

10 CONTRIBUCION AL ESTUDIO DEL HORMIGON

N C. Rockwood

De "ROCK PRODUCTS" 69, mayo 1949

En la práctica, el hormigón no es más que un intento para conseguir la piedra artificial. Tanto es así que, en sus primeros tiempos dicho material era descrito como tal. No obstante, los geólogos describen al hormigón como un tipo de roca del género de las bioclasas. Esta denominación queda perfectamente justificada si se piensa que han intervenido organismos vivos (el hombre) en la cementación y aglomeración de fragmentos de rocas preexistentes (los agregados). Al igual que la Naturaleza, a través de los siglos, ha provocado la unión de fragmentos minerales con "cementos" especiales para formar rocas de duración ilimitada, el hombre trata de reproducir aquellas condiciones para lograr parejos resultados.

En el trabajo de F. W. Clarke, "The Data of Geochemistry" (Boletín nº 470, del U. S. Geological Survey) pueden verse interesantes datos a este respecto. Los estudios realizados por la Institución Carnegie de Estados Unidos, sobre la formación y constitución de las rocas ígneas constituyen también una de las mejores contribuciones al conocimiento de los hormigones y del cemento.

Es evidente que las investigaciones de físico-químicos y geoquímicos han dado mucha luz sobre el origen de diversos tipos de rocas y han ayudado considerablemente a la preparación de minerales sintéticos uno de los cuales es el cemento Portland. Desgraciadamente, los técnicos e investigadores del hormigón parecen haber olvidado en cierto modo estos estudios como fuente de ideas para el exacto conocimiento del hormigón. Sin embargo, en los momentos presentes, se ha vuelto a pensar seriamente en el papel de los petrógrafos, geólogos, químicos y físicos aunque, por ahora, los resultados no hayan sido de demasiado halagüeños. No hay más que leer algunos capítulos de la mencionada obra de Clarke para comprender que no existe ningún mineral, roca o suelo que sea inerte. Todos ellos están sujetos a una serie de condiciones y agentes de desintegración que los modifican a lo largo de su vida.

Todos los materiales que entran en la composición del hormigón son productos naturales derivados de rocas ígneas. Estas, formadas por consolidación del magma, han estado sometidas durante siglos a la acción de los agentes atmosféricos y de los organismos vivos. Todos ellos las han desintegrado volviendo a cementar los fragmentos, de las formas más variadas. Así, de las arenas (cuarzo) se han formado las areniscas; de las arcillas, los esquistos; de las rocas calcáreas, las calizas y dolomitas. El material de cementación para las partículas puede ser originado por arrastres acuosos de diversos productos

químicos que, al depositarse sobre cada fragmento, lo han unido con los adyacentes. En otros casos, tal como ocurre con algunas areniscas, el cemento que la Naturaleza ha empleado para unir los granos de cuarzo ha sido la misma sílice en estado coloidal. Finísimas películas de ésta, al coagularse sobre las arenas han provocado su unión.

De los hechos anteriores se deduce que las mezclas para hormigones pueden mejorarse teniendo a la vista estas experiencias. Lógicamente, no puede prolongarse el tiempo de mezcla en la hormigonera mas allá de un cierto límite, para que por abrasión de unas partículas contra otras (como ha ocurrido en la Naturaleza), se dé lugar a la formación de estos cementos coloidales que han producido las rocas más resistentes y duraderas. Pero, al menos en lo que respecta a la sílice coloidal, es evidente que algo puede hacerse para corregir la falta de este material en los hormigones, causa principal de su poca duración.

