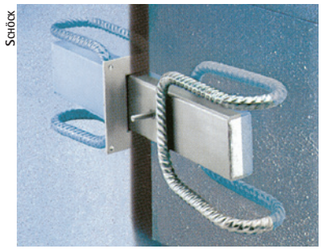
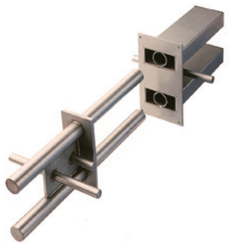
José Jurado Egea

Citius, altius, fortius
Una visión actualizada sobre el uso del hormigón en edificación

José Jurado, profesor de construcción de la Escuela de Arte y Arquitectura de la Universidad Europea de Madrid, analiza las claves actuales de la construcción en hormigón, desde la industrialización de la obra in situ a las nuevas soluciones ofrecidas por los sistemas pretensados y de construcción prefabricada. El ensayo presta especial atención a cuatro sectores donde la transformación ha resultado especialmente notoria: los hormigones autocompactantes, los de alta resistencia, los ligeros aislantes y los hormigones con fibras.

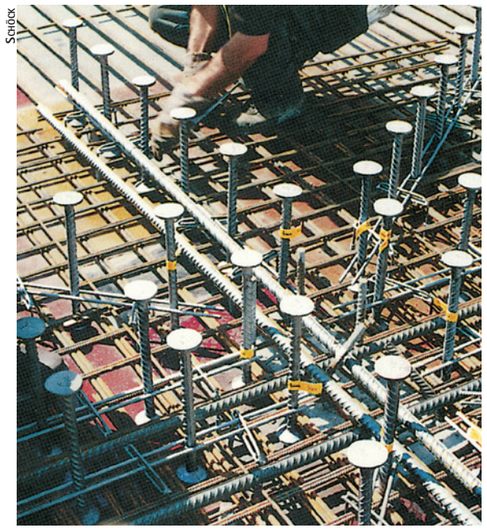


Schöck



Jordhal

Arriba y en el centro, conectores para juntas de dilatación en acero inoxidable. Permiten prescindir de dobles pilares, ménsulas de apoyo y jácenas, con ahorro en costes de encofrado. Abajo, armadura de punzonamiento formada por pernos de doble cabeza soldados a dos redondos de montaje. Incrementa la capacidad resistente de la losa en la zona de pilares.



Schöck

La máxima olímpica expresa con claridad la evolución reciente de la construcción e industria del hormigón. Alcanzada su época gloriosa en los ya lejanos años setenta con una imponente sucesión de tipologías de esqueleto, rascacielos y membranas, hoy en realidad se puede decir, con cierto cinismo, que todo sigue igual pero ya nada es lo mismo. Un repaso a la actualidad nos permite confirmar que, una vez asumidas y asentadas las tipologías y técnicas de base, las soluciones se destacan por lo superlativo en lo numérico (más resistente, más rápido, más bello) y por la amplia disponibilidad de patentes y soluciones en el mercado.

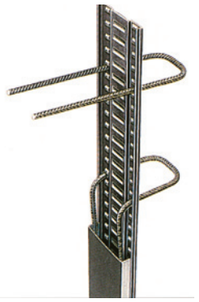
Industrialización

El empuje para la evolución del sector ha procedido de una industria que ha volcado las experiencias de la prefabricación en taller a la obra in situ, incorporando el potencial de la industria química a la hora de modificar y optimizar la dosificación del hormigón para adaptarlo a los muy diversos objetivos de cada caso. La puesta en obra hoy día se asimila más a un taller al aire libre donde se realiza meramente un ensamblaje: hormigón certificado de central e incluso con nombre propio (Agilia, Chronolia, Actium, etc.), altas resistencias iniciales (H50 a 25 MPa en 18 horas, desencofrados en cuatro horas), características modificadas según necesidad (consistencia, impermeabilidad, etc.), sistemas eficaces de bombeo (distancias de 500 m, caudales de 100 m^3/h), armaduras modulares prefabricadas en taller y completos sistemas de encofrados, permiten una puesta en obra donde ya nada queda a expensas del azar, salvo la climatología.

El panorama se completa con un catálogo variado y extenso de soluciones para resolver el talón de Aquiles del material: la unión. Por un lado se reduce el número de juntas obligadas (los esfuerzos por dilatación se incluyen en el cálculo estructural como una condición más; las juntas de retracción se minimizan trabajando con bajas relaciones de agua/cemento) y por otro se ofrecen patentes que estandarizan los enlaces de muros y forjados por medio de cajas de espera que evitan engorrosos encofrados, pasadores de acero inoxidable para juntas de dilatación (con o sin desplazamiento horizontal), conectores con rotura de puente térmico, armadura de punzonamiento en ábaco y demás.

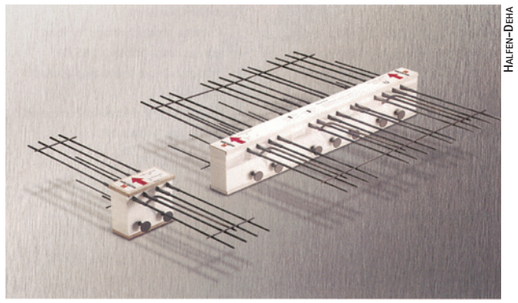
La industrialización del proceso de producción y ejecución en obra se complementa con la evolución del propio material que, de hecho, se ha desdoblado en variantes de muy diverso y delimitado carácter. Esta diversidad de tipos ha obligado a una actualización precisa de la normativa de referencia para recoger, aunque sea de forma genérica, los imparables avances y permitir el uso seguro dentro del marco normativo.

Halfen-Deha



Halfen-Deha

A la izquierda, las cajas de espera se emplean para conectar estructuras de hormigón fabricadas en fases distintas. Se colocan clavadas al encofrado o atadas a las armaduras. A la derecha, conectores para balcones con rotura de puente térmico.



Halfen-Deha

El Museo Mercedes-Benz en Stuttgart (UN Studio, 2006) muestra las posibilidades actuales de la construcción en hormigón para resolver formas complejas con acabados de gran calidad.

D. Malagamba

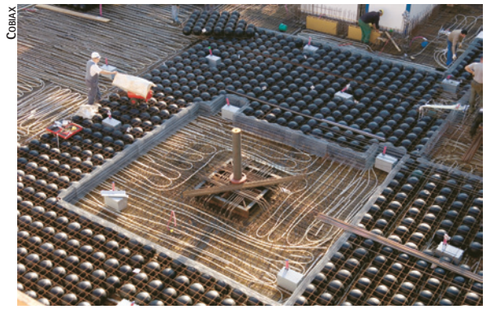
Sostenibilidad

Y puestos a hablar del material, tal vez sea el momento de comenzar reflexionando sobre la vertiente sostenible, hoy tan discutida y, por lo que parece, valorada socialmente. Para ello el enfoque no puede ser otro que cuantificar cuánto material (gravas y arenas de río o cantera) y energía (sinterización del cemento) consume su fabricación, la repercusión paisajística y el aumento de polución que conlleva, y sumar a ello el volumen de escombro no recuperable producido en su eliminación.

Comenzando por este último aspecto, es la propia EHE la que abre las puertas a la reutilización del escombro de demolición preclasificado para permitir su uso como árido reciclado en hormigones estructurales. Necesariamente el volumen de árido grueso reciclado se limita a un máximo del 50% del total para no afectar significativamente a la resistencia (con un 20% es intrascendente), a lo que se une una mayor absorción de agua y un aumento porcentual de cemento y por tanto de retracción (50%). Las perspectivas más optimistas pretenden un aumento en la reutilización hasta el 60% (armonizando con niveles actuales en el Reino Unido u Holanda del 46%), que en todo caso procederán de su uso en carreteras y obras públicas en general. En edificación, el ahorro más realista se deberá a los ajustes progresivos en la propia fabricación del cemento (reducción de

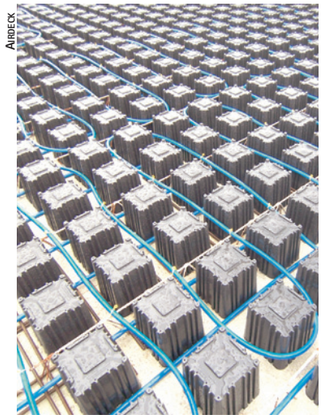
Ch. Richters

Izquierda y derecha, Escuela Zollverein en Essen, Alemania (SANAA, 2006). Los forjados se resuelven mediante losas de 50 cm de espesor y hasta 17 m de luz, aligeradas con esferas de polietileno de alta densidad. Tanto los forjados como los muros exteriores incorporan conductos de calefacción y refrigeración embebidos en el hormigón.



Cobiax

A la derecha y debajo, el hormigón armado del edificio de oficinas One Coleman Street (Swanke Hayden Connell, 2007) ha empleado hasta un 77% de materiales reutilizados.



Airbeck

Prelosa de hormigón armado con sistema de forjado radiante instalado en fábrica. Permite ejecutar losas aligeradas de hasta 14 x 14 m.

la energía consumida en la sinterización del cemento, filtrado de humos) y del hormigón fresco (recuperación de gravas por lavado).

Otro enfoque, conceptualmente más atractivo, se inclina por sustituir los componentes básicos (cemento y gravas) de forma significativa, incluso en hormigones estructurales. Dentro de esta línea, el hormigón de un edificio de oficinas en Londres proyectado por Swanke Hayden Connell Architects utiliza un cemento con cenizas volantes (finos reactivos procedentes de fundición) que aumentan su escaso porcentaje habitual hasta un significativo 40% total, mientras que en las gravas se incorpora un residuo granítico derivado de la fabricación de caolín. El resultado final es un hormigón armado H35 y H40 donde, sumando el acero corrugado procedente de reciclaje, hasta el 77% del volumen se ha visto beneficiado por algún tipo de reutilización o reciclaje.

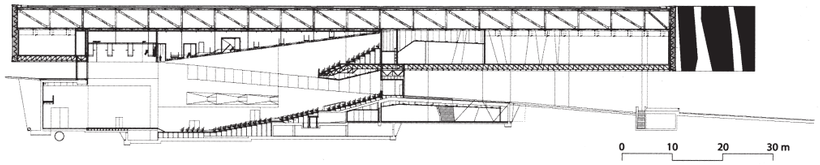
Mayores luces, menores secciones

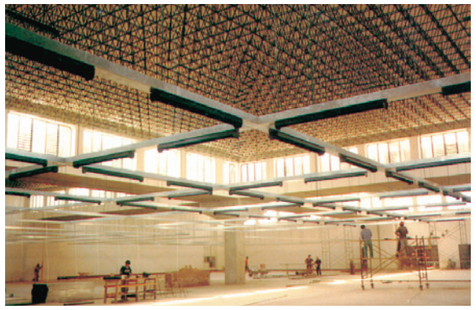
En términos estructurales, los objetivos arquitectónicos son mucho más precisos: las nuevas soluciones deben permitir mayor libertad espacial, minimizando cantos de forjado y, sobre todo, la repercusión de pilares, ya sea reduciendo su sección aparente, ya sea por medio de grandes luces que otorguen libertad de distribución en planta. Para conseguirlo, las soluciones se vuelcan en primer término en limitar en lo posible la desventaja intrínseca del material: su elevado peso propio.

