

Piedras artificiales: morteros y hormigones. El cemento como máximo representante de estos materiales de construcción

M.J. Varas^{1,2}, M. Álvarez de Buergo², R. Fort²

¹ Facultad de CC. Geológicas, Departamento de Petrología y Geoquímica. C/ José Antonio Novais 2, 28040 Madrid, España, mjvaras@geo.ucm.es

² Instituto de Geología Económica (CSIC-UCM). Facultad de CC. Geológicas. C/ José Antonio Novais 2, 28040 Madrid, España

ABSTRACT

From the dawn of architecture to the present day, artificial stones have been the most in-demand building material. Natural stones, because of their beauty, fine quality, etc., are now favoured over artificial stones, but the use of the latter has always been indispensable. The most representative group of artificial stones is that of mortars and concrete. These mortars are obtained from the mixture of natural dry materials with a binding material and water. The binding materials may be common (lime, plaster, clay, etc) or hydraulic (hydraulic lime and cements). Over the last two centuries, 19th and 20th, the prominence of hydraulic mortars and concrete has been enormous and has given cement the starring role in modern construction.

INTRODUCCIÓN

Las piedras pueden clasificarse en piedras naturales y artificiales. El término piedra natural es aplicado comercialmente a todos los materiales de roca natural que han sido extraídos de canteras o minas para ser utilizados en la construcción o uso industrial. La piedra natural se empezó a trabajar para su uso en construcción hacia el 8000 a.C. y Egipto es el mejor ejemplo del Mundo Antiguo. La piedra artificial es un producto especial manufacturado y, en ocasiones, de aspecto similar a la piedra natural. Una de las piedras artificiales más corrientes es la obtenida con restos de la piedra de machaqueo mezclados con cemento Portland (a veces coloreado) y agua.

La piedra artificial empezó a ser trabajada antes que la piedra natural: tapias (8000 a.C.), morteros (8000 a.C.), adobes (5000 a.C.), hormigones (4500 a.C.) y ladrillos (3000 a.C.). El origen de la piedra artificial se localiza en Mesopotamia. Su uso suplía la falta de piedra natural en la región y la carencia de herramientas adecuadas para su extracción y trabajado posterior, además su coste económico era mucho más reducido.

El primer mortero fue un mortero de barro aparecido hace 10000 años en la región de Turquía (Çatal Hüyük), (Mortimore et al, 2004). Su uso fue como mortero de revestimiento. El primer hormigón apareció en la zona de Macedonia hacia el 4500 a.C. Era un hormigón de barro que cementaba los mampuestos de los zócalos de las casas.

Los morteros están formados por un aglomerante, un árido (tamaño arena) y agua. Los hormigones tienen, además, un segundo tamaño de árido, la grava. Los áridos (tamaños arena y grava) proceden generalmente de materiales granulados o de machaqueo, de naturaleza sedimentaria, metamórfica y/o ígnea, localizados en ríos, playas y/o minas. Sea cual sea su origen, estos áridos tienen que estar limpios de arcillas y salitre.

Los aglomerantes son muy variados, siendo los más comunes: la cal aérea que da origen a los morteros y hormigones comunes, y la cal hidráulica y el cemento, que originan los morteros y hormigones hidráulicos.

La cal aérea es una cal grasa procedente de la calcinación a 1000°C y durante 3-4 días, de calizas puras con <5% en contenido arcilloso. Es el aglomerante más tradicional junto con el yeso y el barro. Su uso ha estado ligado a la propia Historia de la Humanidad. Sus principales características son que: a) necesita del proceso de apagado o hidratación previo a su fraguado y endurecimiento, b) no fragua bajo el agua y c) la carbonatación de la argamasa es necesaria para conseguir un buen producto endurecido (Balbas et al, 2001; Krumnacher, 2001). Este aglomerante tarda hasta seis meses en endurecerse, y en algunos casos, incluso años. Su origen se localiza en Turquía y Mesopotamia (6000 a.C.) y su uso principal fue la pavimentación interior de las casas.

La cal hidráulica es una cal magra procedente de la calcinación hasta 1000°C, de calizas, arcillas y/o margas, donde el contenido arcilloso oscila entre el 5 y el 20%.

Es un aglomerante hidráulico que fragua bajo el agua. El fraguado y endurecimiento, varían de lentos (1 a 6 meses) a rápidos (2 a 4 días), según su grado de hidraulicidad. Pero como en el caso de las cales aéreas, necesita del apagado o hidratación previo para que posteriormente fragüe y se endurezca (Balbas et al, 2001; Krumnacher, 2001; Barahona, 2000).

El cemento es según la UNE 80-301 un aglomerante hidráulico, esto es, materiales de naturaleza inorgánica y mineral, que finamente molidos y convenientemente amasados con agua forman pastas que fraguan y endurecen a causa de las reacciones de hidrólisis e hidratación de sus constituyentes, dando lugar a productos hidratados, mecánicamente resistentes y estables, tanto al aire como al agua. Se obtiene de forma natural por la calcinación de margas o calizas impuras y/o de forma artificial por la dosificación y calcinación de calizas y arcillas.

Los cementos naturales se obtenían de la calcinación entre 800 y 1200°C de margas o calizas impuras con un contenido en arcillas de entre el 25 y el 40%. El hecho de ser un material hidráulico permite que fragüe bajo el agua en tiempos relativamente cortos (minutos a horas). Al contrario de las cales (aéreas o hidráulicas) no necesita el apagado o hidratación previo al fraguado pues ambos procesos se realizan simultáneamente. Los procesos de carbonatación y sulfatación son perjudiciales para el endurecimiento adecuado de estos materiales (Balbas et al, 2001; Krumnacher, 2001; Aspiazu, 1924). Los cementos naturales se clasifican en:

1. Cementos naturales rápidos: Cementos fabricados con margas que presentaban un contenido en arcillas moderado (aprox. 25%). Las temperaturas de cocción oscilaban entre 1000 y 1200°C, durante 12-20 horas. Eran cementos ricos en cal, que fraguaban rápidamente (<30 minutos).
2. Cementos naturales lentos: Cementos fabricados con margas que presentaban un contenido en arcillas alto (aprox. 40%). Las temperaturas de calcinación oscilaban entre 800 y 1000°C, durante 8-12 horas. Eran cementos ricos en sílice y fraguaban lentamente (30 minutos-12 horas).

