

## Hormigones de cal: nuevos “viejos” materiales

Joan Ramon Rosell, Montserrat Bosch

*Laboratori de materials, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), España.  
joan.ramon.rosell@upc.edu*

### Resumen

El objetivo de la presentación es reivindicar el hormigón de cal como un material más de los que tenemos a nuestro alcance, que entronca perfectamente con la tradición constructiva mediterránea, y da respuesta a las exigencias de compatibilidad en obras de restauración, así como las actuales exigencias de sostenibilidad.

Se hace una lectura con una cierta perspectiva histórica para acabar repasando algunas obras cercanas al autor. En algunas de ellas se ha trabajado a nivel laboratorio para definir y controlar el material. De todo ello se deducen unas recomendaciones generales que finalmente se exponen.

Palabras clave: Restauración; Patrimonio; Hormigón; Cal

### Introducción

La cal es un material tradicional (Fig. 1).

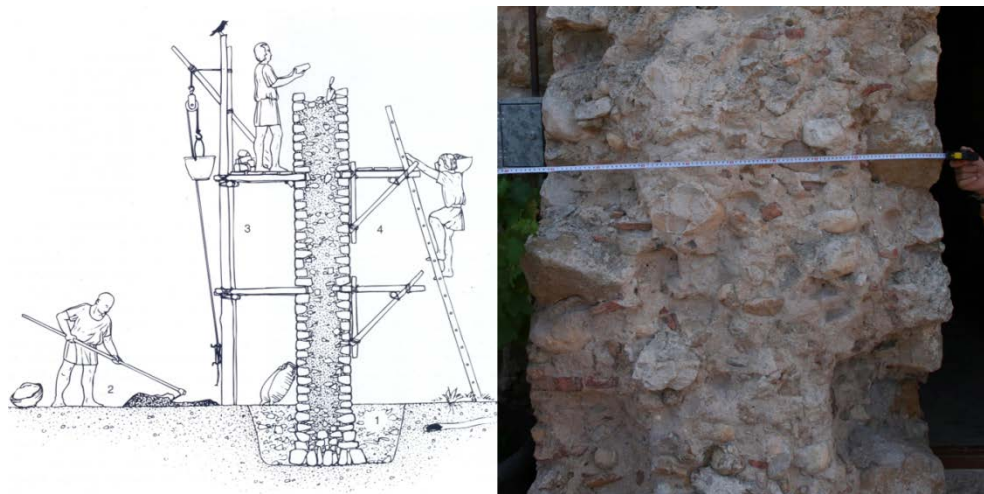


Figura 1. El hormigón de cal es un viejo material de construcción. Imagen de la izquierda, ilustración explicativa de la construcción de un muro romano [1]. Imagen de la derecha, contrafuerte roto de una masía en l'Empordà (Girona). Fotografía JRRA.

La argamasa en base de cal y otros materiales se ha utilizado con excelentes resultados desde "siempre" en nuestra cultura y geografía. Y también se puede usar en la construcción actual, con excelentes resultados, teniendo en cuenta diversas consideraciones y precauciones. Reivindicamos por tanto la cal ante la hegemónica imposición del cemento, que también es un excelente material, pero que en el mundo de la restauración nos conlleva algunos problemas vinculados a la aparición de sales, incompatibilidades entre los módulos de deformación de las estructuras tradicionales y las de hormigón de cemento portland (CP), formación de compuestos expansivos, etc.

### **De la cal al cemento: conceptos de puzolanidad e hidrulicidad**

Tradicionalmente se ha trabajado con cal aéreas, obtenidas a partir de la cocción de piedras muy puras de carbonato cálcico. El saber popular y la bibliografía histórica [2] ya hacen referencia a la bondad de estas cal y también nos avisan de que cuando queremos obtener productos más impermeables o más resistentes necesario mezclar esta cal aérea con adiciones tipo puzolanas naturales o chamota, que no es más que cerámica cocida a baja temperatura, hecha polvo (en catalán picadís, en italiano cocchiopesto) (Fig. 2).

