. Se trata de una zona donde los huracanes son muy frecuentes y por tanto las fachadas tienen unos requisitos de resistencia muy elevados. El programa del museo, indicaba que debían existir salas con grandes entradas de luz para diferentes exposiciones por lo que los arquitectos tuvieron que pensar cómo resolver el problema de grandes vanos de vidrio con la mínima estructura posible. Por ello, para la subestructura de la fachada-en concreto los parteluces-, utilizaron HUAC. Los parteluces se fabrican con una forma trapezoidal contando con unas

dimensiones de 4,80 metros de altura con tan solo 8 cm de espesor en la parte estrecha, 13 cm en la parte ancha y 34 cm de profundidad. Gracias a la gran resistencia a la flexión y a su ductilidad, pueden aguantar toda la presión que los vientos de los huracanes absorbiendo las deformaciones y, una vez hayan cesado las inclemencias del tiempo, volver a su posición de reposo trabajando de manera solidaria con los vidrios de la fachada. En este caso, a pesar de la gran resistencia del HUAC *per se*, se necesitó la incorporación de un armado pasivo en el interior de los parteluces debido a su gran esbeltez. Los parteluces se colocan cada 2,30 metros permitiendo unas entradas de luz excepcionales.



Figura 42. Detalle de la nueva fachada de la piscina municipal de Clichy, Francia.

4.2.3 Reforma de la piscina municipal de Clichy

La piscina municipal de Clichy fue construida en 1968 y ha aguantado el paso del tiempo con dignidad pero el ayuntamiento decidió que necesitaba una reforma que no comprometiera la estructura existente ni fuera excesivamente costosa. El ayuntamiento de Clichy encargó a ENIA arquitectos la reforma del edificio. Entre otros trabajos, se reformó la fachada sur mediante la construcción de una protección solar en forma de *brise soleil* ejecutada en HUAC. La nueva segunda piel del edificio es una malla de elementos horizontales y verticales prefabricados de 2,50 metros de anchura por 1 metro de altura

y solo 4 cm de espesor montados formando rectángulos. Gracias al bajo peso propio, fueron instalados directamente sobre la estructura existente evitando sobrecostes en forma de cimentaciones o subestructuras adicionales. La nueva fachada, gracias a su esbeltez, se lee como un elemento ligero que no compromete la integridad ni la dignidad del edificio. Además, gracias a la planimetría de la superficie de estos elementos, reflejan mucho mejor los rayos del sol que si el *brise soleil* hubiera sido realizado en hormigón tradicional lo que permite un ahorro extra en los costes de climatización.



Figura 43. Restauración de la fachada principal del hotel Rialto. Victoria, Canadá.



Figura 44. Uno de los moldes para la prefabricación de las piezas.

4.2.4 Rehabilitación del Hotel Rialto en Victoria

El Hotel Rialto construido en 1911, en Canadá, había perdido su esplendor de épocas pasadas debido al paso del tiempo. Su fachada principal estaba realizada en terracota, un material que se degrada fácilmente en climas lluviosos y con ciclos de congelación y descongelación. Se trata de la primera rehabilitación realizada en HUAC en el mundo y de la experiencia piloto para rehabilitar otros edificios en Victoria con este mismo método. La primera planta de este edificio estaba forrada de terracota que tenía una función meramente formal. La primera opción fue sustituir la terracota dañada por terracota en buen estado pero el problema es el

mantenimiento que requiere este material y sobre todo, el coste y la durabilidad de la misma. Por ello, para resolver todos los problemas planteados se prefabrican en HUAC todas las piedras de la fachada mediante moldes personalizados realizados de manera artesanal. Se obtienen piezas de solamente 3 cm de espesor lo que aligera carga al edificio. El HUAC aparte de todas las características ya mencionadas, aporta una interesante resistencia a los grafitis, gracias a la adición de resinas epoxi, y la opción de fabricarlo del color que se desee de manera homogénea lo que ahorra costes de mantenimiento en pintura.



Figura 45. Rudy Riccotti.

4.3 Rudy Riccotti, el pionero en el uso del HUAC

Rudy Riccotti (Algeria, 1952) es un arquitecto e ingeniero francés que cuenta con una amplia trayectoria en el mundo de la arquitectura ganando en 2006 el Grand Prix de l'Architecture de Francia. Otros arquitectos han utilizado puntualmente el HUAC pero él le ha dado la gran oportunidad para su uso primero en su obra de ingeniería y posteriormente en su obra arquitectónica.

Ha hecho del hormigón su material tanto en su versión tradicional como en la del siglo XXI.

Poco a poco ha evolucionado su arquitectura hacia la expresividad buscando la tensión que solo se encuentra muy cerca de los extremos. Es representante de la generación de arquitectos que combinan creatividad con cultura constructiva. Para ver las aplicaciones del HUAC en la arquitectura, vamos a tomar como ejemplo algunos de sus proyectos a lo largo de su carrera donde va ganando conocimiento y entendimiento de este nuevo material lo que le permite realizar edificaciones más atrevidas



Figura 46. Puente Seonyugyo acabado y durante su construcción.

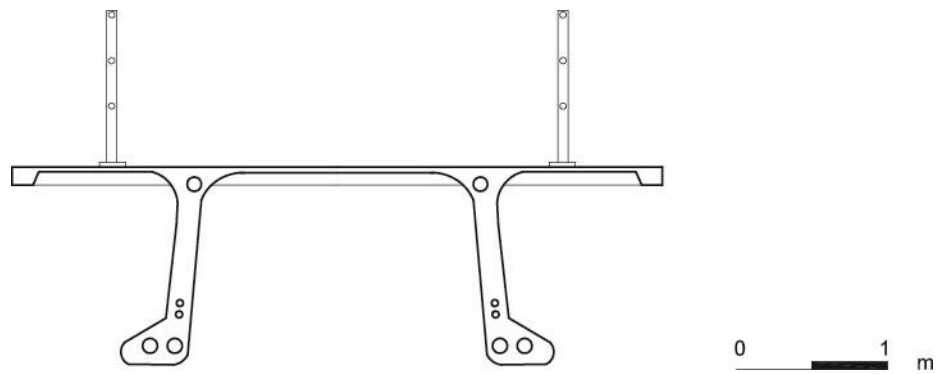


Figura 47. Sección del puente. Escala 1/50.

4.3.1 Pasarela peatonal en Seonyugyo

La primera estructura que diseñó se encuentra en Japón, donde ejecuta el puente Seonyugyo en Seúl, Korea. El puente está formado por un arco central y 2 pasarelas a los laterales. El arco tiene una luz de 120 metros, una anchura de 4,30 metros y una altura de la sección de 1,30 metros. La forma de la sección es una π siendo la anchura en la parte superior es de 3 cm. y de

26 cm. en las partes laterales. El arco se ejecuta completamente en HUAC con una resistencia a compresión de 205 MPa. El arco se divide en 6 secciones prefabricadas que posteriormente se unen mediante el postesado del puente. Gracias al uso del HUAC se redujo hasta en un 70% el uso de material y hasta la fecha los costes de mantenimiento han sido nulos.

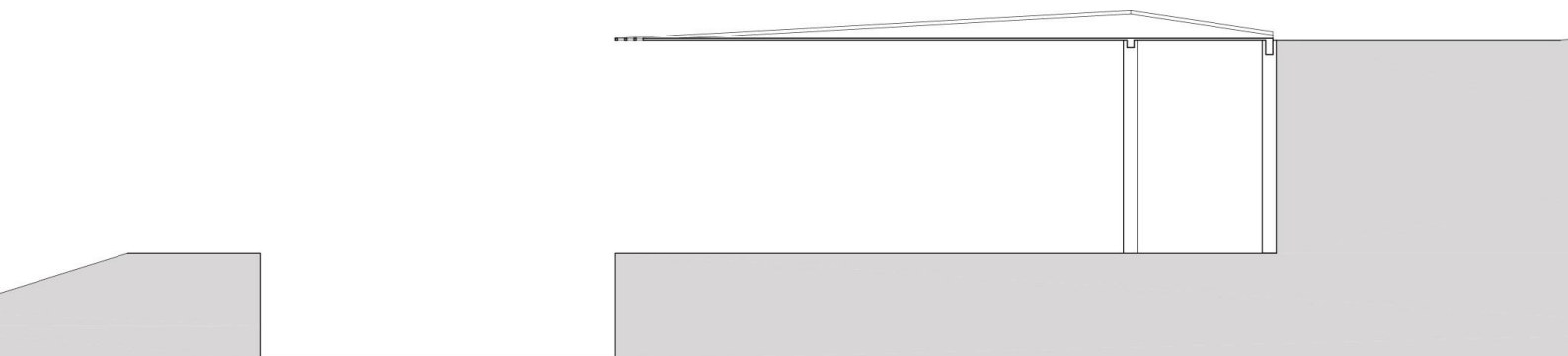


Figuras 48 y 49. Villa Navarra, Francia.



