

EL RETO DEL  
MATERIAL

*David Sanz Aráuz*

*THE CHALLENGE OF  
THE MATERIAL*

*david.sanz.arauz@upm.es*  
*<https://orcid.org/0000-0001-5289-3267>*

*Doctor Geólogo. Profesor Contratado Doctor.*  
*Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas. Escuela Técnica Superior de Arquitectura.*  
*Universidad Politécnica de Madrid.*

En el presente artículo se trata sobre el desarrollo tecnológico del hormigón como material prácticamente universal. Se recogen los avances más significativos que pueden dar lugar a cambios en la concepción del hormigón, desde la composición y forma de sus componentes hasta los sistemas de puesta en obra. Por último se reflexiona sobre la importancia de conservar el patrimonio en hormigón en términos de transmisión de la herencia constructiva a las futuras generaciones, sostenibilidad y economía circular.

Palabras clave: Hormigón, propiedades materiales, durabilidad, tecnología.

#### ABSTRACT

*This article deals with the technological development of concrete as a practically universal material. The most significant advances that can give rise to changes in the conception of concrete are collected, from the composition and shape of its components to the installation systems. Finally, it reflects on the importance of conserving heritage in concrete in terms of transmission of the construction heritage to future generations, sustainability, and circular economy.*

*Keywords: Concrete, material properties, durability, technology.*

Joseph Aspdin patentó en 1824 un tipo de conglomerante que denominó “*portland cement*”. Este hecho está considerado uno de los principales puntos de inflexión en la historia de la arquitectura y la ingeniería. No cabe duda de que forma parte de una cadena con muchos más eslabones que incluiría al menos la comprensión de la hidráulidad por Victat y la fabricación de acero de bajo coste a partir del convertidor Bessemer, entre otros. Estos cambios han impulsado una forma de construcción de los edificios y las infraestructuras en la que el hormigón armado es el principal protagonista, por razones de disponibilidad de materias primas y de economía de producción, durante todo el siglo xx.

En la actualidad la tecnología de la construcción está volviendo a cambiar, por diversos motivos, tanto por la emergencia de innovaciones como por motivos económicos, sociales y políticos. Ante estos cambios, el hormigón se enfrenta a un nuevo reto, para seguir siendo el material más utilizado de los fabricados por la mano humana.

## EL MATERIAL Y SUS PROPIEDADES

Distintos estudios han demostrado que en ese siglo la composición del cemento, base del hormigón, ha variado esencialmente muy poco: un ligero aumento de la proporción de silicato tricálcico (alita) en el *clinker* y una mejora en la finura, lo que permite mayores resistencias, tanto iniciales como finales. Pero en lo básico los componentes son los mismos – silicato tricálcico, silicato bicálcico, aluminato tetracálcico, ferrito aluminato tetracálcico, y yeso – que mezclados

con agua y áridos forman el hormigón. Estos componentes son los responsables de las propiedades en estado fresco y en estado endurecido del hormigón, que junto con el armado y la puesta en obra determinan su calidad arquitectónica y constructiva.

Las propiedades dependen en gran medida de la dosificación, del papel de los áridos por su naturaleza, forma y distribución granulométrica y de los aditivos empleados. Todos estos factores influyen decisivamente en el fraguado, reología, amasado y puesta en obra, curado, aspecto, resistencia, permeabilidad–difusión del  $\text{CO}_2$  y durabilidad. (Fig. 1)

Todo en el hormigón funciona como un sistema dinámico y complejo, en el que la investigación básica y su aplicación en la ciencia de la construcción tiene un papel protagonista.

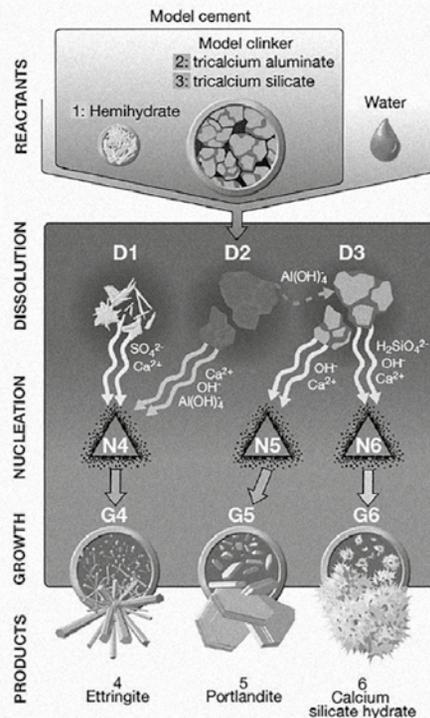


Fig. 1

Ilustración de Fabian Rudy sobre el proceso de hidratación de los cementos, para los trabajos de investigación de Delphine Machon et al. EN: D. Marchon et al., "Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry.", Cement and Concrete Research, nº 112 (2018): 96-110.

## AVANCES CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICOS

Los avances más significativos del hormigón en el siglo xx han sido, además de los propios de la maquinaria de puesta en obra, por una parte el desarrollo de aditivos, que considerados como un componente más han facilitado la entrada de materiales de sustitución del cemento portland puro (adiciones), el control sobre el fraguado, el bombeo en altura o a largas distancias horizontales, el desarrollo de los sistemas de hormigón preparado (*ready-mixed concrete*); y por otra parte la ciencia de materiales compuestos en lo referente al comportamiento de los refuerzos de fibras y partículas, la mecánica de la fractura de materiales frágiles, y el conocimiento sobre los fenómenos de frontera de grano en la nano, micro y macro escalas. Lo que ha permitido la aparición de los hormigones de alta resistencia, los hormigones con fibras, los hormigones autocompactantes, y por último los hormigones de ultra altas prestaciones.