Sin recurrir por el momento a modificar la composición del hormigón, lo inmediato consiste en aligerar el entrevigado y reducir la masa de hormigón que no trabaja (sección traccionada). Es el caso de las patentes que prácticamente igualan el aligeramiento alcanzado por los encofrados recuperables por medio del uso de bovedillas de poliestireno expandido, y que, tanto en variantes de forjado unidireccional como bidireccional, recuperan la planeidad de la cara inferior (para servir de soporte al revestimiento de acabado) y aportan un interesante número de ventajas de puesta en obra (automodulado, separadores, control de llenado, rotura de puente térmico) pero con la limitación de la reacción a fuego del aligeramiento (humo, sectorización).

La búsqueda de una estética más pura lleva a buscar soluciones que ofrezcan una cara inferior en la que el propio hormigón quede visto, tal como ocurre en la losa maciza, pero reduciendo peso al aligerar el núcleo del forjado. Las diversas patentes optan por ocluir cilindros de EPS o bien esferas o semiesferas de plástico rígido (HDPE o similar) en el hormigón fresco. Lógicamente no se alcanza el aligeramiento del forjado reticular clásico, pero se mantiene la bidireccionalidad y se gana en facilidad de ejecución al disponer dos mallas

Estructura de cubierta realizada mediante Losa Reticular Mixta (LRM), que elimina el hormigón en tracción, sustituyéndolo por perfiles metálicos.





Arriba y a la derecha, la estructura del edificio Fórum de Barcelona (Herzog & de Meuron, 2004) utiliza una LRM de una planta de altura que alberga instalaciones y servicios, y permite cubrir luces de hasta 60 m.

de armado continuas en ambas caras (la cara inferior de hormigón se ofrece prefabricada junto al armado y el aligeramiento para prescindir incluso de encofrados). La eficacia del sistema se verifica en la escuela que SANAA realiza en Zollverein, Essen, donde se resuelven luces de 17 m con un forjado de 50 cm aligerado con esferas de 36 cm de diámetro y que incorpora forjado radiante.

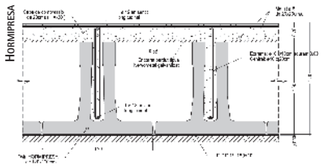
El ingeniero Luis Bozzo se enfrenta al problema del peso con las Losas Reticulares Mixtas (LRM), una recuperación de las tridilosas del mexicano H. Castillo. Las LRM son una solución mixta con acero, donde el hormigón sólo trabaja a compresión y por tanto tiene un aprovechamiento mecánico del 100%. Están formadas por dos mallas de acero y un separador, con al menos una losa de hormigón en cara superior. Apoyan directamente sobre pilares y no precisan por tanto de vigas, ofreciendo una reducción de canto entre el 20 y el 40%, lo que en peso finalmente repercute en un 60%. La separación de las caras puede llegar a la altura de una planta (para uso de instalaciones, por ejemplo), como sucede en el edificio Fórum de Barcelona, de Herzog & de Meuron, donde se salvan luces de hasta 60 m con esta solución.

Forjados pretensados

Atacar el problema de peso desde el origen, es decir, aligerando el propio material (por medio de gas ocluido u otros aligerantes) conlleva por lo general una disminución de la resistencia, lo que en la práctica limita su uso a muros o lo relega a un papel secundario (forjados colaborantes). Así las cosas, no queda más remedio que sacar todo el rendimiento posible a la masa de hormigón, modificando su puesta en carga por pretensado para eliminar las secciones en tracción, donde el hormigón resulta inútil.

El pretensado en su variante pretesa (tesado o puesta en tracción de armaduras activas previo al endurecimiento del hormigón) es propio de la prefabricación, cuyo vasto catálogo incorpora sugerentes patentes, como vigas que se combinan para formar secciones alveolares gigantes para grandes luces, o reelaboraciones de la placa alveolar clásica (nervios pretesados con entrevigado incorporado que hace innecesario el encofrado del forjado) pero con una importante reducción de peso (la cara superior se completa con la capa de compresión), o incluso las variantes de placas de forjado que incorporan la instalación de suelo radiante directamente de fábrica.

Otra patente estructuralmente más ambiciosa resulta la losa ortotrópica de Luis Bozzo, que proporciona a la placa pretensada un comportamiento bidireccional que permite dar un salto de prestaciones y alcanzar esbelteces de 1/34 con importantes sobrecargas.



Hormipresa

Hormipresa

Rudolph

A la izquierda, esquema e imagen de vigas Twin para grandes luces realizadas en hormigón pretensado. Pueden formar forjados aligerados mediante capa de compresión sobre encofrado perdido tipo Nervometal. En el centro, forjado prefabricado formado por dos losas de hormigón unidas por vigas en celosía. La cámara aloja el sistema de calefacción y enfriamiento instalado en fábrica. Abajo, la losa ortotrópica incorpora un armado transversal colocado inmediatamente sobre el hormigón de las prelosas pretensadas. Dicho armado proporciona a la losa un comportamiento bidirecccional que mejora notablemente sus prestaciones.

Ericksen Roed

Ericksen Roed

Estructura prefabricada ER-Post, compuesta por pilares y cerchas con armaduras pretesas con el canto de una planta completa.

Ericksen Roed

Módulos prefabricados o semiprefabricados como éstos dejan de ser complementos más o menos intercambiables del proyecto, para convertirse en la base del proyecto estructural y espacial por su modulación y potencia. Ejemplo de este cambio radical de concepto lo ofrece la patente ER-Post, una estructura prefabricada compuesta por pilares y cerchas pretensadas con el canto de una planta completa. Con dicho sistema se libera una de cada dos plantas de cualquier pilar intermedio, mientras que en las impares su repercusión es mínima, por la distancia entre pórticos (14 m) y la luz de las cerchas (24 m), ofreciendo una distribución de gran amplitud sin descuelgues de ningún tipo.

La retícula de 8 x 8 m de los forjados aligerados tradicionales se amplía mediante postesado a 16 x 8 m en el edificio Pórtico en Madrid (SOM y Rafael de La-Hoz, 2005), arriba a la izquierda, y a 17 x 8 m en los edificios Cristalia 5 y 6 en Madrid (Estudio Lamela), sobre estas líneas.

Postesado

La dificultad para adaptar el módulo dimensional prefabricado a la geometría particular de los diferentes proyectos, deja el campo libre a la incorporación del pretensado en su variante postesa (tesado de armaduras activas posterior al endurecimiento del hormigón), estándar del mercado americano y asiático que aporta máxima eficacia a la losa (maciza o aligerada, uni o bidireccional), en especial para limitar los descuelgues, tan engorrosos de ejecutar, a los estrictamente necesarios.

La compresión previa de las caras teóricamente traccionadas elimina la necesidad de incorporar la mayor parte de las armaduras pasivas (hasta un 60%), lo que redunda en una economía y rentabilidad cada vez más competitivas, en especial por el rendimiento de ejecución y la reducción de carga muerta de hormigón, especialmente sensible en su repercusión sobre la cimentación. El modelo se transforma así en losas de canto constante sobre retículas de pilares a distancias de 12 a 20 m, con considerables esbelteces de 1/30 a 1/45. El resultado es un cambio radical de las limitaciones geométricas de la estructura en sus tres vertientes: canto de forjado, luces entre pilares y voladizos. Como ejemplo del primero valgan las oficinas en New Street Square en Londres, de Bennetts Architects, que con 19 plantas de altura optan por un postesado bidireccional (armadura activa de 4 x 15 mm en vaina de 70 x 19 mm rellena de mortero) para una retícula de pilares con luces relativamente prudentes de 12 x 9 m, con el objetivo de alcanzar un canto de forjado reducido de 32,5 cm. A igual altura libre, la reducción conquistada en cada forjado permite en la práctica incorporar una planta extra al edificio.

Para el segundo objetivo sirve de ejemplo el edificio Pórtico de SOM y Rafael de La-Hoz, que sustituye los forjados reticulares tradicionales en retícula de 8 x 8 m (crujía de oficinas con pilar central) por un forjado igualmente aligerado, con armadura postesa y retícula de 16 x 8 m que elimina el pilar central y resuelve el canto de forjado con una relación canto/luz de 1/40. Experiencias como ésta introducen nuevos módulos estructurales en el espacio de oficinas contemporáneo, que pasa a organizarse en base a geometrías de 17 m (Cristalia) y 22 m (Torre Cube) de luz libre.

Finalmente los voladizos marcan el aspecto tal vez más espectacular de la eficacia del postesado, como queda patente en el edificio de la Copa de América Veles e Vents en Valencia, de David Chipperfield, en el que se dosificó y aceleró el curado del hormigón estructural H40 para obtener en tres días los 35 N/mm^2 que permitían iniciar el postesado.

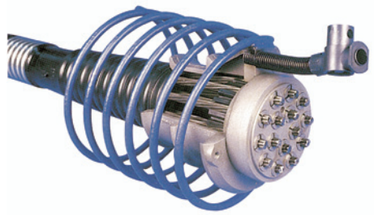
Hormigones de alta resistencia

Pero no sólo se han hecho accesibles las técnicas de ejecución y puesta en carga del hormigón, sino que el propio material pone hoy a disposición del mercado altas resistencias (H60 a H100 o superiores) que permiten reducir significativamente las secciones resistentes, mejorar la durabilidad y acometer objetivos estructurales singulares. De hecho, se incorporan con naturalidad como una pieza intercambiable, perfectamente combinable con estructuras mixtas (Torre de Cristal en Madrid, de Pelli Clarke Pelli), o con hormigón convencional sin más que marcar en la losa de forjado con chapa tipo Nervometal el perímetro de ábaco del pilar en hormigón de alta resistencia (HAR),

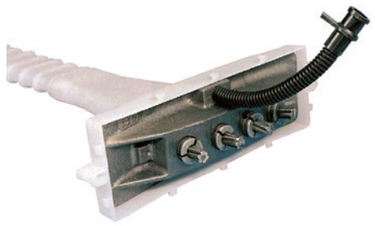
Los forjados con armaduras postesas de la Torre Cube en Guadalajara, México (Carme Pinós, 2005) salvan luces de 22 m con una relación canto/luz de tan sólo 1/55. A la derecha, edificio Veles e Vents en Valencia (David Chipperfield, 2006). Los grandes voladizos se realizaron con hormigón H40 de alta resistencia inicial para poder postesarlos a los tres días.

