

- 40 -

680-5 HORMIGONES VIEJOS Y NUEVOS**(HAVE THE REAL FUNDAMENTALS BEEN DEVELOPED FOR MAKING GOOD CONCRETE?)***Rock Products*, 110, diciembre 1949.**Autor: N. C. Rockwood.**

Existen obras de hormigón con más de cincuenta años de vida que se conservan en perfecto estado. Tales son, algunas presas construídas en Estados Unidos antes del año 1900, la estación Gran Central, de Nueva York, y el acueducto de Los Angeles. Para explicar esto es preciso admitir, una de dos: o que estas obras han resultado "casualmente" buenas, o que hay alguna razón básica responsable de la calidad de estos hormigones. No parece razonablemente lógico admitir la primera posibilidad. Hay, pues, alguna causa o causas por las cuales los hormigones antiguos eran buenos y los modernos no lo son.

Hay muchos síntomas de que los usuarios del cemento tienen algunas dudas sobre la fabricación de hormigones. Entidades tan importantes como el U. S. War Department y el U. S. Bureau of Reclamation, parecen aceptar el hormigón como material de construcción, con muchas reservas.

Los elementos responsables en la industria del cemento, se burlan un poco de los detractores de los hormigones actuales y dicen que la razón por la cual no podemos ver actualmente peores estructuras de hormigón antiguo, es porque sólo se conservan las buenas. Las malas han sido enterradas o destruídas. Tratan de convencer al público de que los cementos de ahora son mejores que los antiguos, y, en algunos casos, mucho mejores.

Pero, ¿este cemento excelente se emplea, en efecto, para fabricar buenos hormigones? Si así no sucede, ¿cuál es la razón del fracaso? Desde luego, debemos admitir que los hormigones actuales adquieren su dureza con mayor rapidez que los antiguos. Su "permanencia" o duración deja, por el contrario, mucho que desear.

INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO

Si consideramos algunos de los factores que influyen en la fabricación y colocación del hormigón en obra, surgen inmediatamente algunas cuestiones: La mezcla y puesta en obra, ¿se hacen ahora peor que hace cincuenta años? Es evidente que, en lo que se refiere a la primera operación, las condiciones actuales, con hormigoneras y dosificadores automáticos, no pueden compararse con el amasado antiguo, a mano. La pasta es hoy mucho más homogénea y mejor.

En cuanto a la puesta en obra, la cuestión ya aparece algo más dudosa. Antes, la pasta se ponía en los encofrados en pequeñas porciones, con intervalos variables de una a otra. Puede pensarse que hubiese alguna ventaja en esta forma de colocar el hormigón, porque, en efecto, el curado y endurecimiento se hacían más lentos que ahora. Puede ocurrir que, en las estructuras masivas (como las presas del Bureau of Reclamation o del Army Engineer Corps), la puesta en obra se haga demasiado rápida. Los encofrados metálicos son demasiado estancos para permitir que se escape el exceso de agua de la pasta, por lo que el secado se hará defectuosamente. La hidratación de los componentes del cemento sería, por ello, más rápida, la elevación de temperatura en la masa más alta y, por ende, los hormigones obtenidos habrían de ser más porosos.

Es obvio que los razonamientos anteriores no pueden aplicarse a los firmes de carreteras y pavimentos de hormigón, que, en la actualidad, no son todo lo duraderos que sería de esperar. Un factor muy importante a este respecto es el empleo de los nuevos encofrados, de tipo absorbente, que eliminan el agua indeseable, mejorando la calidad de la masa de hormigón.

La relación agua-cemento es otra de las características de la manufactura del hormigón, que, como se viene reconociendo desde hace ya mucho tiempo, tiene una gran influencia sobre la calidad del mismo. Sin embargo, puede afirmarse que, desde hace cincuenta años, las pastas se colocaban en obra mucho más húmedas que ahora, lo cual daba lugar a una cierta segregación y afluencia de agua a la parte superior. Hay evidencia que, en tiempos pasados, el hormigón se empleaba más húmedo que ahora.

INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO

Los métodos de acabado de las superficies de hormigón fueron en aquellos años, algo diferentes de los actuales, sobre todo en lo que respecta a pavimentos y aceras. Al parecer, el espolvoreado de la obra con polvo de cemento o una mezcla de cemento y arena, repasando y puliendo después, a la llana, la superficie y suavizándola concienzudamente con herramientas especiales, puede dar lugar a la desaparición de poros y pequeños orificios o fisuras por las cuales podría comenzar la destrucción de la estructura. No es de extrañar, por tanto, que puedan verse aún, en Chicago, aceras construídas hace ya muchos años que han soportado heladas y deshielos en perfectas condiciones.

