

# Hormigones de cal

## nuevos viejos materiales

La cal es un material tradicional: la argamasa en base de cal y otros materiales se ha utilizado con excelentes resultados desde “siempre” en nuestra cultura y geografía<sup>1,2</sup>.

**T**ambién se puede usar en la construcción actual y con excelentes resultados, pero hay que tener en cuenta varias consideraciones y precauciones.

El objetivo de este artículo es reivindicar el hormigón de cal como un material de construcción que entronca perfectamente con la tradición constructiva mediterránea, da respuesta a las exigencias de compatibilidad en obras de restauración y, en determinadas condiciones, conlleva menor impacto ambiental que otras soluciones.

Lo hacemos ante la hegemónica imposición del cemento que, a pesar de ser un excelente material, conlleva algunos problemas en el mundo de la restauración vinculados a la aparición de sales, a incompatibilidades con los módulos de deformación de las estructuras tradicionales o con la formación de compuestos expansivos.

### Los hormigones de cal versus los de cemento Portland

Cualquier profesional tiene, hoy día, unos conocimientos extensos sobre el hormigón de cemento Portland (CP) y sino, sabe dónde ir a buscar la información: hay una extensa bibliografía, normativa y reglamentos, una potente industria de los aditivos y tecnología suficiente como para hacer hormigones de CP de características especiales. No ocurre lo mismo con los hormigones de cal.

En cualquier caso, el hormigón es un excelente material de construcción: conformable, resistente, volumétrico y en el que

podemos incorporar armaduras para que absorban las tensiones justamente allí donde convenga. Si utilizamos hormigones de CP podemos encontrarnos con problemas derivados de la excesiva rigidez que proporciona el cemento, con la aparición de sales o con la falta de transpirabilidad que ocasionan algunos morteros. Si utilizamos hormigones de cal evitamos estos problemas y, además, conseguimos más transpirabilidad, aspectos más acordes con los sistemas constructivos preexistentes y, en determinadas situaciones, mejor comportamiento ambiental. Pero no podemos sustituir de manera automática el cemento por la cal porque entre ambos materiales hay aspectos que se deben controlar.

### El agua de amasado

En primer lugar, el **agua de amasado**: si queremos conseguir resistencias relevantes con hormigones de cal tenemos que conseguir reducir el agua de amasado. Es bien sabido que la cal es un producto muy fino, de mucha superficie específica, y que exige mucha agua para poder conseguir consistencias adecuadas a la hora de trabajarlo<sup>3</sup>. Habitualmente esta trabajabilidad se consigue a base de añadir agua. Pero una alta relación agua/conglomerante penaliza mucho la resistencia y, por tanto, debemos buscar aditivos que nos permitan rebajar esta relación (reductores de agua). Tradicionalmente esta función la hacían determinadas sustancias naturales (azúcar, clara de huevo, sangre, etc.) y hoy día existen algunos buenos



Por **Joan Ramon Rosell\***



Por **Montserrat Bosch\***

aditivos reductores de agua que actúan correctamente con conglomerantes de cal.

Estos aditivos generalmente son sintéticos y derivados del petróleo. Desde el punto de vista medio ambiental, esta realidad debe considerarse junto con otros parámetros: se utiliza muy poca cantidad y al aumentar la resistencia del hormigón se pueden reducir las secciones y "adelgazar" los elementos constructivos, con lo que se reduce la demanda de material y los impactos asociados. Con todo, si no es necesario aumentar la resistencia, es mejor evitarlos.

Si la cal a utilizar es en pasta (cal aérea), se puede reducir la cantidad de agua y añadir azúcar, pero con esta cal no se podrán construir elementos de grosor considerable ni, por desdoblado, realizar hormigones.

Paralelamente, si reducimos el agua reducimos la retracción, un problema más importante en la cal que en el cemento. Si no queremos fisuras por retracciones podemos establecer diferentes estrategias que tienen que ver con la granulometría, con la incorporación de aditivos que modifican la tensión superficial en la red de poros, y/o con adiciones que compensan la pérdida de volumen. Pero una acción sencilla y eficaz es, evidentemente, reducir el agua de amasado, que, además, conlleva una reducción de la porosidad, a tener en cuenta de cara a la durabilidad.

