

Programa de normalización de estudios previos y control de calidad en las intervenciones: morteros empleados en construcciones históricas

Formulación y características 1ª parte



Hormigón de cal visto a visu

Esther Ontiveros Ortega

Departamento de Análisis del IAPH

Presentación

Con el presente artículo se inicia una nueva línea de trabajo dentro del Programa de Normalización y Estudios Previos y Control de Calidad en las Intervenciones. En ella se incluirán el estudio de las técnicas y ensayos empleados para caracterizar los morteros, tanto los originales de construcciones históricas, como los nuevos materiales empleados en la restauración.

Se recomendarán los métodos a emplear para cada una de las determinaciones (composición mineralógica, propiedades físicas, etc), que en muchos casos coincidirán con las usadas para materiales pétreos,

pero que en otras ocasiones tendrán características particulares definidas por este tipo de material (granulometría, estudio del árido y del ligante, etc).

También se estudiarán los morteros de restauración, no sólo desde el punto de vista de su caracterización, sino también desde la óptica de su compatibilidad con los materiales originales del edificio, y se propondrán requisitos que tienen que cumplir en este sentido.

Resumen

Como fase previa a la Normalización de técnicas empleadas en la caracterización de morteros, se realiza un estudio de los distintos tipos de morteros empleados tradicionalmente.

Se describen los componentes de un mortero: ligante, árido y aditivos y se estudian los distintos materia-

les empleados para cubrir estas funciones. Se representa el proceso de fraguado de un mortero, las reacciones y transformaciones que tienen lugar y las distintas fases en que aparecen.

Palabras clave

Mortero / Ligante / Árido / Cal / Yeso / Cemento / Cal viva / Cal hidráulica / Yeso anhidro

1. INTRODUCCIÓN

Los morteros, en general, son mezclas homogéneas de uno o más conglomerante inorgánicos, áridos (arenas) y agua, en proporciones adecuadas; pudiendo contener, además, aditivos (Gaspar, 1996). El resultado final es un material compuesto por una serie de granos embebidos en una matriz de naturaleza variable (en función del aglomerante), con una textura semejante a la que presentan las rocas sedimentarias.

El descubrimiento del mortero supuso un avance importante en la técnica de construcción. Este avance se consiguió cuando tuvo lugar el descubrimiento del aglomerante y su mezcla con otros componentes (áridos), con lo que se obtenía un material capaz de endurecer y comportarse como un material pétreo natural. Estos componentes deben estar en una proporción que permita que la mezcla sea trabajable, cuando esté fresca, con propiedades físico-mecánicas aceptables, durable al endurecer y con buena adherencia al transformarse en un material coherente.

Dentro del término mortero en la actualidad se incluyen todos los materiales que se emplean en los trabajos de albañilería: morteros de construcción de obras de fábrica, morteros de capa fina y morteros ligeros así como trabajos de revocos externos y enlucidos internos (Gaspar, 1996).

Este material ha tenido innumerables formas de uso; así se ha empleado como ligante o material de unión de piedras (sillares, mampuesto y ladrillos) para la fabricación de muros de altura y grosor importante, formando parte del tapial o como material para acabado de superficies.

Los morteros han cubierto una etapa fundamental en la rehabilitación de edificios y monumentos por diversas razones; entre los que cabe destacar: su carácter estético, histórico y físico-químico. Pero sin duda este material debe cumplir una serie de requisitos mínimos de funcionalidad, que garanticen la estabilidad de la estructura o elemento restaurado y que sean compatibles con los materiales presentes; en definitiva que estos materiales respeten al máximo la estructura antigua en todos los aspectos.

El interés por conocer los materiales empleados en la construcción de monumentos, edificios y construc-

ciones en general, su evolución a lo largo del tiempo, así como las posibles transformaciones que han experimentado en determinados casos (por la influencia de las condiciones del medio ambiente en donde se han encontrado), han motivado la realización de numerosas investigaciones.

La fabricación de morteros ha experimentado cambios importantes, pasando de una fabricación artesanal a una fabricación industrial, utilizando productos cada vez más elaborados y procedimientos industriales que han permitido garantizar la producción de morteros de calidad.

La actividad artesanal ha disminuido, o incluso ha desaparecido, transformándose en una actividad industrial. En este avance las formas tradicionales de fabricación de morteros han quedado olvidadas surgiendo una técnica moderna, que son los que actualmente proporcionan los materiales en el campo de las intervenciones. A pesar de ello se hace necesario revitalizar determinadas actividades en este campo, de tal modo que permitan reproducir las técnicas operativas del pasado que, por otra parte, corresponden a un gran aporte de conocimientos empíricos que es preciso traducir científicamente.

Cuando se aborda el estudio sobre morteros de restauración aplicados a materiales de carácter histórico se hace necesario conocer adecuadamente las técnicas de elaboración antiguas, y establecer un estudio comparativo con las formas de fabricación de morteros actuales. Su finalidad es poder comprobar su compatibilidad a la hora de ser aplicados sobre obras de carácter histórico. La normalización de las distintas técnicas de análisis y procedimientos de fabricación es fundamental para conseguir este objetivo.

Al abordar la normalización de técnicas de análisis sobre morteros de restauración se encuentra dificultad a la hora de seleccionarlas, ya que se hace necesario compaginar adecuadamente los ensayos de control de calidad que se realizan sobre los materiales actuales y las técnicas de análisis que se aplican sobre morteros de construcciones de carácter Histórico.

Antes de comenzar a normalizar las distintas técnicas de análisis es importante conocer de una forma general los distintos componentes del mortero, estableciendo una evolución en la forma de fabricación y uso a lo largo de la historia.

2. EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA EN LA FABRICACIÓN DEL MORTERO

El origen del mortero va ligado al descubrimiento de la cal y el yeso; su origen no parece claro, hay autores que lo sitúan en el comienzo de la prehistoria junto con el descubrimiento del fuego y la posibilidad de calcinar piedras.

Hace 6000 años en Turquía (ciudad neolítica de Çatal Hüyük) se empezó a utilizar un material a base de arcilla compactada, aplicado en suelos y muros como base de pinturas elaboradas con yeso, cal y pigmentos mezclados con grasa. En estos casos el mortero de tierra era de color negro, rico en cenizas y restos de huesos, donde todavía no existía un auténtico ligante; aunque se pone de manifiesto ya el empleo del yeso y la cal (según criterios arqueológicos).

Excavaciones arqueológicas realizadas en esta zona han permitido encontrar morteros hace 12000 y 10000 años (tierra compactada); sin embargo los primeros morteros basándose en cal datan de hace 9000, encontrados en Jericó.