Y, en cuanto al curado, puede afirmarse, de la lectura de las obras más clásicas y completas de la época, que tal operación era desconocida o su importancia menospreciada allá por el año 1905. Como los cementos de entonces endurecían más lentamente, los encofrados habían de permanecer en obra por más tiempo; pero, después de quitados, no se consideraba necesario ningún período de curado. Hay que hacer constar, no obstante, que en unas instrucciones para la construcción de carreteras de hormigón, redactadas en 1908, se recomendaba dejar estar las bases de hormigón de tres a seis días, antes de colocar la capa de rodadura, protegiendo la obra de la acción del viento y el sol, para evitar la formación de "grietas de secado".

Hay algunas razones para pensar que la práctica actual de procurar que el hormigón se mantenga completamente saturado de humedad durante el período de curado, puede no ser tan buena como muchos creen. Es obvio que esta operación afecta a la porosidad y al tamaño de los poros que se forman en la masa y, si la calidad de un hormigón viene determinada por las propiedades físicas del mismo, parece natural que la práctica antigua de dejarlo secar lenta, pero completamente, sea más lógica. Al menos nuestros antecesores concentraban su atención sobre la "retracción" antes que sobre la "expansión", y, como veremos más adelante, los viejos portlands, en aquellas condiciones de secado, poseían una retracción menor que la de los cementos de ahora.

Hay que achacar muchos de los fallos de hoy a otro de los factores del

INSTITUTO TÉCNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO

hormigón: los áridos. Estos son reactivos para los álcalis, térmicamente incompatibles y mineralógicamente malos, aparte de otras desventajas. Pero la mayor parte de los áridos que empleamos ahora proceden de las mismas canteras antiguas, de las mismas formaciones geológicas, en general, y, por tanto, no pueden ser muy diferentes de los empleados hace cincuenta años en las mismas localidades. El único cambio que realmente ha tenido lugar es una mayor limpieza de las piedras y cuidado más escrupuloso en las granulometrías. Hace cincuenta años las arenas y otros áridos no se lavaban o su limpieza se hacía muy mal. Más tarde, hacia 1925, aproximadamente, la "moda" del lavado adquirió una importancia desmesurada. Todos los fabricantes lavaban y relavaban sus agregados con el mayor cuidado. De ambas épocas se conservan los hormigones excelentes. Esto no puede ser, pues, la causa de los malos hormigones. Todos los ingenieros y técnicos coinciden en afirmar que los áridos de hoy se preparan mucho mejor que los antiguos. No puede echarse a ellos la culpa de los materiales defectuosos.

Llegamos, por eliminación, a que el único factor importante que queda por considerar es el carácter del cemento portland. Sobre esto existe actualmente una confusión perfecta. Cuando vemos representado el cemento como una composición que contiene ciertas cantidades de los compuestos $3CaO.SiO_2$, $2CaO.SiO_2$, $3CaO.Al_2O_3$ y $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$, no debemos olvidar que, en realidad, estas fórmulas no son más que un medio de representar una composición dada por el análisis de óxidos minerales contenidos en el clinker, después de hacer una serie de suposiciones. No se trata de una combinación química de óxidos.

En el libro de Alexander, "Química coloidal", a propósito del estudio de cementos y morteros, se establece que, "por la divergencia de opiniones sobre la composición química del portland, no se pueden establecer unas bases positivas a este respecto". Estas incertidumbres y dudas son debidas, en gran parte, al hecho de que la fabricación del cemento lleva consigo una serie de "reacciones detenidas" o "equilibrios congelados". Esto significa que, en tales reacciones, puede no haberse llegado ni existir el equilibrio, por lo cual no pueden aplicar-

INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO

se, en general, los diagramas de equilibrio ni las experiencias conseguidas operando con especies químicas puras. Las partículas de materiales sólidos que se disuelven en el líquido (fase fundida) con velocidades diferentes, entran en reacción, produciendo saturaciones con respecto a algunas de las sustancias presentes, las cuales cristalizan formando un compuesto nuevo. Hasta que la fusión sea completa no puede haber verdadero equilibrio. Como es sabido, esto no ocurre nunca en la fabricación del cemento portland. De aquí que la preparación del crudo, tamaño y aspecto de las partículas del mismo y otras circunstancias, tengan un marcado efecto sobre las propiedades del cemento resultante. Otro tanto puede decirse de la duración y temperatura a que se lleve a efecto la cocción, así como de las velocidades de calentamiento y refrigeración del clinker.