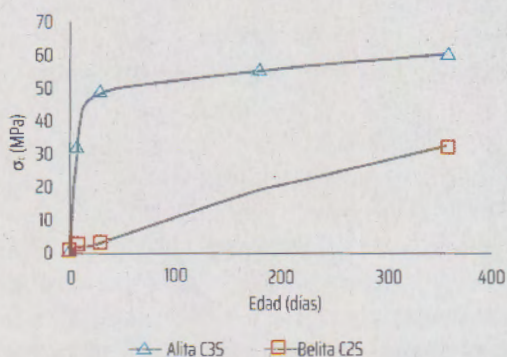
Con todo, también deberíamos **curar el hormigón de manera adecuada**: si con un hormigón de CP hacemos el curado a base de regarlo o impedir que el agua se vaya, en un hormigón de cal hay una parte de reacción hidráulica que necesita agua, mientras que otra parte de reacción aérea necesita  $\text{CO}_2$  del aire. Si la red porosa está llena de agua, el  $\text{CO}_2$  no llega al interior del hormigón, por lo tanto, la manera de curar un hormigón de cal es regarlo a menudo y poco, para que se moje y se seque varias veces.

## Evolución de la resistencia

Otra cuestión es la **evolución de la resistencia**: en los hormigones de cal se alcanzan las resistencias más lentamente que con los hormigones de cemento. El motivo vuelve a ser químico: la alita, componente protagonista del cemento, adquiere

Gráfico 1. Curvas de crecimiento de resistencia y valores alcanzados por la alita C3S (componente protagonista de los cementos) y la belita C2S (componente coprotagonista de las cales hidráulicas).

## Evolución de la resistencia a compresión



resistencias a compresión muy rápidamente, mientras que la belita, componente coprotagonista de las cales hidráulicas, la adquiere más lentamente y de manera constante (fig. 1). En paralelo, la deformabilidad (Módulo de Young) que crece a medida que sube la resistencia, también aumenta más lentamente en un hormigón de cal que en uno de CP. En consecuencia, las obras con hormigón de cal se deben desencofrar bastantes días más tarde de lo que estamos acostumbrados a hacer con los hormigones de CP, lo que implica organizar la obra de manera diferente.

## Reserva alcalina

Tercera cuestión: **la reserva alcalina**. Conocemos como reserva alcalina al contenido de material presente en la matriz del hormigón, con capacidad de disolverse en agua y de aumentar muy significativamente el pH de esta. En el CP la reserva alcalina es la portlandita, es decir, la cal que se genera en el fraguado del propio cemento.

Podríamos pensar que el hormigón de cal, al ser de cal tiene por sí solo mucha reserva alcalina, y ciertamente es así al inicio. Pero con el paso del tiempo y del  $\text{CO}_2$  la cal se carbonata convirtiéndose en carbonato cálcico, que ya no es soluble y, por tanto, ya no modifica el pH del agua que pueda aparecer exteriormente.

## técnica constructiva

Esta reacción de carbonatación avanza del exterior al interior a una velocidad que depende fuertemente de la porosidad del material. El hormigón de cal es necesariamente más poroso porque se tiene que dosificar con mucha más agua que la que consumirá en las reacciones de hidratación. Es esta agua la que acabará evaporándose y dejando tras de sí mucha red porosa. En consecuencia, la velocidad de carbonatación del hormigón de cal es tan elevada que consume la reserva alcalina en muy poco tiempo, y al no tener suficiente reserva alcalina provoca la rápida desprotección química de la armadura convencional frente a la corrosión. Por lo tanto, no debemos armar los hormigones de cal con las barras y mallas convencionales.

### Algunas experiencias

En el actual clima de reivindicación del uso de la cal frente a la imposición masiva del CP, desde la Universidad y los laboratorios de materiales hemos estado trabajando en caracterizar, analizar los comportamientos y diseñar hormigones de cal "ad hoc" para obras singulares. De estas experiencias hemos aprendido y detectado algunos aspectos con los que debemos ser cuidadosos si queremos actuaciones exitosas.

A partir de algunas primeras experiencias en hormigones de cal en masa [4, 5, 6 y 7], empezamos a plantearnos los hormigones de cal con armaduras, lo que conllevaba definir los valores para diferentes parámetros. En el caso de los hormigones de CP y armaduras convencionales de acero corrugado, estos parámetros son bastante conocidos y están incorporados por defecto en las bases de datos de los programas de cálculo. Nos referimos al Módulo de Young del material, las resistencias características alcanzables, las consideraciones de adherencia entre el hormigón y el elemento de armado para determinar las longitudes de anclaje, las curvas de crecimiento de la resistencia en función del tiempo, los tiempos de espera para desapuntalado y desencofrado, etc.