D. Malaganiba

Dywidag



Dywidag



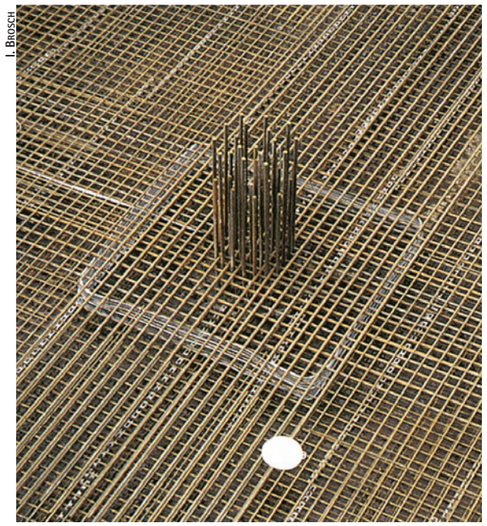
Dywidag

A la derecha, anclaje para tendones longitudinales en vigas y puentes con armaduras postesas. Incorpora armadura helicoidal de zunchado y conducto de ventilación para la inyección de mortero en la vaina. Debajo, anclaje para cuatro torones en línea, instalable en elementos de espesores reducidos, como los forjados planos con armaduras postesas. Debajo, losas de hormigón de 114 mm de espesor con los tendones colocados. W Hotel, Fort Lauderdale, EEUU. Adache Group Architects, 2008.

D. Leistner

Torre de la Feria de Hannover (Thomas Herzog, 1999), excelente ejemplo de construcción con hormigón de alta resistencia. A la derecha, armado en la zona del pilar, con chapa estirada como separación entre dos tipos de hormigón. Abajo, pilar prefabricado realizado con hormigón de alta resistencia H95 y núcleo de acero para minimizar su sección.

I. Brosch



I. Brosch

Abajo, Torre de Cristal, Madrid (Pelli Clarke Pelli, 2008). Pilares mixtos de hormigón de alta resistencia y núcleo de acero. Éste proporciona rapidez de montaje y resuelve el enlace previo con las vigas de acero.

J. Jurado

HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA

Objetivos

Reducción de sección en piezas altamente comprimidas (soportes, muros) o solicitadas a flexión (vigas) incluso pretensadas.
Protección ante ataques ambientales, mecánicos o químicos severos tipo plataformas marítimas, torres enfriadoras, etc.
Realización de soportes o vigas mixtas, por ejemplo, perfiles de acero hormigonados.
Plazos de ejecución cortos por reducción de tiempos de desencofrado.

Características

Resistencias a compresión superiores a 60 y hasta 150 N/mm^2; en estudio hasta 800 N/mm^2.
Fluidez similar al HAC.
Retracción elevada, con peligro de fisuración. Conviene armar con fibra de polipropileno y usar curadores internos o superficiales.
Más impermeable y compacto, mejores acabados y mayor durabilidad.
Color generalmente gris oscuro, por la intervención del humo de sílice. Para hormigón blanco puede emplearse nanosílice o metacaolín.

Componentes

Cemento: normal, por ejemplo CEM I 52,5 R (entre 350 y 500 kg/m^3).
Gravas: generalmente de granulometría discontinua. Recomendable el basalto, y para color blanco, la grava caliza.
Arenas: aconsejable el doble lavado para evitar que finos imprevistos contaminen la dosificación.

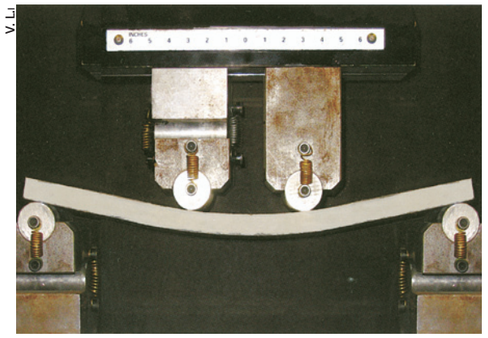
Aditivos

Superfluidificantes que posibilitan una relación baja A/C (< 0,35).
Humo de sílice o microsílice, en polvo o slurry (líquido), máximo 11% del contenido de cemento (necesario sólo para resistencias superiores a 80 MPa). Rellena poros y da compacidad. Es reactivo y aporta resistencia. Mejora la unión entre áridos y cemento.
Fibras de acero o polipropileno: recomendables para resistencia y control de fisuración.

Variantes

Hormigón ligero de alta resistencia: actualmente hasta 80 N/mm^2 con D 1,6.
SIFCON (slurry infiltrated fibre concrete): mortero fluido de alta resistencia y elevada ductilidad, con un 10% en volumen de fibras de acero de 50 a 60 mm de longitud, árido < 0,7 mm, contenido de cemento 1000 kg/m^3. SIMCON es una variante con mallas de fibra de acero.
RPC (reactive powder concrete): resistencia a compresión de 200 a 800 N/mm^2, que se alcanzan por reducción de la porosidad y fisuración. Presenta mayor homogeneidad por eliminación de áridos superiores a 1 mm. Utiliza finos de cuarzo y arena silícea, con granulometría optimizada. Incorpora reductor de agua. El hormigón recién fraguado es tratado en autoclave. Relación A/C muy baja, alrededor de 0,1. La ductilidad mejora con la adición de fibras de acero. Uso por ahora en puentes, fachadas y torres de refrigeración.
ECC (engineered cement composite): hormigón flexible u hormigón de fibras orientadas. Resistencia a flexotracción cincuenta veces superior al hormigón convencional. Incorpora alrededor de un 2% de fibras poliméricas orientadas.

V. Li



Rieder

El ECC (engineered cement composite) es un hormigón armado con fibras que alcanza gran ductilidad. Un panel de ECC puede resistir importantes deformaciones y recuperar su forma inicial una vez eliminada la carga. Abajo, pieza de mobiliario urbano de ECC de gran resistencia y poco espesor.

Rieder

Proceso de fabricación de placas de ECC que incorporan armadura longitudinal, transversal y en masa, de fibra de vidrio.

Ejemplo

Estación de tren ligero. Shawnessy, Calgary, Canadá 2004.
CPV Group Architects and Engineers Ltd.

Se pretendía conseguir una estructura de secciones esbeltas, muy próximas al acero, estableciéndose en proyecto una resistencia a compresión de 150 MPa. Finalmente se optó por el RPC Ductal, fabricado por Lafarge.
Cubierta de 24 cascarones de hormigón de espesor mínimo, enmarcados sobre entramado de vigas apoyadas sobre estructura de pilar único que soporta los módulos en voladizo. Los cascarones, de 5,1 x 6 m tienen un espesor ultrafino de 20 mm. La prefabricación se realizó en piezas de medio cascarón, inyectando el hormigón en encofrados dobles, finalizando con un tratamiento térmico de curado. Las vigas se realizaron en encofrado doble convencional.

Marquesina de estación de tren en Shawnessy, Calgary, Canadá (CPV Group, 2004). Arriba, desencofrado de medio cascarón de cubierta, formada por 24 cascarones de 5,1 x 6 m con un espesor de tan sólo 2 cm. Fueron relizados con Ductal®, hormigón de ultra-altas prestaciones, con resistencias a compresión de 150 N/mm^2 y a flexión de 25 N/mm^2. Este hormigón contiene un 2% de fibra de acero y no precisa armadura pasiva tradicional.

Ductal Lafarge

Ductal Lafarge

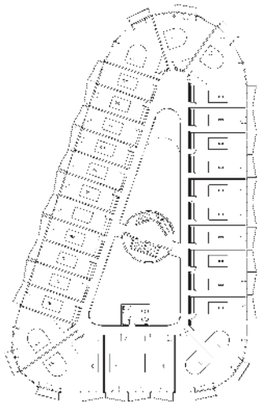
como en la torre de la Feria de Hannover, de Thomas Herzog.

Para lograr altas resistencias, se recurre al aumento del porcentaje de cemento (entre 350 y 500 kg/m^3), y para 80 N/mm^2 y superiores, a la adición de microsílice. El importante incremento de calor de hidratación obliga a limitar el contenido de agua (relación A/C < 0,35) para evitar su evaporación y la consiguiente retracción y aparición de fisuras. Por ello resulta imprescindible el uso de superfluidificantes para obtener las consistencias que permitan su puesta en obra en secciones densamente armadas.

El ajuste de componentes, aditivos y dosificaciones (eliminando incluso las gravas), unido a la incorporación de importantes contenidos de fibras (metálicas o poliméricas hasta el 4%), permite alcanzar variantes de ultra-altas prestaciones (RPC, reactive powder concrete) que modifican de hecho el comportamiento mecánico del hormigón, aumentando no sólo la resistencia a compresión (200 MPa), sino también a flexión (40 MPa), aportando una elevada ductilidad (importante deformación plástica antes de la rotura, autorreparación de microfisuras). El resultado es un material nuevo, muy alejado del frágil hormigón por todos conocido, que permite la ejecución de pilares y vigas postesadas carentes por completo de armadura pasiva formada por redondos tradicionales.

Wenzel + Wenzel

Museo Mercedes-Benz, Stuttgart. (UN Studio, 2006). Los hormigones vistos con inclinaciones y curvaturas variadas exigieron un diseño de obra en 3D para la fabricación de piezas y encuentros. La base de encofrado se realizó con un sistema modular flexible (Peri Vario) al que se superponía un molde específico en cada caso.
A la derecha, Goetheanum en Dornach, Suiza (Rudolf Steiner, 1928) edificio pionero en la utilización del hormigón visto.



David Millington Photography LTD 2007

Microapartamentos Abito (Building Design Partnership, 2007) hormigonados in situ mediante encofrado túnel en forma de L invertida. Cada apartamento incorpora un núcleo prefabricado de hormigón. Debajo, Parque Flotante en Gringrin, Japón (Toyo Ito, 2005. Ingeniero: M. Sasaki). El encofrado se resuelve mediante técnicas tradicionales de carpintería, utilizando tablas finas y cortas para adaptarse a la forma libre de la cubierta.

Takenaka Corp.

Una vuelta de tuerca a este concepto es el hormigón flexible (ECC – engineered cement composite), donde las fibras poliméricas se incorporan orientadas, es decir, que no se mezclan sin orden en la masa, sino que adquieren el papel preciso de armadura (alineadas o en forma de tejido), alcanzando resistencias de laboratorio de cincuenta veces la resistencia del hormigón tradicional, que de hecho, ya ha dejado de serlo.