Los hallazgos de morteros en yacimientos neolíticos indican el conocimiento de la cal y la tecnología de fabricación: la calcinación de la cal, su apagado, la mezcla para obtener morteros y su aplicación para refinado de superficies (ver figura 1).

Atendiendo a las características de estos materiales se puede decir que el proceso de fabricación era el siguiente: a la cal viva con un contenido importante de restos de piedra carbonatada (apagada) no calcinada totalmente (actúa como carga dentro del propio mortero) se le añadía una cantidad mínima de agua para el apagado y tras su puesta en obra se sometía a un proceso de compactación para darle más consistencia.

En este periodo, en otras zonas (Europa Central y Septentrional) la forma de fabricar era menos elaborada (ver figura 2)

En este caso los morteros presentaban contenidos importantes de material arcilloso que actuaba como aglutinante, con madera o cáñamo (para dar trabazón) en unos casos y, en otros, sustancias orgánicas cuya finalidad era darle cuerpo al producto final. En otros casos, por ejemplo Mesopotámica, se utilizaba el asfalto como aglutinante en la fabricación de este material.

En materiales de la época ibérica algunos investigadores han encontrado restos de yeso en aparejos o soportes de policromías (Espínosa et al, 1996).

La cultura minoica empleaba el yeso como base para pinturas murales al fresco. Los etruscos también empleaban el yeso de decoración.

Los egipcios fueron los primeros que utilizaron el yeso hemihidrato, obtenido por cocción a una temperatura aproximadamente de 120°C, para la construcción de la pirámide de Keops, construida hace 4600 años. Los egipcios conocían bien este material y lo empleaban de forma indistinta como material de unión de grandes bloques de piedra, como acabado de superficies y como material de decoración. Según el uso, empleaban unas tecnologías de elaboración diferentes (ver figuras 3,4,5).

Los yesos empleados en las juntas de bloques de piedra estaban formados por anhídrita insoluble (yeso sobrecocido) sometido a más de 300°C. en razón de esto, cierto especialista en el tema mantiene que para la colocación de estos grandes bloques se empleaba anhídrita como lubricante más que como ligante ya que debido a su fraguado extremadamente lento su empleo como ligante no parece probable.

En este caso la materia orgánica añadida como aditivo podría ser el secreto de la receta. La cal que aparece en este tipo de material parece corresponder a impurezas existentes en la propia piedra de yeso más que un añadido intencionado.

Cuando se trataba de elaborar un material para acabados a base de yeso se cuidaba más la temperatura de calcinación (entre 120 y 160°C), con el fin de obtener un producto (hemidrato) de fraguado más rápido que actuase como un auténtico ligante.

Figura 1. Tecnología de fabricación del mortero en época neolítica

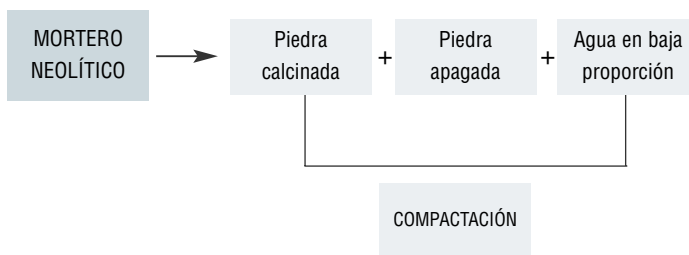


Figura 2. Fabricación del mortero en época neolítica en Europa central y septentrional

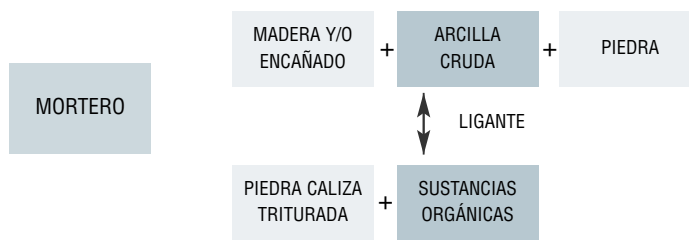
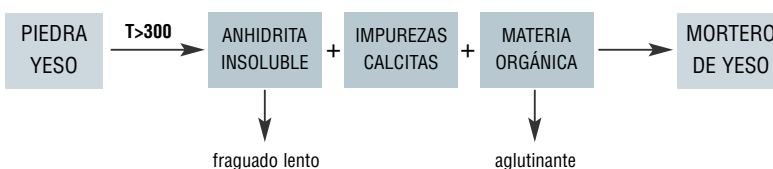


Figura 3. Composición y tecnología de fabricación del mortero para unión de piedras en época egipcia.



Los morteros de decoración o enlucidos presentan cantidades importantes de calcita como un añadido intencionado, con el objeto de blanquear la mezcla final favoreciendo su plasticidad y adherencia, su empleo parece más frecuente en la época faraónica tardía.

Los egipcios no utilizaron para construcción el mortero de cal, debido posiblemente a la gran cantidad de madera necesaria para los hornos de calcinación de la piedra caliza, aunque se observa su empleo en época ptolomeica relacionada con la invasión de los griegos y romanos. Lo que sí es evidente la cantidad de piedra de yeso localizada a lo largo del río Nilo (fundamentalmente en zonas próximas a Alejandría).

El empleo del mortero de cal propiamente dicho aparece con los griegos, encontrándose morteros de este tipo fechados a finales del siglo II y principios del siglo I A.C., a excepción del mortero de enlucido sobre piedra (tobas y calizas) que se empleaba ya en el siglo VII A.C. Las distintas técnicas de fabricación empleadas por los griegos vienen reflejada en la figura 6.

Los griegos empleaban en construcción distintas variedades de morteros: morteros de cal y arena fina, en unos casos adicionaban yeso y polvo de mármol y en otros casos aditivos (tierras de santorín o tejo triturado). El de tejo triturado ya se utilizaba en la época de Salomón durante la construcción de las cisternas de Jerusalén.

Esta técnica de fabricación griega fue heredada por los romanos, que la mejoraron, introduciendo el sistema de aplicación en multicapa, para favorecer el proceso de endurecimiento, y la lava volcánica como aditivo (puzolanas naturales).

No se sabe con exactitud la introducción del mortero con estas características en Roma, aunque sí se sabe que se empleaba ya a finales del siglo II o principios del siglo I A.C. y que se generalizó rápidamente sustituyéndose la forma de fabricación antigua "opus quadratum" (gruesos bloques ajustados sin mortero) y el "opus latericium" (ladrillos secos ajustados sin mortero) por "opus caementium" (mortero de cal+árido+puzolanas) (ver figura 7).