Pero toda esta información no está disponible para los hormigones de cal, por lo que en 2015 iniciamos una investigación



Figura 2. Detalles del refuerzo de las almenas y zuncho perimetral de la casa Puig i Cadafalch en Argentona. A la izquierda, los conectores y la armadura de fibra de vidrio. A la derecha, los elementos ya hormigonados. Foto de los autores.

encaminada a conocer la adherencia del hormigón con las armaduras de acero inoxidable y con las de fibra de vidrio [8]. De los resultados obtenidos se comprobó que las barras de fibra de vidrio se adherían a los hormigones de cal tanto como las de acero corrugado, con unos valores equivalentes a los obtenidos con hormigones de CP de similares resistencias. Eso sí, con velocidades de carbonatación mucho más elevadas.

El estudio se realizó pensando en el proyecto de la arquitecta **Mercè Zazurca** para la rehabilitación de la casa Puig i Cadafalch de Argentona, concretamente tratando de dar solución al refuerzo de las almenas que recorrían las fachadas. Se trataba de diseñar un refuerzo de hormigón en forma de L suficiente rígida y con conectores con la fábrica para resolver los problemas de inestabilidad al viento de las propias almenas, al tiempo que mejoraba el comportamiento estructural general del edificio al dotar a todo el conjunto de un zuncho perimetral de coronamiento a las paredes de carga (Fig.2).

En este caso, el hormigón se hizo a partir de un mortero de cal comercial, con la corrección de granulometría hecha en obra mediante la aportación de una gravilla, los armados fueron de malla de fibra de vidrio.

Una segunda experiencia la hemos tenido en la restauración de la Iglesia de Rosselló de **Miguel Ángel Sala**, arquitecto, donde se proponía la reconstrucción del paramento y el arranque del campanario, repitiendo parcialmente la volumetría que tenía el conjunto antes del derrumbe ocurrido en enero de 2016 (fig. 3). Esta intervención se quería hacer con un material distinto al original, pero con las garantías de compatibilidad entre materiales y con un aspecto determinado, por lo que se pensó en un hormigón de cal. El encargo nos llegó con tiempo suficiente para desarrollar, a partir de una campaña experimental previa, el hormigón de cal en laboratorio. Esta es una consideración a tener en cuenta: si queremos saber resultados de resistencia de un hormigón a 60 días, hay que prever e iniciar los estudios con suficiente antelación.

La propuesta fue un hormigón en masa, ciclópeo, fabricado en obra, en distintas amasadas relativamente pequeñas dada la necesaria lentitud de la obra, y encofrado a dos caras. El proyecto incorporaba unas pequeñas impostas de ladrillos cerámicos en la nueva fachada que coincidían con las juntas del hormigonado por tongadas y que además permitían ocultar posibles fisuras.





Figuras 3. Iglesia de Rosselló (Lérida): a) después del derrumbe de la torre del campanario y las partes inferiores. Foto Diari El Punt-Avui; b) tras la restauración. Foto de los autores.

El requerimiento inicial era de 10 MPa a 90 días, que a pesar de no ser elevado tampoco era fácil de alcanzar. Se prepararon en laboratorio diferentes dosificaciones partiendo de los materiales previsiblemente utilizables en la zona donde se encontraba la obra. Algunos de los hormigones diseñados proporcionaron, en laboratorio, resistencias superiores a 35 MPa a 60 días, añadiendo adiciones puzolánicas y con un control del agua muy exigente. De las distintas formulaciones estudiadas se eligió la que proporcionaba, en laboratorio, los 10 MPa a 28 días, sin demasiadas complicaciones en la dosificación.

Pero en esta experiencia nos topamos con otra realidad: la producción del hormigón de cal en obra necesita, por parte de los operarios, de un conocimiento preciso. A pesar de haber indicado a los operarios cómo hacer el hormigón, las probetas realizadas del primer hormigón hecho in situ dieron unas resistencias de 2,3 MPa a 28 días y 3,7 MPa a 60 días, preocupantemente por debajo de lo esperado.

Efectivamente, las dosificaciones en obra se hacen a cubos, capazos y carretillas; si no tenemos el aditivo que nos han prescrito, utilizamos "el de siempre" que tan buenos resultados proporciona; y si con todo, el hormigón no "funciona bastante bien" (que podríamos interpretar como que no es lo suficientemente fluido) se le añade un poco de agua.

En obra no hay un dosificador mecánico; los operarios, incluso aquellos que tienen mucho oficio, desconocen los hormigones de cal y la propia cal en sí. Por lo tanto, es necesario transmitir el cuidado necesario para utilizar este tipo de materiales y ajustar las prescripciones técnicas que vienen de laboratorio a las distintas realidades de las obras. Solo así se podrán obtener buenos resultados, como los obtenidos finalmente en esta obra (fig. 4).

