

TÓPICOS COMUNES EN LA ELABORACIÓN Y USO DE LOS MORTEROS DE RESTAURACIÓN DE FÁBRICAS

Alberto Sepulcre Aguilar*

En este artículo se repasa en su conjunto el panorama de los morteros y lechadas en la restauración de fábricas. Partiendo de una serie de tópicos y errores muy extendidos, se intenta situar la relación entre la cal aérea, la cal hidráulica, el cemento Portland y las puzolanas, en su uso tanto histórico como actual, en la ejecución de obras. Para ello se analiza su composición, mecanismo de fraguado, propiedades, alteraciones, durabilidad e interferencia con el soporte histórico y se propone el uso de determinados morteros. **Palabras clave:** cal aérea, cal hidráulica, cemento Portland, puzolana, fábrica, mortero, lechada, inyección y rejuntado.

TYPICAL COMMONPLACES IN THE PREPARATION AND USE OF MORTARS IN MASONRY RESTORATION

This article provides an overview on the use of mortar and grout in the restoration of masonry. Beginning with an analysis of some of the commonplaces and typical errors, it aims to contextualise the relationship between non-hydraulic and hydraulic limes, Portland cement and pozzolans in their historical and contemporary use in the execution of works. It does this by analysing the composition, setting mechanism, properties, deterioration, durability and interference of these materials on the historic medium. Finally, it makes recommendations about specific mortars.

Key words: lime (non-hydraulic), hydraulic lime, Portland cement, pozzolan, masonry, mortar, grout, injection and repointing.

Cada vez es más frecuente encontrar en congresos, ferias, revistas, cursos de restauración, e incluso en proyectos de intervención, comentarios, ponencias y artículos sobre morteros tradicionales, o prescripciones sobre la conservación y restauración de éstos. Entre todos ellos a menudo se encuentran imprecisiones, cuando no importantes errores, que podríamos calificar de mitos o leyendas, fruto del desconocimiento de los mecanismos de comportamiento de estos materiales y del manejo de tópicos y recetas mal comprendidas que se van extendiendo peligrosamente. Parece oportuno, por tanto, hacer una revisión del uso en restauración de morteros, desde una visión de conjunto de estos materiales.

Como este terreno es muy amplio, nos centraremos principalmen-

te sobre los morteros de juntas, que junto con los morteros de revestimiento forman el grupo principal de argamasas clasificadas tipológicamente según su campo de aplicación. El interés de este tipo de morteros aunque es principalmente constructivo, afecta también muy directamente al restaurador en casos de rejuntado de fábricas, de relleno de oquedades en revestimientos, o bien simplemente porque el muro es el soporte natural de la pintura mural, esgrafiados, estucos, etc. y su empleo es una fase previa a cualquier otra intervención al tiempo que la condiciona.

Históricamente los morteros de fábrica, hasta finales del siglo XIX, son de matriz calcárea, es decir su conglomerante principal si no único, es la cal¹. Esto no quita para que en ocasiones aparezcan morteros

Recibido: 10/01/2003
Aceptado: 03/02/2003

* Arquitecto.
Profesor de la E.S.C.R.B.C. Madrid.

mixtos con yesos en exteriores, incluso en el caso de revestimientos, pero siempre supeditados a la presencia suficiente de cal o a tratamientos insolubilizantes o reductores de la higroscopicidad del yeso².

Analicemos, por tanto, el estado de la cuestión, empezando por la historia de estos productos, y veamos qué consideraciones podemos extraer de ello.

Evolución histórica

La cal va a ser el principal y casi único conglomerante a lo largo de casi diez siglos³, y aunque va a convivir con el yeso durante todo este tiempo, propiedades como su baja solubilidad en forma de carbonato y su resistencia mecánica, van a hacer que no tenga sustituto en su uso como mortero de unión, de reparto, de colocación o de relleno en la construcción de fábricas pétreas o cerámicas, incluso en los revestimientos exteriores de todo tipo de muros incluidos los de barro⁴.

El panorama va a cambiar radicalmente en el siglo XIX con la aparición de los materiales cementicios. Su origen se produce con el descubrimiento de la cal hidráulica a mediados del XVIII por James Smeaton al trabajar en la construcción del faro de Eddystone. Esto dará lugar a una serie de hallazgos en cascada a lo largo de todo el siglo XIX

por científicos franceses e ingleses⁵, que culminarán con la invención y desarrollo del cemento Portland, así llamado por su aspecto similar a esta caliza inglesa.

Aparentemente, este producto va a presentar tantas ventajas sobre la cal aérea que va a ir desplazándola paulatinamente a lo largo del siglo XX, hasta su práctica desaparición. Entre estas ventajas podríamos citar: la capacidad de fraguado en condiciones muy adversas, su facilidad de amasado y aplicación, su rapidez de fraguado, el desarrollo de altas resistencias iniciales y aún mayores a largo plazo, su adherencia a casi todo tipo de materiales, su facilidad de conservación y más modernamente su adaptación a cada necesidad diferente por su gran variedad de formulaciones.

En resumen podríamos decir que el cemento Portland incluso siendo usado con tanto desconocimiento del producto y tan mal dosificado, amasado, aplicado y curado como se usa hoy en día en cualquier obra de albañilería menor⁶, fragua siempre y cumple en cierto grado, más o menos alejado de sus posibilidades, su función. Al contrario, la cal aérea requiere mucho oficio y conocimientos para su utilización. Desde la fabricación del producto: elección de la roca a calcinar, método de apagado, plazo, espacio y forma de conservación, etc., a su aplicación y curado: preparación de la base, un-

tosidad, salpicado, control de capas, protección climatológica, aireación suficiente, etc., pasando por su elaboración: dosificación y humectación precisas, empleo de adiciones, dificultad de amasado, etc.; todo ello demanda un enorme oficio del que hoy se carece en gran medida y además exige un mayor consumo de tiempo, cuidados, atención y esfuerzo, con una menor garantía de resultados aceptables. Resulta fácil comprender entonces por qué se prefirió inicialmente el cemento a la cal.

Con el paso del tiempo, ya en el siglo XX, se descubrió que el panorama no era tan bueno como se pensaba en un principio, ya que se fue desarrollando toda una patología de uso del cemento en morteros y hormigones: ataque por sulfatos, reacción árido-álcali, formación de etringita retrasada, formación de eflorescencias salinas, aluminosis, etc., que unido a problemas derivados de la puesta en obra como fisuración, ahogado, retracción, etc., hacía que su durabilidad a edades largas no estuviera garantizada. Después de más de medio siglo de estudio sobre unas y otras alteraciones, a principio de los años 80, se produjo el importante cambio de pasar de la búsqueda de mayores resistencias como objetivo último en el desarrollo de los productos cementicios, a considerar la durabilidad a largo plazo como un objetivo tanto o más importante (Boyd,

¹ De ahí, para empezar, lo trivial y cómico de algunos exhaustivos trabajos de investigación sobre morteros históricos del siglo XV por ejemplo, en los que tras numerosos análisis tecnológicos y organolépticos se concluye que se trata de un mortero de cal con arenas locales. ¿Qué esperaban encontrar? ¿no se tratará más bien de justificar presupuestos, inversiones o equipos de trabajo innecesarios?. Respecto a esto, me comentaba recientemente un restaurador como una conocida institución le había pedido que les facilitara el presupuesto de una lista de equipos de análisis para su adquisición y poderlos citar y enseñar a las visitas que reciben. Aunque en este caso, al no tener previsto contratar una plantilla especializada, probablemente no se piense en su utilización.

² Aquí cabría citar como ejemplo los revocos con yeso de Albarracín, en el primer caso, y estucos lustros venecianos o los yesos a la madreña, en el segundo.