Es un poco desalentador el contemplar la voluminosa literatura existente sobre la constitución del portland. Por ahora, es prácticamente imposible fabricar dos cementos exactamente iguales, y no ya por fabricantes distintos, sino por el mismo. No puede asegurarse que la composición química sea la misma, para productos manufacturados en jornadas diferentes. Sin embargo, esto no debe tener demasiada importancia en cuanto a la calidad de los hormigones. Hace cincuenta años, se dedicaba muy poco interés a los componentes químicos, y los únicos ensayos específicos que había de cumplir un aglomerante eran de carácter físico (tiempo de fraguado, resistencia y finura). Desde el punto de vista químico, lo único que se exigía en el año 1900 era que el cemento fuese "puro", es decir, que no contuviera arena u otra roca molida como adulterante.

Cuando la Portland Cement Association celebró el 50 aniversario del primer pavimento de hormigón, construido en Ohio, no se insistió demasiado en la clase de cemento que en aquellos tiempos se utilizó. Sin embargo, no cabe duda que el aglomerante empleado era muy distinto del portland actual. Se trataba de productos poco cocidos, mucho más parecidos a una cal hidráulica o a un cemento natural que a los portlands de ahora. La fábrica que los hizo, construida en 1889, estaba dirigida

INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO

por un joven químico educado en Alemania. Las normas de fabricación eran, por tanto, de inspiración germánica: fabricación de briquetas de greda y arcilla, calcinación de las mismas en horno parecido a los de ladrillos, trituración y pulverización en los rústicos molinos de entonces. La finura no alcanzaba—probablemente—a más de un 75 por 100 por tamiz de 100 mallas.

A pesar de todo, el pavimento de Ohio ha resistido durante medio siglo el tráfico más duro: carros con llantas de acero, herraduras de caballos y los modernos neumáticos. No cabe duda—según la experiencia ha confirmado—que aquellos cementos eran buenos, muy buenos. Quizá la causa de su calidad estribaba en el crudo empleado: marga y arcilla. Estas dos materias estaban finamente divididas (mucho más que lo que puede lograrse con las pizarras y calizas de hoy), dando lugar a un crudo reactivo. Como las briquetas que se metían al horno eran de un tamaño parecido al de un ladrillo ordinario, hay razón para pensar que la parte interna de las mismas debía resultar muy deficientemente cocida, según las especificaciones actuales. Es lógico, por tanto, que el contenido en silicato y aluminato tricálcicos había de ser muy pequeño y, probablemente, ausente en absoluto. Otra posible causa del buen estado del mencionado pavimento, y que no hay que perder de vista, es la presencia de un buen firme de arena y grava de más de 152 milímetros de espesor.

Los primeros hornos rotativos para cemento tenían de 12 a 18 metros de longitud y se alimentaban con aceite o gas de gasógeno. El empleo del carbón pulverizado (bastante groseramente) era monopolio de una empresa. Con estos hornos, y con carbón poco molido, era imposible mantener altas temperaturas de cocción durante un tiempo razonable. Aun empleando crudos con la misma proporción de cal que los actuales, el clinker resultante debía estar muy escaso en AC₂ y SC₂. Por otra parte, había una cierta cantidad de cal sin combinar. Se tenía la costumbre de enfriar los clinkers con agua pulverizada, dejándolos luego en el ensilado (generalmente al aire libre) durante unos meses, antes de la molturación. Cuando se retiraba el clinker de los montones, se encon-

INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO

traba una capa blanca recubriendo el suelo, formada, indudablemente, por cal hidratada. Después de molido el clinker, el cemento se ensilaba también en hangares apropiados antes de su expedición. Este curado en silos, en la fabricación del portland, ha sido ampliamente discutido y, como siempre, los resultados no son concordantes. Al parecer, los cementos ensilados proporcionan mejores resistencias. Desde el punto de vista químico, hay que esperar que los clinker ensilados contengan menos silicato tricálcico, puesto que este compuesto es inestable frente a los agentes atmosféricos, descomponiéndose en SC_2 y cal. Lógicamente, tales cementos curados no deberían dar lugar a inconvenientes derivados de la presencia de cal libre, puesto que ésta estaría completamente hidratada. Posiblemente tampoco habría aluminato de elevado contenido en cal. También es probable que muchas de las calizas arcillosas fuesen de naturaleza puzolánica. Algunas puzolanas activas no son más que arcillas bajas en cal, calcinadas y que contienen cierta cantidad de álcalis. La alúmina y la sílice reaccionan fácilmente con la cal y álcalis a temperaturas relativamente bajas, para formar puzolanas en forma reactiva. En este estado, las puzolanas producen soles o geles cuando se amasan con agua de cal. Se cree que el mecanismo de esta reacción es de tipo coloidal y de adsorción, antes que químico.

Características químicas de los cementos.

El principal cambio experimentado en la constitución del cemento portland, se produjo diez o doce años después de empezar a funcionar el primer horno rotativo. Gracias a estos hornos fué posible fabricar cemento, a partir de caliza y pizarra con o sin algo de sílice extra. Es mucho más difícil obtener un material finamente dividido con estos minerales, que con la marga y la arcilla; la mezcla íntima de los principales ingredientes del crudo es, por ello, menos probable. Esto lleva de la mano a emplear hornos muy largos y temperaturas de cocción muy al-

INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO

tas, para evitar la presencia de cal libre en el cemento. Se empleaba, generalmente, un exceso de arcilla como "factor de seguridad".

Los inconvenientes comenzaron cuando la construcción en hormigón tomó un auge extraordinario, allá por 1910. Las fábricas de cemento no daban abasto para satisfacer las demandas, con lo cual se fueron reduciendo insensiblemente los períodos de ensilado y curado, tanto del clinker como del cemento. Los usuarios empezaron a notar fallos, que se atribuyeron a la presencia de cal libre en el cemento. Por esta época fué también cuando el ingeniero consumidor empezó a decir al cementero cómo tenía que fabricar su producto, sin tener en cuenta sus ideas particulares para el mejor aprovechamiento de sus canteras de crudos.

Como resultado de los inconvenientes derivados de la presencia de cal libre y de las diferencias encontradas en diversos cementos, los clientes empezaron a exigir clinkers muy cocidos. Esto, cuando se partía de rocas naturales que ya tenían la composición aproximada del crudo (margas arcillosas, por ejemplo), no siempre era practicable, por la extrema fusibilidad del crudo, por lo cual era preciso agregar un exceso de cal (3 a 4 por 100). De otra forma el clinker fundía muy rápidamente y la especificación ASTM, "fusión incipiente", no podía ser cumplida. El empleo de mayor proporción de cal en el crudo dió lugar a la obtención de cementos de endurecimiento rápido, con resistencias iniciales más altas. Esto, como es natural, resultaba agradable al constructor. Estos clinkers, por otra parte, son mucho más quebradizos y menos tenaces que los ordinarios, es decir, más fácilmente molidurables, lo cual resultaba muy satisfactorio para el fabricante. Fabricante y consumidor estaban, pues, muy conformes con la nueva situación. Claro que todo esto atentaba contra la durabilidad de las estructuras.

Los redactores de especificaciones y normas comenzaron fijando unas propiedades físicas para los cementos, enseñando al cementero cómo había de componer y cocer sus crudos, y han llegado hasta intentar normalizar lo innormalizable: la composición química de los cementos.

No es posible saber cuántos fabricantes de cemento están de acuer-

INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO

do con esto, pero es de suponer que, dejando la iniciativa a los propios cementeros, que adaptarían el proceso de fabricación a sus características peculiares, se obtendrían buenos resultados. Los cementos serían mejores, sin que nos preocupásemos demasiado de si su composición química era correcta o no.

Los investigadores nos aseguran que todas las buenas cualidades del cemento dependen de su contenido en silicato tricálcico. Los cementos actuales poseen (¿?) un 50-70 por 100 de SC₂ (deducido por los datos del análisis químico), mientras que si aplicamos los mismos métodos de cálculo a cualquier cemento de la época 1900-1910, encontraríamos que la proporción de silicato no alcanza nunca al 10 por 100.