La resistencia de estos morteros romanos parece estar relacionada con su carácter hidráulico y la formación de silicatos de calcio hidratados, similares a los obtenidos con el cemento portland. Pero además han podido influir otros factores, como es el proceso de fabricación, donde la masa era comprimida con pilones para llenar todos los intersticios y expulsar las burbujas de agua. Cuando el mortero se empleaba en la colocación de mosaicos y enlucidos sometidos a la acción del agua, se añadía a la mezcla albúmina, caseína e incluso aceite.

El resultado era: la protección de la matriz del ligante calcáreo, las reacciones de carácter puzolánico y la formación de una superficie de carbonato cálcico con una función protectora (dato distintivo de los morteros antiguos).

Figura 4. Composición y tecnología de fabricación del mortero de acabado en época egipcia.

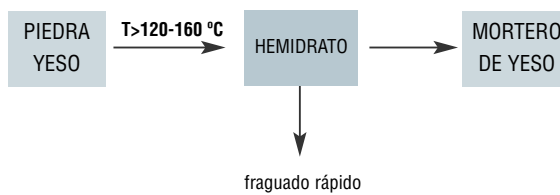


Figura 5. Composición y tecnología de fabricación del mortero de decoración en época egipcia



Figura 6. Técnicas de fabricación de los morteros griegos.

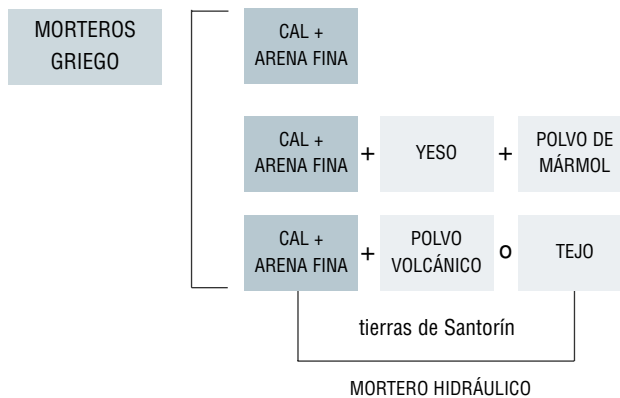
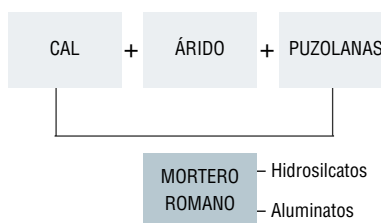


Figura 7. Técnica de fabricación de morteros romanos



Los romanos conocían el yeso pero le daban un papel secundario, como ayuda a la albañilería y para motivos decorativos, sabiendo utilizar sus propiedades. Al final del imperio se utilizaba con más intensidad por su economía.

Con la desaparición del Imperio romano las técnicas de fabricación se diversificaron y sus características variaban según el lugar o el edificio. En general la calidad bajó y esto pudo estar relacionado con el modo de fabricación, ya que los componentes seguían siendo los mismos. Los factores que han influido han podido ser:

1. El tejo en el mortero romano presentaba las siguientes características:
 - Era lo suficientemente poroso para permitir la entrada de aire y favorecer el proceso de carbonatación.
 - Para favorecer su carácter puzolánico (reactividad con la cal), era necesaria una selección de la arcilla y una temperatura de cocción no muy elevada.
2. Otro factor pudo ser el proceso de obtención de la cal o incluso las proporciones que se añadían al mortero, que bajó en este periodo.
3. Por último, el proceso de selección de la granulometría de los áridos y homogeneización de las mezclas, ya que los morteros aparecían mezclados con tierra.

En el periodo medieval en este tipo de materiales se detecta una reducción importante en el aporte de aglomerante (cal) y su mezcla con tierra; sin embargo, sí se observa una mayor elaboración en las técnicas de construcción, haciendo referencia a las construcciones árabes y un desarrollo importante en la

elaboración de morteros para revestimientos y bases de pintura mural.

A partir del siglo XIV se generalizó el empleo de la piedra en construcción, más restringido anteriormente, por lo que la técnica de fabricación del mortero no evoluciona durante este periodo.

Por otra parte, experimentó un gran auge el uso de enlucidos y estucos; así, después del siglo XII, el estuco complementa a la pintura y escultura. Las pastas de yeso se emplean para estucar como soporte sobre tablas, realizándose elementos en relieve moldeados con este material.

En escultura se emplea como soporte de policromías y en el siglo XVII y XVIII el estuco cobra un excepcional valor como complemento a la escenografía arquitectónica, pasando de decoración a esquemas más complejos, con la utilización de armaduras metálicas para afianzar los atrevidos elementos decorativos.

En el siglo XVIII se descubren los morteros hidráulicos que actualmente se conocen, gracias a Smeaton que, durante la construcción del faro de Eddyston, buscaba morteros que fraguasen en presencia de agua. Con este motivo calcinó calizas impuras (margocaliza) con una proporción importante de arcillas y obtuvo dicho ligante hidráulico, confirmando que era la arcilla la que daba carácter hidráulico a los morteros.

Las diferencias entre el mortero hidráulico romano y el mortero empleado por Smeaton aparecen en la figura 9.

Figura 8. Tecnología de fabricación de los morteros medievales

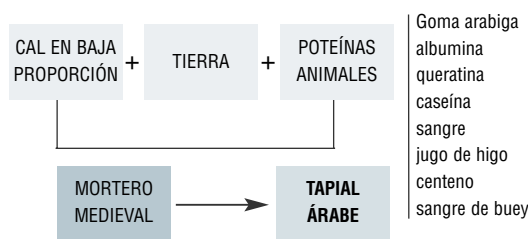
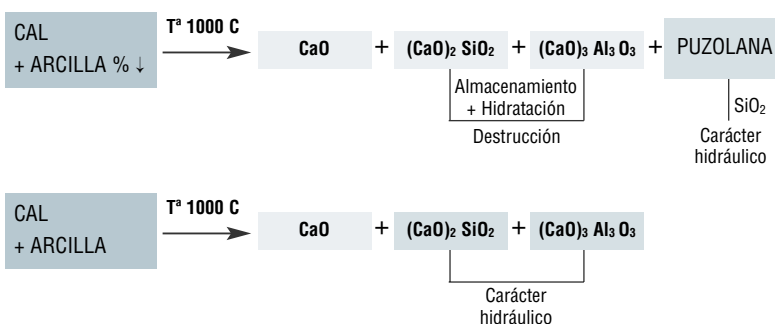


Figura 9. Evolución de los morteros romanos a los modernos, el primer esquema corresponde a la fabricación de los morteros romanos y el segundo a los morteros actuales



El primer esquema corresponde a la forma de elaboración de los morteros hidráulicos romanos, éstos se caracterizan por que los silicatos no provienen de la calcinación de las arcillas sino de la sílice que liberan las puzolanas. La diferencia más significativa entre los morteros de cal hidratada (no hidráulicos) con los que utilizan puzolanas o tejo es la presencia de una fase de sílice vítrea que genera silicatos cálcicos hidratados, cuya formación tiene lugar antes de la carbonatación; estos compuestos son muy estables en el tiempo y su efecto más inmediato es una reducción de la porosidad en la matriz del ligante.

El segundo esquema corresponde a la forma de elaboración de morteros hidráulicos en época moderna. La diferencia entre los morteros hidráulicos romanos con los ensayados por Smeaton, es la fuente de obtención de los silicatos y aluminatos cálcicos que, en el primer caso, proceden de las puzolanas y, en el segundo caso, de la caliza impura calcinada (arcillas). Para el caso de los morteros romanos la proporción de sílice y alúmina que puede contener la caliza es muy baja, destruyéndose estos compuestos durante el proceso de almacenamiento (aproximadamente 3 años).

Vicat (1812) fue el primero que demostró científicamente las propiedades hidráulicas de ciertas cales y que esta propiedad se debía fundamentalmente a la

reacción del óxido de calcio con compuestos derivados de las arcillas (Sílice+ óxidos de hierro y aluminio) originando silicatos cálcicos hidratados (SCH). Según el contenido en arcilla, la temperatura y tiempo de cocción, los compuestos resultantes eran más o menos hidráulicos.

Las cales hidráulicas pueden considerarse como intermedias entre las cales hidratadas y el cemento portland actual. Presentan contenidos elevados en óxido de calcio, por tanto deben ser apagadas en presencia de agua, pero con cantidades pequeñas para evitar la hidratación excesiva de los silicatos cálcicos.

Desde el siglo XIX hasta la actualidad, la fabricación de los cementos modernos han sufrido una amplia evolución desde J. Frost pasando por Apsdin hasta Johnson. El proceso de obtención es el siguiente: la caliza se calcina y posteriormente se tritura y se mezcla con arcilla. Esta mezcla se vuelve a calentar a una temperatura entre 1300-1500 °C, constituyendo el clinker; esta mezcla se tritura y se vuelve a calentar hasta pérdida total del dióxido de carbono. Por último a la mezcla resultante se le añade yeso para retardar del fraguado.

Después de la Exposición Universal de 1851 el cemento portland entra en el mercado de la construcción reemplazando al mortero de cal. La producción industrial de este cemento no ha cambiado prácticamente nada, aunque la investigación sobre él ha sido importante a lo largo del siglo XX.

3. COMPONENTES DEL MORTERO

Dado que el mortero es el producto final de la transformación de una mezcla de materias primas, es indudable que dichas materias primas tienen una gran importancia en los procesos de fabricación, porque de sus características depende, en gran parte, la calidad del producto resultante.

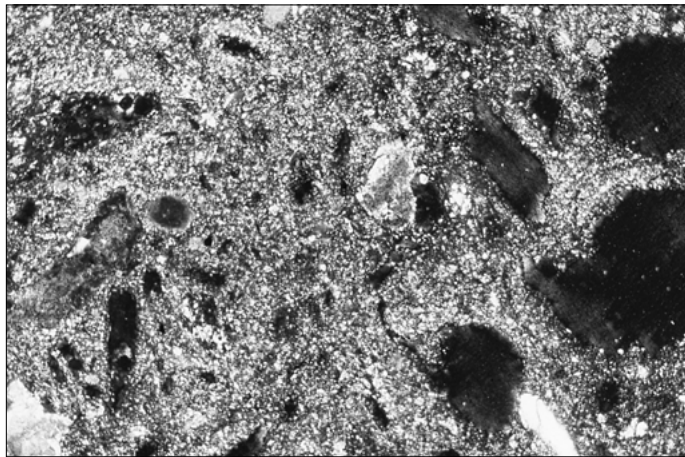
Los constituyentes básicos del mortero son: el ligante, el agregado y posibles aditivos.

3.1. Ligantes

Es el componente que dota a este material de la capacidad de endurecer y a la vez hacerlo trabajable y plastificante. El ligante por excelencia ha sido la cal aunque también se han empleado a lo largo de la historia la arcilla, el asfalto y el yeso y por último y más reciente el cemento portland.

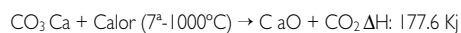
3.1.1. Cal

La cal sin duda es el ligante más utilizado a lo largo de la historia; la tecnología de elaboración ha variado



Mortero de yeso y cal, visto al microscopio óptico

sustancialmente a lo largo del tiempo (método de producción y tipos hornos); sin embargo el método de obtención es sencillo y ha permanecido invariable; básicamente consiste en la calcinación de rocas carbonatadas (calizas fundamentalmente) según la siguiente reacción química (1):



Esta reacción traducida en pesos moleculares nos muestra que por cada 100 gramos de roca caliza se forman después de la calcinación, 44 gramos de CO_2 y 56 gramos de CaO .

La descomposición de la caliza comienza a los 830 °C, obteniéndose la cal viva (CaO), que es apagada con agua formándose la portlandita Ca(OH)_2 . Esta reacción es exotérmica y muy violenta, siendo el resultado final un polvo blanquecino cuya temperatura puede llegar a los 400 °C.

Obtención de la cal

A. Calcinación. La obtención de la cal se realiza por calcinación entre 900-1000 °C de la piedra caliza pura (contenidos en carbonatos cálcicos y magnésicos, superior a 95%), que puede ser dura y densa y a veces porosa.

- A 110°C se pierde el agua higroscópica.
- Entre 110 y 700° C se descomponen los silicatos (arcillas) dando SiO_2 y Al_2O_3 .
- Entre 700 y 900°C se descomponen los carbonatos, con desprendimiento del CO_2 , obteniéndose CaO .
- A partir de los 1000°C reaccionan los productos resultantes, CaO , SiO_2 y Al_2O_3 , dando lugar a la cal hidráulica.

Las caleras (hornos) más utilizadas son los verticales; antiguamente la piedra caliza se introducía por la boca superior del horno en capas alternas junto con el combustible.

B. Hidratación (apagado). Tiene lugar regando la cal viva dentro de un recipiente y batiendo hasta que se deshaga totalmente.

La cal está bien apagada si, al realizar una pasta con la cal y el agua, ésta se agarra a la paleta que se usa para ello.

La primera reacción de hidrólisis del CaO, cuando se mezcla con el agua, no conduce a una acción aglomerante, debido a que este óxido tiene demasiada energía libre y da lugar a una reacción demasiado rápida e incluso violenta. El proceso resulta "expansivo" o destructivo, en lugar de aglomerante. El óxido de calcio, cuando permanece en estado "libre" produce espontáneamente esta reacción, la cual es el origen de las "grietas centrífugas" que eventualmente se pueden producir en cualquiera de los aglomerantes cálcicos.

La cal recién apagada presenta mayor posibilidad de que se formen "caliches" (nódulos de cal libre o no combinada) los cuales, al ser apagados (por ejemplo, en el seno del mortero), producen presiones como consecuencia del aumento del volumen al hidratarse. Este fenómeno expansivo aparece en forma de "desconchamientos", cuando estos nódulos están próximos a la superficie, y en forma de grietas, cuando se hallan a mayor profundidad (Goma, 1979). Por esta razón su contenido en cal viva no debe ser superior al 2 o 3% del volumen total de la masa.

Existen varias formas de apagado:

- Al aire. La cal expuesta al aire absorbe la humedad hasta apagarse, pulverizándose por efecto del aumento del volumen. Este proceso es lento, y tienen el riesgo de recarbonatación por reacción con el CO₂ de la atmósfera. No obstante, a veces se emplea este sistema cuando se trata de conservar por algún tiempo la cal antes de utilizarla; se prepara en montones grandes, de forma que la reacción con el anhídrido carbónico sólo tiene lugar en la superficie.
- Por fusión. También se le llama sistema ordinario. El procedimiento consiste en poner la cal viva en un recipiente de apagado con el agua conveniente y se agita hasta obtener una pasta. El fenómeno llamado de cocción, es el que se produce por una adición insuficiente de agua, o más probablemente, por un batido inadecuado; por contra, la inundación es debida a una excesiva cantidad de agua, que retarda la hidratación por mantener la temperatura demasiado baja.
- Por aspersión. Se realiza por regado de la cal viva que se ha depositado sobre el terreno en capas de 10 cm a 15 cm. de espesor o en pequeños cubos de 30 cm. cubiertos de arena y posteriormente se produce el regado; se obtiene así una cal muy fina en polvo.

- Por inmersión. Se realiza con cal reciente, bien protegida de la humedad del aire y de la lluvia. Se vierte en un cesto de mimbre, que se sumerge unos segundos en agua hasta que comience a hervir la superficie. Tras sacarla del agua y dejarla escurrir se vierte en suelo limpio o en toneles para conservar mejor el calor.

Si el proceso de apagado se realiza de forma correcta, el proceso de carbonatación posterior no llevará consigo un aumento de volumen lo que mejorará las calidades de la cal.

C. Almacenamiento / maduración. Terminado el tratamiento de apagado, la cal se somete a un proceso de maduración que consiste en su almacenamiento por un periodo que puede rondar hasta los tres años (tratado de Villanueva). Así toma consistencia untuosa más compacta, gana en finura, plasticidad, capacidad de retención de agua y rendimiento. Cuanto más tiempo esté enfosada, mayor brillo presenta en su acabado.

Al sacar la cal de la fosa se elimina la capa exterior (ya carbonatada) y la parte inferior para eliminar las posibles sales solubles; también es aconsejable que se tamice para eliminar los posibles restos de arcilla.

Tipos de cal

Las cales según la norma UNE 80-502/92 son aglomerantes cuyos principales constituyentes (basados en análisis químicos) son óxidos e hidróxidos de calcio, magnesio, sílice, aluminio e hierro. Si el contenido en óxido de magnesio es menor del 5% la cal se denomina cal grasa y, en caso contrario, se denomina cal dolomítica o magra. Si presenta contenidos comprendidos entre el 10-20% de sílice, aluminio e hierro se denominan cales hidráulicas.

El MgO proviene de las dolomías, su presencia resulta perjudicial para la cal ya que en este caso el apagado es más lento.

En el mercado se pueden encontrar una variedad de productos derivados de la cal que aparecen en la tabla I.

Tabla I. Productos derivados de la cal

Tipo	Características
Cal blanca	alta calidad
Cal gris	con frecuencia hidráulicas
Cal de Viena	cal en polvo o ensacada
Cal bastarda	cal + yeso
Pasta de cal	cal enfosada tamizada y con agua
Leche de cal o lechada	cal con 90% de agua+ sustancias orgánicas

Según las características de la caliza empleada en la obtención de la cal se distinguen 4 grupos (atendiendo

do a sus componentes químicos) que vienen indicadas en la tabla II.

La presencia de arcillas reactivas es lo que caracteriza a las cales hidráulicas; éstas pueden estar en forma de caolinita, illita o montmorillonita. Estas fases cristalinas al ser sometidas a la temperatura de cocción, pueden liberar Al_2O_3 , SiO_2 y Fe_2O_3 dependiendo de las temperaturas alcanzadas.

El carácter hidráulico de la cal se determina mediante el Índice de hidraulicidad o puzolaneidad que viene dado por la siguiente expresión (2):

$$IP = \frac{\text{arcilla}}{\text{cal}} = \frac{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 (\%)}{CaO + MgO + K_2O + Na_2O (\%)}$$

En las cales grasas esta relación es de 0.1, para valores por encima de 0.5 se denominan cales hidráulicas y para valores entre 0.5-1.3 se obtienen cales medianamente hidráulicas. Sin embargo la presencia de estos compuestos no es directamente equivalente a mayor grado de hidraulicidad, sino que es su capacidad de combinarse con el óxido de calcio; así, se define el Módulo hidráulico (Michaelis, 1909) atendiendo a la siguiente expresión (3):

$$MH = \frac{CaO + MgO + K_2O + Na_2O (n^\circ \text{ de moléculas})}{Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 (n^\circ \text{ de moléculas})}$$

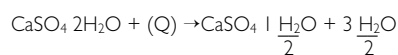
3.1.2. Yeso

Con el término yeso se conocen dos materiales con propiedades físico-químicas distintas. El yeso como ligante, se refiere a un producto obtenido industrialmente a partir de la piedra de yeso "aljez" encontrado en la naturaleza, que responden a las fórmulas $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ y $CaSO_4 \cdot 1/2 H_2O$ respectivamente, se le denomina "yeso cocido" o "yeso industrial" y se trata de sulfato hemihidratado de color incoloro en estado puro.

El otro término hace referencia a piedra que se encuentra en la naturaleza como alabastro, selenita, yeso espático, yeso sedoso, yeso fibroso, yeso de nieve, yeso terroso y rosa del desierto; aunque también puede aparecer en la naturaleza como sulfato cálcico anhidro ($CaSO_4$).

Proceso de obtención del yeso

El yeso como ligante se obtiene a partir del siguiente proceso reactivo(4):



La temperatura de calcinación es variable y su rango puede ser muy amplio, desde 60°C hasta 1200 °C.

Tabla II. Clases de cales

Tipos de Cal		Constituyentes	Porcentajes	Propiedades
Cal aérea	Cal grasa	CaO+ Ca(OH) ₂ libre sin posibilidad de combinación+ MgO+Mg(OH) ₂	95% CaO	No endurece bajo el agua
	Cal magra		<5% MgO 90%CaO ≥5% MgO	
Cal combinada		CaO+ baja % de cal combinada	CaO+ % baja de Cao combinada	Endurece bajo el agua
Cal hidráulica	Débilmente H	CaO libre y CaO combinada con alumina y silicatos de calcio + óxidos de Fe, Mg	10-15%SiO ₂ +Al ₂ O ₃	Endurece bajo el agua
	Propiamente H		15-20%SiO ₂ +Al ₂ O ₃	
	Eminentemente H		>20% SiO ₂ +Al ₂ O ₃	

* H. Hidráulica

Garate, 1999, establece unos rangos de temperaturas para la obtención de los distintos productos; cuando el yeso se somete a temperaturas comprendidas entre 130°C y 1000°C en atmósferas secas (Presión mayor de 1 bar) se pierde parte o toda el agua de cristalización obteniéndose las diferentes fases.

Según la temperatura de cocción, el sulfato que se forma presenta características diferentes:

- Entre 100°C y 120°C (ambiente húmedo) en presencia de Cl_2Mg y presión superior a 1 bar, se forma hemihidrato $2Ca SO_4 \cdot 1 H_2O$ ó $Ca SO_4 \cdot 1/2 H_2O$. (variedad α)
- Entre 120-180°C se obtiene el yeso cocido en forma de hemihidrato $2Ca SO_4 \cdot 1 H_2O$ ó $Ca SO_4 \cdot 1/2 H_2O$ (variedad β).
- Entre 220 y 380°C se obtiene la anhidrita III ó anhidrita soluble.
- Entre 380 y 1200°C se obtiene la anhidrita II ó insoluble (sobrecocida).
- Entre 1200 y 1350°C se obtiene la anhidrita I, fase no estable que se transforma en anhidrita II al bajar la temperatura a 1200°C.
- A temperatura superior a 1350°C se produce el fenómeno conocido como "disociación térmica" dando lugar a la formación de CaO y SO_3 .

En el proceso de obtención (deshidratación) influyen una serie de factores como son: tipos de hornos (rotatorios, verticales, hornos en cinta, hornos artesanales, etc), tamaño de la piedra de yeso triturada, sistema de carga (espesor, distribución) y tiempo de tratamiento.

El yeso hemihidrato $2Ca SO_4 \cdot 1 H_2O$ ó $Ca SO_4 \cdot 1/2 H_2O$ se presenta en dos variedades alotrópicas (α , β) con propiedades diferentes (ver tabla III).

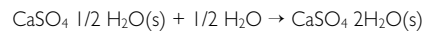
Tabla III. Variedades alotrópicas del yeso

Variedades	Características	Fraguado	Resistencias mecánicas
Hemihidrato α	más compacto sedoso brillante cristales gruesos (aciculares)	rápido	más resistentes, 10 veces más que el β
Hemihidrato β	más esponjoso masivo (microcristalino)	más lento	menos resistente

Fraguado del yeso

El proceso de fraguado del yeso tiene lugar en tres etapas: hidratación, cristalización y endurecimiento.

Cuando el yeso en polvo se mezcla con el agua se produce el proceso inverso al anterior (5)



La hidratación del 95% del yeso tiene lugar en 3 minutos aproximadamente y finaliza en menos de 2 horas. En su fraguado influyen una serie de factores, como son la cantidad de agua de amasado, la temperatura, el tiempo transcurrido desde su deshidratación y el tamaño de las partículas. Cuanto mayor sea el aporte de agua de amasado el tiempo de fraguado baja y, si la temperatura de cocción del yeso es mayor, se aceleran las reacciones de hidratación, salvo en el caso que el yeso sea insoluble; en este caso se produce un retraso en la velocidad de sobresaturación y de la reacción total. Cuando la temperatura de cocción no sobrepasa los 60 °C, en presencia de agua el hemidrato se hidrata de forma rápida dando lugar a una maraña de agujas de yeso como consecuencia de un fraguado es rápido (en algunos minutos). Este proceso va ligado a un aumento de la temperatura y una expansión por cristalización.

El fraguado del yeso se puede regular con el empleo de retardadores del fraguado que pueden ser de varios tipos:

- *Electrólitos.* Disminuyen la solubilidad del yeso. Entre ellos se encuentran el cloruro sódico y potásico, sulfatos sódico y potásico, alcoholes, acetonas, éteres, azúcares, ácido cítrico, ácido acético, ácido fosfórico y ácido bórico.
- *Sustancias* que modifican la estructura cristalina del yeso. Entre ellas se encuentran el acetato de calcio, carbonato magnésico, carbonato cálcico, etc.
- *Sustancias orgánicas* de elevado peso molecular. Actúan como coloides protectores y entre ellas se encuentra la cola, caseína, queratina, goma arábiga, albúmina de huevo, gelatina, melazas, tannino, etc.

El problema fundamental del yeso, junto con la regulación del fraguado, es actuar sobre la solubilidad, disminuyéndola durante su hidratación o una vez endurecido y perfectamente seco; en definitiva impermeabilizarlo. Los productos empleados para este propósito se han mencionado anteriormente como retardadores del fraguado. El empleo en la masa del yeso de ciertos aditivos (sulfato magnésico, aluminio, bario, etc.) originan sales poco solubles que colmatan los poros consiguiendo dicho endurecimiento.

Cuando el yeso se mezcla con áridos normales o ligeros para fabricar un mortero, se ha de tener en cuenta:

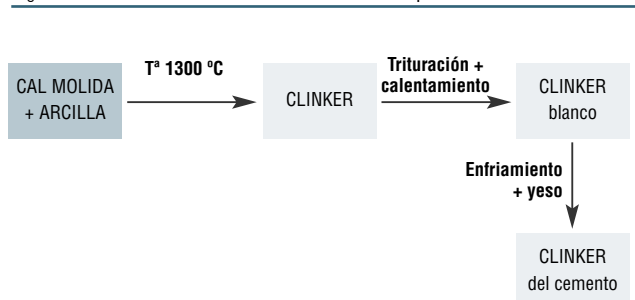
- El comportamiento del yeso con áridos es muy diferente a la mezcla de yeso sin áridos.
- La naturaleza de los áridos influye en las características de los morteros, modificando la cantidad de agua para el amasado, lo que, a su vez, incide en el tiempo de fraguado, porosidad y resistencia mecánica.
- Por otra parte, hay que tener en cuenta que las impurezas que se encuentran en la piedra del yeso (arcilla, carbonatos, etc.), así como los incocidos que actúan como carga, influyen en las distintas características de los yesos industriales.

3.1.3. Cemento

El término cemento deriva de "Caementium" haciendo referencia a cascajos o gravas sumergidos en un baño de mortero montado con la ayuda de unos tableros de madera para obtener un bloque. Se entiende en este caso por cemento la sustancia conglomerante, inicialmente plástica, que endurece, es decir, el ligante exclusivamente sin la carga inerte.

La evolución que ha sufrido este término a lo largo de la historia lo ha asociado al descubrimiento de cemento portland, hecho que ha incitado a confusión, ya que su origen relacionado con las cales hidráulicas romanas no tiene nada que ver con el uso que actualmente tiene.

Figura 10. Proceso de obtención del cemento portland



Cuando se habla de cemento hay que referirlo a un ligante moderno cuyo proceso de obtención viene reflejado en la figura 10.

Los componentes empleados en la fabricación del cemento son de tres tipos:

- Material carbonatado (calizas, margas, lodos aragónicos). Suponen el 75% de los componentes del cemento.
- Componentes secundarios. Corresponden al material arcilloso y suponen del 10 al 25% de los componentes del cemento.
- Adiciones. Se encuentran en baja proporción, su función es mejorar las características del cemento. Estos componentes se clasifican en :
 - hidráulicamente activos: escorias siderúrgicas, cenizas volantes, humo de sílice, arcillas activadas, etc.
 - hidráulicamente inactivas: confieren plasticidad, color, adherencia, etc.

Los crudos del clinker del cemento portland, son mezclas de diferentes tipos de materias primas cuyas características se establecen sobre la base de unos módulos que definen su composición química. Los módulos más utilizados son:

Módulo silíceo, Kühl (1951) (6).

$$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

Módulo fundente o aluminico-férrico, Kühl (1951) (7).

$$MA - F = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

Grado de saturación en cal (8).

$$MSC = \frac{CaO}{2,8 SiO_2 + 1,1 Al_2O_3 + 0,7 Fe_2O_3}$$

El grado de saturación en cal representa la cal necesaria para que se saturen todos los demás componentes químicos del crudo y se formen los componentes del clinker. La composición del clinker del portland aparece en la tabla IV.

En el mercado se pueden encontrar básicamente dos tipos de cementos:

1. Cemento portland, el cual se obtiene por calcinación hasta fusión (sinterización) de calizas, margas y arcillas; sus componentes básicos son: 2/3 SCH (silicatos cálcicos), Al_2O_3 , Fe_2O_3 + otros, una relación $CaO/SiO_2 > 2$ y $MgO < 5\%$.

Tabla IV. Componentes del clinker

Componentes	Compuestos	Proporciones
C_3S silicatos tricálcicos	$3CaO \cdot SiO_2$ (alita)	45-70%
C_2S silicatos bicálcicos	$2 \cdot CaO \cdot SiO_2$ (belita)	15-35%
óxido de calcio	CaO (libre)	<5%
óxido de magnesio	MgO (libre)	<5%
álcalis	Na_2O , K_2O	<5%
C_4AF ferrito aluminato tetracálcico, C_3A	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	3-15%
aluminatos tricálcicos	$3CaO \cdot Al_2O_3$	

2. Cemento aluminico, el cual se obtiene por la fusión de calizas y bauxitas. Sus componentes son: Al_2O_3 mayoritariamente, Aluminatos cálcicos y no existen C_3A , $Ca(OH)_2$.

3. 2. Árido

Se define agregado como un material granular de naturaleza inorgánica, en general, que, junto con la masa del ligante, forma el mortero. Engloba desde la arena hasta el tejo y su finalidad es estabilizar su volumen, hacer de relleno y disminuir su retracción durante el secado; se le ha asignado equivocadamente un carácter inerte en referencia a su posible pasividad química. Constituye el 80% aproximadamente de la masa total del material y determina en gran parte su comportamiento.

El término árido hace referencia a un conjunto de partículas de diferente granulometría que forma parte de la masa de un conglomerado; si es grava se denomina árido grueso y si es arena árido fino. Estos materiales deben cumplir las siguientes condiciones:

- resistencias mecánicas y durabilidad aceptables
- buena adherencia a la pasta
- generar una mínima cantidad de huecos al apilarse
- no retener excesiva cantidad de agua
- mantener homogeneidad en el mortero fresco durante la manipulación
- no provocar efectos negativos durante la hidratación del aglomerante ni una vez el material esté endurecido.

El término hormigón es un concepto relacionado con construcciones antiguas y designaba una mezcla de mortero con árido más grueso (grava o piedra) de tamaño mayor que la arena (de la Torre, 1992). Por tanto, es precisamente el tamaño de la carga

Tabla V. Clasificación de los agregados o áridos

Agregados o áridos	Tipos	Composición
ÁRIDOS SILÍCEOS	arenas graníticas arenas marinas puzolanas o tobas volcánicas	Cuarzo. Feldespato, plagioclasa, augitas y micas
ÁRIDOS CALCÁREOS	rocas carbonatadas	Calcita, dolomita, etc.
TEJO	molienda de cerámicas	material silíceo de alta temperatura
ÁRIDOS MIXTOS	arena silícea/tejo arena de playa + tierra volcánica agregado calcáreo + cuarzo árido calizo + cuarzo + conchas	Mezcla de las composiciones anteriores

inerte el factor diferenciador entre mortero y hormigón. La discriminación entre un término u otro viene designado por el tamaño del árido, para diámetro inferior a 8 mm se considera mortero, para tamaño comprendido entre 8 y 70 mm se denomina hormigón.

Existen otros criterios de clasificación de áridos atendiendo a su granulometría, la clasificación más utilizada aparece en la tabla VI.

Tabla VI. Clasificación de áridos atendiendo al tamaño

Tipos de áridos	Tamaño
Arena o árido fino	Retenido tamiz 5 UNE7050
Grava o árido grueso	Pasa tamiz 5 UNE7050

Arredondo, 1983 establece una terminología de los áridos atendiendo al tamaño, que aparece en la tabla VII.

Tabla VII. Clasificación de áridos según Arredondo

Tipo de árido	Tamaño
Morro	80-150 mm
Grava gruesa	50-80 mm
Grava media	40-60 mm
Grava menuda	30-50 mm
Gravilla	20-30 mm
Garbancillo	5-20 mm
Arena gruesa	2-5 mm
Arena fina	0.05 -2 mm
Polvo	0-0.05 mm

El estudio sobre patologías en morteros esta muy relacionado con los defectos que presentan estos agregados de ahí que la normativa existente sobre áridos esté orientada a establecer un control de calidad sobre estos materiales.

Tradicionalmente, el agregado se ha seleccionado entre los materiales disponibles en el entorno sin una normativa de calidad previa, aunque sí parece claro que estos agregados en muchos casos eran tratados previamente a ser utilizados en obra. Este tratamiento consistía en un lavado y posterior secado para eliminar las posibles impurezas (material arcilloso).

3.3. Aditivos

Se consideran aditivos a las sustancias añadidas a la mezcla con el objeto de mejorarla. Sus funciones son:

- Disminuir o aumentar la porosidad del material
- Facilitar la plasticidad
- Aumentar el grado de consistencia y durabilidad

A veces el límite entre agregado, ligante o aditivo no está claro ya que este último puede desempeñar funciones que normalmente se le atribuyen a los anteriores.

Atendiendo a su tipología los aditivos se clasifican en:

1. Aditivos inorgánicos. En este grupo se incluyen sustancias naturales, sintéticas o semisintéticas (se incluyen sustancias que pueden sufrir calentamientos, molienda o secado previo). Entre los más frecuentes se encuentran: arcillas, tejo, fragmentos de ladrillo, puzolanas naturales o artificiales.

2. Aditivos orgánicos. Se trata de sustancias orgánicas naturales donde se pueden incluir componentes con pequeñas modificaciones que no afectan a su esencia (disolución, colado etc). Entre ellos se incluyen: sangre animal, leche, huevos, clara de huevo, goma arábiga, estiércol, carbón y azúcar.

3. Aditivos sintéticos. Incluye componentes sintéticos o materiales naturales pretratados de forma compleja. Este tipo de componentes aparecen en la industria del mortero en los últimos tiempos. Entre ellos se encuentran: resinas, polímeros acrílicos, fracciones de petróleo, acrilonitrilos, benzotriazoles, siliconas, ácidos carboxílicos, hidroxilados, polivinilos, etc.

Los aditivos inorgánicos se han usado tradicionalmente con la función de dar un carácter hidráulico al mortero. El tejo y el carbón juegan un papel importante en el endurecimiento, ya que su presencia, al ser materiales porosos, favorece el acceso de CO₂ y alivia las presiones generadas durante la ruptura de las mezclas endurecidas.

El empleo de los aditivos orgánicos es común en los morteros antiguos; sus características aparecen en la tabla VIII.

3.4. Componentes minoritarios

Se trata de compuestos que aparecen en pequeñas proporciones cuyo contenido puede ser indicativo de:

- Presencia de actividad puzolánica (por existencia de sílice disuelta y óxidos de Fe y Al).
- Presencia de sales solubles, en forma de cationes alcalinos (Na⁺, K⁺) y aniones (Cl⁻, NO₃⁻, SO₄⁻² y en menor proporción F⁻). Son los responsables de los fenómenos de alteración y aparecen normalmente en forma de eflorescencias.
- Elementos metálicos traza, (que se encuentran en partes por millón o billón) cuya presencia puede ser indicativa de la cantera de procedencia del material (tanto del ligante como del agregado).

Tabla VIII. Propiedades de los aditivos orgánicos

Aditivos	Funciones
Clara de Huevo	Acelerador y retardador del fraguado, plastificante
Azúcar	Acelerador del fraguado, resistencia a la escarcha
Gelatina	Incrementador de la durabilidad
Gluten	Incrementador de la adherencia, retardador del tiempo de fraguado
Caseína	Incrementador de adherencia
Albúmina	" y plastificantes
Cerveza	Incrementador de durabilidad
Orina	" "
Leche	Plastificante
Aceite mineral	"
Glicerina	"
Glucosa	"
Sangre	Retardadores del tiempo de fraguado
Sacarina	" "

Referencias

ÁLVAREZ GALINDO, JI (1997). "Caracterización de morteros en Monumentos históricos Navarros. Tesis Doctoral, Universidad de Navarra. Publicación inédita.

ARREDONDO AND F. SORIA (1983). Estudio de materiales. Tomo I. Ed. S.P. Mopu. Revista *obras públicas* Madrid.

ESPINOSA GAITÁN, JL; GUTIÉRREZ MONTERO, F y VILLEGAS SÁNCHEZ, R (1996). Estudio de materiales del yacimiento de Puente Tablas (Jaén). 3th International Congress of Restoration of Building and Architectural Heritage. 1996 Granada, Spain.

GARATE ROJAS, I (1999). "Las artes de los yesos, yeserías y estucos". Instituto Español de arquitectura, Universidad de Alcalá. ISBN 84-89150-27-7.

GASPAR TEBAS, D (1996). "Morteros de albañilería, clasificación y propiedades". *Degradación y Conservación del Patrimonio Arquitectónico*. Universidad Complutense, Madrid. ISBN:84-89365-84-9.

GOMA, F (1979). "El cemento potland y otros aglomerantes". Ed. Técnicas asociadas S.A, Barcelona.

SORIANO CARRILLO, J (1992). "Materias primas para cementos y áridos". *Recursos minerales de España* CSIC, Madrid.

DE LA TORRE LÓPEZ, MJ (1995). "Estudio de los materiales de construcción de la Alhambra". *Monografía de Arte y Arqueología*. Universidad de Granada, IAPH Junta de Andalucía.

VALVERDE ESPINOSA, I (1993). "Caracterización de los áridos para hormigones en la Depresión de Granada". Tesis Doctoral Universidad de Granada. Publicación inédita.