## Conclusiones

Los hormigones de cal son perfectamente compatibles con intervenciones estructurales en obras de restauración (y no solo en estas).

Las cales hidráulicas nos permiten confeccionar estos materiales sin ninguna aportación de cemento Portland, pero la "cultura" del hormigón (que por defecto siempre consideramos hormigón de cemento portland) no se puede trasladar miméticamente a los hormigones de cal.

Hay que ser especialmente cuidadosos en varios aspectos:

## Evolución de la resistencia a compresión (60% HR; 20 °C)

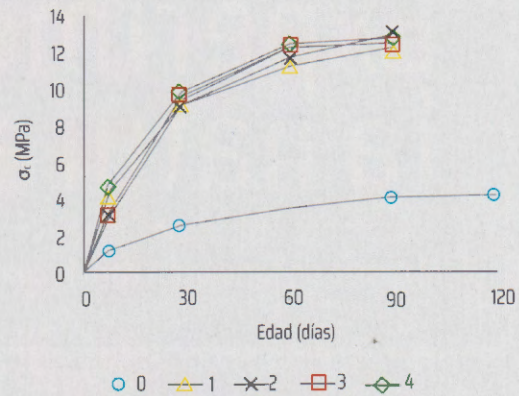


Figura 4. Evolución de las resistencias a compresión de los hormigones para la iglesia de Rosselló: muestra 0, la primera realizada en obra; muestras 1, 2, 3 y 4 correspondientes a distintas amasadas realizadas en obra, pero siguiendo estrictamente las especificaciones de proyecto.

- La utilización de reductores de agua.
- El uso de armaduras no corrosibles (fibras sintéticas, fibras vegetales, aceros galvanizados, etc.).
- Respetar los tiempos de fraguado y de adquisición de resistencia.
- Asumir que hay que trabajar con resistencias "bajas" (hasta 15 MPa) a 90 días.
- Saber trasladar la "manera de hacer" estos hormigones a pie de obra.

Y agradecimientos: a aquellos profesionales como **Mercè Zazurca** y **Miquel Àngel Sala**, que apuestan por la investigación y la innovación en sus proyectos, y colaboran con la Universidad en la generación y la transferencia del conocimiento.

\***Joan Ramon Rosell**, PhD. Professor UPC. Director del Laboratorio de Materiales EPSEB-UPC.  
<https://labmaterials.epseb.upc.edu/ca>

\***Mercè Zazurca i Codolà**, Arquitecta, especializada en intervenciones en el Patrimonio Histórico. Dinamizadora para equipos multidisciplinares para la innovación de la rehabilitación sostenible. [z.m@coac.net](mailto:z.m@coac.net)

### Bibliografía.

- 1.- **Adam, J.P.** (1996). La construcción romana, materiales y técnicas. Editorial de los oficios. León.
- 2.- **Vitruvio Polion, M.** (1787). Los diez libros de arquitectura, Traducción de **Joseph Ortiz**. Madrid, Imprenta Real.
- 3.- **Rosell, J.R.** (2013). Aportaciones al comportamiento deformacional de pastas de cal. Tamaño y forma de las partículas. Tesis doctoral. UPC. Barcelona.
- 4.- **Bestue, J.; Corbella, X.; Rosell, J.R.** (2010). Diseño y determinación de propiedades de un hormigón romano. PFG. UPC. Barcelona
- 5.- **Peñaranda, P.; Rosell, J.R.** (2012). Diferencias y similitudes entre morteros de cal hidráulica y morteros mixtos de cal aérea y cemento portland. PFG. UPC. Barcelona.
- 6.- **Lucas, P. de; Rosell, J.R.; Píalarissi, S.H.** (2017). Estudio de hormigones de cal hidráulica con fibras de polipropileno. Tesina Máster. UPC. Barcelona.
- 7.- **Bedini, S.; Rosell, J.R.** (2017) Estudio de micro-hormigones de cal con sustitución de árido natural por árido cerámico reciclado. Tesina Máster. UPC. Barcelona.
- 8.- **Rosell, J.R. De la Rosa, G., Ramírez-Casas, J.** (2016). Hormigones de cal: Adherencia a las armaduras. Ponencia en el congreso: A cal no espaço ibérico: um futuro com história; V Jornadas FICAL - Fórum Ibérico da Cal. Lisboa.