Se dice generalmente que un incremento de 2, 3 ó 4 por 100 en el contenido en caliza, no debe suponer un aumento considerable con relación a los cementos antiguos. Pero hemos de tener en cuenta que, por cada 1 por 100 que aumente la dosificación en carbonato de cal en el crudo, el clinker resultante experimenta un incremento, en cuanto a SC₂, de 14,2 por 100. Huelga decir lo que pasará cuando el exceso de carbonato cálcico se eleve a 3 ó 4 por 100. Además, como hemos dicho antes, la temperatura de cocción alcanzada en los hornos antiguos no daba lugar a la formación de mucho silicato tricálcico.

Importancia de las propiedades físicas.

Consideremos algunos aspectos físicos y mecánicos del problema de los hormigones. Para ello habrá que admitir algunos supuestos e hipótesis relativos a los fenómenos coloidales que, por el momento, no pueden ser comprobados dado el estado actual de la ciencia coloidal.

Las propiedades físicas del cemento y del hormigón son, en la práctica, fundamentales. Su estudio puede arrojar alguna luz sobre las cuestiones que se plantean.

Supongamos que ignoramos, por el momento, la composición química actual del cemento portland o de cualquier otro tipo de material cemen-

ticio, y consideremos, simplemente, cuál es la función física específica responsable del comportamiento de los aglomerantes. Es decir, de la facultad de consolidar una masa de arena o fragmentos, fraguando y endureciéndose, de la misma forma que la Naturaleza aglomera rocas, tales como las areniscas, calizas y otras piedras que, como no podemos por menos de reconocer, se comportan infinitamente mejor que el hormigón en las construcciones.

Hay muchas razones para pensar que los fragmentos rocosos fueron cementados en la Naturaleza, formando una especie de hormigón, por cierto tipo de suspensiones o soluciones coloidales de pequeñísimas partículas de sólidos en agua, tales como sílice, carbonatos cálcico y magnésico, óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, etc., etc. Todas estas soluciones son extremadamente diluídas y la materia sólida se deposita fácilmente cuando se filtran a través de un lecho de arena o material similar. También, cuando estas soluciones o suspensiones se concentran suficientemente por evaporación u otro medio, se forman geles o precipitados gelatinosos. Es evidente que, desde el punto de vista geoquímico, muchos minerales se han formado por desecación o solidificación de geles. Así, el ópalo es un gel solidificado de sílice, mientras que la bauxita, por ejemplo, proviene de otro gel de hidróxido aluminico. El pedernal, la calcedonia, el flint y otras formas de SiO_2 , también son de origen coloidal.

Aparte de las reacciones puramente químicas o atómico-moleculares, en las que se cumplen las conocidas relaciones estequiométricas, hay una serie de compuestos que no cumplen las leyes y teorías químicas, tales como muchos óxidos e hidróxidos hidratados, muy comunes en el reino mineral, en los cuales las moléculas de agua y los demás componentes no se encuentran en proporciones definidas. La adsorción es un término que está íntimamente ligado a la tecnología del cemento y del hormigón. Esta denominación, casi privativa de la química de los coloides, se refiere a fenómenos puramente superficiales. Cuanto más pequeñas sean las partículas de un cuerpo, tanto mayor es su superficie específica y, por ende, tanto más favorecidas resultan las adsorcio-

nes coloidales, es decir, desde el punto de vista del cemento, las imbibiciones con respecto al agua. Los umbrales entre la verdadera química y la química coloidal se superponen ciertamente, y por ello, tal vez, nos encontramos incapaces de comprender los fenómenos que ocurren en el cemento.

Existe una distinción entre precipitados gelatinosos y geles. Según Weiser, las soluciones coloidales de sílice, óxido de hierro y alúmina pueden convertirse en precipitados gelatinosos antes que en geles. La diferencia parece estribar en que, un precipitado gelatinoso presupone la existencia de diminutos cristales, mientras que en un gel no es necesariamente así. Claro es que las diferencias entre estado amorfo y cristalino se van anulando conforme avanzan los medios de observación. Muchos cuerpos antes considerados como amorfos, han dejado de serlo después de la invención del microscopio electrónico. No obstante, en la literatura sobre cementos, se sigue utilizando el término "gel de sílice", más por costumbre que por otra cosa. El estado coloidal, como se admite hoy día, no es más que un intermedio entre átomos y moléculas y partículas cristalinas visibles. Es decir, es una mera cuestión de tamaño de grano. Es interesante a este respecto la tabla de Hartman, que delimita perfectamente las dimensiones:

Átomos	0,1 a	0,6 μ .
Moléculas	0,2 a	5,0 "
Grupos moleculares	0,5 a	10,0 "
<u>Partículas coloidales</u>	5,0 a	200 "
Part. visibles (microsc.).	Más de	250 μ .
Partículas visibles	Más de	1 mm.