Si analizamos este saber popular desde la química, vemos que el objetivo es conseguir un silicato cálcico o un aluminato cálcico, y por tanto, añadir a la cal, sílice ( $\text{SiO}_2$ ) o alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) reactivas, que es lo que aportan todos estos materiales de tipo puzolánico. A esta capacidad de reaccionar con la cal (y otros alcalinos) en presencia de agua la llamamos puzolanidad.



Figura 2. Detalle de una junta de mortero de cal con chamota correspondiente a una fábrica de ladrillo de la Alhambra de Granada. Fotografía JRRR.

Si se fabrica la cal a partir de la cocción de piedras menos puras, con mayores contenidos de arcillas, margas, etc, se obtienen cales en las que ya hay una parte en la que los silicatos cálcicos (y los aluminatos cálcicos) se forman en la propia cocción. Por tanto, en esta parte, sólo será necesaria la aportación de agua para formar compuestos resistentes del tipo silicatos cálcicos hidratados (tobermoritas, ..). A la capacidad de formar esta reacción de hidratación, la llamamos

hidraulicidad. El resto del material, aquel que no contiene compuestos provenientes de las arcillas, reaccionará con el  $\text{CO}_2$  en la conocida reacción de carbonatación (aérea).

Es en base a la proporción entre estos dos tipos de materiales (los aéreos y los hidráulicos) que podemos identificar o diferenciar las diferentes cales y cementos: la cal, la cal hidráulica, el cemento natural o los cementos portland no son materiales tan diferentes ya que todos ellos tienen una base común: la cal o el calcio. En la Fig. 3 podemos ver en esquema esta clasificación.

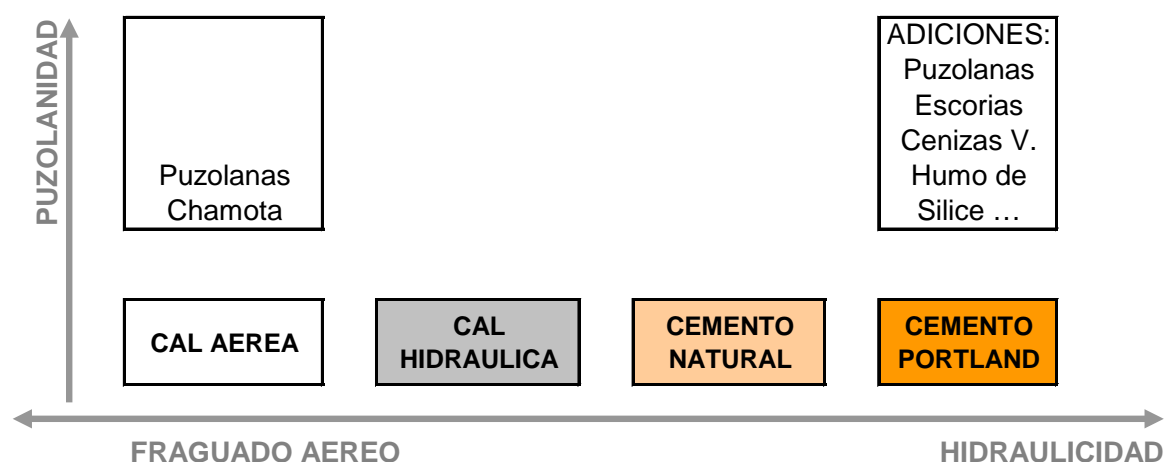


Figura 3. Esquema descriptivo de los diferentes conglomerantes en base cal [3].