Cualquier sustancia que las aguas puedan depositar en forma relativamente insoluble sobre un material, puede servir como cemento. Entre estas están: la sílice, carbonato y sulfato de calcio, hidróxidos de hierro y aluminio, fosfatos, fluoruros y arcillas. De todos estos aglomerantes, el peor es la arcilla por la facilidad con que se desintegra e hincha por la acción del agua. Los cementos a base de carbonatos de calcio y

magnesio pueden servir para aglomerar las partículas de caliza. El CO_3Ca coloidal o la caliza disuelta parecen tener la propiedad de unir los cristales preexistentes de carbonato cálcico, igual que hace la sílice coloidal con los granos de arena cuarzosa. Claro está que estos cementos carbonatados son peores que la sílice a causa de su solubilidad relativamente grande. El pedernal o sílex se supone formado por "colada" de aguas muy silíceas en el interior de huecos existentes en las calizas. Los componentes del sílex, por su naturaleza coloidal, pueden tener influencia sobre la hidratación de los componentes del cemento.

El cuarzo es la forma más corriente y estable de sílice. El hecho de que la mayor parte de los componentes de las rocas se hayan desintegrado, disuelto o convertido en arcilla, excepto la sílice, es una prueba de su durabilidad. Todas las aguas que fluyen por la corteza terrestre llevan algo de sílice coloidal disuelta en forma de sílice opalina o hidratada. Cuando estas disoluciones pierden agua se deposita la SiO_2 , primeramente como gel. Si continua el proceso de desecación por evaporación, se forman masas duras, solidas, como por ejemplo los ópalos y ágatas. La calcedonia, el pedernal y el sílex son otras tantas formas de sílice amorfa, si bien los geólogos difieren en cuanto a su definición. Todos ellos tienen una estructura fibrosa o criptocristalina y parecen formados por granos de cuarzo cementados por sílice opalina.

La sílice es el componente más importante de cementos y hormigones. Corrientemente se supone que el pedernal, como tal sílice, tiene un coeficiente de expansión térmica relativamente alto. Los trabajos realizados por Sosman no confirman esta teoría y por tanto hay que suponer que las dilataciones de algunos pavimentos construídos con hormigón de guijarros, en épocas calurosas, no se deben a dilataciones de éstos, sino de los materiales que los circundan.

El carbonato de cal y la sílice pueden combinarse para dar un material cementicio. Lo mismo puede ocurrir con las arcillas impregnadas con sílice coloidal o CO_3Ca . Una cosa es evidente: En ninguna de las rocas encontradas en la Naturaleza existen cementos tales como la cal hidratada o los silicatos hidratados de calcio contenidos en el hormigón endurecido.

A continuación hace el autor un resumen somero sobre los cementos romanos y otros aglomerantes de tipo puzolánico, insistiendo sobre algunas particularidades referentes a las recetas de la época vitrubiana, y a la conservación de las obras de aquellos tiempos a través de los siglos, cuestiones todas ellas ampliamente tratadas en trabajos anteriores.

En lo que se refiere a las diferencias entre cales hidráulicas, cementos naturales y portlands de los primeros tiempos, hay que hacer destacar que, desde el punto de vista químico, existe poca distinción entre ellos. Tanto las cales hi-

dráulicas como los cementos contienen cal en la proporción de 3 a 2 con respecto a la sílice y alumina. En todos los casos, la temperatura de cocción de estos aglomerantes no es suficiente para combinar toda^{la} cal con los componentes ácidos, por lo que se encuentra siempre una proporción grande o pequeña de CaO libre. Aparentemente, casi todas las cales hidráulicas, cementos naturales y portlands antiguos contienen porcentajes considerables de óxidos, cloruros o sulfatos de sodio o potasio. Posiblemente esto también ocurre, aun en las mejores puzolanas.