Encofrados

Observando el salto cualitativo entre el Goetheanum (1928) de Rudolf Steiner y el Phaeno Science Center de Zaha Hadid, queda claro que nos hemos podido liberar del corsé de un brutalismo casi obligado (los muros acabados en "piel de cabra montesa" de Le Corbusier en Ronchamp) para optar por acabados refinados (lisos o texturados con ayuda de matrices de goma) según el proyecto exija y el bolsillo permita.

El papel principal sigue correspondiendo al encofrado como negativo de nuestra forma ideada, aquél que dejará impreso por siempre cualquier defecto superficial que presente. La industria ha ido desarrollando los encofrados modulares para otorgarles facilidad de manejo, rápida recuperación del material, medidas especiales y múltiples accesorios que permitan estanqueidad y acabados mejorados (berenjeno clipado, planchas de revestimiento interior).

La imposibilidad de garantizar acabados óptimos por medio de encofrados recuperables (salvo puesta única o revestimiento supletorio), ha abierto las puertas a los desechables, preferentemente de materiales económicos como el poliestireno expandido, a un paso de las innovadoras soluciones de membranas plásticas. Investigadas por Mark West, director de C.A.S.T. (Centre for Architectural Structures and Technology, Universidad de Manitoba, EE UU), y con precursores como Lamberton, Binhoff o Fisac, aprovecha no sólo la perfección superficial del plástico, sino su deformabilidad para otorgarle formas exclusivas, muy próximas al "hormigón flexible".

Como sistemas, siguen vigentes ejemplos clásicos como el encofrado túnel, en aplicaciones tan apropiadas como los 200 microapartamentos Abito en Manchester, de Building Design Partnership. Los muros portantes de 20 cm se ejecutan "por extrusión" ortogonales a fachada, y se rematan con un frente abierto y acristalado. En coherencia con el sistema portante, los núcleos húmedos (cocina y baños) también se ejecutan en hormigón, en éste caso ligero y armado con fibra de vidrio.

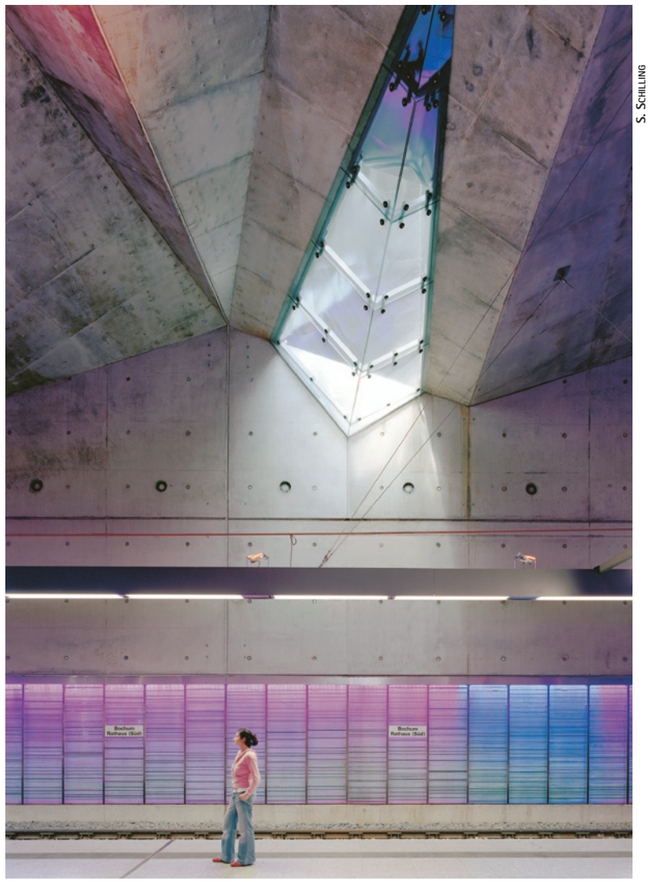
Pero la vanguardia de la arquitectura exige mayor libertad de formas. No basta con resolver el plegado, aún al alcance de los encofrados modulares. La irrupción de la generación digital de formas arquitectónicas exige soluciones no convencionales. Atrás han quedado en muchos casos la lógica constructiva que subyace en las bellas superficies regladas de F. Candela, reproducidas por él mismo en L'Oceanogràfic de Valencia.

Ni siquiera nos resulta ya útil la lógica "neumática" de Bini con sus propuestas de encofrados hinchables. Ahora la propuesta escultural responde a la lógica formal del programa informático, ya sea de diseño, como el Museo Mercedes-Benz de UN Studio, o de cálculo, como en el crematorio de Kakamigahara de Toyo Ito. Aquí la forma de suaves lomas original debe su conformación final a la "evolución" de cálculo estructural realizada por el ingeniero Mutsuro Sasaki, según su concepto de morfogénesis, tan en la línea de Gaudí y Frei Otto y sus maquetas de catenaria inversa. Sea cual fuere la justificación original, al proceso de encofrado le revierte un enorme esfuerzo de diseño previo y de fabricación de prototipos (casi a nivel artesanal), así como de coordinación en obra.

Encofrados perdidos

En el otro extremo de complejidad se sitúan los encofrados perdidos. El objetivo consiste en aportar un molde económico para dar forma al hormigón y de paso otorgarle alguna propiedad interesante. Actualmente se ofertan múltiples soluciones en poliestireno expandido en piezas tipo bloque, formadas por dos caras de

A. Casagrande

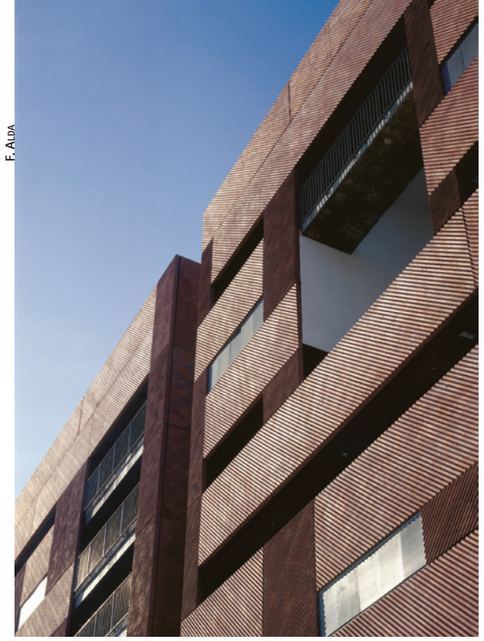


S. Schilling

Sobre estas líneas, cubierta en L´Oceanogràfic, Valencia (Félix Candela, 2002), formada por paraboloides hiperbólicos de hormigón; a su derecha, cubierta resuelta mediante una losa de hormigón plegada. Estación de metro en Bochum, Alemania (Pahl y Weber-Pahl, 2006).

Los encofrados textiles desarrollados en el C.A.S.T. permiten una gran variedad de geometrías tensadas. Utilizan membranas permeables y facilitan la realización de piezas con sección variable acorde a la distribución de fuerzas. Arriba, viga realizada con encofrado textil; abajo, pieza lineal encofrada. Debajo izquierda, pilares de forma arbórea; derecha, encofrado para soporte en Y tras el hormigonado.

F. Alda



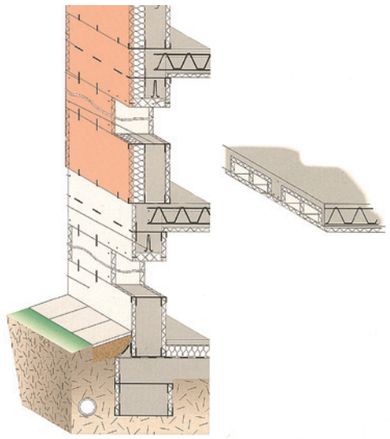
A la izquierda, fachada de paneles prefabricados de hormigón, encofrados con chapa ondulada y pigmentados irregularmente en masa. Viviendas sociales en Sevilla (Nieto y Sobejano, 2002). A la derecha, Centro Cultural El Molino en Utebo, Zaragoza (I. Alday y M. Jover, 2004). Textura de fachada realizada con paneles de encofrado revestidos de cañizo.

Styro Stone

Isoraist

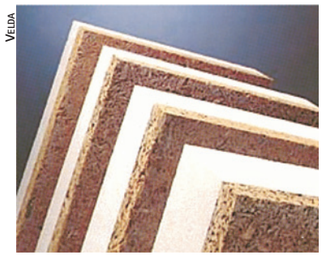
Coffor

Velox



Arriba, construcción con encofrado perdido de bloques de poliestireno expandido. A la derecha, hormigonado del núcleo de los bloques. En el centro, sistema de encofrado perdido formado por dos mallas de metal estirado con rigidizadores verticales. Abajo, tableros para encofrado perdido compuestos por virutas de madera unidos por barras de atado. Pueden incorporar aislamiento térmico.

Velda



EPS unidas por el mismo material o llaves de chapa de acero. Las ventajas evidentes son el fácil montaje por enjarje del encofrado del muro, así como el aislamiento en ambas caras que aporta al hormigón endurecido (el interior se puede rozar para instalaciones). Tiene como inconvenientes la falta de acabado (precisa de revestimiento en ambas caras) y el mal comportamiento al fuego del EPS.

El uso de tableros de viruta-cemento, con o sin aislamiento incorporado, aporta un solución más sostenible (material de reciclado), manteniendo la facilidad de agarre para el acabado y la sencillez con la que se recorta y adapta el molde a cualquier hueco o paso de instalaciones.

Una variante más sencilla la constituye el encofrado con ligeras mallas de acero que retienen el hormigón fresco y permiten eliminar el exceso de agua. El conjunto endurecido de hormigón y acero ofrece una notable mejora de resistencia.

La búsqueda de una superficie acabada lleva a los prefabricados de doble hoja de hormigón unida mediante armadura interior. Desde la solución más simple a la más evolucionada, como la Arquitectura Vertida de Miguel Fisac, estos sistemas ofrecen calidades superficiales y soluciones de junta muy diversas.

Acabados

La superficie del hormigón posee una gran capacidad para adquirir las más diversas soluciones expresivas. La pigmentación en masa del hormigón y la inclusión de matrices de goma posibilitan una extensa variedad de colores, texturas y relieves. La exposición de los áridos se consigue por proyección de arena o aplicación de retardadores de fraguado, que permiten el lavado a presión de la lechada exterior de cemento.

En el hormigón in situ estos acabados resultan complicados de alcanzar de manera uniforme y predecible por la dependencia del proceso de ejecución y la mano de obra. Por ello, las soluciones más evolucionadas se dan en los paneles prefabricados. Un ejemplo interesante resulta la imitación de vidrios serigrafiados para uniformar la envolvente con un único motivo. Wiel Arets acomete este objetivo en la biblioteca universitaria de Utrecht mediante una matriz de goma de 25 mm de espesor, mientras que Herzog & de Meuron recurren, en la biblioteca de Eberswalde, al "tatuado" de la superficie con ayuda de láminas impresas con retardadores de fraguado, colocadas en el fondo del molde.