Horizontalmente encontramos la secuencia de los diferentes conglomerados en función de su contenido en arcillas. La cal aérea (sin arcillas) es un material que endurece con aire ( $\text{CO}_2$ ) y a medida que vamos hacia la derecha vamos identificando materiales más hidráulicos; la cal hidráulica (una cal con unos componentes aéreos y unos de hidráulicos) el cemento natural (que es una cal llevada al límite y que incluso en algunos momentos se le llamaba cal límite o cemento límite) y finalmente, cuando la química está suficientemente desarrollada, el cemento portland, que es el paso siguiente con contenidos máximos de sílice y alúmina para garantizar la no presencia de cal libre.

En el eje vertical vemos la capacidad de aportar sílices y alúminas con otros materiales: las puzolanas y la chamota en la cal aérea, y ya modernamente, en el cemento, como las escorias siderúrgicas, el humo de sílice, las cenizas volantes, etc.

### Los hormigones de cal en la actualidad

Después de años en que el cemento se había impuesto de manera rotunda en el mundo de la construcción, últimamente, y por motivos diversos, observamos como hay un cierto clima de reivindicación del uso de la cal. Las experiencias que presentamos a continuación dan respuestas a proyectos diversos y se suman a esta apuesta por un material tradicional, con muchas virtudes, pero que necesita también de su conocimiento.

DESIGNACIÓN	No CO <sub>2</sub> Ca	Tipo "impureza"	Fraguado/ endurecimiento
Cal Común, Cal grasa	< 6 %	Sílice, Alúmina, ..	No endurece sumergida
Cal Árida, Cal Magra		Sílice (arena), hierro, magnesio, manganeso	No endurece sumergida
Cal Dolomíticas		Magnesio	No endurece sumergida
Cal Medianamente Hidráulica	8 a 12 %	Arcillas, Mg, Mn, Fe	Fraguado sumergido: 15 a 20 días
Cal Hidráulica	13 a 17 %	Arcillas, Mg, Mn, Fe (SiO <sub>2</sub> preponderante)	Fraguado sumergido: 6 a 8 días
Cal Eminentemente Hidráulica	18 a 20 %	Arcillas, Mg, Mn, Fe (SiO <sub>2</sub> preponderante)	Fraguado sumergido: 2 a 4 días
Cal límite	20 a 25 %	Arcilla	"con prontitud"
Cemento límite inferior	25 a 27 %	Arcilla	Fraguado sumergido: 15 a 20 minutos
Cemento medio	28 a 36 %	Arcilla	"mucha prontitud"
Cemento límite superior	37 a 65 %	Arcilla	

Figura 4. Transcripción en forma de tabla de la explicación de como eran los diferentes conglomerantes el 1859, procedente de [4]. Como se puede apreciar, la clasificación se ordena de manera creciente por el contenido de arcilla en la materia prima.

Efectivamente cualquier profesional tiene, hoy en día, unos conocimientos extensos sobre el hormigón de CP (o si no, sabe dónde ir a buscar la información). Hay una extensa bibliografía, normativa, reglamentos, una potente industria de los aditivos, tecnología suficiente como para hacer hormigones de características especiales, etc. Quizá fuera interesante plantearnos con los hormigones de cal la misma exigencia metodológica para obtener los mismos buenos resultados.

El hormigón es un material conformable, resistente, volumétrico y en el que podemos incorporar armaduras allí donde corresponda para que absorban las tensiones justamente allí donde convenga. Efectivamente el hormigón es un excelente material de construcción.

Si utilizamos hormigones de cal en vez de hormigones de CP, evitamos además algunos problemas: los derivados de la excesiva rigidez que proporciona el cemento; la aparición de sales; o los problemas que ocasiona en algunos morteros la impermeabilidad. Pero no podemos sustituir de manera automática el cemento por la cal dado que entre ambos materiales hay aspectos que hay que controlar.

El primero tiene que ver con 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. 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 (clara de huevo, sangre, etc.) y hoy en día ya existen algunos buenos aditivos reductores de agua que actúan correctamente con conglomerantes de cal.

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, los aditivos que modifican la tensión superficial en la red de poros, y/o 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, una característica interesante de cara a la durabilidad.

Con todo, también deberíamos curar el hormigón de manera adecuada y que no es la misma que usamos para el hormigón de CP. Si con un hormigón de cemento portland 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 hay otra parte de reacción aérea que necesita  $\text{CO}_2$  del aire. Si la red porosa está llena de agua, el  $\text{CO}_2$  no llega al interior del hormigón. Así, la manera de curar un hormigón de cal es: regarlo a menudo y poco para que se moje y se seque, se moje y seque.

Segunda cuestión, la evolución de la resistencia: en los hormigones de cal se alcanzan las resistencias más lentamente que con los hormigones de cemento. Hay por tanto desencofrar bastantes días más tarde, lo que implica organizar la obra de manera diferente. Y en paralelo, el 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 (Fig. 5).

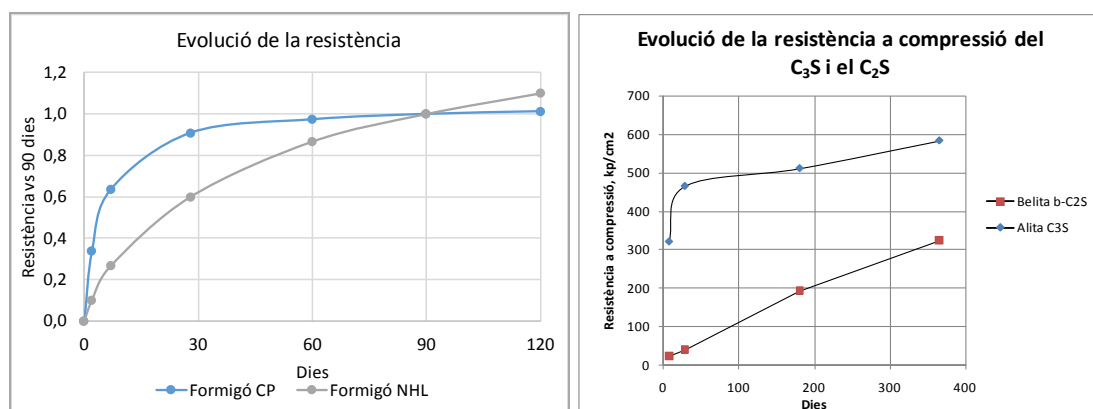


Figura 5. Dos gráficos que muestran la evolución de la resistencia. A la izquierda, si consideramos la resistencia a compresión a los 90 días como el 100%, podemos comparar la pendiente de las curvas como a la velocidad de incrementar la resistencia. A la derecha, las curvas de crecimiento de resistencia y los valores alcanzados por la Alita (componente protagonista de los cementos) y la Belita (componente coprotagonista de las cales hidráulicas).

Tercera cuestión: la reserva alcalina. Conocemos como reserva alcalina el 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 inicialmente es así. 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.

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 que uno de CP dado que lo tenemos que dosificar con mucha más agua que la que consumirá en 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 no tener suficiente reserva alcalina provoca la rápida desprotección química de la armadura convencional frente a la corrosión. Por lo tanto, si utilizamos las armaduras habituales en hormigones de cal, tendremos problemas importantes de corrosión (Fig. 6).

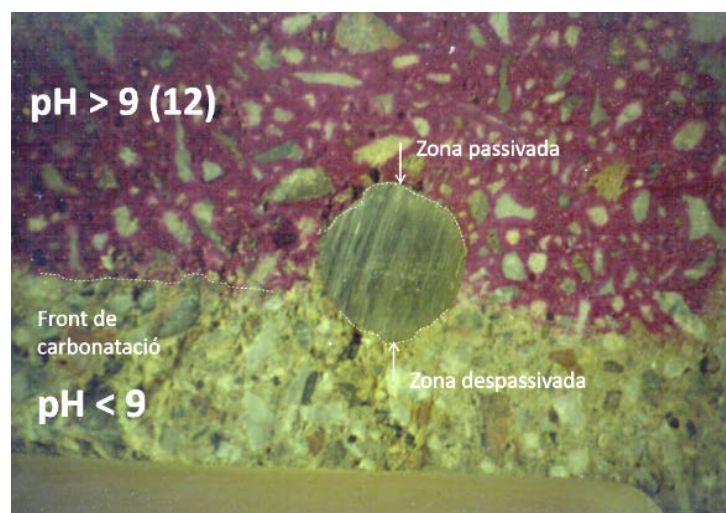


Figura 6. Por medio de la fenolftaleína se observa visualmente el cambio de color de la matriz del hormigón en función de su pH. En la zona de pH elevado, la armadura se encuentra pasivada y no se puede producir corrosión por presencia de humedad. Fotomontaje JR Rosell

## Algunas experiencias

Nuestra experiencia en hormigones y morteros de cal comenzó en el laboratorio con estudios centrados en los efectos de aplicar chamota a los hormigones de cal [5] y con conglomerados confeccionados con cal hidráulica versus mezclas de cal y cemento [6].

La primera intervención en obra y de una cierta importancia fue la construcción de una bóveda de cañón<sup>1</sup>, de 4,5 m de luz. Se trataba de diseñar un hormigón en masa donde la exigencia de resistencia no era muy elevada. Se optó por hacer un hormigón a partir de un mortero de cal comercializado, corrigiendo su curva granulométrica añadiendo un porcentaje de árido grueso. El producto funcionaba bastante bien pero el coste resultaba muy elevado en tanto que se utilizaba un mortero comercializado para pequeños espesores, de una manera muy masiva (Fig. 7).

A partir de esta experiencia comenzamos a plantearnos los hormigones de cal con armaduras, lo que conllevaba definir los valores de diferentes parámetros. En el caso de los hormigones de cemento portland y armaduras convencionales de acero corrugado estos parámetros son bastante conocidos y están cargados por defecto en las Bases de datos de los programas de

<sup>1</sup> A partir de un proyecto de Oriol Rosselló, arquitecto.

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 transferencia, las curvas de crecimiento de la resistencia en función del tiempo, los tiempos de espera para desapuntalado y desencofrar, etc.



Figura 7. Dos fotografías de Oriol Roselló que muestran el proceso de hormigonado por tongadas y los conectores de piedra, de la vóveda.

Iniciamos por tanto una búsqueda encaminada a conocer la adherencia entre el hormigón y las armaduras de acero inoxidable o las armaduras de fibra de vidrio [7]. De los resultados obtenidos se desprende que las barras de fibra de vidrio se adhieren a los hormigones de cal tanto como las de acero corrugado y todo con unos valores equivalentes a los obtenidos con hormigones de CP de similares resistencias. Eso sí, con velocidades de carbonatación mucho más elevadas (Fig. 8).

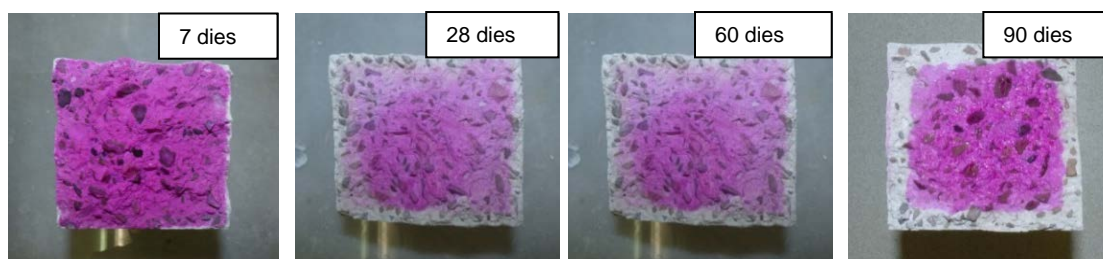


Figura 8. Evolución de la profundidad de carbonatación del hormigón de cal hidráulica en una probeta de 15 x 15 cm. Fotomontaje G. De la Rosa [7]

El estudio se realizó pensando en un proyecto concreto<sup>2</sup>, 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 suficientemente rígida, con conectores con la fábrica, para resolver los problemas de inestabilidad al viento de las propias almenas, al mismo tiempo que también mejoraba el comportamiento estructural general del edificio al dotar a todo el conjunto de un zuncho perimetral de coronamiento de las estructuras de paredes de carga (Fig.9).



Figura 9. Detalles del refuerzo de las almenas y zuncho perimetral de la casa Puig i Cadafalch a Argentina. A la izquierda, conectores y armaduras de fibra de vidrio, a la derecha, elementos ya hormigonados. Foto de los autores.

En este caso, el hormigón se hizo nuevamente a partir de un mortero comercial con la corrección de granulometría, hecha en obra, mediante la aportación de una gravilla; y los armados fueron de malla de fibra de vidrio. Todo ello una solución de coste elevado.

Otro caso fue el del hormigón para el baluarte de la muralla de Barcelona, descubierta bajo el mercado de San Antonio, en el marco del gran proyecto de rehabilitación de dicho edificio.<sup>3</sup> En este caso, la geometría del elemento era muy potente, aunque no había ningún compromiso remarcable de exigencia de resistencia. El baluarte se ha realizado hormigonando en dos etapas verticales y utilizando un hormigón ciclópeo de cal para el relleno (Fig. 10).

Lo más destacable de este hormigón con cal hidráulica NHL 5 de El Tigre, es que se ha realizado en central hormigonera, con las especificidades que ello conllevó. Y si bien es cierto que ha proporcionado resistencias reducidas, estas son suficientes para la función que tiene que llevar a cabo. Tampoco se ha utilizado ningún reductor de agua.

<sup>2</sup> Restauración/rehabilitación de la casa *Puig i Cadafalch* de Argentina (Barcelona) proyecto de la arquitecta Mercè Zazurca.

<sup>3</sup> Rehabilitación del mercado de San Antonio de la ciudad de Barcelona, obra de los arquitectos Pere Joan Ravetllat y Carme Ribas.





Figura 10. Proceso de hormigonado del Baluarte de la muralla medieval de Barcelona, bajo el mercado de Sant Antoni.

Cabe decir que también se pueden diseñar "Grouds" (pastas de cal con puzolanas, para inyectar) de altas prestaciones mecánicas. En estos casos hubo que ajustar mucho el tema de la dosificación y los aditivos, llegando a alcanzar valores entre 32 y 43 MPa de compresión, que son resistencias muy elevadas conseguidas con cal [8].

Como última experiencia tenemos la restauración de la Iglesia del Rosellón<sup>4</sup>, donde se propone hacer la reconstrucción del paramento y el arranque del campanario, repitiendo parcialmente la volumetría que tenía el conjunto antes del derrumbe parcial ocurrido en enero de 2016. Esta intervención se quiere hacer con un material diferente al inicial, pero con las garantías de compatibilidad entre materiales y con un aspecto determinado, por lo que se ha pensado en un hormigón de cal.



Figura 11. Iglesia de Roselló después del colapso del campanario y las partes inferiores. Foto *Diari El Punt-Avui*

<sup>4</sup> Reconstrucción parcial del campanario, el coro y otros elementos de la iglesia de Roselló (Lleida), obra de Miguel Angel Sala, arquitecto.

Este encargo nos ha llegado con tiempo suficiente como para poder desarrollar el hormigón de cal en el laboratorio, a partir de una campaña experimental previa. 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.

El hormigón propuesto ha sido un hormigón en masa, ciclópeo, encofrado a dos caras y con unas puestas que permiten generar unas pequeñas impostas en fachada hechas con ladrillos cerámicos. El hormigón se hace en obra y en muchas amasadas, relativamente pequeñas, dada la necesaria lentitud de la obra.

En esta experiencia detectamos, una vez más, la realidad de las obras: 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 como hacer el hormigón, las probetas realizadas del primer hormigón hecho in situ (A3 “in situ” 0 según tabla Tabla 1) dio unas resistencias de 2,3 MPa a 28 días y 3,7 MPa a 60 días preocupantemente por debajo de lo esperado.

Tabla 1. Tabla de resultados (MPa) de resistencias a compresión de los hormigones de cal preparados para la iglesia de Rosselló.

Amasada	Resistencia a compresión (MPa)				
	Edad (días)				
	7	28	60	90	120
A1 (laboratorio)		10,3		14,1	
A3 (laboratorio)		9,2	11,2	14,5	14,5
B1 (laboratorio)			35,4		39,1
B2 (laboratorio)		12,3	15,8		15,0
A3 “in situ” 0 *		2,3	3,7	4,1	4,2
A3 “in situ” 1 **	4,5	10,0	12,6	12,6	
A3 “in situ” 2 **	4,3	9,2	11,2	12,2	
A3 “in situ” 3 **	3,0	9,2	11,8	12,9	
A3 “in situ” 4 **	4,7	9,8	12,5	12,8	

\* Error en obra, diferentes aditivo, dosificación aditivo y cantidad de agua

\*\* Dosificación A3 correctamente realizada en obra.

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. Hay que transmitir el cuidado necesario para realizar este tipo de materiales y por otra parte ajustar las prescripciones técnicas que vienen de laboratorio a las distintas realidades de las obras. Sólo así se podrán obtener buenos resultados, como los obtenidos finalmente con las muestras A3 “in situ” 1 y 2 (ver tabla Tabla 1).

### A modo de conclusión

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

Las cal 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:

- La utilización de reductores de agua adecuados
- 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 en obra.

## Bibliografía

[1] Adam, JP. (1996). "La construcción romana, materiales y técnicas". Editorial de los oficios. Leon.

[2] Vitrubio Polion, M. (1787). "Los diez libros de arquitectura", Traducción de Joseph Ortiz. Madrid Imprenta Real.

[3] Rosell, J.R. (2007). "Morteros de cal para obras de restauración". Conferencia en Construmat Barcelona 2007.

[4] Espinosa, P.C. (1859). "Manual de Construcciones de albañilería". Madrid. Edición facsímil 1991.

[5] Bestue, J.; Corbella, X.; Rosell, J.R. (2010). "Diseño y determinación de propiedades de un hormigón romano". PFG. UPC. Barcelona

[6] 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.

[7] Rosell, J.R, De la Rosa. G., Ramírez-Casas. J. (2016). "Hormigones de cal: Adherencia a las armaduras". Ponencia al congreso: A cal no espaço ibérico: um futuro com história; V Jornadas FICAL - Fórum Ibérico da Cal. Lisboa.

[8] Puchol, R.; Ramírez-Casas, J.; Rosell, J.R. (2014). "Inyecciones puzolánicas de altas prestaciones". PFG. UPC. Barcelona.

[9] Lucas, P. de; Rosell, J.R.; Pialarissi, S.H. (2017). "Estudio de hormigones de cal hidráulica con fibras de polipropileno". Tesina Màster. UPC. Barcelona.

[10] Bedini, S.; Rosell, J.R. (2017) "Estudio de micro-hormigones de cal con sustitución de árido natural por árido cerámico reciclado". Tesina Màster. UPC. Barcelona.

[11] Rosell, J.R. (2013). "Aportaciones al comportamiento deformacional de pastas de cal. Tamaño y forma de las partículas". Tesi doctoral. UPC. Barcelona.