Sin embargo, estas innovaciones surgidas en respuesta a presiones de facilidad de ejecución y coste no son suficientes para abordar los retos de la arquitectura y la ingeniería de la construcción en el siglo XXI.

En la actualidad hay fuerzas globales que empujan al desarrollo de hormigones adecuados para una construcción automatizada y hacia materiales que generen una menor huella de  $\text{CO}_2$  y tengan mayor durabilidad, es decir que se mantengan en buenas condiciones de servicio durante el mayor número de años posible. El contexto en el que estos materiales deben aparecer está determinado por procesos globales, como la escasez de energía, agua y materias primas para una población creciente, el desarrollo imparable de la cibertecnología, el cambio climático y las políticas de impuestos y restricciones asociadas, como la tasa de emisiones o los gastos de secuestro de  $\text{CO}_2$ , y por tecnologías emergentes: la computación con el Big Data, la instrumentación y los materiales inteligentes, la fabricación aditiva con los avances en aditivos adecuados para ella, y los conglomerantes alternativos. De entre todas estas innovaciones, probablemente la que mayor impacto tenga sea la fabricación aditiva, o impresión tridimensional del hormigón, acompañada de sistemas de concepción de la forma y estructura arquitectónicas diferentes de los actuales, con un apoyo importante de herramientas de diseño digital.

Su implantación provocará cambios en los sistemas de amasado, transporte y puesta en obra; en las normas y los procedimientos de ensayo y control; y por supuesto en los materiales, tanto en el cemento, como en los áridos y el refuerzo, y en especial en los aditivos.

En la fabricación aditiva del hormigón la función que desempeñaba el encofrado recae ahora en el propio material. De modo que las propiedades reológicas (viscosidad/tiempo/resistencias) y de hidratación (nucleación y crecimiento cristalino) son cruciales por sus correspondientes efectos en el aspecto final y en la resistencia y la durabilidad del hormigón. Conviene recordar que el proceso de hidratación va acompañado de una disipación de calor que provoca fisuras o grietas, cambios en la docilidad de la mezcla por evaporación del agua, fraguados diferenciales, segregación de los áridos, etc.

Se trata, como se ha dicho antes, de un sistema complejo y dinámico en el que las propiedades no son estáticas, sino que van cambiando con el tiempo, propiedades que evolucionan en distintas etapas con diferentes estados viscosos. Entender y actuar sobre este sistema es la base para el desarrollo definitivo de la impresión tridimensional. En particular con la ciencia aplicada a la extrusión, que es la técnica más desarrollada entre los distintos procedimientos ensayados para la fabricación digital de hormigón.

La evolución de la consistencia o fluidez durante la impresión se puede controlar midiendo la tensión de fluencia de la mezcla (*dynamic yield stress*) a distintos tiempos, de este modo se han descrito cuatro estadios: bombeo y extrusión, vertido, tiempo de trabajo (*green strength*), ganancia rápida de resistencias, y curado. En cada una de estas etapas se necesitan diferentes aditivos para modificar las propiedades asociadas a cada estado: alta fluidez, estabilidad de la mezcla, control del tiempo de fraguado, control de las reacciones de hidratación, endurecimiento. Se trata de actuar a la vez sobre los sistemas coloidales y de crecimiento cristalino con aditivos tanto orgánicos como inorgánicos.

Todo esto tendrá una incidencia especial si en lugar de barras de acero se emplean otro tipo de sistemas de refuerzo como las fibras, como parecen indicar todos los estudios. Siendo el manejo adecuado del flujo con las fibras y la formación de juntas entre capas de impresión (*cold joints*), uno de los retos principales respecto a las propiedades en estado endurecido: aspecto, resistencia final y durabilidad.

## DURABILIDAD Y PATRIMONIO EN HORMIGÓN

Por otra parte, en un ámbito más allá de fabricación digital, la mayoría de los trabajos respecto a la durabilidad sugiere sustituir a medio plazo las barras de acero por otros elementos que no estén sometidos a la corrosión.

Los fenómenos de corrosión en el acero son la principal causa de pérdida de durabilidad del hormigón. Se dice que los costes de mantenimiento y repa-

ración de estructuras de hormigón armado superará en poco tiempo a los de construcción. En zonas especialmente agresivas y para soluciones comprometidas (vg. un puente en una zona marítima fría), los refuerzos de acero inoxidable son viables desde el punto de vista económico.

Razones no solo económicas, sino también medioambientales y culturales, deberían hacernos reflexionar sobre el problema del patrimonio en hormigón del siglo xx. Este patrimonio es uno de los más vulnerables, dado su enorme riesgo por corrosión, la cantidad de bienes afectados y el escaso interés, en algunos casos nulo, por su preservación. Son pocos los edificios e infraestructuras de hormigón protegidos y tutelados por las administraciones públicas, y no hay un fervor popular por su conservación. Sobre este problema, también la ciencia de la construcción puede aportar ideas y soluciones.

Para solventar el problema de la corrosión hay distintas alternativas, el cambio de sistema de refuerzo es la principal, pero también se están recorriendo otros caminos como los materiales de autorreparación (self-healing concrete), que permiten el sellado de fisuras cuando se produzcan, evitando así la entrada de agua y la difusión del  $\text{CO}_2$  y del ion cloro, entre otras sustancias. En estos desarrollos participan la nanotecnología, la ciencia de la computación y los materiales inteligentes, y los biomateriales.

## CONCLUSIÓN

Como se puede inducir de este artículo, el reto del material solo se acometerá con una combinación adecuada de conocimiento de materiales, diseño, y estrategias de proceso constructivo.

### Bibliografía

Marchon, D., S. Kawashima, H. Bessaies-Bey, S. Mantellato, y S. Ng. "Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry". Cement and Concrete Research 112 (2018): 96-110.