³ Se citan como restos más antiguos con presencia de cal, las ruinas de la ciudad turca de Catal Huyuk de unos 8.000 años a. C.

⁴ También se ha usado en los muros de tapial para aumentar su consistencia y resistencia, espolvoreándola entre tongada y tongada a modo de pseudoverdugadas, formando el llamado tapial calicostrado. Además de estos que aquí se comentan, son otros muchos los usos que ha tenido la cal en la vida cotidiana de los pueblos a lo largo de la historia: desinfección hortofrutícola, fabricación de pinturas, desacidificación o estabilización de suelos, eliminación de restos de materia orgánica, etc.

⁵ En 1756 James Smeaton descubre la cal hidráulica, en 1812 Vicat estudia científicamente el mecanismo de la hidraulicidad, en 1824 John Aspdin inventa el cemento Portland, en 1838 William Aspdin mejora el cemento Portland aumentando la temperatura de cocción, en 1845 Isaac Jonhson utiliza el clinker molido, en 1887 Henri Le Chatelier estudia las propiedades de los óxidos del cemento y nombra a sus componentes principales, alita, belita, felita, etc., estudios todos ellos que han generado la denominada "química del cemento" y que continúan en la actualidad con la fabricación y estudio de productos cada vez más sofisticados como: los cementos de bajo calor de hidratación, los cementos aluminosos, los cementos resistentes a sulfatos y agua de mar, los cementos blancos, los cementos de escorias activadas alcalinamente, etc.

⁶ Baste como ejemplo el que si bien hoy en día hay una enorme variedad de cementos (la RC-97 establece más de un centenar de variedades entre componentes y resistencias distintas) cuando se intenta adquirir en un almacén de materiales un saco, sólo se dispone de tres o cuatro tipos, cuando no de sólo dos: uno en blanco y otro en gris.

Mindess & Skalny, 2001). Hoy en día conviven ambas tendencias, teniendo en la segunda un especial protagonismo el uso de adiciones de puzolanas como la escoria de alto horno, las cenizas volantes, el humo de sílice, etc., productos algunos, que se venían utilizando desde principios de siglo, pero más como una vía de eliminación de importantes *stocks* de residuos industriales que por sus cualidades, y sobre los que volveremos más adelante.

El campo de la restauración de monumentos no fue ajeno a esta corriente, y así se fue cambiando paulatinamente el uso de la cal por el del cemento Portland, con los mismos problemas citados pero enormemente agravados por su relación y coexistencia con bases tradicionales de cal, más débiles y alteradas. Siguiendo la línea anterior y en los mismos años, toda una serie de científicos y técnicos denunciaron esta insostenible situación, en el congreso del ICCROM (1981) que se convocó en Roma al efecto⁷.

Se podrían resumir en ocho los motivos por los que el cemento Portland es inadecuado para su uso en restauración de edificios históricos (Feilden, 1982: 72), que según creo se explican por sí mismos:

- Irreversibilidad
- Elevada resistencia
- Alta rigidez
- Impermeabilidad
- Retracción de fraguado
- Producción de sales
- Alta conductividad térmica
- Textura característica⁸.

A partir de ese momento va a producirse en restauración un efecto casi supersticioso, de rechazo a todo lo relacionado con el cemento Portland, hasta convertirse en un tabú incluso la mención de este producto por su nombre. Se da el caso de que la mayoría de los morteros preparados, específicos para restauración que se comercializan, contienen en cierta medida cemento Portland como adición, pero si se cita, se hace con el eufemismo de "... y otros conglomerantes hidráulicos".

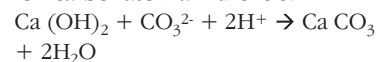
Así, hoy en día para muchos profesionales el cemento Portland (incluso para algunos el propio término *cemento*), es sinónimo de *aberración* entre los materiales de restauración, al tiempo que se llenan la boca de referencias a las cales hidráulicas⁹. Sin embargo, como veremos a continuación, no hay tanta diferencia entre unos y otras.

Materiales conglomerantes

La cal aérea, como es sabido, consiste en un hidróxido cálcico obtenido a partir de la hidratación de un óxido de calcio formado por cocción entre 900° y 1.200° C de rocas calizas, mármoles o dolomías.

Este hidróxido se combina con el anhídrido carbónico atmosférico dando lugar a un carbonato cálcico poco soluble y con ciertas propiedades mecánicas, a menudo sobreestimadas (Sepulcre, 1998b). Se trata de un proceso que tradicionalmente se ha vinculado con un ambiente seco, si

bien recientes investigaciones parecen demostrar que para que la carbonatación se produzca idóneamente es necesaria una humedad relativa del aire entre el 50% y el 70%, debido a que se efectúa a partir del ión carbonato vía hidrólisis:



necesitando tanto aireación como humedad suficientes (Martínez, Puertas & Blanco, 1995: 43; Blanco Varela, 1996: 2).

Por otra parte, los conglomerantes hidráulicos reciben su nombre de su capacidad para fraguar en medio húmedo e incluso sumergidos bajo el agua. Esto se produce por su contenido en cierta cantidad y variedad de componentes que endurecen por hidratación, son silicatos y aluminatos cálcicos que forman en contacto con el agua hidrosilicatos e hidroaluminatos cálcicos insolubles.

Estos componentes son¹⁰:

Silicato Bicálcico	SC ₂
Silicato Tricálcico	SC ₃
Aluminato Tricálcico	AC ₃
Ferroaluminato Tetracálcico	FAC ₄

La formación de estos componentes proviene de la cocción junto con las calizas (carbonato cálcico), de arcillas (silicatos aluminicos hidratados e impurezas de óxidos de hierro o magnesio), o de sedimentos síliceos, bien sea por dosificación artificial (cales hidráulicas artificiales o cementos artificiales), o por contenido de arcillas en la propia caliza como el caso de las margas (cales hidráulicas naturales o cementos naturales).

⁷ Entre otras podemos citar las ponencias siguientes:

V. Furlan: "Experiences pratiques avec des crepis à base de chaux"

I. Holmstrom: "Mortars, cements and grouts for conservation and repair. Some urgent needs of research"

S. Peroni *et al.*: "Lime-based mortars for the repair of ancient masonry and possible substitutes"

F. Massazza & M. Pezzuoli: "Some teachings of a Roman concrete"

⁸ Feilden habla del color y la textura, aunque realmente ninguna de estas dos es una causa comparable a las anteriores, primero porque desde la existencia de los cementos blancos el color no es ningún problema y segundo, porque la textura depende principalmente de la dosificación y el tipo de árido utilizado en la mezcla.

⁹ Nótese que comúnmente se utiliza el término cemento o cemento Portland en singular y el de cal hidráulica en plural, siendo mucho mayor la variedad de formulaciones en el caso del cemento (clases I, II, III, IV o V según proporción de clinker, con resistencias de 32.5, 42.5 y 52.5 MPa, con alta resistencia inicial o normal y distintos tipos de adiciones: calizas, puzolanas naturales, escorias, cenizas volantes, humo de sílice, blancos o grises, resistentes a sulfatos o agua de mar, aluminosos, de bajo calor de hidratación, etc.