Figura 50. Elemento prefabricado para la cubierta.

Figura 51. Sección Villa Navarra. Escala 1/100.



4.3.2 Villa Navarra

En el año 2008 Ricciotti utilizará la experiencia adquirida en el puente para el proyecto que realiza en la ciudad de Le Muy, Francia, el edificio Villa Navarra. Se trata de un ejemplo del uso del HAUC como material de cubierta. El proyecto se trata de una piscina enclavada en el paisaje de Var, Francia que intenta mimetizarse con el entorno enterrándose para que el impacto en la colina donde se construye sea mínimo. La cubierta está formada por 17 elementos prefabricados, de 2,35 metros de ancho y 9,25 metros de largo con un espesor de tan solo 3 cm, colocados en voladizo. Este espacio, cobija a

los usuarios de la piscina a la par que enmarca el paisaje. Al tener una gran resistencia a la flexión y bajo peso propio, se consigue que no se necesite armado pasivo exceptuando un cable embebido en la parte superior de la pieza abaratando los costes tanto de ejecución –ya que se precisa simplemente de una grúa- como de cimentación. El HUAC se trata de un material impermeable por lo que no es necesaria ninguna lámina de impermeabilización adicional. Para que el agua no se cuele por la unión de las piezas se rellena la fisura con un material impermeable.



Figura 52. Detalle de la fachada del estadio Jean Bouin. París, Francia.

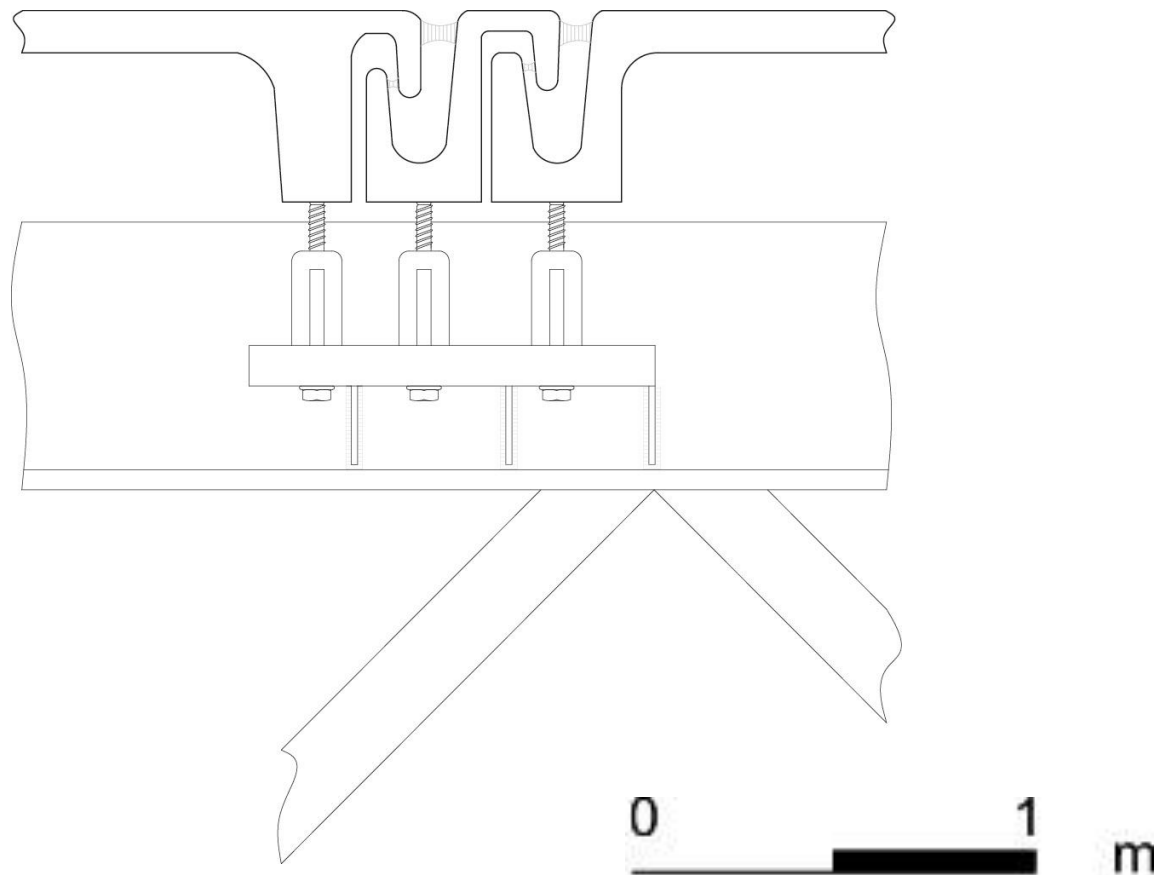


Figura 53. Detalle de la unión y anclaje de los paneles de la cubierta. Escala 1/50.

4.3.3 Estadio Jean Bouin

En el año 2013, realiza la reforma del estadio Jean Bouin situado en la ciudad de París, Francia. Construido originalmente en 1925, se decide realizar una reforma para ampliar su capacidad y actualizar su imagen al nuevo siglo. El antiguo estadio se derriba y para que no afectara a los residentes colindantes la ampliación del aforo, se buscaba una piel que pudiera contener el ruido de los espectadores, fuera impermeable y pudiera evacuar el agua de lluvia con facilidad a la par que ofreciera una respuesta arquitectónica tanto formal como de control solar. Es por ello que vuelve a confiar en el HUAC. En primer término se realiza una subestructura portante en acero que soportará los paneles. Los paneles prefabricados se dividen en 2 grupos, los utilizados en la fachada

cuya función es el control solar y el control acústico y los utilizados en la cubierta cuya función es proteger a los espectadores de la lluvia. Ambos grupos de paneles son prefabricados y con forma de triángulo isósceles con unas dimensiones de 2,4 metros en la base por 9 metros de largo y sólo 3,5 cm de espesor sin ningún tipo de armado. El propio nervio de los paneles actúa de unión entre ellos mediante un machihembrado posteriormente colmatado con un agente sellante para impermeabilizar. Todas las necesidades constructivas están incluidas en un solo elemento reduciéndose en consecuencia los costes puesto que sobre todo en los paneles de cubierta no es necesario ningún trabajo adicional al del montaje y sellado de juntas para mantener la impermeabilidad.



Figura 54. Vista exterior del MuCEM.Marsella, Francia.

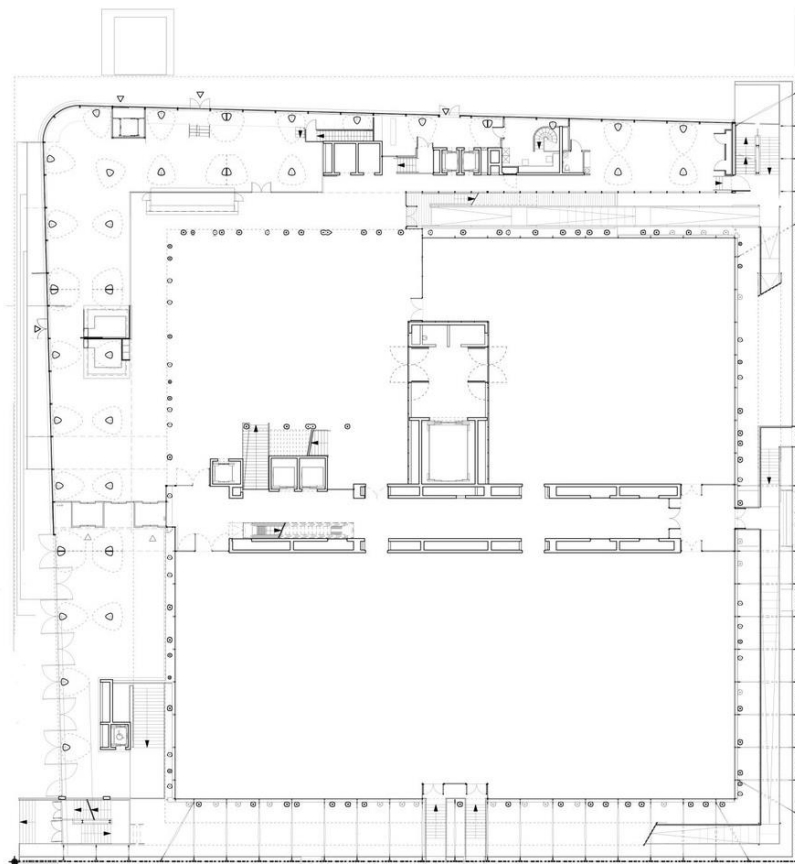


Figura 55. Planta baja del MuCEM. Escala 1/400.

4.3.4 Museo de las Civilizaciones de Europa y el Mediterráneo

En el año 2013 Marsella fue Capital Europea de la Cultura junto con Košice. Por este motivo el Museo de las Civilizaciones de Europa y el Mediterráneo (MuCEM a partir de ahora) fue concebido como elemento central de dicho evento. La historia del proyecto se remonta a 2002 cuando se propuso el concurso de la reorganización de la costa de Marsella competición que ganó Rudy Ricciotti. La elección del HUAC como material principal fue gracias a la localización del edificio, ya que se encuentra al lado del mar donde incluso el acero inoxidable se oxida por culpa del ambiente corrosivo. Es la primera vez que se utiliza el HUAC para la construcción de los elementos portantes en un edificio. Las propiedades como la gran ductilidad, la larga vida útil y la gran esbeltez y su gran resistencia, se mezclan para conseguir una expresión arquitectónica clara. El edificio es

una caja de cristal, con el núcleo de comunicaciones en su punto medio, formada por dos pieles siendo la interior de vidrio y la exterior, al sureste, suroeste y en cubierta, de paneles prefabricados de HUAC. El acceso principal se encuentre en la parte superior del museo, a través de la cubierta mediante un puente peatonal de 130 metros de longitud con 82 metros de luz que une el MuCEM y el fuerte de Saint Jean. Esta pasarela está realizada con 26 elementos prefabricados de HUAC posteriormente postensados con una curvatura positiva de 41 cm. Cada elemento prefabricado (*fig 56*) tiene una dimensión de 1,60 metros de altura por 2,40 metros de anchura con un espesor de 8 cm en el suelo de la pasarela y 35 cm en el pasamanos y parte baja de la sección ya que por ahí discurren los cables de postensado

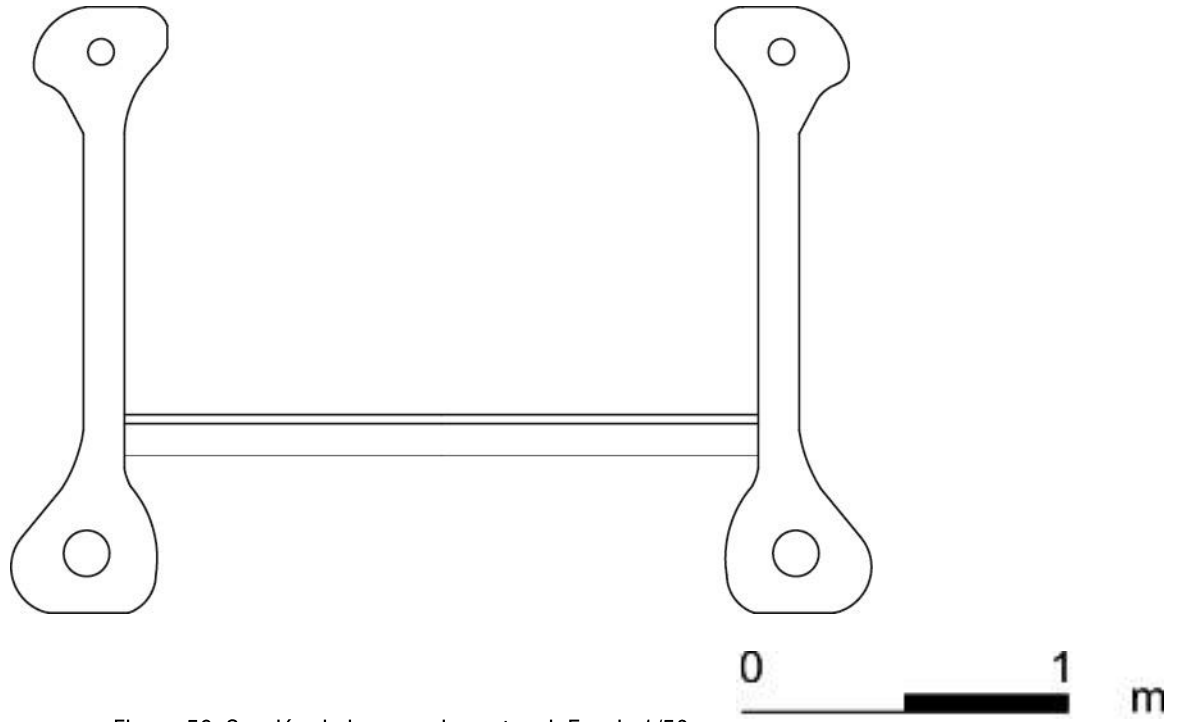
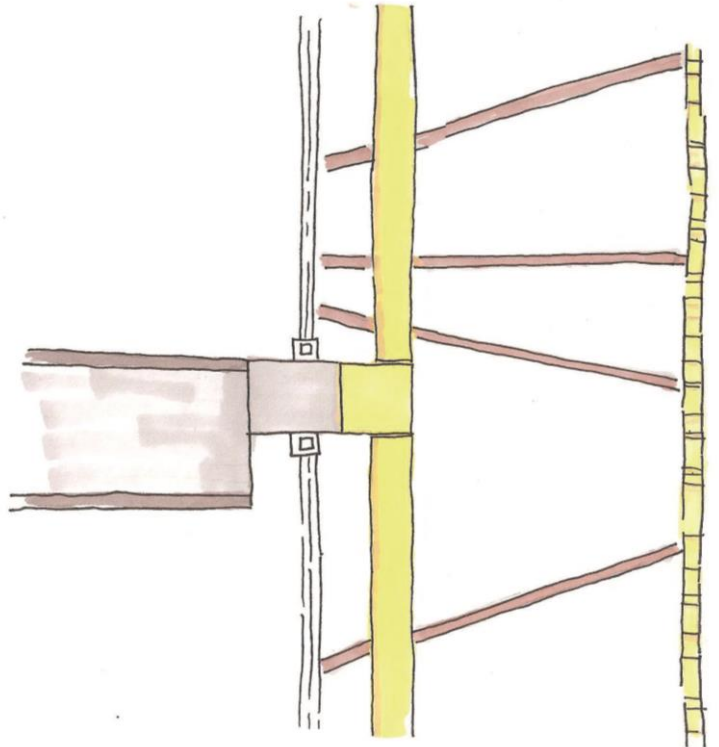
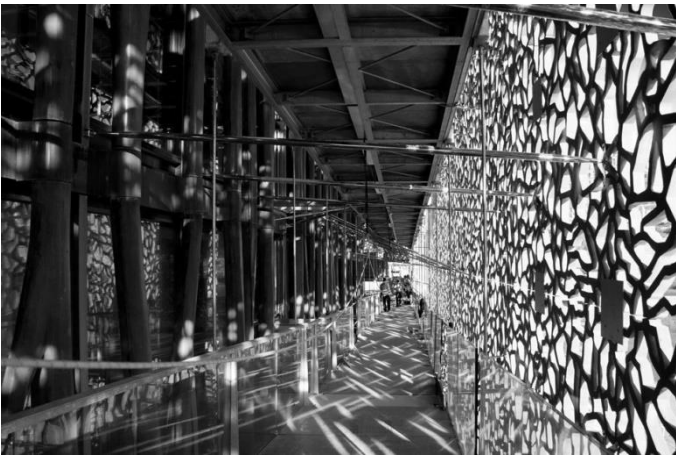


Figura 56. Sección de la pasarela peatonal. Escala 1/50.



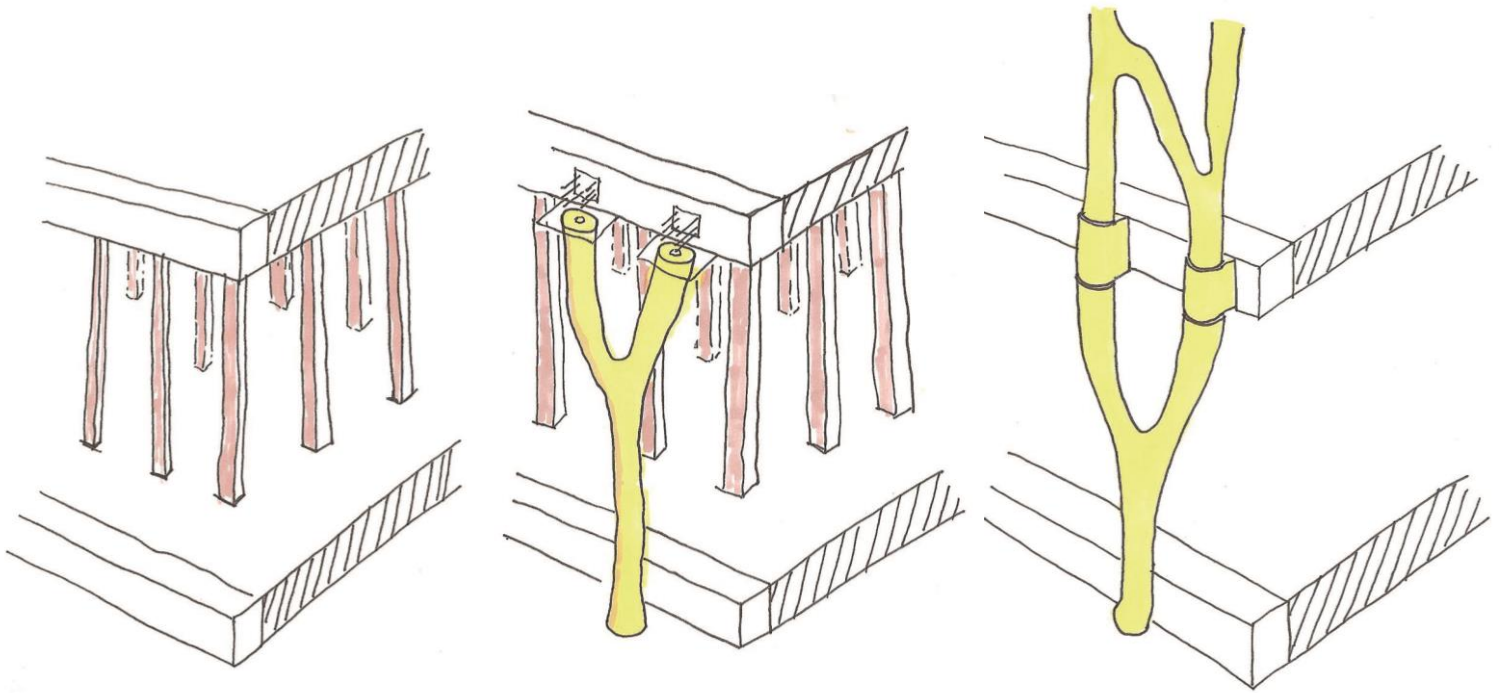
Figuras 57 y 58. Sistema estructural del MuCEM.

A medida que nos acercamos por su acceso principal a través de la pasarela, descubrimos la doble materialidad y la doble piel del edificio. Desde la distancia lo primero que vemos es la fachada exterior realizada en paneles prefabricados de HUAC. Cada panel tiene unas dimensiones de 6 por 3 metros y un espesor de solo 7 cm. La fachada no necesita una subestructura que soporte los paneles, simplemente se apoyan unos encima de otros descansando directamente sobre la planta baja. Los paneles, para estabilizarse, necesitan un arriostramiento (*fig 58, en marrón*) contra el edificio que se realiza mediante barras de acero cromado que unen la piel interior con al exterior.

Una vez traspasada esta primera piel, nos encontramos con una caja de cristal de 3 niveles que deja ver la estructura perimetral portante. La estructura se compone de columnas prefabricadas en Y, de forma arbórea, perimetrales en fachada y un núcleo central de servicios y ascensores realizado en hormigón in situ. Las columnas varían en altura entre 2,79 y 8,79 metros y la sección varía entre los 10 y los 40 cm. Las columnas no cuentan con ningún refuerzo pasivo de acero puesto que es innecesario gracias a las fibras metálicas embebidas en toda la columna. Sin embargo sí que cuentan con un cable interior para postensar la estructura una vez acabada de ejecutar. La construcción de este edificio (*figs 59, 60, 61*) no es la tradicional. En primer lugar se ejecuta el forjado de la planta superior sobre una subestructura temporal (*fig 59*). Seguidamente se coloca el pilar prefabricado en el perímetro del

forjado. En este momento el pilar no está sosteniendo el forjado todavía por lo que para realizar la unión necesaria, se realiza la unión del pilar prefabricado con el forjado mediante el encofrado de una ménsula con HUAC in situ entre la cabeza del pilar y el perímetro del forjado (*fig 60*). Posteriormente se retira la subestructura que estaba aguantando el forjado para que el pilar entre en carga. Después se añade la continuación del pilar para la segunda planta y se repite el proceso (*fig 61*). Para finalizar la estructura portante, los pilares necesitan un postensado (*fig 64*). Esto es debido a que las columnas no son rectas y presentan cargas descentradas (acción de los forjados) por lo que existía un claro riesgo de pandeo. Para evitar este riesgo, por el interior de las columnas discurre un cable que se postensa para que la unión de todas las piezas sea firme y permitiendo que todos los elementos trabajen a la vez, solidarios unos con otros. La forma de las columnas no es meramente caprichosa puesto que también cumplen varias funciones; una función antisísmica ya que gracias a su forma van arriostrando de forma horizontal, y una función de arriostrar la fachada acristalada contra las cargas de viento.

El forjado de cada planta se ejecuta con vigas en I pretensadas, prefabricadas en hormigón C60 con una longitud de 23,40 metros. Para transmitir la carga del forjado a la estructura de pilares perimetral se realiza un anillo de reparto con hormigón C60 vertido in situ. Está previsto que gracias al postensado de las vigas de los forjados, los efectos de la dilatación por temperatura no afecten a la estructura.



Figuras 59,60 y 61. Proceso constructivo de la estructura principal.

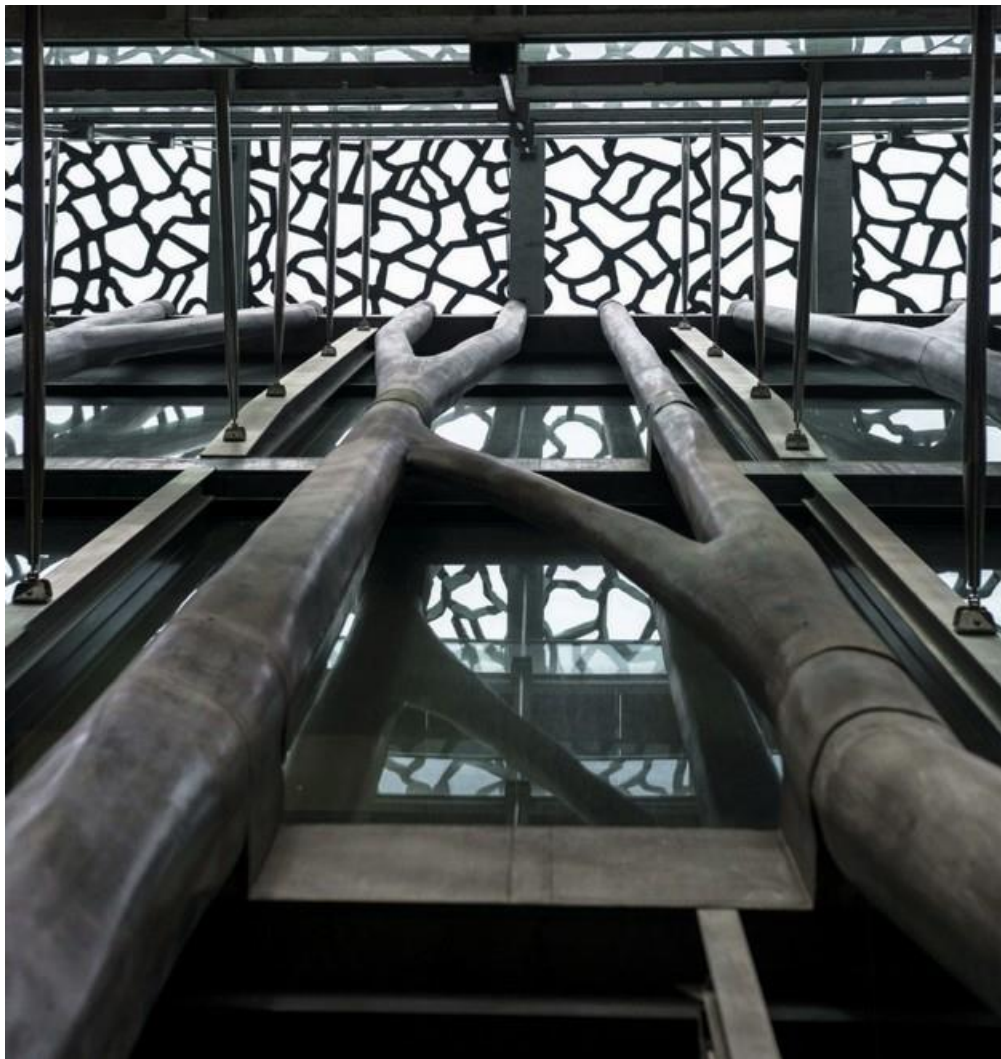


Figura 62. Vista interior entre las pieles del edificio.



Figura 63. Construcción de la estructura del MuCEM.

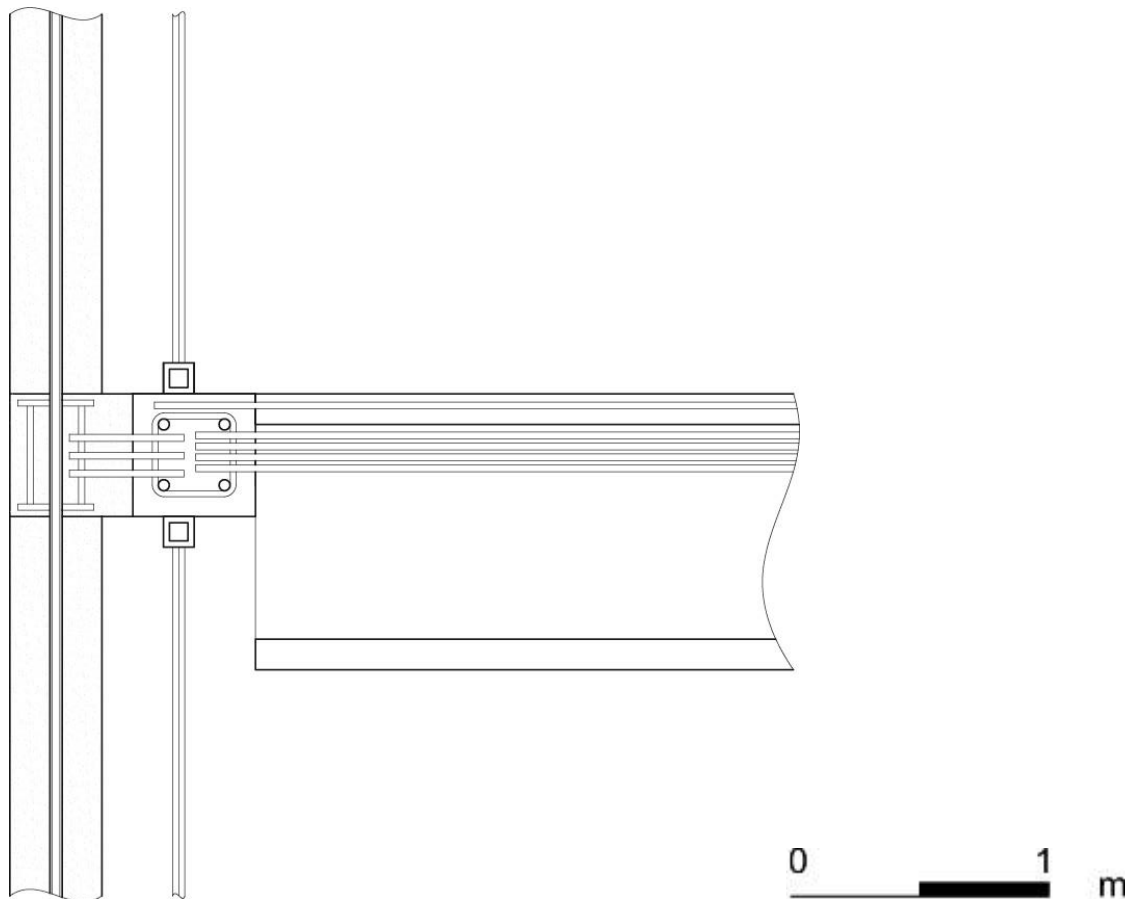


Figura 64. Sección constructiva de la unión del forjado con el pilar y detalle del cable de postesado en la columna. Escala 1/50.

4.4 Caso estudio

Una vez estudiados algunos ejemplos de su uso, vamos a realizar un *caso estudio* para observar las ventajas que aporta este material en una edificación. Vamos a realizar una estructura rectangular de 30 metros de largo y 20 de ancho y 2 plantas de 3 metros la baja y 3 metros la primera. Ha ha sido imposible realizar los cálculos puesto que no existe una normativa que regule su cálculo, su grado de seguridad, etc. Se realizaron 2 modelos en el programa CYPE y se pretendía poner en valor lo estudiado en el trabajo; diferencia de costes, ahorro de material,

ahorro de CO₂, etc. No ha sido posible calcular los elementos en HUAC puesto que dicho programa no tiene estas normativas. Además se intentó realizar los cálculos a mano pero no se encontraron las ecuaciones que rigen el HUAC y las ecuaciones del cálculo de hormigón armado no son precisas para la nueva realidad del material que tiene unos comportamientos diferentes al hormigón armado tradicional. Al ser un material joven, las herramientas para su cálculo aún no son muy accesibles.

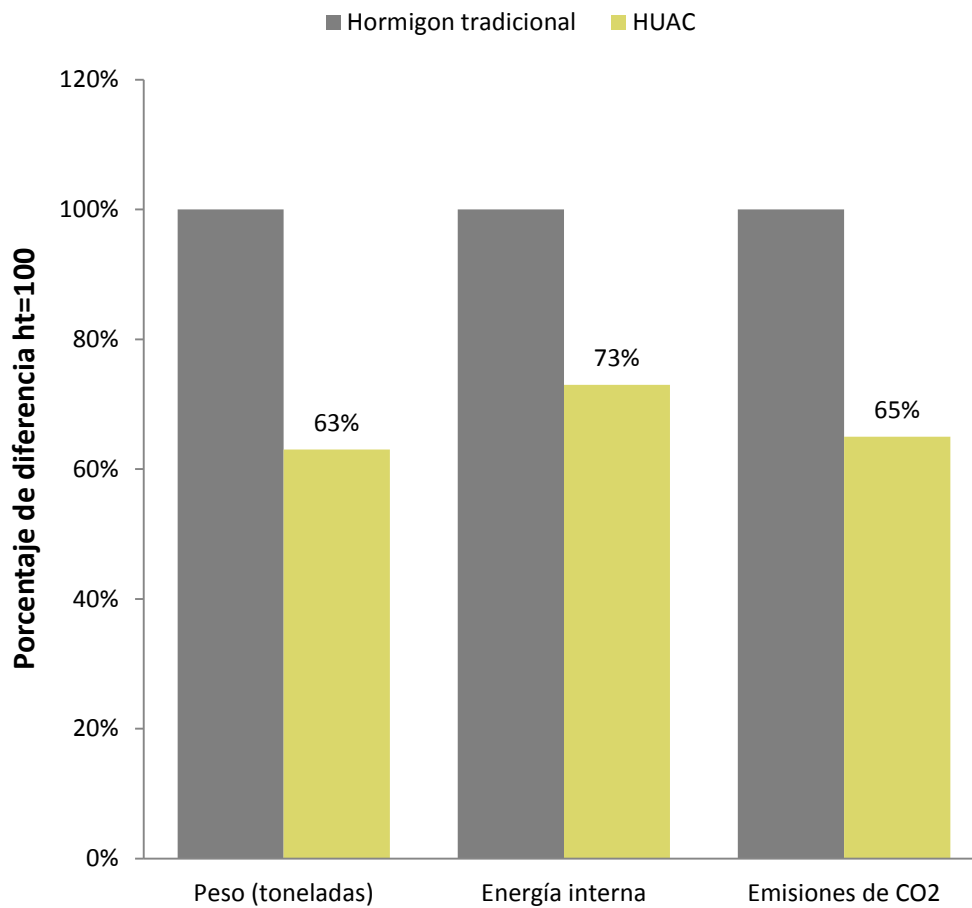


Figura 65. Diferencia media en construcciones con hormigón tradicional y HUAC en diferentes campos.¹⁰

¹⁰ La energía interna o adquirida es la suma de todas las aportaciones de energía necesarias para producir algo, en este caso una edificación.

5. COSTES, MANTENIMIENTO Y SOSTENIBILIDAD

Actualmente, en Europa nos encontramos ante varios retos que marcarán el desarrollo de las futuras generaciones siendo el cambio climático una de las más importantes. En todo el mundo, la construcción de edificios (extracción de las materias primas, transformación de las mismas, transporte y uso en la construcción) representa el 40% de todas las emisiones de gases de efecto invernadero. La mayor parte de las edificaciones utilizan hormigón cuyo principal componente es el cemento portland. El cemento portland por si solo produce el 9,5% de todas las emisiones de CO₂ del mundo ya que para su elaboración, entre otros procesos, es necesario someter a la materia prima a temperaturas de 1500 °C llegando a consumir 100 kwh y producir 1 tonelada de CO₂ por cada tonelada de cemento. El acero no se queda atrás y arroja unos datos todavía peores puesto que para producir una tonelada de acero se necesitan 170 kwh de energía produciendo 1,7 toneladas de CO₂. Desde el año 2000 se ha aumentado la producción de cemento más de 2,5 veces hasta las 4180 millones de toneladas y la de acero 2 veces hasta las 1600 millones de toneladas en el año 2015.

Vivimos en el mundo de la obsolescencia programada donde la calidad ya no prima sino la cantidad y el aumento de la producción. Aquí entra en escena el HUAC que puede llegar a ser un material “amigable” con el medio ambiente en comparación con sus competidores. En principio puede parecer que no va a ser así puesto que su consumo de cemento por metro cúbico es el doble que el hormigón tradicional lo que hace que la energía necesaria para producirlo se doble y por ende las emisiones de CO₂. Entonces es cuando ponemos en valor las características del material que permite realizar estructuras de igual capacidad portante que las del hormigón tradicional pero usando entre un 75-80% menos de material. Y solo hemos hablado del hormigón en sí, si continuamos vemos que en general este material no necesita armadura pasiva ya que gracias a la adición de fibras de acero en su mezcla se resuelven todos los problemas asociados a la armadura pasiva. Si bien también tiene contenido en acero, de hasta un 6% en algunas dosificaciones, la reducción es de entre el 30-35% de la cantidad de acero necesario para la misma capacidad portante que el hormigón tradicional. Sumando ambas reducciones de material conseguimos que la huella de CO₂ se reduzca hasta en un 40%.

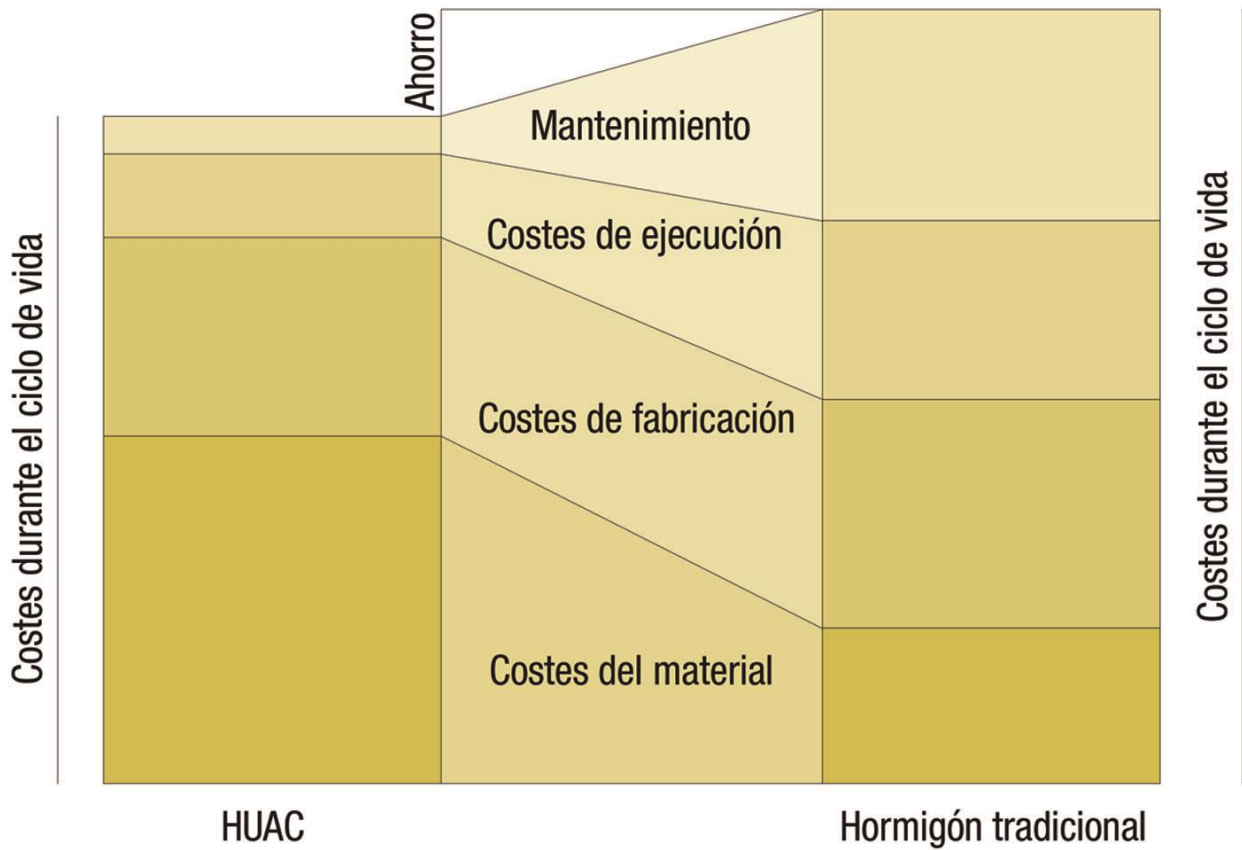


Figura 66. Comparación de costes de un edificio a lo largo de su vida útil.

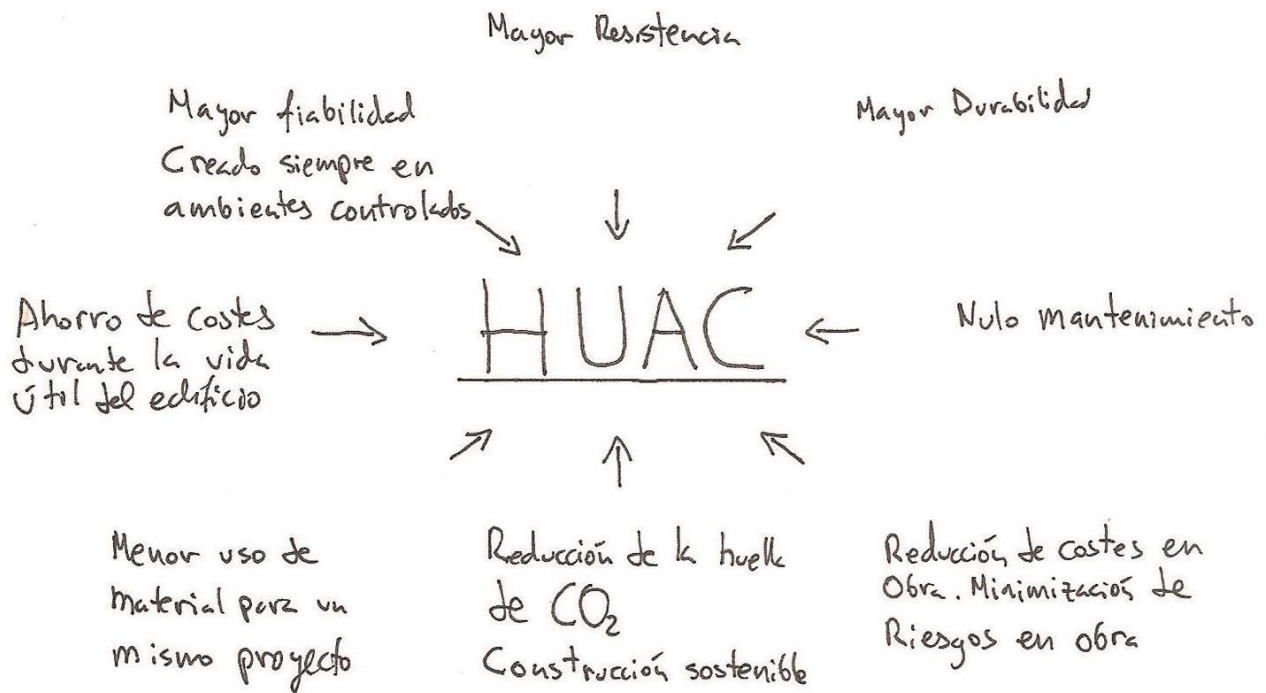


Figura 67. Ventajas del HUAC.

Actualmente la construcción se está encaminando hacia la prefabricación ya que ésta permite primero ahorro en costes de fabricación puesto que ésta se hace de manera seriada y controlada; después el ahorro en CO₂ durante la fabricación ya que al estar medida, reglada y centralizada es más eficiente y finalmente los costes de construcción, que se reducen drásticamente puesto que únicamente hay que transportar las piezas prefabricadas y proceder a su montaje reduciendo el tiempo de construcción y la maquinaria en obra. El HUAC es un material concebido para su prefabricación ya que sus mejores características se consiguen en condiciones controladas. Para prefabricarlo, se suele mantener la temperatura entre 60 y 90°C y la humedad relativa al 95% durante 3 días para que el fraguado se complete lo que hace que las características del material aumenten entre un 25 y un 30% reduciendo la retracción a prácticamente cero respecto a su homólogo fabricado in situ.

El problema actual del mundo es que si algo tiene mejores características que su antecesor pero su coste monetario es igual o mayor, no tendrá éxito. La primera barrera que tiene este material es su coste inicial ya que el HUAC tiene un coste entre 4 y 6 veces superior por metro cúbico; El hormigón HA-40 tiene un coste medio de 260€/m³ incluyendo ya el acero utilizado para las armaduras mientras que el HUAC tiene un precio medio actual de 1500€/m³. El precio del HUAC tiene una tendencia bajista por lo que cada vez será más barata su adquisición. Esta primera barrera se minora puesto que, de media, una estructura realizada con HUAC consume un 75% menos de hormigón para la misma resistencia

por lo que resultaría en un precio ponderado de 375€/m³. Esto también ayuda a que las cimentaciones sean más pequeñas ya que el HUAC tiene unas cargas muertas similares a las del acero reduciéndose así su coste. Donde realmente destaca el material es en los costes de la vida útil del edificio. Una estructura de hormigón regularmente tiene una vida útil de 35 años hasta que necesita reparaciones mientras que el HUAC tiene una vida útil de más de 100 años sin mantenimientos. El coste de mantenimiento de una estructura realizada en HUAC es nulo o prácticamente nulo. Como ejemplo tomamos uno de los puentes estudiados anteriormente, el puente en Sakata, Japón acabado en 2002. Utilizaron un 80% menos de material que si se hubiera realizado en hormigón tradicional. Esta experiencia en el uso del HUAC ha sido totalmente satisfactoria. Aunque el coste inicial fue ligeramente superior- aproximadamente un 10% más- a su equivalente en hormigón tradicional, el mantenimiento del puente ha sido nulo. Normalmente este tipo de puentes a los 10 años tienen ya problemas tales como reacciones álcali-sílice o corrosión de las armaduras que necesitan de un mantenimiento pero en este caso se ha observado que la estructura está en perfectas condiciones, sin haber indicios de que esto vaya a cambiar, puesto que la baja porosidad no permite la penetración de ningún agente nocivo en la estructura. En general, los proyectos realizados en HUAC tienen unos costes iniciales superiores pero, a la larga, reducen de media los costes en un 20% durante toda la vida útil de la edificación ya que éste duplica a la del hormigón tradicional y no necesita prácticamente mantenimiento.

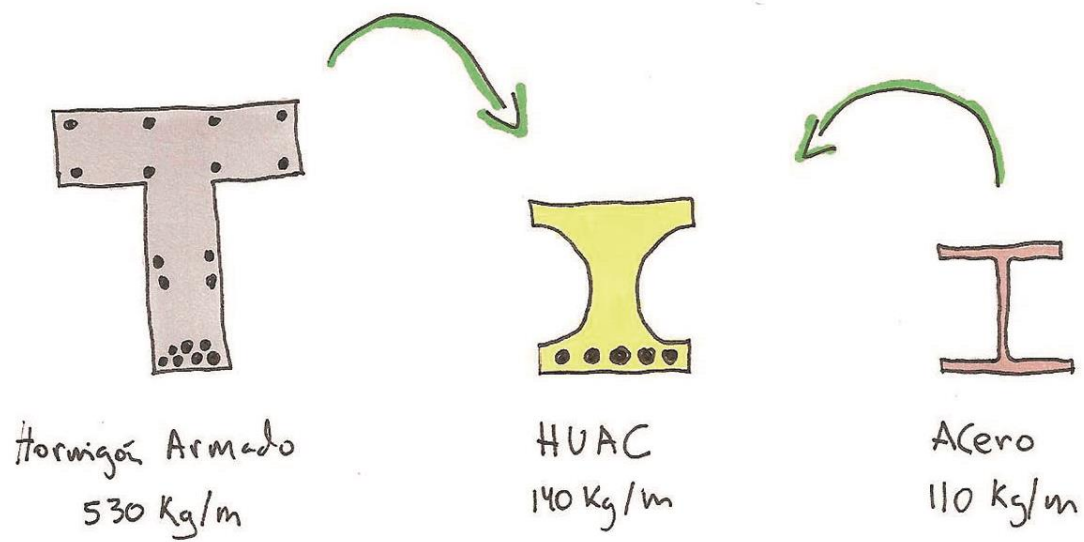


Figura 68. Diferencia de peso y de sección para una misma resistencia en hormigón armado, HUAC y acero.

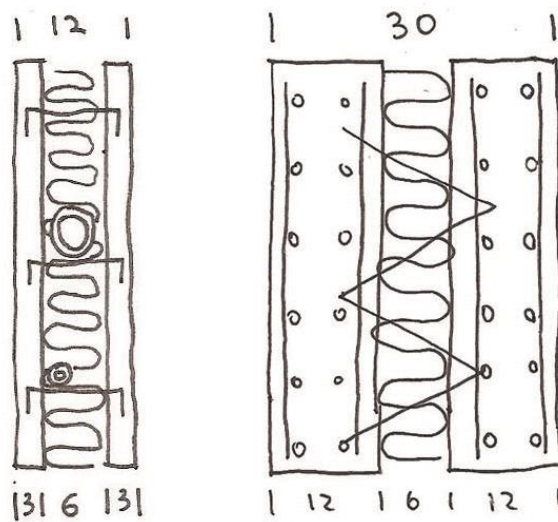


Figura 69. A la izquierda nuevo prototipo de muro estructural prefabricado con HUAC con aislamiento e instalaciones en su interior. A la derecha mismo muro estructural prefabricado realizado en hormigón tradicional.

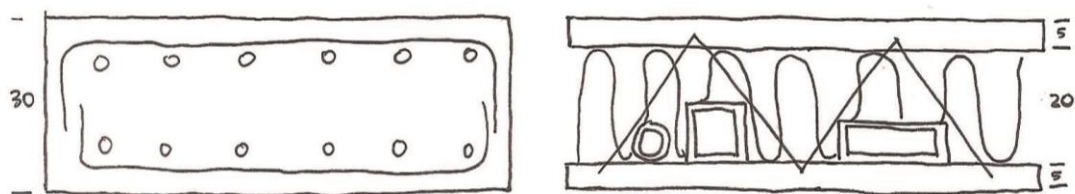


Figura 70. A la izquierda forjado tipo losa realizado en hormigón tradicional. A la derecha nuevo prototipo de forjado prefabricado con HUAC tipo "sándwich" con instalaciones y aislamiento en su interior.

6. CONCLUSIONES

Una vez concluido el estudio y caracterización de este material, se concluye que el HUAC revolucionará la construcción en un corto periodo de tiempo si es que no lo está haciendo ya. Se trata de un material situado entre el hormigón y el acero pues comparte muchas propiedades con ellos. El HUAC toma prestadas todas las bondades del hormigón tradicional y el acero pero sin sus desventajas. Es un material que soluciona problemas pretéritos, sin sustituirlos por otros. Cuenta con una durabilidad excepcional- su gran baza para ser un material revolucionario gracias a su gran resistencia tanto a compresión como a flexión, a su resistencia contra agentes externos como, ácidos de todo tipo,, gracias a su baja porosidad es prácticamente impermeable por lo que tampoco le afecta otro de los grandes enemigos del hormigón, las heladas siendo el HUAC prácticamente inmune a ellas.

Actualmente su uso es muy puntual, concentrándose sobre todo en infraestructuras de todo tipo; puentes, carreteras, pasarelas, industria química, etc. En la arquitectura se ha estado utilizando también de manera muy puntual para elementos de fachada, para pequeños detalles de acabados, escaleras, etc.

No todo son buenas noticias, se trata de un material que produce el doble de CO₂ por metro cúbico de material pero se usa hasta un 80% menos de material para realizar el mismo cometido. Utiliza materiales de desecho de otros procesos industriales como el humo de sílice por

lo que no ha de ser producido con el consecuente ahorro en CO₂. Por el contrario, los superplastificantes son muy contaminantes pero la cantidad utilizada es muy pequeña. El balance final arroja que se emite hasta un 35% menos de CO₂ a la atmósfera gracias al uso de este material.

Además es un material que fomenta la prefabricación puesto que sus mejores características se consiguen al prefabricarlo. La prefabricación en la construcción no ahorra solamente tiempo-menor tiempo de ejecución- y dinero-menor coste de personal y maquinaria para la obra- sino que además permite reducir el CO₂ asociado a la ejecución de la obra. Gracias su capacidad de ser moldeado con formas hasta ahora imposibles, es posible crear todo un nuevo catálogo de elementos prefabricados con mucha más variedad. Si esto se llevara a cabo, más arquitectos apostarían por la prefabricación como método de construcción ya que la elección de modelos no sería tan permitiendo más creatividad. Además nos encontramos ante un material personalizable por lo que si la solución necesaria no se encuentra en dicho catálogo, ésta podría ser fabricada sin problemas. Es un material que puede llevar otros materiales embebidos en su interior con un espesor muy pequeño a modo de panel sándwich prefabricado, pero con la capacidad portante de un forjado completo de 30 cm. Nuevas soluciones constructivas aparecerán gracias al uso de este material, tanto prefabricadas como vertido in situ.

Aunque su punto fuerte es la prefabricación, el HUAC ejecutado directamente en obra cuenta con una resistencia a las 24 h de más de 100 MPa, lo que permite desapuntalar con mayor rapidez, permitiendo ciclos de construcción in situ mucho menores pasando de una media de una semana entre piso y piso a 3 días.

Al utilizar este material, los costes de mantenimiento se reducen de manera drástica afectando incluso a cosas tan cotidianas como la limpieza de grafitis ya que al ser un material muy poco poroso e impermeable y con una resistencia muy alta a los agentes químicos, éstos son más fáciles y baratos de retirar sin dañar el material por culpa de los agentes limpiadores. Si deseamos un muro antigraffiti al 100% se precisa la adición de resinas epoxi en su dosificación.

La arquitectura del siglo XXI tiene que ser sí o sí la arquitectura de la sostenibilidad. Ha de tener en cuenta todos los aspectos medioambientales; desde que se proyecta el edificio hasta su construcción y posterior uso y mantenimiento. Los países emergentes están demandando una gran cantidad de habitación, infraestructuras y equipamientos que si son producidos con los medios y materiales de épocas pasadas causarán un grave problema climático. El hormigón es el material más utilizado en el mundo, produciendo un 9% de todas las emisiones de CO₂ por lo que si todo ese hormigón producido fuera HUAC, estas emisiones se reducirían simplemente por el hecho de que es necesario hasta un 80% menos de HUAC para realizar una estructura igual que si ésta se realizara en hormigón tradicional. El HUAC y otros nuevos materiales menos

contaminantes deben ser potenciados en detrimento de los más contaminantes. Nos encontramos ante un material mucho más sostenible en comparación con sus otros inmediatos competidores; el acero y el hormigón tradicional. En este mundo donde la obsolescencia programada es la norma, este nuevo material puede ser la respuesta para evitarla.

No podemos dejar de mencionar que este material tiene unas características perfectas para ser utilizado en zonas sísmicas. Se trata de un material 500 veces más flexible que el hormigón tradicional con una gran ductilidad que le permite deformarse para absorber energía antes de colapsar. Asimismo, al ser un material más resistente se necesita menos cantidad para conseguir la misma resistencia por lo que la estructura tendrá menos peso propio, lo que deriva en menores inercias causadas por los movimientos horizontales.

Entonces, ¿por qué no se utiliza de manera masiva? Seguramente todavía no se utiliza masivamente por dos causas; No tener una normativa que lo regule de manera global y su precio que, aunque está bajando a medida que se extiende su uso, todavía es muy elevado.

En abril del año 2016 vieron la luz en Francia 2 normativas (NF P 18-470 y NF P 18- 710) para el diseño y producción del HUAC como complemento a las normas dictadas en el Eurocódigo 2. En ellas se recogen las especificaciones que ha de tener, su desempeño como material resistente, y sus formas de producción y conformidad. Sustituyen el

estándar para cementos en Francia. También se incluyen métodos estandarizados para determinar las características del material y normas de diseño de estructuras realizadas en HUAC. Estas normas recogen más de 15 años de satisfactoria experiencia usando HUAC en Francia. Sería bueno e interesante que cada país tome como base y referencia esta normativa y la adapte. Cuantos más países introduzcan normativas relacionadas con el HUAC más utilizado será y antes llegaremos al objetivo de reducir el CO₂ emitido por las construcciones. En el año 2017 se aprobarán una serie de normas que regularán la prefabricación de elementos en HUAC que pretenden potenciar su uso primero en Francia y posteriormente en todo el mundo.

En Canadá, donde el primer uso de este material tuvo lugar, han planteado que a partir de ahora, todos los puentes de nueva construcción se van a realizar en HUAC debido a su nulo mantenimiento a pesar de su elevado coste inicial.

Como corolario, el HUAC es un material brillante pero joven que necesita aún maduración en forma de normativa regulatoria antes de la entrada en escena de su uso masivo y necesita personas que le den una oportunidad (como Rudy Riccotti) para que se pierda el miedo al uso de algo desconocido. Puede ser utilizado en cualquier ámbito en la arquitectura debido a sus múltiples posibilidades, desde la obra nueva hasta la rehabilitación sin ningún problema o inconveniente.

Bibliografía.

Melo, Ernesto. 2006. *Los aditivos*. Santo Domingo: Universidad de Santo Domingo.

Graybeal, Benjamin A. 2006. *Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete*. Virginia: Research, Development, and Technology Turner-Fairbank Highway Research Center. Federal Highway Administration.

Vidaud, E., Vidaud, I. 2010. *El humo de sílice como adición al concreto estructural*. www.imcyc.com. Consultado el 18 de agosto de 2016.

Vera-Agullo, Jose. 2012. *Nanomaterials in the construction industry*. Acciona Infraestructuras I+D+i. Pragmacero. 2013. *Innovador concreto flexible ultrarresistente*. Chiapas: México. www.pragmacero.com. Consultado el 30 de agosto de 2016.

Jian, Chu. 2016. New bendable concrete that is stronger and more durable. Nanyang: Nanyang Technological University.

Dr Spasojevič, A.; Dr Burdet, O.; Prof. Dr Muttoni, A. 2008. *Applications structurales du Béton Fibré à Ultra-Hautes Performances aux ponts*. Lausanne. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Love, E. 2011. *Introduction to Ultra-High Performance Concrete (UHPC)*.

Folliard, K., Thomas, M., Kurtis, K. 2003. *Chapter 2, Alkali-Silica Reaction*. Virginia: Research, Development, and Technology Turner-Fairbank Highway Research Center. Federal Highway Administration.

Antón, G.I.L.C., P.E.N. Viqueira, V.A.G. de, L.M.Á. Climent. 2014. *Método y dispositivo para la determinación de coeficientes de migración de cloruros en hormigones parcialmente saturados de agua*. Google Patents.

Thefullwiki. 2016. *Millau Viaduct*. www.thefullwiki.org. Consultado el 4 de septiembre de 2016.

Tanaka, Y., Musha, H., Tanaka, S., Ishida, M. 2010. *Durability performance of UFC sakata-mira footbridge under sea environment*. Corea: Korea Concrete Institute. ISBN 978-89-5708-182-2.

Lafarge. 2008. *A world first for the Villa Navarra by Rudy Ricciotti*. Lafarge press kit.

Ricciotti, R. 2012. *Romain Ricciotti on Ultra High Performance Concretes*.

Fehling, E., Schmidt, M., Stürwald, S. 2008. *Ultra High Performance Concrete (UHPC)*. Kassel: Universität Kassel. ISBN 978-3-89958-376-2.

Lubbers, Anna R. 2003. *Bond performance between Ultra-High Performance Concrete and prestressing strands*. Tesis. Russ College of Engineering and Technology.

García Barba, F. 2013. *Rudy Ricciotti: "Soy el tocapelotas de la arquitectura"*. www.arquiscopio.com. Consultado el día 9 de septiembre de 2016.

- Scia.net. 2016. *Museum of European and Mediterranean Civilizations (MuCEM) - Marseille, France*. www.scia.net. Consultado el 11 de septiembre de 2016.
- Catherine, S. 2016. *Völkermuseum in Marseille aus UHPC - VÖZ Vereinigung Österreichischer Zementindustrie*. www.zement.at. Consultado el 13 de septiembre de 2016.
- UHPC White Paper. 2013. 1st ed. [ebook] Carmel, Indiana: NPCA. www.precast.org. Consultado el 3 de agosto de 2016.
- Magureanu, C. I. Sosa, C. Negrutiu, B. Heghes. 2010. *Bending and shear behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete*. www.witpress.com. ISSN 1743-3509.
- Domoterra. 2013. *El cemento y la producción de CO2*. www.domoterra.es. Consultado el día 12 de septiembre de 2016.
- Metalesymetalurgia.com. 2016. *El acero y la producción de CO2*. www.metalesymetalurgia.com. Consultado el día 14 de septiembre de 2016.
- Habert, G., Arribe, D., Dehove, T., Espinasse, L., Le Roy, R. 2012. *Eco-efficient construction and building materials*. Cambridge: Woodhead Publishing. ISBN 978-0-85709-767-5
- British Cement Association. 1999. *Concrete through the ages*, BCA, Reino Unido.
- Palomar Llovet, P. 2003. *La historia más que centenaria de un importante sector: la industria del cemento*. VCA Editores, Barcelona, España
- ieca.es. 2016. *Historia del cemento*. www.ieca.es Consultado el día 3/8/2016
- Schaeffer, R. E. 1992 *Reinforced Concrete preliminary design for Architects and Builders*. McGraw-Hill
- Picon, A. 1997. *L'art de l'ingénieur*. Editions du Centre Pompidou.
- Romea, C. 2009. *El hormigón: Breve reseña histórica de un material milenario*.
- Nistal Cordero, A.F., Retana, M.J., Abrio, T.R. 2012. *El hormigón: historia, antecedentes en obras y factores indicativos de su resistencia*. Universidad Alfonso X el Sabio: Madrid. ISSN: 1696-8085.
- Gromicko, N., Shepard, K. 2011. *The history of Concrete*. www.nachi.org. Consultado el día 11/8/2016
- Rinaldi, M. 2013. *Stade Jean Bouin by Rudy Ricciotti*. www.aasarchitecture.com. Consultado el día 8/9/2016
- Ahlborn, T.M., Harris, D.K., Misson, D.L., Peuse, E.J. 2011. *Strength and durability characterization of UHPC under variable curing conditions*. TRB annual meeting.
- Ozyildirim, C. 2011. *Evaluation of UHPFRC*. Richmond, Virginia.
- Graybeal, A., Hartman, J.L. 2003. *Strength and durability of Ultra High Performance Concrete*.

Habert, G., Arribe, D., Dehove, T., Espinasse, L. Le Roy, R. 2012. *Science for Environment Policy*. European Commission DG Environment News Alert Service, editado por La Universidad de Inglaterra Oeste, Bristol.

Randl, N., Steiner, T., Ofner, S., Baumgartner, E., Mészöly, T. 2014. *Development of UHPC mixtures from an ecological point of view*. Carinthia University of Applied Sciences.