La cuestión de los álcalis del cemento preocupa extraordinariamente a los técnicos. Parece existir evidencia del efecto beneficioso de estos productos, en contra de la opinión más generalizada. Existe un libro "Los Silicatos solubles en la Industria", de G. Vail, que aborda el problema de la presencia de álcalis o silicatos alcalinos en los aglomerantes. Debemos recordar una piedra artificial inventada por Ransome en 1850 que consistía en un bloque de aglomerados unidos por silicato sódico y sumergido en una solución caliente de cloruro cálcico. Se formaba un cemento de silicato cálcico y el ClNa resultante se marchaba disuelto en el agua. Esta reacción prueba que la adición de cloruro cálcico a un cemento portland puede, en ocasiones, mejorar su calidad. Existen otras razones para pensar que los cementos de elevado contenido alcalino

son buenos. En los tiempos de Gillmore (1870) se utilizaba en Estados Unidos un tipo de cemento conocido como Rosendale que tenía una gran proporción de álcalis y magnesia. A pesar de ello este cemento podía competir en calidad con los cementos importados de Europa y los rompeolas fabricados con hormigones de este material se mantienen hoy, al cabo de más de 80 años en contacto con el agua del mar, en perfecto estado (Isla del Estado, Bahía de Nueva York). La causa de esto parece estribar en que aquellos cementos no estaban tan cocidos como los actuales y por tanto la magnesia no se encontraba "muerta". Muchos ingenieros de aquella época estaban convencidos de que los cementos con magnesia eran mas resistentes al agua marina que los ordinarios.

Los cementos artificiales antiguos se cocían a unos 1.400 ° C, mientras que los actuales se calcinan a 1.670 ° C; los hornos eran más cortos, por lo que la clinkerización se hacía mas breve. Como resultado de todo ello, los cementos contenían mucho menos silicato tricálcico y mas bicálcico que los actuales. Para apagar la cal libre que contenían estos cementos había varios procedimientos, tales como el curado o la pulverización con agua. Según el autor, la cal hidratada libre en estos viejos cementos tenía un efecto beneficioso pues se unía con parte de la arcilla no combinada, de forma algo análoga a las puzolanas, dando lugar a un proceso ulterior de reacción en

morteros y hormigones después del fraguado. Nadie puede decir que esto sea imposible.

Otra diferencia entre los primeros cementos y los actuales es la concerniente al grado de molturación. Es bien sabido^{que} las normas actuales exigen una finura mucho mayor. Pero ... ¿hasta qué punto es beneficioso esto? Los cementos antiguos, no muy cocidos y mal molidos (si se comparan con los de hoy) daban estructuras resistentes y duraderas, aunque las resistencias iniciales no fuesen tan elevadas. Ahí tenemos, por ejemplo, las obras del Canal de Panamá, construido con un cemento rico en magnesia y medianamente cocido, que se mantienen muy bien al cabo del tiempo.

Hacia 1910 es cuando comenzó la demanda de cementos muy cocidos. La necesidad de esta sobrecocción se debe, en parte al menos, a la poca homogeneidad de los crudos y la falta de mezcla perfectamente íntima. Esto se confirma por el cemento Leigh fabricado con un mineral que ya tiene la composición precisa y para el cual la temperatura de cocción ha de ser inferior que la normal. Si se intenta calentar por encima de ella, el cliúker funde francamente y destruye los recubrimientos de los hornos. Para poder cocer más a fondo es preciso añadir al crudo un exceso de cal. Se vio entonces que el cemento producido era más fácil de moler, de más rápido endurecimiento y de resistencias iniciales más elevadas.

El papel de la cal en un cemento hidráulico parece ser el de activar el paso a la forma coloidal de parte de la sílice y alumina. Esto parece más incidental que necesario, puesto que los cementos actuales poseen todas las propiedades de la sílice coloidal. Cuando mayor es la proporción de esta sílice en relación con la cal, mejor es el cemento. Utilizando cal asociada con sílice reactiva, pueden reproducirse en unas horas, semanas o días, los fenómenos de cementación que en la Naturaleza han tardado miles de años. El punto de vista del autor para explicar la bondad de los hormigones fabricados con cementos antiguos estriba en la hipótesis de una proporción mejor entre los componentes ácidos y básicos en el cemento hidratado.

Si los silicatos cálcicos se asemejan a los sódicos, en el cemento hidratado, la naturaleza real de tal cemento, es la de un gel de sílice al que se encuentran unidos iones de calcio, mediante cargas eléctricas. No todos los iones de calcio o sodio (si hay álcalis) estarán unidos a la superficie del gel; como éste es poroso y presenta conductos capilares, algunos de los iones serán absorbidos en el seno del gel y, por tanto, son más difíciles de separar del mismo. El núcleo de gel de sílice está eléctricamente cargado con polaridad negativa; los iones metálicos son positivos. No parece haber combinación química, pues, en la práctica, todo el calcio puede

separarse del cemento endurecido pulverizado haciendo pasar agua a su través. El gel sujetará a unos cuantos iones de calcio más firmemente que a la mayoría, y por ello el silicato monocálcico es el más estable.

Parece claro que el componente más importante del Portland hidratado y endurecido es un gel de sílice de estructura plana. En definitiva, este es el único agente cementicio. Si esto es así, el verdadero objetivo para fabricar un hormigón duradero es rellenar todos los huecos que quedan entre los agregados con un gel de sílice, manteniéndolos llenos mientras dura el proceso de pérdida de agua de dicho gel. Esto podría ser un argumento en favor de los cementos lentos, es decir, de los poco molidos y bajos en cal. En condiciones adecuadas, el gel de sílice puede tomar un aspecto idéntico al del sílex. Después de un largo tiempo, en el interior de una estructura masiva de hormigón, sometido a presión, podría convertirse en cuarzo. El calor ayuda a estas reacciones. Esto puede verse, por ejemplo, en el proceso de fabricación de ladrillos cal-arena; en él se mezclan de 8 - 10 partes de cal con 92 - 90 de arena, se comprime y se trata en autoclave bajo presión. La reacción transcurre en unas pocas horas sin cambios dimensionales.

De las consideraciones anteriores se deduce que, en estructuras de hormigón, parece ilógico eliminar calor de las mismas, bien sea por enfriamiento externo o por el empleo de comen-

tos fríos. Por el contrario, si en un cemento hay puzolanas o sílice activa será más práctico sacar el mayor partido posible al calor desprendido en las reacciones de hidratación.

Se refiere de nuevo al efecto de los álcalis en el cemento Portland indicando que, para comprender mejor este fenómeno hay que tener en cuenta los cambios iónicos que tienen lugar en el suelo de labor, en el cual los iones de metales alcalinos o amonio son reemplazados por calcio mediante intercambio catiónico, así la presencia de un exceso de cal apagada en el Portland hidratado es un factor de inestabilidad, puesto que los componentes del hormigón son los mismos que los del suelo. Esto es otro argumento en favor de la adición de sílice activa para eliminar la actividad de cambio de iones y estabilizar el hormigón.

En la química del suelo también puede encontrarse una explicación plausible al misterio de los agregados reactivos. Cuando a un terreno alcalino, es decir, que contiene una elevada concentración en sodio, se añade cal, ello no ayuda a conseguir la eliminación del álcali. Estos suelos deben tratarse primeramente con una sal ácida para reducir la alcalinidad en sodio. Del mismo modo, una concentración en álcalis sobre la superficie externa de un agregado impide que el hidróxido cálcico funcione normalmente, es decir, que se produzca el intercambio iónico. Es necesario añadir un compuesto que reduzca la alcali-

nidad (sílice activa, por ejemplo) para que los iones de calcio se depositen en o sobre el gel de sílice o silicato, fortificando el hormigón.

Mucho se ha dicho en los últimos tiempos sobre los agregados reactivos o no. Partiendo de la base de que no existe ningún agregado inerte, en vez de investigar sobre áridos que presenten esta característica, es mejor sacar el mayor partido posible de tal reactividad. Podemos aprovechar con ventaja cualquier actividad latente en un material agregado para conseguir buenos hormigones. Se puede concebir, por ejemplo, que un hormigón dosificado enteramente con agregados de sílex, finos y gruesos, - puede dar un material ideal puesto que estaría formado por productos íntimamente relacionados con el gel de cemento y, además, tal hormigón tendría poca expansión térmica. Incluso puede llegar a ser conveniente el empleo de cementos muy alcalinos con tal tipo de agregados silíceos con objeto de aprovechar al máximo la reactividad cemento-agregados.

Un conocimiento mejor de la química de los silicatos alcalinos puede servir para comprender mejor la reacción anterior. Si tomamos un Portland que contenga 1,0 % de óxidos de sodio y potasio, un saco de dicho cemento contendrá casi 0,5 kg. de Na_2O , cantidad nada despreciable. Este óxido (y lo mismo el de K) se hidroliza instantáneamente formándose hidróxido alcalino. Este es corrosivo sobre la sílice (ataca incluso al vidrio) y por tan

to muy eficaz para hacer pasar la sílice a la forma coloidal. En este sentido es mucho más eficaz que el $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Por ello, aún con agregados gruesos que contengan sílice, se logrará su fácil ataque con la consiguiente formación de silicato alcalino.

Una disolución de silicato alcalino absorbe 4,4 veces tanta sílice como contenga de Na_2O . Como el contenido en sílice aumenta en proporción al de hidróxido sódico, el líquido se hará cada vez más viscoso. (Recuérdese la viscosidad de las soluciones de vidrio soluble). En determinada fase del proceso que estamos describiendo, el agregado silícico y el hidróxido alcalino unido a él, llegan a estar envueltos en una película o membrana de silicato alcalino viscoso, la cual sirve de medio semipermeable al conjunto.

Esta membrana sirve para impedir el paso de las sustancias coloidales de la disolución externa al interior de la misma, pero en cambio permite el paso del agua o de un electrolito disuelto (hidróxido sódico, por ejemplo), mediante un proceso de diálisis. La solución de hidróxido tiene gran afinidad por el agua, lo cual significa que una gran cantidad de este líquido se introducirá en la "burbuja" formada por la partícula de agregado, hinchándola como un balón. Como esta no puede expandirse indefinidamente, por estar encuadrada en su alvéolo, se desarrollará una presión de dentro a fuera que puede llegar a resquebrajar la es-

estructura.

La membrana de silicato a que se ha hecho alusión ha podido ser analizada químicamente, comprobándose la presencia en la misma de gran número de elementos minerales (Na, Ca, Fe, Al,) de los que entran en la composición del hormigón, unidos a su parte exterior. La disolución de la partícula, en virtud del proceso de ósmosis mencionado, progresa indefinidamente.

Puesto que los hidróxidos alcalinos son mucho más reactivos que el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para lograr la activación de la sílice, una cierta cantidad de dichos álcalis, convenientemente distribuida en un cemento Portland, el cual también tiene sílice activa bien distribuida, podría llevar a la obtención de un buen material cementicio. La única limitación es la presencia de la membrana mencionada que provoca la diálisis. Si pudiese mantenerse convenientemente diluida la solución de silicato para evitar su viscosidad, no habría que temer a la reacción álcali-agregado. Esto es, probablemente lo que ocurre con los cementos que no contienen más de 0,6 % de álcalis. Pero es obvio que debe haber otros procedimientos químicos o físicos para evitar la concentración de los silicatos alcalinos viscosos; sencillamente, la adición de bastante sílice activa para neutralizar los hidróxidos puede ser un buen método, tal como se anuncia por algunos investigadores que dicen haber conseguido buenos resultados trabajando por enci

ma de un cierto porcentaje de agregados reactivos.

N. del T. - No pueden ni deben tomarse al pie de la letra la mayor parte de los conceptos emitidos por el autor y que discrepan considerablemente del conocimiento clásico de morteros y hormigones. No obstante, sus hipótesis sobre el papel de los geles de sílice en el hormigón, sobre la poca importancia que dá a los silicatos y aluminatos (alita, belita, celita) considerados como entes cristalinos y sus teorías sobre la reacción álcali-agregados, pueden servir para despertar interés sobre determinados estudios ajenos al campo de cementos y hormigones, pero relacionados con éstos.