¹⁰ La notación que se utiliza en la química del cemento designa abreviadamente a los óxidos correspondientes por una inicial, para evitar la longitud extrema de las formulaciones de los compuestos con los que se trabaja. Así por ejemplo:

SiO₂ = S, CaO = C, Al₂O₃ = A, Fe₂O₃ = F, MgO = M, Ca(OH)₂ = CH, CaSO₄·2H₂O = DH

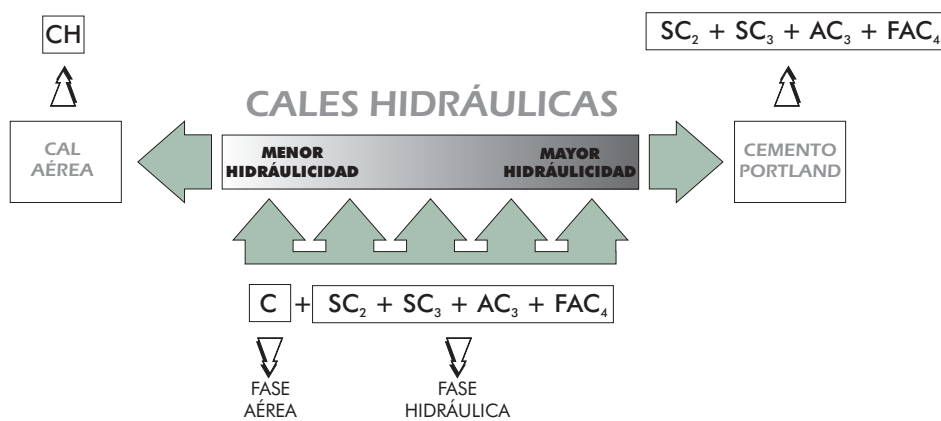
y los compuestos significan:

SC₂ = 2CaO. SiO₂, SC₃ = 3CaO. SiO₂, AC₃ = 3CaO. Al₂O₃, FAC₄ = 4CaO. Al₂O₃. Fe₂O₃

Pasando la fórmula básica del cemento Portland de:

2CaO. SiO₂ + 3CaO. SiO₂ + 3CaO. Al₂O₃ + 4CaO. Al₂O₃. Fe₂O₃ + CaSO₄·2H₂O a la forma abreviada de:

SC₂ + SC₃ + AC₃ + FAC₄ + DH mucho más fácil de manejar.



Mientras que la cal aérea y el cemento Portland tienen una composición aérea e hidráulica pura respectivamente, la cal hidráulica tendrá una mayor o menor hidraulicidad dependiendo de que predomine más una u otra fase en su composición. Por ello se puede hablar de muchos tipos de cales hidráulicas.

El grado de hidraulicidad del compuesto resultante dependerá de la proporción entre la fase aérea (CH), y las fases hidráulicas (SC₂, SC₃, AC₃ y FAC₄), teniendo como polos extremos: de un lado la cal aérea (compuesta sólo de hidróxido cálcico -CH-) y del otro el cemento (compuesto sólo de silicatos y aluminatos cálcicos -SC₂, SC₃, AC₃ y FAC₄-). Entre medias estarían las cales hidráulicas, que contienen parte de uno y de otros -CH, SC₂, SC₃, AC₃ y FAC₄-, clasificadas en débilmente, medianamente o fuertemente hidráulicas, según la citada proporción de fases¹¹.

De lo anterior se desprende lo absurdo de hablar de una cal hidráulica y de un cemento como algo totalmente distinto, pues vemos que la diferencia entre una cal fuertemente hidráulica y un cemento es casi inexistente, y que entre una cal débilmente hidráulica y una fuertemente hidráulica puede haber tanta diferencia como entre la cal aérea y el cemento, a pesar de que a las dos se les denomine como cales.

En el caso del cemento Portland hay otras adiciones como son: un 3% de yeso como regulador del fraguado, y una cantidad indeterminada de fillers y adiciones en unos porcentajes máximos que varían según la clase (I, II, III, etc.), dada la reactividad de este producto que le permite absorber casi todo tipo de rellenos sin perder sus cualidades

conglomerantes¹², pero que no superan el 5% en el caso del más puro. Además, el molido ultrafino del cemento aumenta enormemente su reactividad al dotarle, por ejemplo, de una superficie específica *Blaine* entre 4.000 y 6.000 cm²/g (Labahn & Kohlhaas, 1985: 194).

Sin embargo cuando se habla del alto contenido en sales del cemento Portland, muchas veces no se tiene en cuenta que los álcalis que las generan se aportan en el árido o en el agua de amasado. El límite de álcalis susceptibles de formar sales en el cemento varía entre el 0.3 y el 1.2% (Neville, 1996: 10), a menudo en forma de sulfatos alcalinos, y será alto o bajo según la proporción de cemento que forme parte del mortero.

En el cemento Portland blanco, para evitar su coloración, se utiliza como arcilla el caolín, con lo que se elimina la presencia de óxidos de magnesio o de hierro, y se evita la contaminación con los gases de los recuperadores en los hornos, donde se producen las mayores ganancias en álcalis. Por ello, utilizando un cemento más o menos puro, blanco, bajo en sales y de alta resistencia (clase BL-I 52,5), se reduciría notablemente la presencia de sales, y más en el caso de un mortero mixto por necesitarse una menor dosificación

En principio puede parecer que genéricamente las cales hidráulicas son cementos suaves o que reúnen

las ventajas de ambos, pero esto no está tan claro. Primero, las cales hidráulicas naturales son mucho más escasas de lo que se piensa, de hecho en España no se fabrica ninguna, y en Europa sólo tienen cierta relevancia en Francia -sólo se hace en nueve plantas (Ecole d'Avignon, 1997: 33)- o Italia¹³. Además, al provenir de rocas naturales con distintos tipos de minerales secundarios, arcillas, magnesitas, dolomías, sesquióxido de hierro, etc., es mucho más difícil controlar las impurezas que contienen, mientras que en las dosificaciones artificiales de materias primas se pueden evitar partiendo de productos más puros. Segundo, su falta de mercado ha llevado a una ausencia de normativa¹⁴ y, por tanto, de control de calidad, carencia de especificaciones técnicas, de contenidos, etc., convirtiéndolas en un producto marginal en España suplido por importaciones con pocas garantías de comportamiento. Tercero, esta caída en desuso provoca una limitada disponibilidad del material, lo que unido a la pequeña demanda en volumen que suponen las obras de restauración, hace que a menudo sea muy difícil conseguir este producto en determinadas zonas o momentos.

Y cuarto, pero casi lo más importante, la fase aérea de la cal hidráulica necesita apagarse para convertirse en un conglomerante, mientras que las fases hidráulicas, si se hidratan, fraguan parcialmente perdiendo reactividad; lo que convierte a estas cales en un producto de uso muy difícil ya que requieren apagado, pero con una cantidad de agua muy variable según el grado de hidraulicidad, y con el peligro de inactivación. En un momento posterior, parte del material fraguará por carbonatación y parte lo hará por hidratación, y el agua que esas fases necesitan para su fraguado, impedirá la aireación de la otra, que no comenzará hasta que se pierda el agua excedente, ya en la fase de curado. En definitiva un proceso complejo y delicado.

¹¹ Desde el siglo XIX se viene midiendo numéricamente este grado de hidraulicidad a través de distintos módulos o índices, siendo el más conocido el de Vicat que compara la proporción entre óxidos:

$$i_H = S + A + F / C + M$$

¹² Muchos residuos industriales más o menos tóxicos se pueden inertizar y eliminar incorporándolos al cemento, como el caso de metales pesados o el reciente de las *vacas locas*.

¹³ De hecho esta es la razón por la que se han incluido estas cales en la nueva norma europea UNE-EN-459 partes 1, 2 y 3.

¹⁴ Esto está a punto de cambiar por la norma citada en la nota anterior que será de obligado cumplimiento para obtener la conformidad de uso en el territorio de la Unión Europea.

Por otra parte, las cales hidráulicas artificiales que se fabrican en España se hacen mezclando en distinta proporción cal aérea y cemento blanco, lo que no supone ninguna desventaja sobre las naturales, como ya hemos visto. Pero este control de los ingredientes y dosificaciones, creo que se realizaría mejor que en la planta cementera, ejecutado por el propio restaurador para cada caso concreto. Además, esta separación de ingredientes permite su fabricación independiente y su mezcla ya en forma conglomerante: hidróxido cálcico en polvo, apagado en hidratadores¹⁵, y cemento blanco en seco, preservado de la humedad, pudiendo humedecerse ya todo junto en la fase de amasado, para evitar el problema citado anteriormente.

Métodos de restauración de fábricas

Existen dos procedimientos fundamentales para la restauración de fábricas que son la inyección de lechadas y el rejuntado.

La primera consiste en la inyección de un conglomerante de consistencia líquida, con objeto de rellenar huecos, macroporos o fisuras, aglutinando las partículas disgregadas, con la finalidad de devolver la capacidad mecánica de absorción de esfuerzos al muro.

Esto se puede realizar mediante presión manual, por gravedad, neumáticamente o por vacío; aplicando

taladros por rotación preferentemente al tresbolillo, con una profundidad de 2/3 a 1/2, según los casos y si se trabaja a una cara o a dos caras.

Los problemas de esta técnica suelen referirse al contenido de humedad más o menos alto en el interior del muro que dificulta el control de la relación a/c¹⁶, la dificultad de sellado del volumen de muro a intervenir y, por tanto, de la delimitación de la inyección¹⁷, la garantía de penetración y difusión de la lechada¹⁸, y la compatibilidad mecánica y físico-química entre morteros.

Los materiales que se utilizan van desde las cales aéreas tradicionales a las resinas epoxídicas, pasando por todo tipo de conglomerantes hidráulicos. Dejemos aparte el caso de las resinas sintéticas, que en relación al punto de la compatibilidad¹⁹, sólo se consideran admisibles cuando el peligro de colapso estructural es inminente, como por ejemplo en zonas de actividad sísmica (Binda *et al.*, 1990: 432; Barcellona *et al.*, 1993: 637; Guderzo, 1995: 51). Centrándonos en las lechadas de matriz cálcica o cementosa, vemos que prácticamente las cales aéreas quedan descartadas por su imposibilidad de aireación y, por tanto, de carbonatación, por su lentitud de fraguado y por su debilidad mecánica; aunque hay quienes proponen emplear cales autógenas o cales biogénicas²⁰, que son de dudosa efectividad, al menos en grandes volúmenes. Nos quedan por último las cales hidráulicas con

mayor o menor grado de hidráulidad, que por lo dicho anteriormente debería ser más bien mayor.

El otro procedimiento de consolidación de fábricas es el rejuntado, o relleno de huecos en las juntas de una fábrica desde el exterior. Este tratamiento es para algunos autores (Almesberger & Caldart, 1986: 236), tanto más efectivo que la inyección, lo que no es de extrañar sobre todo en casos de muros medievales de dos hojas y un relleno, donde la capacidad mecánica depende del confinamiento lateral del muro, que a su vez depende de las hojas externas.

El procedimiento comúnmente utilizado es el propuesto por Ashurst (1983: 21-23), consistente en esencia en el saneado del mortero degradado de la junta hasta llegar a la base sana y el posterior relleno con un mortero nuevo, inyectando primero si la profundidad alcanzada es mayor del canto o 25 mm, y evitando enrasar la junta con la fábrica para evitar que aumente su grosor aparente.

Aquí, las dificultades son menores que en el sistema anterior por ser más visible y superficial la intervención. Aún así, está el problema de la humedad del muro, la compatibilidad mecánica (resistencia menor y deformabilidad mayor en el mortero que en las piezas de la fábrica), la compatibilidad físico-química y el problema de la adherencia. Además, las condiciones de puesta en obra son totalmente distintas, principal-

¹⁵ Se suele considerar mejor si se trata de cal apagada por inmersión o aspersión, en polvo; o por fusión en maseras, en pasta, a la manera tradicional. Esto era verdad con los procedimientos artesanales de apagado donde la granulometría era más gruesa y los inocidos se tenían que separar de la cal por decantación, pero también es discutible hoy en día, puesto que desde un punto de vista técnico, los separadores de partículas de los hidratadores y los sistemas de dosificación y control de la temperatura permiten asegurar que una hora de hidratación por este sistema equivale más o menos a un año en un estanque tradicional.

¹⁶ La relación agua-conglomerante (a/c), influye drásticamente en la resistencia, porosidad, retracción y durabilidad del mortero resultante, se trate de yesos, cales o cementos. Por ello es uno de los parámetros fundamentales a controlar en la fabricación de materiales conglomerados. En el caso de otros productos como las resinas epoxídicas, un exceso de humedad puede evitar la polimerización según la formulación (Baronio, Binda & Fontana, 1988; Binda *et al.*, 1990: 435)

Sin embargo este dato fundamental en la fabricación de una pasta o mortero, a menudo se desprecia cuando es mucho más importante que otros datos incluso compositivos.

¹⁷ El peligro de una inyección sin límites, es el calado a la otra cara del muro o el colado por una grieta que al ser una vía fácil de entrada de producto, evita la impregnación del conjunto.

¹⁸ Este tratamiento se realiza, en cierta medida a ciegas, y aunque se dejen testigos de penetración o se usen técnicas indirectas de control (ultrasonidos, espectrorradiometría de IR, etc.) siempre queda cierta incertidumbre del volumen abarcado.

¹⁹ Este sería también un punto a discutir pues por compatibilidad se entiende habitualmente afinidad compositiva (normalmente química), y en este supuesto entrarían muchos productos sintéticos; mientras que a veces la inyección de una lechada de cal aparentemente inocua, puede suponer un gran daño por la enorme cantidad de agua que aporta al interior del muro.

²⁰ Las cales autógenas se basan (Baglioni, P. *et al.*, 1997) en la adición de un producto químico (e. g. carbamato de etilo) capaz de generar CO₂ para su carbonatación, aunque para que esta se produzca, ya hemos visto que no basta la presencia de anhídrido carbónico. Las cales biogénicas, se basan en la actividad de bacterias que producen como residuo carbonato cálcico (Loubière, 1999; BIOCANOR, 1999), pero en espesores de micras y bajo condiciones ideales de alimentación y climatología.

mente en lo que respecta a la consistencia de la argamasa.

En cuanto a los materiales, vale lo comentado en el caso anterior, pero teniendo en cuenta que la hidráulica no es necesaria en un grado tan alto por la mayor accesibilidad ambiental, aunque aparece un nuevo requisito de durabilidad por efecto de la erosión atmosférica, lo que nos lleva a hablar de uno de los materiales más interesantes para asumir esta función: las puzolanas.

Las puzolanas

Normalmente las puzolanas se definen como materiales que, carentes de propiedades cementicias y de actividad hidráulica por sí mismos, contienen constituyentes que se combinan con la cal a temperaturas ordinarias y en presencia de agua, dando lugar a compuestos permanentemente insolubles y estables que se comportan como conglomerantes hidráulicos (Calleja, 1958: 6-7; 1969: 9). Es decir, que pueden formar silicatos y aluminatos de calcio, capaces de fraguar por hidratación.

Para ello, no sólo basta con una composición mayoritariamente silíceo o silicatada, sino que se tienen que dar otras circunstancias como una estructura molecular reactiva, normalmente amorfa, y una alta superficie específica. Por ello, en otras definiciones de los materiales puzolánicos (Hammond, 1992: 36) ya se apunta la necesidad de estos factores: composición silíceo, aluminosa o ferruginosa, cierto estado de cristalinidad y estructura, y capacidad de reacción con la cal a temperatura y presión ambiental en presencia de humedad.

Las puzolanas se han utilizado casi desde el comienzo del uso generalizado de la cal aérea²¹, así los Griegos y los Romanos eran buenos conocedores de sus efectos, pero sobre todo fueron estos últimos los que les sacaron el máximo partido en su obras de ingeniería hidráulica: acueductos, cisternas, puertos, etc. (Sepulcre & Hernández, 2000). Baste como indicativo de las excelentes propiedades de estos morteros, el buen estado de conservación que han presentado hasta hoy.

Como hemos indicado, las puzolanas son ciertos tipos de sílice y alúmina capaces de combinarse con cal en húmedo y a temperatura ambiente dando lugar a productos cementicios. Es decir, se trata de un proceso parecido al de la fabricación del cemento pero en frío; o dicho de otra manera, podemos obtener productos resultantes similares, bien mezclando calizas y arcillas, y sometiendo a un tratamiento térmico; o bien cocinando calizas y cocinando arcillas por separado, y luego mezclándolas en húmedo. Nótese que en ambos casos los ingredientes son similares y en ambos se les somete a un tratamiento de activación térmica antes o después.

¿Cuál es por tanto la diferencia entre un resultado y el otro? La respuesta está en la velocidad de reacción de los componentes y el grado de combinación de los mismos. Mientras que en el caso del cemento, la reacción se produce bruscamente a alta temperatura, y se obtiene un producto totalmente combinado, muy reactivo; en el caso del conglomerante puzolánico o cemento romano (aunque varía según el tipo de puzolana, dosificación, etc.) la reacción es mucho más lenta y convive con la carbonatación simultánea de la fase aérea de la cal. Por lo que el resultado es un mortero fraguado parcialmente por vía aérea y por vía hidráulica.

Pero no es este el único efecto de la adición de puzolana a la cal, sino que el mortero así obtenido va a ir ganando resistencia y estabilidad con el paso del tiempo (en un grado mucho mayor que un mortero de cal aérea convencional) lo que le va a dar unas resistencias aceptables a medio plazo, y una extraordinaria durabilidad a medio, largo y muy largo plazo. Esto, como comentamos antes, ha hecho que hasta en el cemento Portland se ensayara el efecto de la adición de puzolanas, dado que son capaces de combinarse con los cristales de hidróxido cálcico, denominados mineralógicamente *portlandita*, que se generan en la formación de los geles tobermoríticos. Esto le da al mortero capacidad para neutralizar los efectos de la formación de microfisuras de fraguado, resistencia a la cristalización de sales,

a la formación de productos expansivos, etringita retrasada, monosulfato, taumasita, incluso evita la reacción ácido-álcali entre otros efectos, como pone de manifiesto la enorme cantidad de trabajos de investigación al respecto que se publican día a día.

Esta enorme demanda que genera el cemento Portland, y su recuperación para los morteros tradicionales, hace que se estudien cada día nuevos productos puzolánicos (Hammond, 1992; Allen, 1992; Ahmad & Shaikh, 1992; Biricik, *et al.*, 1999; De Gutiérrez, Delvasto & Talero, 2000; Martirena- Hernández *et al.*, 2000a y 2000b; Sánchez de Rojas *et al.*, 2001; Sepulcre, Schnell & Hernández, 1999). Así hoy podemos encontrar puzolanas tradicionales y modernas, naturales y artificiales, de origen orgánico e inorgánico, de alta y baja reactividad, etc.

Las puzolanas que se usan habitualmente en los cementos: humo de sílice, escorias de alto horno y cenizas volantes, no son las ideales para los morteros de restauración, bien sea por la posibilidad de formación de sales o por su alta reactividad (Barbero & Sepulcre, 1998). Otros subproductos industriales de desecho, aunque en este caso de origen orgánico, son las cenizas de cascarilla del arroz, corteza de coco, bagazo de caña, vaina del cacao, etc. cuyo aprovechamiento supone una alternativa de la cal al uso del cemento en países subdesarrollados importadores de este material, que carecen de tecnología para su fabricación²², y sus necesidades habituales se pueden satisfacer con cales hidráulicas (Hammond, 1992: 37). Sin embargo estas puzolanas no son habituales en nuestra área geográfica.

En cuanto a las puzolanas que han sido usadas tradicionalmente: depósitos volcánicos naturales (napolitana, romana, Trass, etc.), depósitos silíceos opalinos sedimentarios (diatomeas, infusorios, Cherts, etc.) y de fabricación artificial (Gaize, Moller, ceniza de esquitos bituminosos, etc.), cada vez son más escasas, caras y de difícil disponibilidad por falta de mercado. De ahí que la fabricación de puzolanas artificiales con materiales asequibles, sea la opción más interesante hoy en día en nuestro ámbito de trabajo. Y son

²¹ Se cita como caso conocido más antiguo del empleo de puzolanas la máscara de Jericó y los aljibes de Jerusalén del s. X a. C.

²² Las caleras son mucho más fáciles de construir y requieren un menor gasto energético.

dos, a mi juicio, las más idóneas para su utilización en morteros de restauración: las chamotas de cerámicas de baja temperatura de cocción o el metacaolín puro.

Las primeras ya fueron muy usadas por los romanos (Sepulcre & Hernández, 2000) en forma de ladrillos y tejoletas trituradas (cocciopesto) y su reactividad depende de una temperatura de cocción baja, entre 650° y 750° C (Baronio & Binda, 1997) y una superficie específica alta, obtenidas fácilmente a partir de un fino molido de cerámicas porosas rojas de baja calidad. El problema que presentan estas puzolanas radica en la coloración rosada que aportan al mortero, no siempre adecuada a su uso visto, y la disponibilidad de reservas suficientes en cada caso²³.

Las segundas se obtienen directamente a partir de la cocción de caolín a temperaturas también entre 650° y 750° C (He, Makovicky & Osbaeck, 1996) (en realidad lo que se obtiene es el componente reactivo principal de las anteriores), y tienen la ventaja de no aportar coloración ninguna a la cal, aunque hoy por hoy tampoco se fabrican industrialmente para su uso sistemático, es probable que se haga en el futuro por su interés para el cemento Portland o la cal (Frías & Sánchez de Rojas, 2000; Frías & Cabrera, 2002; Palomo *et al.*, 1999; Tálero, 1999; Sabir, Wild & Bai, 2001).

Pero centremos el trabajo en el objetivo de este artículo, que no es otro que analizar y rebatir muchas de las afirmaciones, sin base alguna, que se manejan frecuentemente en el ámbito de la restauración.

Relación de algunos tópicos habituales

1. No se puede intervenir en una fábrica histórica sin analizar la

composición del mortero. La composición química o mineralógica, además de previsible en la mayoría de los morteros históricos, no condiciona la composición del mortero de restauración. Son otros factores de índole aparente como el color, la textura, ...; o de índole metodológica como la puesta en obra, reología, objetivos, etc.; los que lo hacen.

Creo que si bien todos estamos de acuerdo en el interés del estudio arqueológico o histórico de materiales, de técnicas constructivas, etc. a través de una metodología científica, este no tiene que ir obligatoriamente unido a cada intervención que se realice en un bien cultural.

En la práctica cotidiana de la restauración auspiciada por instituciones públicas o privadas se dedica mucha más atención a los estudios previos y documentales que a la propia actuación restauradora y frecuentemente se sacrifican importantes partidas del presupuesto para la acumulación de datos a menudo innecesarios para esa intervención. Esto supone graves estrecheces que obligan a reducir cualitativa o al menos cuantitativamente la actuación. La recomendación clásica de que se debe conocer lo mejor posible el bien a intervenir, y que la ejecución de una obra supone a menudo la posibilidad de acceder a elementos o partes del objeto habitualmente ocultos, o incluso que al habilitarse un crédito presupuestario se dispone de una ocasión inmejorable para que se incluyan otros presupuestos necesarios para esos análisis o investigaciones, es de carácter general, y no puede ser tomada como imperativa.

En aquellas obras en que se pueda mantener en el futuro la accesibilidad a zonas originales, como es corriente en el caso de morteros de fábrica, o en que el presupuesto sea

escaso habrá que plantearse la necesidad de reducirlo mediante estos trabajos de investigación que acaban convirtiéndose en moda y en exhibiciones técnicas pseudocientíficas vacías de contenido. Sobre todo cuando se dedica tan poca atención a la justificación de la elección de un determinado mortero (composición, dosificación, puesta en obra, amasado, aplicación, curado, ...) y basta recurrir a cuatro tópicos como la utilización de morteros de cal ¿?, la prohibición de uso del cemento Portland, a veces alguna referencia al árido y poco más.

2. *Se debe utilizar un mortero con una composición parecida al original.* En la mayoría de los casos esto no es posible bien por que no se pueden reproducir los materiales o los procedimientos de fabricación y puesta en obra, o bien por que es imposible conseguir un estado de envejecimiento preciso²⁴. Pero lo más importante, no es posible porque la finalidad es totalmente distinta: penetrar por una red de fisuras, adherir fragmentos desagregados, rellenar huecos y cavidades, conseguir una alta velocidad de fraguado, no aportar humedad al muro, fraguar en presencia de humedad y ausencia de aire, etc.

3. *Sólo deben utilizarse morteros de cal.* Este es un requisito frecuente en las prescripciones técnicas. En el mejor de los casos no quiere decir nada, porque no explica que tipo de "cal", lo malo es que a menudo se refiere a una cal aérea en circunstancias en que es imposible su fraguado por las razones atrás expuestas. Otras veces se trata de rechazar productos concretos como conglomerantes poliméricos o cementicios (ver puntos 7 y 8).

4. *La cal se apagará en fosa cuanto más tiempo mejor.* Ya se ha comentado esto. Presupone una

²³ El problema es que no se comercializan estas puzolanas como tales, lo que obliga a su fabricación por parte de la empresa restauradora en cada caso, y el entorpecimiento consiguiente de la obra al tener que adquirir la cerámica, buscar un molino, envasar y transportar los materiales y, como siempre, para volúmenes pequeños de material, lo que supone una repercusión grande de precio y de tiempo.

²⁴ Imaginemos el caso de un mortero de relleno de un muro medieval formado por una mezcla de cal y canto en grandes masas encerradas entre las hojas exteriores de sillarejo, si hoy tuviéramos que intervenir inyectando cal aérea en masa como consolidante, probablemente pasarían siglos antes de que consiguiéramos el más mínimo efecto. En la intervención actual habría que considerar otros factores como determinantes del mortero a utilizar, porque partimos de una situación diferente de la original y perseguimos unos objetivos distintos (Sepulcre, 1998a). Además aunque pudiéramos caracterizar cualitativamente el mortero, incluso cuantitativamente, y pudiéramos reproducirlo con exactitud (materias primas, proceso de fabricación artesanal, apagado, técnica constructiva, ...), su envejecimiento nunca sería igual... ¿o habría que fabricarlo ya envejecido?

mayor calidad de la cal en pasta apagada por métodos tradicionales. Dejando aparte las ventajas del apagado en hidratadores industriales, que ya se ha comentado (ver nota 15), la conservación y uso de la cal en pasta es mucho más complicada.

La necesidad de mantener el producto sumergido continuamente en agua para evitar su carbonatación, obliga al despliegue de maseras o estanques en obra con el consiguiente estorbo y consumo de espacio, sin hablar de la necesidad de almacenamiento previsto con la suficiente anticipación, y de mantenerlo durante un tiempo considerablemente largo.

5. *Es mejor un conglomerante lo más natural posible.* Un conglomerante es un producto artificial obtenido en un proceso pirotécnológico que se considera natural o artificial según el grado de selección y dosificación de las materias primas utilizadas para su fabricación. Luego el término natural es una convención que no aporta ninguna propiedad cualitativa al conglomerante, en todo caso lo hace limitando su calidad.

En varios de los tópicos que se comentan se dejan traslucir connotaciones peyorativas hacia los productos artificiales frente a los naturales o hacia los de fabricación industrial frente a los artesanales. Aunque este no es el sitio para un análisis extenso sobre esas cuestiones, conviene plantear alguna reflexión al respecto.

En ambos casos se están trasladando prejuicios de la vida común donde tras periodos de enorme fe en la industrialización y el desarrollo tecnológico se ha pasado a una gran desconfianza en estos procedimientos. Así hoy en día la idea de progreso ya no va unida a la de avance, mejora, calidad, ..., sino a las dudas sobre cuanto hay que pagar por él (contaminación, pérdida de identidad, de calidad, etc.)

En el primer caso se está identificando conglomerante natural con algo más sano o auténtico, o con algo sin, o con poca manipulación, asociando la idea al ámbito de la alimentación o de la geografía. Sin

embargo un conglomerante es un producto artificial *per se*, por lo que dada la necesidad de una transformación es mejor cuanto más controladamente se pueda realizar, y no se gana nada sacrificando alguna parcela del proceso al uso como materia prima de una combinación mineralógica determinada por la naturaleza y no por el fabricante.

En el segundo caso, artesanal se asocia a objetos fabricados individualmente, y por tanto con más cuidado, más singularidad y mayor valor particular, mayor originalidad, es decir mejor "a mano" que "a máquina". Lo cual es válido para entidades cuyo valor reside en el objeto en sí, pero en un conglomerante su calidad reside en su homogeneidad, su regularidad, su fiabilidad o la predecibilidad de su comportamiento que sólo puede darnos la uniformidad del proceso industrial y sus controles de calidad.

Pues bien, pareciendo esto tan obvio, todavía en la última intervención restauradora que dirigí, una empresa nos ofrecía como mejora una "*cal fabricada en Italia según antiguas formulaciones a base de graseo de cal cocido a leña y estacionado en fosa durante dos años*" como si se tratara de una delicatessen o un caldo gran reserva con denominación de origen ... ¡por favor señores!

6. *Es mejor un mortero a base de cal hidráulica natural que uno artificial.* Se podría dar la contestación del punto anterior, pero concretamente la dosificación artificial de la cal hidráulica mezclando cal aérea y cemento blanco, permite un mejor control del grado de hidraulicidad deseado, y una mayor selección de los ingredientes en pureza, apagado, etc. Además, tal como se ha explicado en el texto no hay diferencia compositiva sustancial entre una y otra.

7. *No se deben utilizar morteros que contengan cemento.* Este comentario denota un desconocimiento absoluto de los productos conglomerantes. Como ya se ha justificado en el artículo, una cosa es el uso y otra muy distinta el abuso. Los compo-

nentes hidráulicos de la cal y del cemento son los mismos por lo que se trata exclusivamente de una cuestión de proporción y eso, como mejor se consigue, es a partir de las materias primas puras (cal aérea y cemento Portland) mezcladas en la proporción adecuada.

Dejando aparte, que cuando los morteros envasados específicos de restauración indican que contienen componentes hidráulicos, normalmente se están refiriendo a la adición de cemento Portland sin decirlo por su nombre.

8. *Es mejor un producto natural que uno sintético.* Este tema daría para un artículo en sí mismo, pero aquí normalmente se están prejuzgando los productos poliméricos por su complejidad. Precisamente en la naturaleza existen abundantes ejemplos de materiales poliméricos "naturales": resinas, gomas, celulosas, fibras proteicas, etc. El problema es el control de sus propiedades, dado que las condiciones en que se usan los productos sintéticos en la construcción y en la restauración se encuentran muy alejadas de las condiciones ideales de polimerización, en comparación con la industria naval o aeronáutica por ejemplo, y se temen problemas a largo plazo. Otras veces se aducen razones de irreversibilidad²⁵, si bien por ejemplo en casos de colapso estructural de un bien o una construcción, esta sería incluso deseable.

9. *Se realizará la adhesión de fragmentos mediante un mortero de cal.* El hecho de hablar de adhesión asociado al uso de un mortero de cal, ya es cuanto menos muy optimista. Se ha escrito abundantemente sobre este asunto (Ávila, 1996; Monjé, 1994; Sepulcre, 1998b; De Villanueva, 1991) y si se da adhesión entre un mortero de cal y un material pétreo, va a ser por *enganches* mecánicos y no por mecanismos químicos.

Por adhesión química usualmente se entiende aquella obtenida por las fuerzas de atracción generadas por sustancias secundarias capaces de formar películas entre dos superficies en contacto, uniéndolas (Matteini & Moles, 2001: 275). Esto

²⁵ Por reversibilidad normalmente se entiende la posibilidad de eliminación de los productos de la intervención, puesto que en sentido estricto ninguna actuación es reversible. Y este concepto es de difícil aplicación en la restauración de fábricas ya se trate de materiales naturales, artificiales o sintéticos, con lo que realmente se están valorando cuestiones de facilidad de eliminación, grado, etc. de donde se deduce la imposibilidad de generalización y la discutibilidad de todo proceso de este tipo.

quiere decir que, aunque normalmente pueden darse varios mecanismos al mismo tiempo, un adhesivo químico puede unir dos superficies completamente lisas, sin porosidad aparente, gracias al desarrollo de enlaces químicos.

Sin embargo, el procedimiento mecánico de adhesión depende de la porosidad de la base, pues se produce por penetración del conglomerante en fase líquida en la red porosa, relleno de la misma y su posterior fraguado. Aún si bien este fenómeno también puede estar presente en la adhesión química, siempre sería de forma secundaria, ya que una de las características de la adhesión química es que se limite a la creación de un interfaz y no se produzca de forma masiva (Matteini & Moles, 2001: 274-275).

En el caso de un mortero de cal, se necesita de un espesor de material considerable, por no hablar de la lentitud de fraguado de estos conglomerantes en comparación con los adhesivos químicos.

Debemos pues, olvidarnos de adherencia entre conglomerantes y superficies vitrificadas impermeables por despreciable. Pero aun tratándose de superficies porosas la resistencia capaz de desarrollar estas uniones es muy poca y se basa a menudo en las fuerzas de rozamiento entre los diferentes elementos, ya que, si bien la resistencia de esfuerzos de tracción en los materiales pétreos es muy reducida, aún lo es más en los morteros de cal (Sepulcre, 1998b).

Así en el caso de revocos, su espesor es determinante para que este tipo de adhesión le permita resistir incluso su propio peso en fresco, esfuerzo imposible cuando se trata de adherir fragmentos desprendidos. Por ello, para plantear la adhesión de fragmentos rocosos, teselas, o mosaicos completos con su base incluida, mediante morteros de cal, hay que tener una fe desmedida en los milagros. Cierto es que estos restos pudieron estar originalmente sujetos mediante morteros de cal, pero embebidos en una masa continua y encajados unos con otros y sujetos por rozamiento; siendo las condiciones de partida y los requisitos del adhesivo en los casos actuales, totalmente distintos. Por lo que será necesario probablemente recu-

rrir a adhesivos sintéticos la mayoría de las veces.

Conclusiones

Por todo lo anterior sería conveniente que nos documentáramos más y mejor a la hora de exigir requisitos en prescripciones técnicas y en intervenciones, ya que si fuéramos menos mojigatos y habláramos más claro, evitaríamos despilfarros económicos que cuanto menos no suponen ninguna mejora de la actuación, sino riesgos para la misma.

Cuando hablamos de restauración de fábricas mediante el uso de morteros, bien sea mediante inyección o mediante rejuntado, no podemos pretender el uso exclusivo de morteros aéreos, por su dificultad de carbonatación, lentitud de fraguado, falta de desarrollo de resistencia a edades tempranas, etc. Descartando, por lo expuesto, también la cal hidráulica o el uso exclusivo de cemento Portland, lo ideal pensamos que sería el uso de morteros mixtos de cal, cemento Portland blanco y metacaolín como puzolana, con una dosificación adaptada a cada caso.

La utilización sistemática de puzolana no presenta ningún riesgo para un mortero, y aunque algunos autores limitan su empleo a casos de exposición a condiciones ambientales agresivas (Gibbons, 1997: 105,108), nunca puede perjudicar a la argamasa, incluso en cantidades altas, ya que la porción no combinada actuará como *filler* más o menos inerte.

Agradecimientos

Gran parte de lo comentado en este artículo está contrastado con el ejercicio práctico en trabajos de restauración o de investigación, también me he servido de la abundante experiencia profesional en restauración de pintura mural de mi compañero Juan Carlos Barbero Encinas. Asimismo me ha facilitado mucha información sobre la industria de las cales y los cementos D. Eduardo Herrero de ANCADE. A ellos pues mi agradecimiento por lo de interesante que pueda haber en este texto principalmente para los restauradores.

Bibliografía

- Ahmad, S. F. & Shaikh, Z. (1992): "Portland-Pozzolana Concrete from Sugarcane Bagasse Ash". En Hill, Holmes y Mather (eds.), Lime and other Alternative Cements. Intermediate Tech. London: 172-179.
- Allen, W.J. (1992): "Locating Reactive Natural Pozzolana". En Hill, Holmes y Mather (eds.), Lime and other Alternative Cements. Intermediate Tech. London: 64-72.
- Almesberger, D. & Caldart, R. (1986): "Consolidamiento di opere storiche in muratura mediante iniezioni di prodotti speciali a base cementizia o formulati epossidici". En Manutenzione e Conservazione del Construito fra Tradizione e Innovazione. Atti del Convegno di Studi, Bressanone 24-27 giugno 1986. Libreria Progetto. Padova: 229-245.
- Ashurst, John. (1983): Mortars, Plasters and Renders in Conservation: A basic Guide. Ecclesiastical Architects' and Surveyors' Association. London. 54 p.
- Ávila Jalvo, J. M. (1996): "Introducción a la mecánica de las fábricas". En F. Mingarro Martín (ed.), Degradación y conservación del patrimonio arquitectónico. Complutense. Madrid: 343-350.
- Baglioni, P. et al. (1997): "Nuevas lechadas de cal, de fraguado autógeno, utilizadas en la restauración de pinturas murales". Cuadernos sobre Conservación. Vol. 42, 1997 n° 1, International Institute for Conservation. Madrid: 34-41.
- Barbero, J. C. & Sepulcre, A. (1998): "Influencia de las cargas inorgánicas en el comportamiento de los morteros de inyección para pinturas murales". En Actas del XII Congr. de Conservación y Restauración de Bienes Culturales. Alicante, 28-31/X/98. ACCRBC: 663-670.
- Barcellona, S. et al. (1993): "Evaluation of Injection Grouting for Structural Strengthening of Ancient Buildings". En M. J. Thiel (ed). Conservation of Stone and Other Materials. Congreso Int. RILEM/ UNESCO, Vol II, Cambridge Univ. Press/ E & FN Spon. London: 637-643.
- Baronio, G. & Binda, L (1997): "Study of the Pozzolanicity of Some Bricks and Clay". Cons. and Buil.

- Mat.*, Vol. 11, No. 1, Elsevier Science, Oxford: 41-46.
- Baronio, G.; Binda, L. & Fontana, A. (1988): "*Indagine sperimentale sul consolidamento di elementi in muratura mediante iniezioni*". En III Congr. Naz. *Conoscere per Intervenire* il Consol. degli Edif. Storici. Assoc. It. per il Recupero e Consolid. delle Const. Catania, 10-12/XI/88: 378-387.
- Binda, L. *et al.* (1990): "*Repair of masonries by injection technique: Effectiveness, bond and durability problems*". En *Structural Conservation of Stone Masonry*. Int. Tech. Conf. Athens 31-X/3-XI-89. ICCROM. Rome: 431-441.
- BIOCANOR S. L. (1999): "Procedimiento Calcite". Conf. Fund. Cultural COAM, Madrid, 22 de junio. (s. p.)
- Biricik, H. *et al.* (1999): "*Study of Pozzolanic Properties of Wheat Straw Ash*". *Cem. and Conc. Res.* Vol. 29, no. 5. Elsevier Science. New York: 637-643.
- Blanco Varela, M. T. (1996): "Otros materiales cementantes". En el curso "*La Tecnología del Hormigón en la Construcción del siglo XXI*". Fund. Cultural Sta. Teresa. Avila, 29 nov./1 dic., 1996. (s. p.)
- Boyd, A. J., Mindess, S. & Skalny, J. (2001): "Diseño de hormigón durable". *Mat. de Cons.*, 263-264. IETCC (CSIC). Madrid: 37-53.
- Calleja, J. (1958): "Las Puzolanas". *Ion*, separata vols. XXIX y XXX, Madrid, 47 p.
- Calleja, J. (1969): *Las puzolanas*. Monografía n. 281, julio 1969, I.E.T.C.C. (C.S.I.C.), Madrid, 91 p.
- De Gutiérrez, R. M.; Delvasto, S & Talero, R. (2000): "Una nueva puzolana para materiales cementicios de elevadas prestaciones". *Mat. de Cons.*, 260. IETCC (CSIC). Madrid: 5-13.
- De Villanueva, L. (1991): "Patología de los revestimientos continuos conglomerados". En *Curso de patología*. Conservación y restauración de edificios. Tomo III. COAM. Madrid
- Ecole d'Avignon (1997): *Techniques et Pratique de la Chaux*. 3eme tirage. Eyrolles. Paris. 211 p.
- Feilden, Bernard M. (1982): *Conservation of Historic Buildings*. ICCROM. Rome.
- Frías, M. & Cabrera, J. (2002): "*The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of metakaolin-lime-water systems*". *Cem. And Conc. Res.* Vol. 32, no 1. Elsevier Science, New York: 133-138.
- Frías, M. & Sánchez de Rojas, M. I. (2000): "Influencia del metacaolín en la estructura porosa de matrices a base de MC-cemento". *Mat. de Cons.*, 259. IETCC (CSIC). Madrid: 57-67.
- Gibbons, Pat (1997): "*Lime*". En Conf. Proc., *Historic Scotland Traditional Materials Conference*. I. Maxwell & N. Ross (eds.). Historic Scotland. Edimburgo: 101-108.
- Guderzo, Marcello (1995): "*Consolidamento delle murature con leganti colloidali*". *Beni Culturali, Tutela e Valorizzazione*, Anno III, n. 2 marzo-aprile 1995. Betagama. Viterbo (Italia): 51-54.
- Hammond, A. A. (1992): "*Manufacture and Use of Lime and Pozzolana Cements in Africa*". En Hill, Holmes y Mather (eds.) *Lime and Other Alternative Cements*, Intermediate Technology Publications, London: 35-46.
- He, C.; Makovicky, E. & Osbaeck, B. (1996): "*Thermal treatment and pozzolanic activity of calcined kaolin*". *App. Clay Sci.*, vol. 9, 3 Elsevier Science. Oxford: 165-187.
- ICCROM (1982): *Mortars, Cements and Grouts Used in the Conservation of Historic Buildings*. Preprints of ICCROM Symposium, Rome 3-6/XI/81. ICCROM. Rome.
- Labahn, O. & Kohlhaas, B (1985): *Prontuario del Cemento*. 5ª ed. española. (trad. de la 6ª alemana). Editores Técnicos Asociados. Barcelona. 1016 p.
- Loubière, Jean François (1999): "*La biomineralización, una técnica de futuro*". Conf. Fund. Cultural COAM, Madrid, 22 de junio. (s. p.)
- Martínez Ramírez, S.; Puertas Maroto, F. & Blanco Varela, M.T. (1995): "*Carbonation Process and Properties of New Lime Mortars with Added Sepiolite*". *Cem. and Con. Res.*, vol. 25, no. 1. Elsevier Science, New York: 39-50.
- Martirena-Hernández, J. F. *et al.* (2000a): "Propiedades puzolánicas de desechos de la industria azucarera. Primera parte". *Mat. de Cons.*, 260. IETCC (CSIC). Madrid: 71-78.
- Martirena-Hernández, J. F. *et al.* (2000b): "Propiedades puzolánicas de desechos de la industria azucarera. Segunda parte". *Mat. de Cons.*, 261. IETCC (CSIC). Madrid: 67-72.
- Matteini, M. & Moles, A. (2001): *La química en la restauración*. Los materiales del arte pictórico. Col. arte y restauración. Trad. E. Bruno & G. Lain (1ª ed. italiana Nardini, 1989). Nerea, IAPH. Sevilla. 508 p.
- Monjó Carrió, J. (1994): *Patología de cerramientos y acabados arquitectónicos*. Munillalería. Madrid.
- Neville, A. M. (1996): *Properties of Concrete*. 4th ed. (1ª ed. 1963). Longman. London. 844 p.
- Palomo *et al.* (1999): "*Chemical Stability of cementitious materials based on metakaolin*". *Cem. and Con. Res.*, vol. 29, 7. Elsevier science. New York: 997-1004.
- Sabir, B. B.; Wild, S. & Bai, J. (2001): "*Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review*". *Cem. and Conc. Res.*, vol. 23, 6 Dec. 2001. Elsevier Science. New York: 441-454.
- Sánchez de Rojas, M. I. *et al.* (2001): "Investigación sobre la actividad puzolánica de materiales de desecho procedentes de la arcilla". *Mat. de Cons.*, 261. IETCC (CSIC). Madrid: 45-52.
- Sepulcre Aguilar, A. (1998a): "Consideraciones sobre los morteros para la consolidación de fábricas de edificios históricos". En *Seminario Internacional sobre consolidación de pinturas murales*. Aguilar de Campoo (Palencia), 19-21 de agosto de 1998. Fundación Sta. María La Real/ Centro de Estudios del Románico: 75-94.
- Sepulcre Aguilar, A. (1998b): "Análisis de algunos aspectos mecánicos de los morteros de fábrica y de revestimiento en edificios históricos". En *Seminario Internacional sobre consolidación de pinturas murales*. Aguilar de Campoo (Palencia), 19-21 de agosto de 1998. Fundación Sta. María La Real/ Centro de Estudios del Románico: 127-142.
- Sepulcre, A.; Schnell, J. & Hernández, F. (1999): "Medida de la puzolanidad de materiales no cementicios: una modificación del ensayo de Fratini". En la *V Jornada Nacional sobre aplicaciones arquitectónicas de los materiales compuestos y aditivados*. Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas. Univ. Politécnica

- de Madrid. 3 de abril de 1999, Madrid.
- Sepulcre, A. & Hernández, F. (2000): “Análisis histórico del uso de las puzolanas tradicionales”. En la VI Jornada Nacional sobre aplicaciones arquitectónicas de los materiales compuestos y aditivados.
- Depatamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas. Univ. Politécnica de Madrid. 21 de noviembre de 2002, Madrid.
- Talero, R. *et al.* (1999): “Preparación de morteros y hormigones no tradicionales a base de cemento Portland, metacaolín y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 15.05\%$)”. En la V Jornada Nacional sobre aplicaciones arquitectónicas de los materiales compuestos y aditivados. Depatamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas. Univ. Politécnica de Madrid. 3 de abril de 1999, Madrid.