Suponiendo una partícula de forma cúbica, de 1μ de arista, el área superficial de 1 c. c. de estas partículas se eleva a 6.000 metros cuadrados. Una película de agua que recubra todas y cada una de las partículas contenidas en el c. c., aun cuando el espesor de la misma sea monomolecular, ya equivale a un volumen apreciable. Todas las teorías de la coeidequímica se basan en las fuerzas naturales inherentes a las

INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO

micelas (similares a las fuerzas capilares; N. del T.), que asumen elevados valores a causa del gran desarrollo de las superficies específicas. Estas fuerzas se identifican, en cierto modo, con las de atracción atómico-molecular, por lo cual es difícil discriminar dónde terminan unas y comienzan otras. La hidrólisis parecía ser el único criterio seguro para dilucidar la cuestión. Así, cuando la cal se disuelve en el agua puede adoptar la forma coloidal; pero cuando se disocia en sus iones: Ca^{++} y OH^- ya estamos ante un fenómeno puramente químico. Sin embargo, las autoridades competentes en química coloidal, están de acuerdo en que también las micelas, o sea, partículas coloidales, son susceptibles de ionizaciones semejantes.

En general, es casi unánime la opinión de que todos los óxidos e hidróxidos contenidos en el portland son prácticamente insolubles en el agua. Es decir, si existe solución realmente química, su concentración es del orden de partes por millón. Sin embargo, es un hecho concreto que, tanto en la superficie como en el subsuelo, existen aguas que contienen sustancias minerales en cantidad apreciable, en forma de partículas coloidales dispersas, arrancadas de las rocas y del suelo por dichas aguas. En el cemento portland hidratado, se encuentran estas partículas de tipo coloidal, más que disoluciones genuinamente químicas.

En la ya citada obra de Alexander, por ejemplo, se consigna que "el mismo cemento no hidratado puede contener diversas sustancias en solución sólida o en estado disperso. Así, la cal libre, que, según Dyckerhoff y otros, está disuelta en un silicato dicálcico vítreo, puede encontrarse en estado coloidal, el cual, para el caso de cementos, escorias, etc., es difícilmente distinguible."

Suponiendo que el CaO se encuentre disperso en el clinker como cal, ¿qué pasará cuando una gota de agua sea añadida a unas cuantas partículas de cemento? Las partículas de clinker no son de tamaño coloidal, porque la molturación no llega a ese estado. El agua añadida hidrata la cal coloidal existente en dichas partículas, sobre todo en lo que respecta a su superficie. El fenómeno de la hidratación del portland es exactamente igual al de hidratación de una partícula de cal viva. Hay

INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO

hinchamiento, desintegración y desarrollo de calor. La cal en el cemento se encuentra, pues, en forma de "cal viva muy activa".

La hidratación de estas partículas coloidales de cal, dispersas en el magma del cemento, da lugar a la ruptura (eclosión) de las partículas del mismo en fragmentos, algunos de los cuales son de tamaño coloidal. Estos, aparte de la cal hidratada, están formados principalmente por sílice, alúmina y óxido de hierro. Todos estos compuestos, dispersos o coloidalmente disueltos en agua, forman, primeramente, disoluciones coloidales, luego geles y, eventualmente, precipitados gelatinosos, por un proceso conocido por sínéresis, es decir, contracción automática y eliminación del agua por estrujamiento. No se sabe si los geles de sílice, alúmina y óxido de hierro actúan separadamente o en conjunto, pero no cabe duda de que el gel de sílice juega el papel principal, por lo cual podemos, sin mucho error, suponer que este es el principal material aglomerante o "cola mineral" en el cemento portland, lo mismo que, en la Naturaleza, el SiO_2 es el cemento universal para las formaciones rocosas.