No toda búsqueda de perfección superficial está orientada por objetivos estéticos. La lisura implica ausencia de poros, y por tanto compacidad, que otorga protección al propio hormigón (y al acero que lo arma en su interior) de su principal enemigo, la carbonatación (15 mm/10 años) y posterior corrosión del acero. Un problema

R. Halbe

M. Spiluttini

El Palacio de Congresos en Adeje, Tenerife (Artengo, Menis y Pastrana, 2005) combina diversas texturas de hormigón, como el abujardado rugoso realizado con martillo neumático o la impresión de las tablas de madera del encofrado (fotografía sobre estas líneas).

J. Bitter

Arriba, la biblioteca universitaria en Eberswalde, Alemania (Herzog & de Meuron, 1996) muestra una envolvente de imágenes fotográficas. Las placas de hormigón fueron grabadas con retardadores de fraguado, y los vidrios, al ácido. A la izquierda, Wiel Arets resuelve un esquema similar en la biblioteca universitaria en Utrecht, Holanda (2004) utilizando placas hormigonadas sobre matrices de goma y vidrios serigrafiados. Hormigón tratado con veladuras degradadas de diferentes tonos. Instituto de enseñanza en La Orotava, Tenerife (Artengo, Menis y Pastrana, 2004).

M. de Guzmán

FIBRAS PARA HORMIGÓN

Fibras de acero

Según el proceso de fabricación se clasifican en: trefiladas, cortadas en láminas, virutas de acero, y otras, como fibras de acero fundidas. Las fibras pueden ser rectas, onduladas, corrugadas, conformadas en extremos de distintas formas, etc. La forma tiene una incidencia importante en la adherencia al hormigón. Se recomienda una longitud como mínimo dos veces el tamaño del árido mayor. Son usuales longitudes de 2,5 a 3 veces este tamaño. Por otra parte, la longitud de la fibra debe ser inferior a 2/3 del diámetro del tubo de bombeo. Cuando las fibras son finas, la distancia entre ellas se reduce, formándose un entramado o red de fibras más denso que aumenta su eficiencia y mejora la redistribución de la carga o los esfuerzos.

Fibras poliméricas

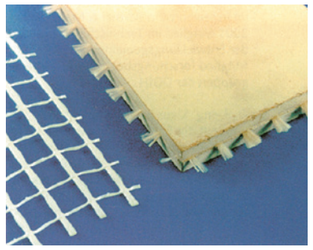
Están formadas por un material polimérico (polipropileno, polietileno de alta densidad, aramida, alcohol de polivinilo, acrílico, poliamida, poliéster) extrusionado y posteriormente cortado. Éstas pueden ser adicionadas homogéneamente al hormigón, mortero o pasta. Según el proceso de fabricación se clasifican en monofilamentos extruidos y láminas fibriladas; según su diámetro, en microfibras (ø < 0,30 mm) y macrofibras (ø > 0,30 mm).

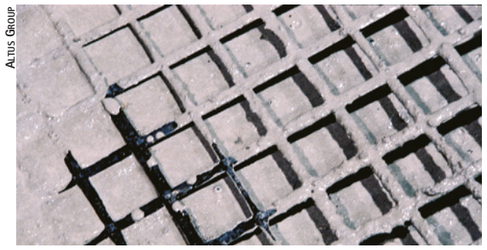
Las macrofibras pueden colaborar estructuralmente. Su longitud, de 20 a 60 mm, debe ser tres veces el tamaño máximo del árido. Las microfibras se emplean para reducir la fisuración por retracción plástica del hormigón, especialmente en pavimentos y soleras, pero no pueden asumir ninguna función estructural. También se utilizan para mejorar el comportamiento frente al fuego, siendo conveniente en este caso que el número de fibras por unidad de peso sea muy elevado.

Además de por sus características físico-químicas, las microfibras se caracterizan por su frecuencia de fibra, que indica el número de fibras presentes en 1 kilogramo y que depende de la longitud de fibra, y muy especialmente de su diámetro.

Fibras de vidrio

Salvados los problemas de deterioro de este tipo de fibras debidos a la alcalinidad del medio, las fibras de vidrio resistentes a los álcalis (AR) han sido utilizado generalizado que se puede atacar de muy diversas formas.



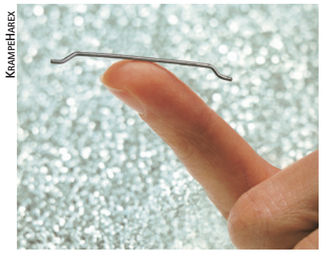


Altus Group

Fibre Net

Arriba a la izquierda, placa de hormigón armada con tejido de fibra de vidrio. Debajo, armadura de reparto de vinilésterepoxi y fibra de vidrio. A la derecha, malla de epoxi y fibra de carbono.

KrampeHarex



KrampeHarex

Arcelor Mittal

La industria ofrece diversos tipos de fibras de acero, vidrio y polipropileno para hormigón. Las fibras de acero tienen entre 6 y 60 mm de longitud y están disponibles en distintas formas y diámetros. Abajo, forjado colaborante realizado con hormigón reforzado con fibras de acero en sustitución del mallazo.

El sistema más sencillo consiste en recubrir el hormigón con una capa protectora, que puede abarcar desde la película hidrófoba más sencilla en base a silanos, que sólo reduce la entrada de agua, hasta la pintura o veladura en base a resinas siloxánicas, silicatos o acrílicos, pasando por un sellado con base de poliuretano o acrílicos.

Armaduras

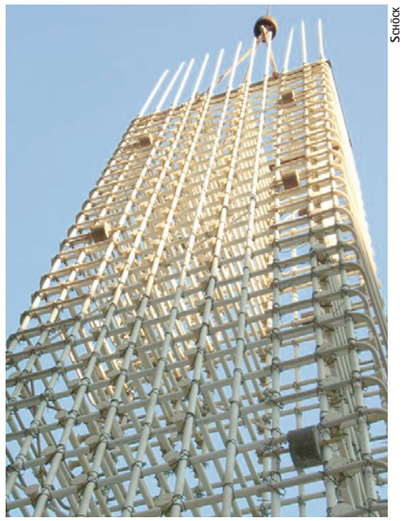
En la misma línea, además de "tapar" las posibles entradas de agua, la durabilidad del hormigón se puede asegurar eliminando directamente las "microrroturas" superficiales por donde se producen las infiltraciones. Estas microfisuras (0,1 mm, deformaciones mínimas por la entrada en carga del armado de acero) en las caras traccionadas, se evitarían con el pretensado comentado anteriormente. Alternativamente se puede optar por atacar el problema desde la perspectiva inversa, y sustituir el material de armado por otro menos corrosible (los inoxidables son costosísimos por el momento), como el acero galvanizado o el acero microcomposite (MMFX: altas resistencias, resistentes a corrosión y precio competitivo).

La alternativa polimérica, representada por barras corrugadas de resinas reforzadas con fibra de vidrio o carbono, parte con ventaja respecto al peso (de la armadura y del hormigón, ya que precisa menos recubrimiento) y durabilidad (no se corroe), siempre con la limitación de la rotura frágil y el coste. Alternativas con armadura en tejido plano o tridimensional (tubos, doble capa de tejido con "alma" de atado) ofrecen prometedoras perspectivas en simbiosis con los microhormigones o slurrys de última generación.

Donde claramente se ha impuesto la alternativa polimérica ha sido en las fibras de armado en masa, que se reparten el mercado con las de acero y de fibra de vidrio (ver texto "Fibras para hormigón"), con la virtud común de ofrecer un control de la fisuración por retracción eficaz en toda la sección de hormigón. Mientras que las de acero aportan mayor resistencia (flexión e impacto) y ductilidad a la masa de hormigón (vigas pretensadas con armadura pasiva exclusivamente de fibras de acero han ofrecido excelentes resultados), las de polipropileno ofrecen una mejora en resistencia a fuego, así como compacidad e impermeabilidad, y por tanto durabilidad.

Hormigón autocompactante

El control de la porosidad del hormigón, y por ende su compacidad, se convierten por tanto en piedra angular del problema. La dependencia de la compacidad del correcto vibrado ha constituido el talón de Aquiles insalvable para *(continúa en pág. 20)*



Schöck

Armadura de barras corrugadas de resina de viniléster y fibra de vidrio, resistentes a la corrosión y con baja conductividad térmica.

Bam

BarrSplice

A la izquierda, tendido de armaduras enrolladas. Cada barra puede tener un diámetro, longitud y separación diferentes a la contigua. Debajo, manguito de empalme tipo doble barra, versión mecánica del tradicional empalme por solape, con uniones de longitud reducida.

* El texto "Fibras para hormigón" es un extracto de "Presentación del anejo de hormigón con fibras de la EHE y ecuación constitutiva del hormigón con fibras", de Antonio Aguado y Felipe Laranjeira, publicado en *Aplicaciones estructurales del hormigón con fibras*, Barcelona 2007.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE

Acrónimo: HAC o concretamente H 30 AC

Definición

Hormigón capaz de fluir y rellenar cualquier parte del encofrado simplemente por la acción de su propio peso, sin necesidad de compactación por medios externos y sin segregación ni bloqueo.

Características

La cualidad más destacada es el preciso acabado superficial por su capacidad de adaptación al encofrado. Sin embargo, el concepto más revolucionario es la propia puesta en obra del hormigón, ya que desaparece la necesidad del vibrado de la masa fresca (de hecho, se prohíbe). Puede reunir otras exigencias, como ligereza (hasta D 1,4 por el momento), alta resistencia (de hecho los HAR suelen ser también autocompactantes), compatibilidad con armado de fibras, color, etc.

El otro aspecto destacado es la durabilidad, origen de su aplicación en edificación. Dado que el hormigón convenientemente compactado retrasa la carbonatación y el deterioro del hormigón, la Osaka Gas Company decidió en 1988 prescindir del factor humano en el vibrado del hormigón en su nuevo depósito de gas licuado, y optó por recurrir al primer HAC. La obra evidenció otro aspecto favorable: la velocidad de ejecución (entre un 10 y un 20% más rápida) por los elevados ritmos de producción que permite la inexistencia de vibrado, con la ventaja añadida de suprimir la mayor fuente de ruido de la obra (hasta un 90% de reducción del ruido ambiental).

Los inconvenientes se hallan en el estricto control de dosificación necesario, que sitúa hoy la fabricación en manos de fabricantes que ofrecen marcas específicas y otorgan garantías. La extrema sensibilidad a las variaciones (por ejemplo, del contenido de humedad de los encofrados) se intenta reducir con ayuda del modulador de viscosidad, que limita la segregación y aporta uniformidad a las distintas mezclas.

Por otro lado, resulta exigente la propia ejecución del vertido, ya que precisa de cierta continuidad para permitir la mezcla entre las distintas tongadas y la salida del aire ocluido: al no aportarse energía de movimiento por medio de vibrado, es el movimiento propio del vertido y el peso del hormigón al asentarse quienes realizan la mezcla y empujan el aire a la superficie. Esta característica ha propiciado nuevas soluciones de puesta en obra,

Aalborg Portland

Las especiales características del hormigón autocompactante exigen ensayos específicos de consistencia. A la izquierda, ensayo de extensión de flujo en un HAC blanco. Se mide el diámetro final obtenido al levantar el cono de Abrams, y el tiempo para alcanzar un diámetro de 50 cm.

La fluidez y baja relación agua/cemento del HAC posibilita la correcta ejecución de hormigones densamente armados y que requieren resistencia a compresión.

Dywidag

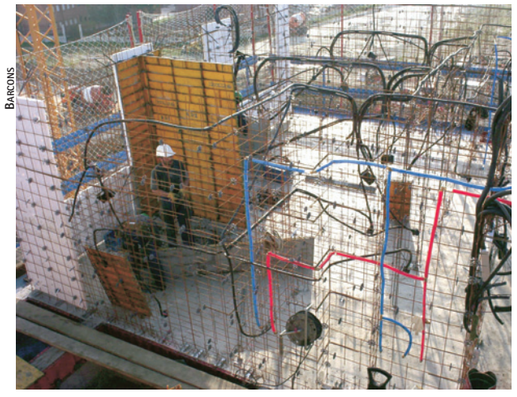
Doka

El bombeo desde la parte inferior del encofrado facilita la mezcla entre tongadas y la salida del aire ocluido.

Barcons

A la izquierda y abajo, el HAC permite hormigonar encofrados con aislantes e instalaciones, y un buen acabado en ambas caras.

Barcons



como por ejemplo, el bombeo desde la parte inferior del encofrado, que garantiza que todo hormigón nuevo pone en movimiento al anterior.
El sobrecoste actual del HAC, entre el 30 y el 18% respecto al hormigón convencional, se ve compensado en muchos casos por el ahorro de mano de obra (un 30%) y otros valores añadidos.

Ventajas. Facilidad y rapidez de hormigonado. Utilizable con alta densidad de armadura. Aplicable a formas complejas. Mejor acabado superficial (no tiende a segregarse o perder lechada, por lo que las posibles fugas en el encofrado resultan menos perjudiciales). Menor contaminación acústica en obra. Ahorro en mano de obra y equipos. Mayor durabilidad e impermeabilidad. Mayor resistencia a compresión a igual contenido de cemento. Bombeable. Compatible con fibras.

Inconvenientes: Control estricto de la dosificación. Relación crítica en la formulación de aditivos. Posibles juntas frías entre amasadas si no se cuida la continuidad del vertido. Coste entre un 30 a 15% superior.

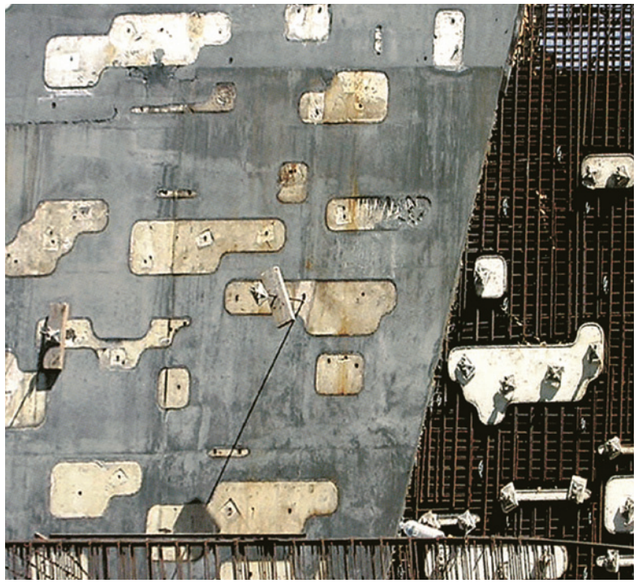
Ensayo de caracterización
La transformación que supone el HAC se reconoce en el cambio radical del método de medición de la consistencia, que deja atrás el cono de Abrams para pasar a medir el diámetro y la velocidad de expansión de una plasta tipo de hormigón: extensión del diámetro entre 550 y 850 mm (normalmente entre 700 y 800 mm; tiempo en alcanzar un diámetro de 50 cm (entre 2 y 8 s). Categorías: AC1: 10 a 20 s; AC2: 6 a 10 s; AC3: 4 a 6 s; por debajo hay peligro de segregación. Otros métodos: embudo en V, caja en L, anillo J. Resistencia a segregación: uniformidad de la masa.

Usos
Hormigones vistos en geometrías complejas que precisan de encofrados de difícil vibrado.
Hormigones en espesores mínimos, armados extremadamente densos o compuestos tipo sándwich (por ejemplo, muros con alma de poliestireno e instalaciones premontadas). Permite realizar delgados muros de hormigón ligero armado con tejido de fibras.
Prefabricación: ya con larga tradición y experiencia de uso en espesores, formas y acabados muy variados.
Gunitados: hormigones proyectados sobre mallas de armado en muros y superficies curvas (muy experimentado en túneles y ahora en patentes de semiprefabricación).

Dosificación
El HAC se distingue básicamente por un aumento significativo del contenido de finos (cementos, áridos y adiciones suponen alrededor del 23% del peso total del hormigón), y la incorporación de superfluidificantes para aportar la fluidez necesaria.
Finos (ø<125 nm), peso total 500 a 600 kg/m^3: cemento (normal, tipo I o II), es el reactivo base, mín. 330 kg/m^3; áridos (por ejemplo, filler calizo), polvo mineral no reactivo, ø<62 nm, otorga color claro a la mezcla.
Adiciones reactivas: cenizas volantes; microsílice o humo de sílice, aportan resistencia a flexión, gran avidez de agua, alta cohesión que obliga al aumento de superfluidificante, oscurecimiento de la mezcla (salvo microsílice blanca), precio elevado (uso casi reservado a HAR).
Arenas: se eligen de granulometrías continuas. Alcanzan el 50-60% del total de áridos. Buena parte de las arenas debe ir en finos para evitar que éstos sólo se compongan de cemento o adiciones reactivas, lo que aumentaría la avidez de agua de la mezcla.
Grava: tamaño máximo de 16 e incluso de 12 mm, con coeficiente de forma el más bajo posible (preferentemente cantos rodados).
Agua: cantidad en relación a finos (A/F) de 0,9 a 1,05. Si se reduce resultan mezclas excesivamente cohesivas y necesitan demasiado volumen para compactarse; si se aumenta hay riesgo de exudación, aunque puede corregirse con el modulador de viscosidad. Si se incluyen finos reactivos (cenizas, microsílice) se deberá aumentar a su vez el volumen de agua reactiva.
Aditivos: superfluidificante, aproximadamente 3% en relación al contenido de cemento. Imprescindible como reductor de agua (reducción del 30 al 35%) y para conseguir máxima fluidez a partir de consistencias secas. También debe aportar, según el caso, resistencias iniciales elevadas o prolongado mantenimiento de la consistencia. Preferentemente serán de última generación (éter-policarboxílicos o PCE), que aportan rápida absorción y actúan mediante repulsión electrostática y esférica para dispersar las partículas de cemento. Recubren el gránulo de cemento y crean una barrera frente al agua que ralentiza la hidratación. Además, aumentan la superficie que entra en contacto con el agua, lo que intensifica la hidratación.
Modulador de viscosidad: confiere cohesión interna (forma una red tridimensional que actúa de soporte) sin pérdida de fluidez. Incrementa por tanto la resistencia a la segregación y se incorpora, por ejemplo, cuando el aporte de finos se queda corto. El efecto en general es beneficioso para uniformar los resultados, dada la variabilidad de las mezclas y, sobre todo, para atenuar las oscilaciones de agua (hasta un 10%), ya sean de los propios áridos o del encofrado (por exceso o por defecto).

Ejemplo
Phaeno Science Center, Wolfsburg, Alemania 2005.
Zaha Hadid Architects.

La propuesta sobreeleva 7 m el cuerpo principal del edificio, que apoya en diez soportes gigantes de 11 m de altura y 30 cm de espesor (120 m^3 de hormigón). El forjado es bidireccional con aligeramiento ocasional de casetones recuperables. El acabado, tanto en el exterior como en el interior, es en hormigón estructural visto. El diseño del proyecto, con formas reviradas y muros de hasta



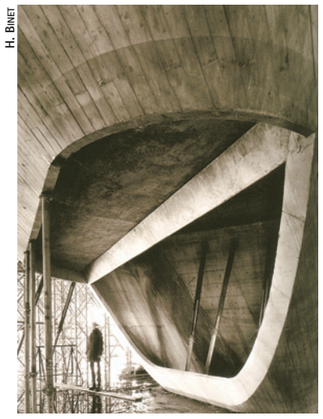
Centro Cultural Óscar Domínguez en Santa Cruz de Tenerife (Herzog & de Meuron, 2008). El empleo de HAC permitió rellenar con precisión encofrados de gran complejidad y satisfacer las exigencias de acabado.

Basf

R. Halbe

K. Ortmeyer

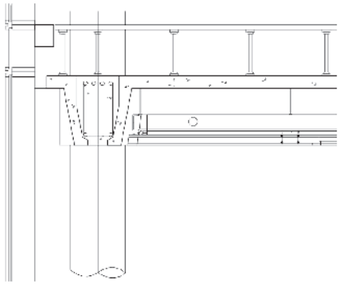
H. Binet



Phaeno Science Center en Wolfsburg, Alemania (Zaha Hadid, 2005). El HAC se utilizó tanto en las piezas prefabricadas de fachada como en la plataforma inferior in situ.
La uniformidad de acabado aconsejó utilizar filler calizo, encofrados prehumectados y hormigonado por bombeo desde la base de encofrado.
Abajo, detalle de uno de los grandes soportes en construcción.

Oficinas en Solihull, Reino Unido (Foggo Associates, 2003). Los pilares, forjados y vigas están formados por elementos prefabricados de hormigón.

Las vigas incorporan huecos para el paso de instalaciones y extracción de aire, y se completan con un núcleo de hormigón in situ.



39° de inclinación, exigía una geometría de encofrados de imposible vibrado, por lo que la solución consistió en aplicar hormigones autocompactantes, tanto in situ (unos 5.000 m^3) como prefabricados (paneles en fachada sur). Para ajustar el nivel de acabado a cada caso, se establecieron tres categorías: visto muy exigente, visto, y no visto, en los que la fisura máxima admitida en superficie era de 0,25 mm. El hormigón incorporó un filler calizo por su color claro, uniformidad de acabado y escasa sensibilidad a los cambios de contenido de humedad o agua. La consistencia óptima se logró con mezclas de 45 y 90 minutos, y el acabado óptimo, con tolerancias mínimas en consistencia. Otros factores importantes para garantizar superficies uniformes fueron la prehumectación de encofrados, el curado cuidadoso posterior al vertido, y la puesta en obra del hormigón por bombeo. La ejecución constató que, siempre que el hormigón estuviera en movimiento, el aire ocluido salía con facilidad (salvo a temperaturas bajas) y las tongadas se mezclaban naturalmente, pero una vez en reposo, el hormigón retenía las burbujas y los nuevos hormigones fluía sobre la masa antigua, dejando "líneas de flujo" visibles en la superficie vista del hormigón. Esta característica tixotrópica del hormigón (diferente fluidez según velocidad de la masa), obligó al bombeo del hormigón desde la base del encofrado y a destinar algunos operarios a mantener el hormigón en movimiento con la ayuda de barras metálicas a la hora de verter el nuevo hormigón.

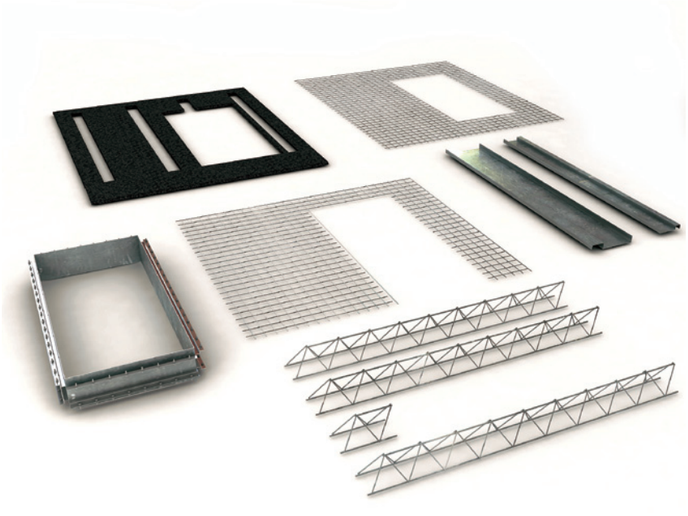
J. Marburg

Bloques de viviendas en Rheinfelden, Suiza (Zwimpfer Partner, 2006), realizados mediante elementos prefabricados que configuran módulos de vivienda apilables.

B. Sorg

la calidad del hormigón. Por ello resulta de vital importancia eliminar el factor humano del proceso de ejecución, mediante una puesta en obra en la que el hormigón se asiente y compacte de forma autónoma por medio de su propio peso.

Este hormigón, denominado autocompactante (HAC), es un viejo conocido de la construcción industrial de los años setenta en Japón y de la prefabricación de los noventa. Hoy se encuentra plenamente incorporado a la ejecución in situ. Aporta una fluidez extrema, fuera de los márgenes del cono de Abrams, que de hecho implica una medición de consistencia específica. El resultado es un hormigón que fluye sin problemas entre las armaduras más densas y se adapta al encofrado con perfección geométrica, reflejando con fidelidad las aristas más complejas. Para lograr estas propiedades, la dosificación debe incorporar un alto porcentaje de finos, gravas de diámetro pequeño y superfluidificantes de última generación. La cualidad de estos aditivos para dispersar las partículas de cemento y mejorar su hidratación, permite mantener una "red" espaciada de partículas que evita su acumulación y segregación. El beneficio estético es apreciable: perfectos bordes en ángulo agudo y superficie lisa y tersa, incluso con espesores de hormigón mínimos (ver texto "Hormigón autocompactante").



Componentes del panel básico de Fisac: cerco de acero para los huecos, canaleta para conducción de instalaciones, malla electrosoldada, celosía de unión entre paneles y aislamiento de vidrio celular.
Imagen central, viviendas en el Ensanche de Vallecas (M. Fisac, S. González, B. Aleixandre y F. Sánchez-Mora).
Fachada de muros portantes de hormigón visto que muestra el canto de las losas alveolares.
Debajo, esquema de montaje del sistema y paneles de hormigón flexible, realizados con encofrado de lámina de polietileno.
Las dos caras del panel, totalmente acabadas en fábrica, no precisan de pintura ni mantenimiento alguno.

Prefabricación

Desde hace tiempo el HAC ha sido utilizado en la prefabricación de diversas piezas y paneles de catálogo. En la actualidad, debido al eterno problema de economía de escala, bien poco ocurre en el desarrollo de patentes comerciales, salvo honrosas iniciativas puntuales. Entre ellas, además del ejemplo de la patente de Miguel Fisac (ver texto "El legado de Miguel Fisac"), se encuentran tres proyectos recientes de índole diversa: una semiprefabricación, un sistema mural y una malla estructural.

La semiprefabricación se refiere al proyecto de oficinas en Solihull, de Foggo Associates, que recupera la estructura vista de hormigón al interior del espacio de oficinas por estricta necesidad de inercia térmica. Los acabados mejorados de la prefabricación se configuran, por razones de rigidización estructural, en un entramado monolítico mediante un hormigonado conjunto in situ. Las piezas prefabricadas ofrecen una elaboración extrema para configurar apoyos sobre pilar, pasos de instalaciones, etc.

La variante mural del sistema Pile Up (apilar) del estudio Zwimpfer, refleja un interesante módulo espacial con doble altura, que mezcla muros de carga ortogonales a fachada con pilares interiores para no condicionar la distribución. Los muros de hormigón prefabricado (4 x 5,5 m) disponen de un espesor portante de 15 cm, aislamiento interior, y un

EL LEGADO DE MIGUEL FISAC

Miguel Fisac desarrolló, con el apoyo de Fernando Sánchez-Mora y Sara González, un ingenioso sistema de construcción prefabricada. La solución, Arquitectura Vertida en sus palabras, se estructura alrededor de dos ideas: perfectos acabados en hormigón visto tanto al exterior como al interior (muros y techo), y planta libre sin interferencia de soportes.

El muro es semiprefabricado para conseguir un panel ligero, cómodo de manipular y de completar con hormigonado en obra. En taller se prefabrican sólo las caras (HAC de 4 cm de espesor) y se aporta el aislamiento rígido, los precercos e incluso la carpintería acabada y las instalaciones. El elemento final es un sándwich hueco, arriostrado por las celosías interiores.

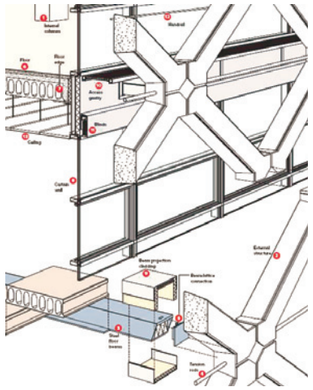
El acabado en hormigón flexible característico de Fisac se logra con una lámina de polivinilo sobre el molde, que otorga una superficie brillante y una protección hasta la instalación en obra. Una vez fraguada la cara, el encofrado se voltea y se repite el proceso en la segunda cara.

El relleno en obra se confía a un hormigón ligero HLE 25, con propiedades autocompactantes para rellenar con garantías el alma del panel sándwich. Tiene resistencia mecánica suficiente para resolver en espesores de un pie las cargas de un bloque tipo, y mejora significativamente el comportamiento higrotérmico del conjunto.

El panel se monta sobre las esperas de la planta inferior, se apuntala desde dentro y se rellena de hormigón salvo los últimos 40 cm previstos para insertar el armado longitudinal de atado. A continuación se apoyan las placas alveolares, que sólo precisan el hormigonado de la capa de compresión. Finalmente se introducen los armados verticales y se hormigonan junto al zunchado horizontal en coronación del muro.

El resultado es una ejecución en "castillo de naipes", con una sencilla y recurrente unión lineal en apoyo articulado que se estabiliza en los testeros por medio de muros de arriostramiento o cajas de escaleras.

M. Musch



Edificio Atlas en Wageningen, Holanda (Rafael Viñoly, 2007). A la derecha, organización constructiva de la fachada.

espesor de acabado de 8 cm, de los cuales sólo los últimos 2 cm son de calidad vista (cemento blanco, mármol de machaqueo, decapado mediante proyección de arena).

Por último, la malla estructural exterior del edifico Atlas de Rafael Viñoly representa una muestra reciente de la minuciosidad con la que se pueden perfeccionar los elementos lineales hasta resolver un entramado complejo. El módulo de 7,18 x 3,58 m incorpora en su sección de 40 x 38 cm un canalón en pendiente y goterón para evacuación de agua, así como las uniones con el módulo superior, el tubo de acero horizontal de arriostramiento y la conexión con la viga metálica interior.

T. Ohashi

Teatro Nacional de Okinawa en Urasoe, Japón (Takamatsu, 2003). Fachada formada por elementos prefabricados de hormigón con armaduras postesadas en obra. Una vez colocados, su armadura se fija a la del módulo adyacente para asegurar la continuidad estructural.

Hormigón traslúcido

La prefabricación arroja también productos más lúdicos. En esa perspectiva deben interpretarse los juegos de luz, que tan vivamente contrastan con la opacidad y severidad clásica del hormigón. El así llamado hormigón traslúcido ofrece un efecto singular del paso de un cierto grado de luz de una cara del hormigón a la otra mediante la incorporación de fibras ópticas (un 4%) ordenadas perpendicularmente. Se fabrican en paneles o bloques para conformar muros mediante el pegado con resinas epoxi, pero dada la limitada producción en dimensiones y espesores modestos y el alto precio, por el momento se limitan a elementos de decoración.

Bloques de hormigón traslúcido, fabricados con hormigón de áridos finos y fibras ópticas dispuestas transversalmente.

Heiderberg-Luccon

HORMIGÓN LIGERO Y AISLANTE

Definición

Hormigón que presenta una reducción del peso específico del 20 al 60%, alcanzada en general por medio de áridos ligeros y por oclusión de aire en la masa, ya sea directamente por agentes aireantes o indirectamente mediante sólidos porosos. Este aire ocluido, junto a los posibles rellenos ligeros, reducen la conductividad térmica y confieren al hormigón propiedades aislantes.

La gran variedad de combinaciones de rellenos y aditivos proporciona un amplio surtido de productos para construcción prefabricada o in situ. Estos productos se pueden clasificar en dos grupos: el hormigón poroso o celular (bloques, rellenos, etc.) y el hormigón ligero estructural (HLE).

En el primer grupo, el objetivo prioritario es el aligeramiento y el aislamiento térmico, conseguidos mediante diversas soluciones técnicas (poliestireno expandido, aireantes, etc.) que generalmente reducen las prestaciones mecánicas (resistencias relativamente bajas, de 2 a 10 N/mm^2). Suelen presentar una estructura granular de poro abierto.

En el segundo grupo nos encontramos con el hormigón ligero que se destina a usos estructurales (pilares, vigas, forjados, etc.). En este caso, la estructura granular se presenta en una masa compacta de poros cerrados, muy similar a la del hormigón convencional. La normativa contempla hormigones con densidades aparentes (estado seco) entre 1.200 kg/m^3 (D 1,2 en g/cm^3) hasta 2.000 kg/m^3 (D 2,0) conseguidas por inclusión de áridos ligeros, naturales o artificiales, y donde quedan excluidos los hormigones celulares. La resistencia se establece en un mínimo de 15 MPa (HLE 15) y un máximo de 50 MPa (HLE 50).

Objetivos

El cometido del HLE es doble: aporta ligereza (luces medias y grandes, voladizos, rehabilitación), y también aislamiento térmico (fachadas y cubiertas).

Ligereza: en relación con la densidad media del hormigón estándar, de 2.400 kg/m^3, la reducción hasta los 1.200 kg/m^3 supone un 50%, lo que revierte en menor carga muerta en forjados y menores secciones estructurales en general (importante también para reducir costes de transporte en piezas prefabricadas).

Aislamiento: el hormigón ligero aporta en todos los casos cierta capacidad aislante (la conductividad térmica del HLE medio ronda los 0,5–0,7 W/m°K, menos de la mitad del hormigón convencional), y por tanto colabora en el aislamiento térmico de la envolvente y de las divisiones interiores (particiones, forjados). Para resolver por sí mismo la necesidades de aislamiento (como la fachada con muros monolíticos del ejemplo), deberá alcanzar valores de unos 0,20 W/m°K (como referencia, la madera se sitúa entre 0,15 y 0,20) para cumplir con un espesor razonable (25 a 30 cm) los límites fijados por la normativa.

T. Defilla

Vivienda en Chur, Suiza (Patrick Gartmann, 2003). Construcción monolítica de hormigón aislante de arcilla expandida y vidrio celular. Los muros exteriores, de 45 cm de espesor, y la cubierta, de 60-65 cm, carecen de aislamiento y sólo la cubierta se proteje mediante una capa de slurry flexible de cemento modificado con polímeros.

Composición

Se basa en la sustitución de los áridos convencionales por otros ligeros (aire ocluido de poro abierto o cerrado), principalmente arcillas expandidas o vidrios reciclados entre otros (silicato volcánico, cenizas recicladas, poliestireno expandido, áridos naturales como piedra pómez o toba volcánica).

Se puede optar por sustituir sólo la grava (ø4–8 mm) o también las arenas (ø0,2–2 mm), lo que supone una reducción supletoria de unos 200 kg/m^3.

Características

Mayor aislamiento térmico: la mejora se produce en proporción directa al aumento del contenido de áridos ligeros.

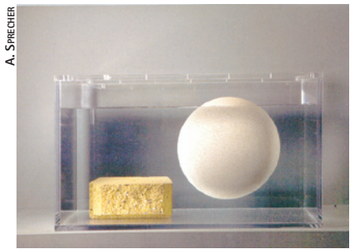
Mejor aislamiento acústico: la porosidad interna actúa de amortiguador acústico al absorber la vibración sonora, especialmente en bajas frecuencias. Características mecánicas: como regla general, para una misma resistencia a compresión (por ejemplo, H 25 y HLE 25), el módulo de deformación lineal y la resistencia a tracción disminuyen en proporción a la reducción de la densidad.

Mayor retracción: la porosidad interna conlleva mayor absorción de agua (a tener en cuenta en la dosificación) y por tanto mayor contracción del volumen seco.

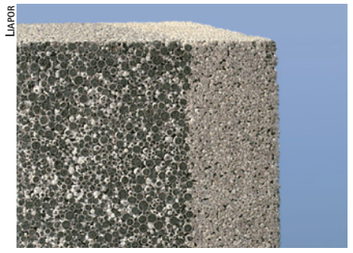
Mayor fluidez: los áridos artificiales habituales presentan forma esférica de pequeño tamaño (8 mm de diámetro) que facilita el flujo.

Peor compactación: el árido pesa menos y traslada peor la energía de vibración.

A. Sprecher



Liapor



Xella

Esfera de hormigón celular flotando en el agua. A su lado, pieza de hormigón convencional. En el centro, elemento prefabricado aislante compuesto por hormigón con árido de arcilla expandida sin finos y capa exterior de cemento con vidrio celular. Abajo, placas prefabricadas de hormigón celular armado para forjado y cubierta. Con luces de hasta 6 m y espesores hasta 30 cm, permiten realizar cubiertas sin aislamiento térmico convencional. A diferencia del hormigón celular realizado in situ, el prefabricado puede emplearse en elementos estructurales.

W. Dechau

Para su casa en Berlín, Mike Schlaich ha empleado muros monolíticos de hormigón infraligero (760 kg/m^3 de densidad) de 50 cm de espesor que no requieren aislamiento térmico.

W. Dechau

Arriba y en el centro, imágenes de la construcción de la casa Schlaich, donde se observa los conductos de instalaciones embebidos en los forjados y los muros de fachada con armaduras poliméricas, de baja conductividad térmica. Abajo, los tensores para anclaje de encofrados fabricados con fibra de vidrio evitan corrosiones y puentes térmicos.

B. T. Innovation

Mejor comportamiento frente al fuego: posee menor conductividad térmica, menor coeficiente de dilatación térmica y mayor elasticidad, lo que reduce el riesgo de choque térmico.
Precio: aproximadamente el doble que un hormigón convencional.

Ejemplo
Vivienda unifamiliar en Berlín, 2007.
Mike Schlaich con Clemens Bonnen y Amanda Schlaich.

Mike Schlaich, ampliamente conocido por sus obras con la ingeniería Schlaich, Bergermann und Partner, ha recogido en la realización de su casa el testigo de las diversas construcciones monolíticas actuales (Bearth & Deplazes, Patrick Gartmann), para combinar la expresividad del hormigón visto en ambas caras con el aislamiento y la estanqueidad necesarios a toda envolvente.
La solución monolítica resulta claramente onerosa, pero aporta ventajas sustanciales, al eliminar de raíz las condensaciones y presentar una ejecución sencilla y unitaria, evitando engorrosas soluciones sándwich in situ, como los núcleos de poliestireno expandido, que ocasionan serios problemas de continuidad en encuentros de forjados y muros.
El muro de hormigón monolítico resuelve en un solo material el conjunto de exigencias estructurales y de cerramiento. Sólo necesita alcanzar resistencias a compresión equivalentes a muros de carga de fábrica de ladrillo (resistencias características de 5 a 10 MPa) y una conductividad térmica que permita prescindir del aislamiento convencional.
Las pruebas realizadas en laboratorio han permitido a Schlaich desarrollar una solución, denominada "hormigón infraligero", con una densidad inferior a 800 kg/m^3 (D 0,8; de hecho el hormigón flota en el agua). Las características finales presentan una densidad en seco de D 0,76 con una resistencia a compresión de 7,0 N/mm^2 y una conductividad térmica de 0,18 W/m°K a 10°C, lo que permitiría realizar, en la zona más exigente de España, muros de fachada con 28 cm de espesor, y que en Berlín han exigido 50 cm. Se ha recurrido exclusivamente a gravas y arenas de arcilla expandida, aireantes, una relación agua-cemento alta (0,5) y aditivos superfluidificantes de última generación.
Para confirmar las tesis experimentales se ha proyectado una construcción unifamiliar de tres plantas, con dos fachadas de hormigón y las otras dos acristaladas. El hormigón, visto por ambas caras (salvo el extradós de la cubierta), es infraligero en muros, ligero en la cubierta y convencional en el forjado intermedio. Dado el aumento de absorción de agua debido a la mayor cantidad de poros, el acabado exterior se completa con un hidrofugado con xilanos. Las irregularidades de acabado se repasaron con mortero de arcilla expandida.
El armado de los muros, destinado a absorber las fuertes retracciones del hormigón, se realizó con barras poliméricas que evitan la aparición de corrosión con independencia del espesor de recubrimiento (unos 5 cm) y, ante todo, eliminan una gran cantidad de pequeños puentes térmicos de acero. La solución monolítica exigió un riguroso replanteo previo de tuberías, manguitos y cajas, fijados a armaduras y encofrados antes del hormigonado. A pesar del sobrecoste del hormigón aislante (hasta dos veces el convencional), la casa experimental ha mostrado ser globalmente más económica.

D. Frutos

Colegio y biblioteca en Torre Pacheco, Murcia (Martín Lejárraga, 2007). Escalera de acceso al área de exposiciones. El hormigón construye y caracteriza todo el espacio.

Cobiax

Escuela Zollverein en Essen, Alemania (SANAA, 2006). Losa de cubierta realizada mediante forjado aligerado con esferas de plástico.

B. Khoshnevis

Contour Crafting es un sistema experimental de proyección de hormigón a través de una boquilla fijada a un brazo robotizado. Este sistema permitiría construir muros de forma libre mediante sucesivas capas de hormigón.

R. Feiner

Casa Meuli en Fläsch, Suiza (Bearth y Deplazes, 2001), construcción monolítica de hormigón aislante con muros de 50 cm de espesor.

Envolvente

Nada hay más cierto que la obsesión arquitectónica por el material único, aquél que resuelva la totalidad de la obra. Este viejo sueño, hasta hace poco ilusorio por la pérdida de confort que conlleva la piel realizada exclusivamente con vidrio, acero u hormigón, tiene hoy una oportunidad.

Mientras que gran número de patentes están conformadas no ya con un material, sino con un único proceso de ejecución (como el sándwich realizado in situ de hormigón y alma aislante), otros como Deplazes, Baumgärtner o Schlaich, optan por elaborar una masa de hormigón ligero por incorporación de arcilla expandida, que puede resolver por sí mismo las exigencias de aislamiento térmico global (ver texto "Hormigón ligero y aislante").

De lo expuesto se resume que no queda tan lejos el viejo sueño de Edison de fabricar edificios de hormigón in situ mediante un proceso industrial automatizado. La disponibilidad de hormigones armados y aislados en masa, con un estricto control de consistencia, permite ejecutar un vertido automatizado que no precise armados supletorios ni encofrados. Una aproximación la propone el sistema Contour Crafting, aún en fase experimental, que se inspira en las superestructuras realizadas en Yachiyoday, Japón, para ejecutar con la ayuda de un robot, hiladas sucesivas de hormigón que reproducen libremente las formas estructurales más diversas. [T]