Los cementos artificiales se obtienen de la calcinación a altas temperaturas (>1300°C) y durante menos de 8 horas, de calizas puras y arcillas (20-25%), convenientemente dosificadas. Son materiales hidráulicos que también fraguan bajo el agua pero son ligeramente más lentos que los cementos naturales, tardando entre 1 y 12 horas en el proceso (Balbas et al, 2001; Lea, 1976; Aspiazu, 1924). Como en el caso de los cementos naturales, la carbonatación y la sulfatación son procesos negativos para el fraguado y endurecimiento de estos cementos. El cemento "Pórtland" es el cemento artificial más conocido en la actualidad.

HISTORIA DE LOS AGLOMERANTES HIDRÁULICOS EN MORTEROS Y HORMIGONES

Dentro de la historia de los aglomerantes en morteros y hormigones se pueden distinguir dos grandes períodos:

Período antiguo (Mesopotamia 6000 a.C.-Roma 200 a.C.)

Este período se caracteriza por utilizar aglomerantes hidráulicos elaborados con mezclas naturales de materias primas y donde los tratamientos térmicos se encuentran ausentes. Durante esta etapa, las cales aéreas eran apagadas y mezcladas con tierras que transmitían al conjunto la hidraulicidad deseada.

Morteros: En Mesopotamia (4000-3000 a.C.) las cales previamente apagadas eran mezcladas con tierras, dando origen a morteros que eran utilizados en los enfoscados. En Grecia (2000 a.C.) las cales apagadas se mezclaban con "tierras de Santorini" para producir morteros que eran utilizados en la pavimentación. En Roma (200 a.C.) Vitrubio recoge en sus tratados de arquitectura como las cales apagadas eran mezcladas con puzolanas para producir el llamado "cemento romano", el cual era empleado como mortero en el revestimiento de los muros.

Hormigones: En Grecia (2000 a.C.) los morteros de cal apagada y "Tierra de Santorini" se convertían en hormigones cuando se añadían al conjunto tejas y/o ladrillo triturado de tamaño grava. Su utilización se centró en construcciones hidráulicas, como acueductos y depósitos de agua. En Roma (200 a.C.) a las cales apagadas y a las puzolanas, en una proporción 1:2, se añadían áridos gruesos dando origen al llamado "Mortero Concrecionado" u "Opus Caementiciun". Su uso se centró en la construcción de obras públicas y muros en general.

Período moderno (Reino Unido 1756-actualidad)

Este período se caracteriza por emplear aglomerantes hidráulicos elaborados con mezclas naturales y artificiales de materias primas y donde los tratamientos térmicos son imprescindibles. Durante esta etapa, se descubrieron las propiedades hidráulicas de las cales magras, con un contenido en arcillas de entre el 5 y el 40%, y se vio que estas propiedades mejoraban con el proceso de cocción.

En 1756, el ingeniero inglés John Smeaton, descubrió que las calizas impuras (margas) resistían la acción del agua del mar. Con este material reconstruye el faro Eddystone, en Cornwall, Gales. Estos nuevos materiales recibieron el nombre de "Cales Hidráulicas".

En 1796, el inglés James Parker, elevó la temperatura de cocción de las margas, aumentando su hidraulicidad y velocidad de fraguado con respecto a las cales hidráulicas. Estos nuevos materiales se denominaron “Cementos Naturales” o “Cementos Parker”.

En 1814, el químico francés Louis Vicat, establece las bases para la preparación de los aglomerantes artificiales (“cementos artificiales”), al calcinar mezclas dosificadas de arcilla y cal. En 1824, el maestro de obras Joseph Aspdin, patenta la fórmula del “Cemento Artificial Portland”. La escoria recocida de los hornos y su molienda daba un producto de fraguado lento, alta hidraulicidad y enorme resistencia.

En 1845, se inició la producción industrial del Cemento Artificial Portland. Se cambia la dosificación caliza:arcilla y se alcanzan $t^{\circ}>1300^{\circ}\text{C}$ en los hornos. En 1861, se obtiene el reconocimiento nacional (Reino Unido) del Cemento Artificial Portland con la construcción de la red de alcantarillado de Londres.

En 1875, se abren nuevas fábricas en Alemania y Francia, y en 1880, los hornos verticales son sustituidos por hornos horizontales. En 1891, el Cemento Artificial Portland consigue su reconocimiento mundial en la Exposición Universal de París.

El empleo de estos nuevos aglomerantes, tanto en forma de mortero como de hormigón, se centró principalmente en la construcción civil: faros, puertos, canales, embalses, depósitos, etc. Su uso en la edificación tardó un tiempo debido a que era considerado un material poco o nada estético. Entre 1901 y 1904, el arquitecto francés Tony Garnier, empleó estos materiales en la edificación de la “Citte Industrielle” y a partir de aquí se generalizó su empleo en toda clase de construcciones.

HISTORIA DE LOS AGLOMERANTES HIDRÁULICOS EN ESPAÑA

La fabricación de los cementos en España se inició en 1835 (figura 1). El cemento que aparece por esas fechas es el conocido como “Cemento Natural” (Varas et al, 2007). Este tipo de cemento procede de la calcinación a temperaturas medias ($800-1200^{\circ}\text{C}$) de calizas arcillosas o margas con distinto contenido en calcita y arcillas (25-40%) (Balbas et al, 2001; Lea, 1976; Aspiazú, 1924).

Es un cemento poco conocido por su escasa vida productiva (s.XIX en Europa y segunda mitad del s.XIX en España), ya que rápidamente fue sustituido por el cemento artificial Portland, que era mucho más resistente e ideal para las grandes infraestructuras civiles que se estaban empezando a construir en toda Europa (canales, puertos, sistemas de alcantarillado y suministro de agua, túneles, etc.).

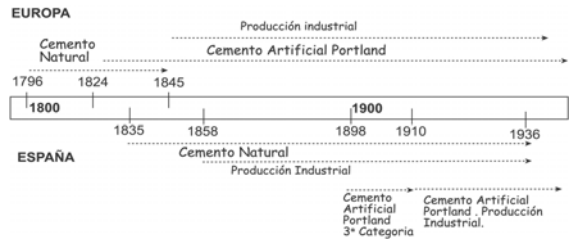


Figura 1: Esquema cronológico de la producción de cemento en Europa y España (Varas et al, 2007).

El lugar exacto donde se inició la producción del cemento natural en España no está claro, ya que surgieron, al mismo tiempo, numerosos focos independientes. La máxima concentración de estos focos se localizó en el norte y noroeste de España, principalmente en las comunidades autónomas del País Vasco y Cataluña. Desde el punto de vista industrial y económico, estas dos comunidades autónomas se alzaron con fuerza durante la segunda mitad del siglo XIX, y en este resurgir, la industria del cemento jugó un papel primordial. La producción y el consumo del cemento están considerados como uno de los termómetros más fiables de la actividad económica de un país.

GEOLOGÍA DE LAS POBLACIONES CEMENTERAS

La localización de las zonas cementeras en la España del siglo XIX está ligada a su geología circundante. La fabricación de estos cementos necesita de dos materias primas básicas: margas y carbones. La proximidad y la accesibilidad de ambos tipos de yacimientos eran necesarias por las deficiencias existentes en el transporte de la época.

En el País Vasco, el origen del cemento natural se localiza en la comarca del Bajo Urola (Guipúzcoa). Esta comarca englobaba las poblaciones de Zumaya, Arrona y Cestona. La industria del cemento supuso para esta comarca el motor del crecimiento industrial y económico. Además, la alta calidad de su cemento (Cementos Naturales Rápidos Zumaya; UNE 7087:1955) supuso que fuera muy apreciado en obras portuarias y costeras, tanto dentro como fuera de España. Era un cemento que fraguaba en pocos minutos y resistía durante años, sin sufrir alteraciones por la acción de las aguas marinas (Urdangarín & Izaga, 2000).

La geología dominante en el Bajo Urola (IGME, 1975) está constituida principalmente por calizas arcillosas, margocalizas y margas, pertenecientes al Cretácico marino. Todos estos materiales fueron fuertemente demandados para la industria del cemento.

Por su parte, los lignitos que se necesitaban para la calcinación se extraían de forma artesanal de la zona cársica de Aizarna y del monte Erchina (Cestona).

En Cataluña destacaron dos zonas cementeras en esa época, San Celoní (Barcelona) y San Juan de las Abadesas (Gerona). En la actualidad, queda poco de ese pasado tan próspero, solo algunas fábricas que han sido restauradas. San Celoní se localiza muy cerca de la provincia de Gerona y en la zona de cierre de la Depresión del Vallés-Penedés. Los materiales empleados en la fabricación del cemento se encuentran a 5 km al norte de San Celoní, en la zona de Campins. Son materiales oligocenos (Terciario) muy replegados donde se distingue (IGME, 1983, 1976) un tramo arcósico inferior, en cuya parte superior aparecen intercalaciones de lignitos y un tramo medio lacustre de donde se extraían unas margas bituminosas gris-verdosas empleadas en la fabricación de su cemento natural más característico, el cemento natural lento (“buenos cementos”) y margas blancas para fabricar cementos naturales rápidos (“cementos normales”) (Galea & Galea, 1997).

San Juan de las Abadesas (Gerona) se encuentra en una zona geológica rica en margas. Estos materiales pertenecen al gran sinclinal de Ripoll, cuyo núcleo está compuesto por materiales terciarios (Eoceno) de origen marino (ITGE, 1994). Los carbones (hulla) empleados en la fabricación del cemento eran extraídos de la zona de Ogassa (al norte de San Juan). Son carbones de buena calidad (7000 Kcal/kg y sólo 8% de cenizas), y están intercalados con materiales estefanienses (Carbonífero Superior).

ORIGEN Y PRODUCCIÓN ARTESANAL DEL CEMENTO NATURAL EN ESPAÑA (1935-1958)

Los orígenes y las épocas de inicio de la fabricación de los cementos naturales en España no son coincidentes, varían según las necesidades existentes en cada lugar y en cada momento. Así pues, en Guipúzcoa, la producción se inició en 1835-36, durante la primera guerra carlista.

Fueron los soldados ingleses, los que emplearon los grandes recursos existentes en la comarca (abundantes canteras de margas y minas de lignitos) para fabricar un aglomerante, que se utilizó en las defensas de San Sebastián.

Posteriormente, técnicos también ingleses instruyeron a las gentes del lugar en las ventajas y los beneficios del nuevo producto. Les mostraron que las materias primas, muy abundantes en la zona, eran idóneas para la fabricación del cemento natural, el cual tampoco era muy laborioso de fabricar y no necesitaba de grandes infraestructuras ni inversiones iniciales elevadas (Varas et al, 2007; Ibáñez et al, 2001, 1990; Urdangarín & Izaga, 2000).

Por el contrario, en Cataluña no está muy claro cómo ni cuándo surgió el cemento, sólo se sabe (com. pers. D. I. Tremps Sala), que en la comarca de San Juan de las Abadesas fueron los religiosos españoles venidos desde Italia poco antes de mediados del siglo XIX, los que trajeron la técnica de fabricación de estos aglomerantes (Varas et al, 2007).

En esta primera etapa, la fabricación de los cementos naturales s.s. se realizó de forma artesanal, utilizando pequeños hornos verticales discontinuos, del tipo calero, construidos en las propias canteras de margas (figura 2).

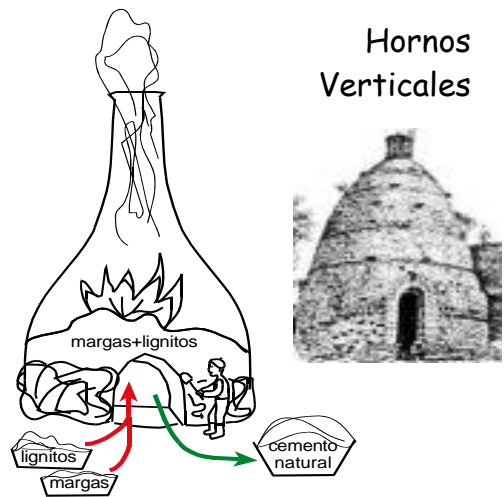
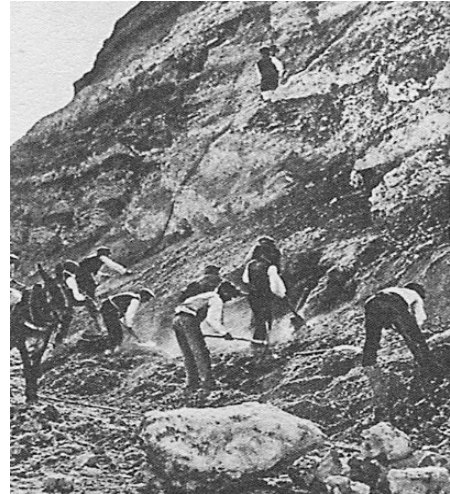


Figura 2: La producción artesanal se centra en las canteras donde se localizan los hornos verticales discontinuos u hornos caleros (Varas et al, 2007; Lafarge-Asland, 2001).

Estos hornos se cargaban por su parte superior; primero se echaba el carbón (lignito o hulla) y luego, las margas. Este carbón era prendido por la parte inferior del horno, dejándose encendido un número determinado de horas hasta que se estimaba que las margas estaban suficientemente cocidas. En ese momento se cerraba la alimentación de aire y se dejaba apagar (Ibáñez et al, 2001).

Una vez enfriado, se extraía todo el producto por la boca inferior del horno. Las temperaturas de calcinación rondaban los 900-1000°C. Todo este proceso se realizaba de forma manual y estimativa, sin medios técnicos ni materiales que pudieran regular los parámetros que intervenían en la obtención del producto calcinado. En carros de tracción animal, se transportaba el producto cocido hasta antiguos molinos localizados en las riberas de ríos de arroyada.

En estos molinos el producto calcinado era triturado por grandes ruedas o muelas de piedra dispuestas en vertical y accionadas por las aguas del arroyo. Este tipo de energía hidráulica era discontinua y poco regular. Finalmente, el cemento así obtenido era trasladado a las poblaciones respectivas donde se tamizaba a mano, se envasaba, se almacenaba y se vendía (Urdangarín & Izaga, 2000; Ibáñez et al, 1990).

En este primer período de fabricación del cemento natural, la composición de las margas (calcita + arcilla) empleadas se consideraba ideal para tal finalidad. No existía un conocimiento exacto de su composición química ni mineralógica, por lo que no había manipulación de sus componentes (Varas et al, 2007).

En esta época, según extraían las margas de las canteras eran introducidas para su calcinación en los hornos. Tan sólo, atendiendo al color de las margas y a las características finales (fraguado y resistencia) de los cementos producidos, se distinguían bien los cementos naturales rápidos de Zumaya y los cementos naturales lentos de San Celoní (Varas et al, 2007).

PRODUCCIÓN INDUSTRIAL DEL CEMENTO NATURAL EN ESPAÑA (1858-1898)

El aumento progresivo de la demanda de este aglomerante en los años siguientes produjo el desarrollo y afianzamiento del sector cementero en las distintas regiones españolas, y provocó cambios para mejorar su producción (Varas et al, 2007). Este auge se debió al inicio de importantes obras portuarias e hidráulicas por toda España (puertos, canales, etc).

Empezaron a construirse fábricas en las proximidades de las ciudades (Zumaya, Arrona, Cestona, San Celoní, San Juan de las Abadesas, etc), quedando en desuso los hornos discontinuos que había en las propias canteras.

La primera fábrica de cemento natural conocida se edificó en Arrona (Bajo Urola, Guipúzcoa) en 1858 y se llamaba “Nuestra Señora de Los Dolores” (1858-1930).

Estas nuevas fábricas eran edificios que englobaban series de: hornos, molinos y silos para almacenar el producto (figura 3). Los nuevos hornos (figura 4) eran estructuras verticales de 4 a 8 metros de altura y morfología ovoidal, llamados “hornos de cuba”.



Figura 3: Las nuevas cementeras presentaban hornos, molinos y silos juntos (Ibáñez et al, 2001).

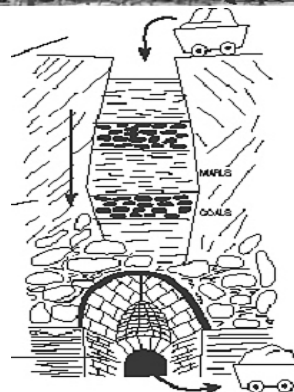
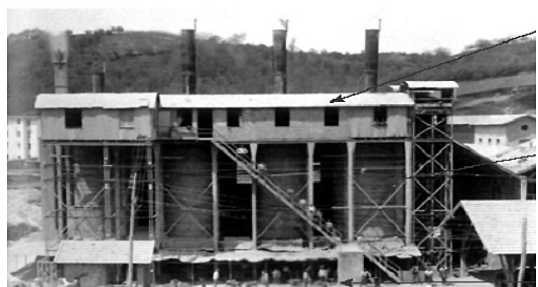


Figura 4: Disposición en batería de los hornos verticales continuos (Varas et al, 2007; Ibáñez et al, 2001).

Eran hornos de producción continua construidos en mampostería y revestidos internamente con ladrillos macizos. En su parte alta seguían teniendo una boca por la que se realizaba la descarga alternativa de carbones y margas.

La capa de carbón era de menor espesor que la capa de margas. Las margas sufrían un proceso de trituración en los molinos antes de la cocción. La capa de carbón que se descargaba contenía brasas o leña ardiendo para que este carbón prendiera y se fuera consumiendo muy lentamente, sin apenas producir llama. Mientras esto ocurría en la capa de carbón, la capa de margas que tenía por encima, perdía su humedad por efecto del calor emitido por la capa de carbón inferior.

Este primer proceso se daba en la zona alta del horno o “zona de deshidratación” (primeros 2-3m). En la zona intermedia o “zona de cocción” (1-2m) el material margoso se cocía junto al carbón, y se producía la mezcla de ambos materiales. En esta zona se podía regular la entrada de aire para controlar el tiempo y la temperatura de cocción. Las cenizas del carbón suponían un aditivo que favorecía las propiedades finales del producto. Este aditivo era sílice y alúmina, que evitaban la degradación del cemento natural una vez puesto en obra, porque la sílice y la alúmina eran activas y reaccionaban con la cal favoreciendo el fraguado (Aspiazu, 1924).

Cuanta menos ceniza quedara mezclada y ésta no contuviera elementos perjudiciales, mejor era el producto final que se obtenía (Aspiazu, 1924). Durante el descenso hacia la parte inferior del horno y después de completar la calcinación, el producto se iba enfriando paulatinamente hasta llegar a la boca inferior por donde se extraía.

Esta zona del horno era más estrecha que la superior y se llamaba “zona de refrigerado” (Urdangarín & Izaga, 2000; Abril, 1998; Galea y Galea, 1997). De esta forma los hornos siempre estaban llenos y encendidos.

El material calcinado era llevado a los molinos existentes en la propia fábrica. Entre 1858 y aproximadamente 1880, los molinos eran verticales formados por grandes ruedas o muelas que pisaban, trituraban y molían el producto calcinado hasta convertirlo en polvo fino (cemento natural). Este polvo era luego tamizado, envasado y almacenado en la propia fábrica.



Figura 5: Las vagonetas de tiro animal mejoró el transporte de las materias primas (Varas et al, 2007; Ibáñez et al, 2001).



Figura 6: El cable aéreo fue de gran ayuda en aquellas zonas de más difícil acceso (Varas et al, 2007; Ibáñez et al, 2001).

A finales de siglo (1880-1900), el proceso de fabricación de los cementos naturales mejoró en muchos aspectos, aunque los hornos verticales y continuos se siguieron utilizando hasta 1950. Los avances tecnológicos introducidos facilitaron y aumentaron la producción de cemento natural (Varas et al, 2007):

- Mejoró el transporte de las materias primas (margas y carbones) a las fábricas de cemento que se encontraban cerca de las poblaciones y apartadas de sus zonas de extracción. Se sustituyeron los animales de carga y los carros por vagonetas de tracción animal (figura 5), y a partir de 1880 entró en funcionamiento el cable aéreo (figura 6). A finales del siglo XIX el ferrocarril fue el medio de transporte más importante (Ibáñez et al, 2001).
- A partir de 1880, los molinos verticales se cambiaron por los molinos horizontales de bolas de tipo Morel y Smith (Ibáñez et al, 1990).
- La fuerza hidráulica con que se movían los molinos fue sustituyéndose progresivamente por la fuerza de vapor, pues se necesitaba un suministro energético más regular y continuo. A principios del siglo XX (1902), los motores eléctricos reemplazaron definitivamente a ambos tipos de fuerzas (Ibáñez et al, 2001; Abril, 1998; Galea y Galea, 1997).

Los avances tecnológicos introducidos en la fabricación del cemento natural (1880) fueron precedidos anteriormente (1858-1880) por cambios en las técnicas de fabricación de los mismos. Aparece por primera vez la figura del químico que analiza los diversos tipos de margas para ver su viabilidad y tipo de cemento natural (rápido o lento) que puede fabricarse.

Realiza pruebas físicas, hídricas y mecánicas (compresión y tracción) para conocer sus propiedades hidráulicas, de resistencia y dureza naturales, y pruebas químicas (calimetrías) para determinar su contenido en cal. Se empieza a producir una manipulación de las margas, llevándose a cabo mezclas que mejoraban el producto final. Es a partir de este momento cuando se define claramente la producción del cemento natural rápido y del cemento natural lento, que aunque se conocían anteriormente (1836-1858), su producción era natural, dependiendo únicamente del tipo de marga empleada (Varas et al, 2007).

DECADENCIA DE LOS CEMENTOS NATURALES EN ESPAÑA (1898-1936)

La fama de los cementos naturales a partir de 1858 provocó que su demanda aumentara de tal manera que para poder abastecer este mercado, las fábricas, en un principio negocios familiares independientes, se vieron obligadas a agruparse en sociedades comerciales.

Hasta 1926, las ventas de las cementeras siguieron una trayectoria creciente, pero a partir de esas fechas el negocio fue a peor hasta que en 1936 cerraron muchas de las fábricas de cemento natural.

El inicio de la fabricación en España del cemento artificial Pórtland (1898) fue ganando terreno al cemento natural, pero fue el inicio de la Guerra Civil Española (1936), lo que alteró completamente su desarrollo industrial, siendo complicada su recuperación posterior.

El fuerte empuje que experimentaba el cemento artificial Pórtland llegado desde Europa (Inglaterra y Francia), donde hacía ya más 55 años que se estaba utilizando de forma masiva, favoreció el inicio de su producción en España. Sus propiedades de rigidez y dureza superaban ampliamente a las de los cementos naturales por lo que convertían a este nuevo cemento en un material de construcción ideal.

Su fabricación, tecnológicamente más compleja que la fabricación de los cementos naturales, necesitaba una fuerte reconversión del sector hasta entonces existente, y que en muchos casos, no se podía afrontar.

Durante un tiempo (1898-1910), algunas fábricas produjeron este nuevo cemento con los medios con los que contaban hasta entonces para fabricar los cementos naturales (hornos verticales continuos y molinos horizontales). La producción del cemento Pórtland se inició entre 1898 y 1901 en diversas regiones del norte y noroeste de España (1898 Asturias, 1900 Zaragoza y 1901 Guipúzcoa y Barcelona).

La diferencia que existía con la fabricación del cemento natural era que en la fase previa a la calcinación se hacía necesario realizar una cuidadosa selección de las materias primas (margas, calizas y arcillas), dosificándolas y mezclándolas correctamente, y antes de introducirlas en los hornos había que molerlas. Además de cuidar las proporciones de las materias primas empleadas, también se tuvo que subir la temperatura de cocción por encima de la sinterización (>1300°C) (Ibáñez et al, 2001). El resultado fue un cemento artificial Pórtland considerado de 3ª categoría (Varas et al, 2007). Este cemento artificial convivió con los cementos naturales en el momento de mayor auge de estos últimos.

El verdadero cemento artificial Pórtland surgió con la reconversión tecnológica de los hornos utilizados en la calcinación, se pasó de los hornos verticales a los hornos horizontales rotatorios, cuya tecnología permitía controlar los numerosos parámetros (temperatura, grado de cocción, enfriamiento, etc), que intervenían en la calcinación de las materias primas y de los que dependía la calidad final del producto calcinado.

Del mismo modo, se produjeron cambios en la forma de preparar las mezclas de las materias primas antes de la calcinación y después de la dosificación. Hasta ese momento con los hornos verticales se había utilizado la vía seca, que consistía en el secado de materias primas duras antes o durante su pulverización. Con los hornos horizontales se utiliza la vía húmeda, que permite obtener mezclas muy homogéneas y cementos de características constantes y alta calidad.

Los primeros hornos horizontales rotatorios fueron introducidos en España (Barcelona) desde Francia, en 1910 (Lafarge-Asland, 2001). En estos nuevos hornos el proceso se acortaba bastante (<8 horas) con respecto a los hornos verticales, donde la cocción podía durar entre 8 y 20 horas, según el tipo de cemento natural a obtener.

Los hornos horizontales giraban sobre su propio eje y tenía una ligera inclinación, lo que permitía el desplazamiento del producto hacia las partes bajas, pudiéndose recargar constantemente por la parte alta. Este desplazamiento pendiente abajo hacía pasar al producto por cuatro zonas del horno: desecación, calcinación, vitrificación (formación del clínker) y enfriamiento (Ibáñez et al, 2001).

Poco a poco, el cemento artificial nacional fue ganándole terreno en el campo comercial, a los cementos naturales, hasta su desaparición en 1936. Después de la guerra (1939) fueron los cementos artificiales los que resurgieron para reconstruir un país completamente devastado.

ARQUITECTURA DE LOS CEMENTOS EN ESPAÑA

Como en el caso de los cementos naturales, los cementos artificiales fueron muy demandados en el sector de las obras públicas: redes de alcantarillado y abastecimiento de agua, canales, puertos, túneles, etc.

En el sector de la edificación, el uso de cualquiera de los cementos se relegó en un principio a la cimentación de los edificios y como mortero de fábrica, pero nunca como mortero de revestimiento al ser considerado un material poco estético y vulgar (Barahona, 2000).

Para los revestimientos se seguía utilizando el mortero tradicional de cal. Los primeros edificios construidos completamente en cemento (hormigón), surgen en España a partir de 1898. Gaudí en Barcelona y Arbós en Madrid fueron dos arquitectos arduos defensores de estos nuevos aglomerantes.

En Madrid, el panteón de Hombres Ilustres (1892-1899) y la iglesia de San Manuel y San Benito (1903-1910), marcan una clara excepción en la historia del empleo del cemento, y más aún del cemento natural, en la construcción de edificios.

Fernando Arbós no solo revolucionó las técnicas constructivas de la época sino que también empezó a utilizar materiales diferentes a los materiales tradicionales usados hasta ese momento en Madrid (granitos, calizas, cales, etc) (Álvarez de Buergo et al, 2004; Varas et al, 2003). Uno de estos materiales fue el grupo de los cementos (Varas et al, 2005).

El panteón de Hombres Ilustres es un edificio neobizantino construido entre 1892 y 1899 por el arquitecto F. Arbós, en Madrid (figura 7). Aparecen documentados varios tipos de cementos, pero ninguno de ellos se encuentra a la vista.

Los cementos naturales lentos se presentan en la cimentación del edificio formando parte de los hormigones, también están como morteros de junta y como morteros de unión del aplacado exterior del edificio. El cemento natural rápido aparece en los morteros de revestimiento. El empleo de un cemento artificial Portland importado de Marsella (Portland Lafarge), se utilizó en la pavimentación.

La iglesia de San Manuel y San Benito, también fue construida por F. Arbós en estilo neobizantino, entre 1903 y 1910 en Madrid (figura 7). Los cementos detectados en este edificio también aparecen ocultos y son sobre todo los cementos naturales lentos (morteros de junta y de unión del aplacado exterior) y los cementos artificiales (mortero de junta).



Figura 7: Panteón de Hombres Ilustres (superior) e iglesia de San Manuel y San Benito (inferior).

Como ya se ha indicado anteriormente, la aparición en el siglo XIX de los cementos, desbancó a los aglomerantes tradicionales (cal y yeso). Los cementos naturales fueron los primeros en aparecer y se convirtieron en los precursores de los conocidos cementos artificiales Portland (Varas et al, 2005). La diferencia entre ambos tipos de cementos radica en su proceso de producción; materias primas y temperaturas de cocción. Su producción influye en sus propiedades finales.

En los hornos verticales, empleados en la producción de los cementos naturales, los procesos que transforman las materias primas en cemento son deshidratación, cocción y enfriamiento.

En los hornos horizontales, utilizados en la elaboración de los cementos artificiales, los procesos son más complejos: deshidratación, cocción, vitrificación y enfriamiento. Según se van sucediendo estos procesos, la química de las materias primas empleadas va evolucionando hasta conseguir la química que define a cada tipo de cemento.

Las margas, calizas y arcillas utilizadas como materias primas son deshidratadas a temperaturas de entre 100 y 400°C.

El proceso de cocción implica, primero, la descomposición de los silicatos (arcillas y margas) en SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 , a temperaturas de entre 400 y 800°C; segundo, la descomposición de los carbonatos (margas y calizas) en CaO y CO_2 , a temperaturas de entre 800 y 1000°C y, tercero, la combinación de los óxidos anteriores a temperaturas de entre 900 y 1200°C para dar origen a los compuestos (silicatos-S cálcicos-C y aluminatos-A cálcicos-C) que definen los cementos naturales: CS , C_2S (silicato bicálcico; belita), C_3S_2 , CA , $\text{C}_2\text{A}_2\text{S}$ (silicato de Ca y Al; gehlenita), etc.

El proceso de vitrificación implica la clinkerización de los compuestos anteriores, es decir, la formación del C_3S (silicato tricálcico: alita) que define a los cementos artificiales y que se consigue a temperaturas superiores a 1300°C. Por último, el proceso de enfriamiento es muy importante, pues para conseguir la estabilidad del C_3S , se necesita que este enfriamiento sea rápido y solo se logra en los hornos horizontales donde existe un control técnico de los procesos (Bustillo et al, 2001; Callebaut et al, 2001; Pérez, 1996).

Mientras que la presencia de la alita (C_3S) es distintivo de los cementos artificiales, la gehlenita ($\text{C}_2\text{A}_2\text{S}$) y la belita (C_2S) son definitorios de los cementos naturales (Varas et al, 2005; Callebaut et al, 2001).

Esta mineralogía reacciona con el agua produciendo su apagado (hidratación) y fraguado. Son reacciones exotérmicas que liberan calor y aumentan el pH por encima de 10. Aparecen nuevos minerales hidratados: tobermorita (silicato cálcico hidratado, $\text{C}_x\text{S}_y\text{H}$) y portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). El endurecimiento del mortero implica la deshidratación y la formación de CS , CA , C_2S , C_3S , etc. La carbotación y la sulfatación son dos procesos negativos en la eficacia de un mortero u hormigón hidráulico.

En la actualidad, el estudio para la identificación y la caracterización química y mineralógica de los cementos artificiales y naturales en morteros antiguos es muy limitado. Con el tiempo, se han producido variaciones en la composición de las materias primas y en los procesos de producción de estos cementos, que los diferencian de los cementos recientes (Varas et al, 2005). Es importante tener este conocimiento para saber cómo restaurar estos morteros de cemento en la actualidad (Callebaut et al, 2001; Franzini et al, 2000; Moropoulou & Bakolas, 2000). Esto se debe a que la restauración con cementos actuales de obras en las que se utilizaron tanto cementos naturales como artificiales de distintas épocas, puede provocar problemas de incompatibilidad entre los materiales. Estas incompatibilidades están ligadas a su dureza, rigidez e impermeabilidad. Así pues, se quiere plantear la problemática de que el estudio de los morteros de cemento (naturales y artificiales) con más de cien años es necesario, a la hora de planificar una restauración.

CONCLUSIONES

- La piedra artificial se trabajó antes que la piedra natural, por cuestiones económicas (bajo coste económico), técnicas (falta de herramientas adecuadas) y/o geológicas (ausencia de piedra natural en la zona de asentamiento).
- Los morteros y hormigones son las piedras artificiales más representativas. El primer mortero fue un mortero de barro aparecido hace 10000 años en Turquía y el primer hormigón apareció en la zona de Macedonia (4500 a.C.) y también era de barro.
- Los morteros y hormigones están formados por un aglomerante (barro/tierras, cales, yesos, cales hidráulicas o cementos naturales y artificial), un árido (tamaño arena para los morteros y arena y grava para los hormigones) y agua.
- Los aglomerantes más comunes son las cales aéreas (<5% en arcillas), cales hidráulicas (5-20% en arcillas) y cementos (20-40% en arcillas). Los aglomerantes se dividen en comunes (cal aérea) e hidráulicos (cal hidráulica y cementos).
- El uso de morteros y hormigones hidráulicos (cales hidráulicas y cementos) se puede agrupar en dos períodos: antiguo (Mesopotamia 6000 a.C.- Roma 200 a.C.) y moderno (Reino Unido 1756-actualidad).
- El período antiguo se caracteriza por utilizar aglomerantes hidráulicos elaborados sin tratamientos térmicos. Por el contrario, el período moderno utiliza aglomerantes hidráulicos elaborados con tratamientos térmicos.
- El cemento entró en España en 1835-36, con 50 años de retraso respecto a Europa. Su fabricación, primero fue artesanal para pasar luego a una fabricación industrial cuando su demanda aumentó como consecuencia del inicio de la industrialización del país. Se pasó de una fabricación fragmentada en diversas ubicaciones, con la intención de reutilizar los hornos caleros en las canteras, los molinos de las riveras, los almacenes de los pueblos, etc, a una fabricación centralizada donde unos edificios cercanos entre sí reunían los hornos, los molinos y los silos.
- En la España del siglo XIX se fabricó y utilizó el cemento natural, mientras que en el siglo XX, fue sustituido por el cemento artificial Portland. El cemento se empleó en un primer momento en obras públicas y civiles, retrasándose su uso en la edificación por ser un material de poco estético. Su empleo en la edificación fue al principio muy limitado, localizándose en zonas no visibles (cimientos, juntas, base de otros recubrimientos, etc).

- La combinación del estudio histórico y el análisis científico ha permitido discriminar y valorar la evolución durante los dos últimos siglos (XIX-XX) de los diversos tipos de cemento (natural y artificial) empleados en construcción.
- Hay distinciones mineralógicas entre los distintos aglomerantes hidráulicos. Los silicatos cálcicos es la fase mineral más característica de los cementos, y se encuentra ausente en la cal. Dentro de los cementos, los cementos artificiales o Pórtland se diferencian de los cementos naturales por la presencia en los primeros de altas cantidades de silicato tricálcico o alita, por el contrario, en los cementos naturales domina la presencia del silicato bicálcico o belita.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la ayuda y facilidades prestadas por Patrimonio Nacional para la realización de este trabajo. Del mismo modo, agradecemos la colaboración desinteresada de las numerosas personas, tanto particulares como de ayuntamientos y bibliotecas, para la elaboración del perfil histórico del cemento en España.

REFERENCIAS

Abril, J.M. (1998): *Teixidores i tapers. Industrialització a Sant Celoni 1860-1936*. Barcelona, Ajuntament de San Celoní, 47-68.

Álvarez de Burgo, M., Fort, R., Varas, M.J. & Gómez-Heras, M. (2004): *Panteón de Hombres Ilustres, Madrid, Spain: Building Materials, Degradation and Conservation*. En: 6th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin. Influence of the Environment and Defense of the Territory on Recovery of Cultural Heritage. Lisbon.

Aspiazu, L. (1924): *Cementos Uriarte Zubimendi, S.A. Inalterables por las aguas del mar y por las seleniosas*. Zumaya, Guipúzcoa, España. 31 p.

Balbas, A., Delgado, S., Pavia, S. & Ruenco, J.L. (2001): *Caracterización de morteros*. En: Rocas, Morteros y Ladrillos. Caracterización y restauración. Fundación Uncastillo-Dpto. Geología, Eds. I Jornadas de caracterización de los materiales pétreos en arquitectura, escultura y restauración, Univ. Zaragoza, 151-185.

Barahona, C. (2000): *Técnicas para revestir fachadas*. Madrid: Arquitectura y Tecnología I. Minilla-Lería, Ed. 196 p.

Bustillo, M., Calvo, J.P. & Fueyo, L. (2001): *Conglomerantes: Cemento*. En: Rocas Industriales. Tipología, aplicaciones en la construcción y empresas del sector. Madrid: Rocas y Minerales. 189-228.

Callebaut, K., Elsen, J., Van Balen, K. & Viaene, W. (2001): *Nineteenth century hydraulic restoration mortars in the Saint Michael's Church (Leuven, Belgium). Natural hydraulic or cement?.* Cement and Concrete Research, 3: 397-403.

Franzini, M., Leoni, L. & Lezzerini, M. (2000): *A procedure for determining the chemical composition of binder and aggregate in ancient mortars: its application to mortars from some medieval buildings in Pisa*. Journal of Cultural Heritage, 1: 365-373.

Galán, E., Leguey, S. & Carretero, M.I. (2002): *The mortars of the Torre del Oro (Seville, Spain)*. En: Protection and Conservation of the Cultural Heritage of the Mediterranean Cities. E. Galán, F. Zezza (eds.). Swets & Zeitlinger, Lisse, 165-172.

Galea, N. & Galea, E. (1997): *Retalls Històrics de Campins*. Barcelona: La Rectoria Vella, 25-33.

I.G.M.E. (1975): Hoja nº63 (Eibar) del Mapa Geológico de España, escala 1:50.000. Madrid.

I.G.M.E. (1976): Hoja nº364 (La Garriga) del Mapa Geológico de España, escala 1:50.000. Madrid.

I.G.M.E. (1983): Hoja nº365 (Blanes) del Mapa Geológico de España, escala 1:50.000. Madrid.

I.T.G.E. (1994): Hoja nº256 (Ripoll) del Mapa Geológico de España, escala 1:50.000. Madrid.

Ibáñez, M., Torrecilla, M.J. & Zabala, M. (1990): *El cemento*. En: Arqueología Industrial en Guipúzcoa. Guipúzcoa: Universidad de Deusto. Consejería de Cultura y Turismo del Gobierno Vasco, 205-219.

Ibáñez, M., Zabala, M. & Torrecilla, M.J. (2001): *Cementos Rezola*. 150 años de historia. Guipúzcoa: Cementos Rezola-Italcementi Group. 2ª edition. 219 p.

Klenner, J., Meintrup, E. & Rother, W. (1980): *Brennen von hydraulischem Kalk im Schwebegas-Calculator*. Zem.-Kalk-Gips, 33(10): 498-504.

Krumnacher, P.J. (2001): *Lime and Cement Technology: Transition from Traditional to Standardized Treatment Methods*. Master's Thesis. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. Digital Library and Archives ETD etd-02182001-031406. 90 p.

Lafarge-Asland, Ed. (2001): *Asland, una historia del siglo XX*. Barcelona, Lafarge-Asland S.A. 103 p.

Lea, F.M. (1976): *The Chemistry of Cement and Concrete*. Edward Arnold, Ed. London.

- Moropoulou, A., Bakolas, A. & Bisbikou, K. (2000): *Investigation of technology of historic mortars*. Journal of Cultural Heritage, 1: 45-58.
- Mortimore, J.L., Marshall, L.J.R. Almond, M.J. Hollins, P. & Matthews, W. (2004): *Analysis of red and yellow ochre samples from Clearwell Caves and Çatalhöyük by vibrational spectroscopy and other techniques*. Spectrochimica Acta Part A, 60: 1179-1188.
- Pérez, R. (1996): *Panorama técnico cementero*. Memoria del curso de doctorado (inédito). 43 p.
- Urdangarín, C. & Izaga, J.M. (2000): *Arroa y el cemento: 150 años de historia*. En: Arroa-Behea. Historia de un barrio joven. Guipúzcoa: Ezkaizto Arroa-Beheko Auzo Elkartea, 95-131.
- Varas, M.J., Alvarez de Buergo, M. & Fort, R. (2005). *Natural cement as precursor of Portland artificial cement: methodology for its identification*. Cement and Concrete Research, 35(11): 2055-2065.
- Varas, M.J., Alvarez de Buergo, M. & Fort, R. (2007): *The origin and development of natural cements: the Spanish experience*. Construction and Building Materials, 21(2): 436-445.
- Varas, M.J., Gómez-Heras, M. & Fort, R. (2003): *Abastecimiento de Piedra en Monumentos de Madrid del siglo XIX: La Cripta de la Catedral de Santa María de la Almudena y el Claustro-Panteón de Hombres Ilustres*. Restauración y Rehabilitación, 79: 46-51.