El papel principal de la cal en el cemento portland parece ser, por tanto, el de romper las partículas de cemento en fragmentos coloidales o micelas de sílice, alúmina y óxido de hierro o sus hidróxidos. El hidróxido cálcico formado reacciona después con la sílice disuelta, tal como lo hace cualquier hidróxido básico, coagulando el sol y pasándolo a gel, probablemente por neutralización de las cargas negativas sobre el coloide silíceo o porque tiene una afinidad mayor por el medio acuoso, lo cual puede originar una eliminación de agua del sol, causando la aglomeración de las partículas de sílice coloidal. Se supone, en general, que, al menos una parte del hidróxido cálcico, se encuentra hidrolizado, lo cual significa que una pequeña parte de la reacción es de naturaleza química y no coloidal. Sin embargo, la cal es tan poco soluble en agua que el fenómeno químico ocupa un lugar secundario. Probablemente, sólo un pequeño porcentaje de las partículas son del tamaño de micelas coloidales, así que habrá una gran cantidad

INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO

de partículas de suspensoides, y aun agregados de mayor tamaño, en el clinker.

Los geles de sílice, alúmina y óxido de hierro formados poseen una estructura muy abierta con una gran cantidad de poros y canalillos capilares, de pequeño tamaño, llenos de líquido. La solución (química o coloidal) de hidróxido cálcico puede ser absorbida por estos poros gracias a acciones eléctricas por cargas de signo contrario. Así se forman los diversos hidratos de los silicatos cálcicos. En la práctica, todos los experimentadores han encontrado que las proporciones de CaO a SiO_2 no guardan relación estequiométrica. Las proporciones varían con la alcalinidad del medio. El silicato monocálcico $\text{SiO}_2 \cdot \text{CaO}$ parece ser el más estable en condiciones ordinarias, pero esto no prueba que se trate de una verdadera combinación química, puesto que hay otros silicatos de relaciones 3:1 y 3:2, igualmente posibles en el seno del agua de cal saturada.

La adsorción de cal sobre la superficie y, especialmente en los poros y canales del gel, tiende a espesarlo y endurecerlo por coagulación y aglomeración, y esta es la razón por la cual los cementos con mucho silicato tricálcico endurecen y ganan resistencia a la compresión muy rápidamente. Claro que esto tiende a hacer hormigones quebradizos y no demasiado buenos. Eventualmente, la alcalinidad del medio líquido que rodea al cemento, se reduce por cristalización de parte de la cal que dicho medio lleva, por percolación del agua de cal o por "lavado" de cementos y hormigones endurecidos por cualquier curso de agua. Si el agua de lavado lleva CO_2 u otra sustancia capaz de insolubilizar la cal, el efecto puede ser beneficioso, por formarse precipitados insolubles.

Algo similar ocurre con algunas calizas oolíticas de Indiana, famosas como piedras de construcción, que, cuando están recién arrancadas de la cantera, tienen el aspecto de hormigón "verde", y luego hay un sangrado, mediante el cual rezuma una solución coloidal concentrada de CO_2Ca , que forma una capa sobre la superficie externa de la

INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO

piedra. Por exposición a la atmósfera, este "barniz" provoca el cierre de los poros propios de toda roca, dando lugar a estructuras de gran belleza y duración. Es bien sabido, también, que el hormigón puede protegerse de la intemperie depositando sobre la superficie del mismo, o en los poros internos, algún mineral insoluble.

680-6 FALLOS EN EL HORMIGON: CAUSAS Y REMEDIOS

(FAILURES IN CONCRETE WORK.-THEIR CAUSES AND CURES)

Cement, Lime and Gravel, 224, diciembre 1949.

Autor: B. H. Knight.

Para evitar fallos y fracasos en las obras de hormigón se impone, ante todo, un perfecto conocimiento de los materiales que entran en su composición, a saber: cemento, arena, piedras y agua. De estos ingredientes el cemento es un producto manufacturado y normalizado que, en muy raros casos, origina fallos. Los áridos-piedras-son, en ocasiones, los responsables del fracaso de una estructura. Los áridos blandos y porosos, calizas arcillosas, algunas doleritas, etc., deben evitarse en lo posible. La arena, igualmente, puede contener impurezas perjudiciales para el éxito de la obra. El agua deberá estar exenta de impurezas orgánicas y de anhídrido carbónico. Por otra parte, el cemento portland, como es bien sabido, no resiste al ataque de ácidos, álcalis y substancias, tales como los sulfatos, que pueden estar disueltas en el agua de amasado. Lo mismo puede decirse de los suelos o líquidos con los cuales deba estar en contacto el hormigón fabricado. En lo que se refiere a la forma y aspecto de los áridos, los cantos redondeados dan buena trabajabilidad, pero son inferiores-en otros aspectos-a los de superficie rugosa.

En cuanto a la operación de mezclado o amasado, sujeta, en general,

INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO