

- 1 -

611-15 DIVERSAS CUESTIONES SOBRE CEMENTO Y HORMIGON

(Have the Real Fundamentals Been Developed for Making Good Concrete ?)

N. Rookwood.

De: "ROCK PRODUCTS" 111, Febrero 1950

Este trabajo, que puede y debe considerarse como continuación de otro aparecido en la misma revista Rock Products (véase Últimos Avances, número 9, pág. 40), en su número de Diciembre del pasado año, es debido al conocido editor-consultor M. Rookwood, cuyo nombre ha sido mencionado en diversas ocasiones en las páginas de este Boletín.

El autor comienza haciendo una distinción entre porosidad y permeabilidad de las pastas endurecidas de cemento y de morteros y hormigones, partiendo de la base que estas dos particularidades físicas del cemento endurecido son decisivas en cuanto a su comportamiento. La porosidad en una pasta se define, según Feret, como el espacio total ocupado por líquidos y gases. La permeabilidad es la cantidad total de líquido o gas que puede atravesar una masa, en un tiempo dado y con una diferencia de presiones de finida, por unidad de área del material. Cuanto más finos y abundantes son los espacios, mayor será la absorción capilar para las soluciones salinas y, por tanto, la penetración. La permeabilidad puede definirse como la cantidad de líquido o gas que puede fluir a través de una sección transversal del material en un tiempo dado y bajo una diferencia de presiones - unidad. La diferencia entre permeabilidad de los morteros o sea su capacidad para permitir el paso de agua a su través y su porosidad (facultad de retener agua en sus poros), aparece claramente definida. Generalmente, los morteros más porosos son los menos permeables y viceversa. Las arenas de grano grueso producen morteros que, por poseer pocos espacios intersticiales pero de gran tamaño, permiten que el agua se cuele a través de los mismos con cierta facilidad. En los morteros de arena fina, que tienen nume-

- INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO -

rosos poros pequeños, el agua penetra en los mismos pero queda retenida en virtud de las fuerzas capilares, no permitiendo el paso libre del agua.

Los efectos del paso de agua a través de un mortero permeable o poroso son muy diferentes. Con los permeables, se deposita rápidamente una abundante eflorescencia blanca, debido a la descomposición de los silicatos de calcio del cemento en compuestos menos ricos en cal, que se convierten en carbonato por exposición al aire. Esto puede ocurrir también por la acción del carbónico disuelto en el agua del mar, cuando se trata de obras marítimas. En los morteros porosos, la eflorescencia es mucho menos abundante y, en general, poco profunda.

La desintegración del hormigón por los hielos es, en cuanto a su mecanismo, muy similar a la que ocurre en las obras de ribera. En el primer caso son los cristallitos de hielo los que provocan la aparición de grietas, mientras que el segundo, los elementos cristalinos están constituidos por sulfato magnésico que contiene el agua marina en gran cantidad. En todo caso, es evidente que la desintegración es una consecuencia directa de la porosidad de las masas, tal como admiten también los geólogos para la desintegración de las rocas. La resistencia de un hormigón a la humedad y a la intemperie es, pues, una consecuencia de sus propiedades físicas, y no depende mucho de la composición química o mineralógica excepto cuando dicha composición es tan diferente de lo normal que puede afectar a la porosidad. Tal ocurre, por ejemplo, en la desintegración de los hormigones expuestos a la acción de las aguas alcalinas, lo que ha llevado a las especificaciones sobre los cementos portland resistentes a los sulfatos. Los experimentos verificados han mostrado que pueden encontrarse fallos en cementos que no contienen arriba de 4 ó 5% de aluminato tricálcico, mientras que otros que contienen cantidades muy superiores han dado buenos resultados. No cabe duda, pues, de que los compuestos de alúmina, por sí mismos, no son la causa de la desintegración. La razón por la cual los cementos ordinarios altos en Al_2O_3 no dan en general buenos resultados frente a las aguas alcalinas, depende evidentemente de que el gel de alúmina formado toma más agua que los geles de sílice ó de óxido de hierro, haciendo -

que el hormigón sea más poroso. A juicio del autor, si rebuscamos en la literatura sobre experimentos con hormigón, encontraremos multitud de estudios sobre fallos del hormigón en casos específicos, en los que casi siempre se echa la culpa del mal comportamiento a la composición del cemento, de los áridos y del propio hormigón, pero no se tiene en cuenta para nada la cuestión de la porosidad del material, sobre todo desde un punto de vista sistemático. A este respecto, cita Mr. Rockwood unos experimentos de Mattimore y Rahn (Proc. ASTM, 1935) verificados con dos tipos de cemento, uno de molienda grosera y 0,61% de álcalis, amasados con dos tipos de arena, una poco resistente al sulfato sódico (disolución) y otra más inerte. Las experiencias, que duraron cerca de 5 años, no condujeron a ningún resultado concluyente.

Mr. Rockwood muestra su extrañeza ante la falta de estudios sistemáticos sobre la porosidad de pastas puras de cemento, morteros y hormigones, y cita, en cambio, algunos excelentes trabajos sobre porosidad de piedras de construcción. Así, Bain, que estudió con todo lo referente a mármoles, dice que las soluciones salinas no afectan por igual a todos los mármoles aunque su apariencia externa sea idéntica. Las piedras que tienen poros de menos de $0,025 \mu$ de diámetro resisten bien a las soluciones mientras que las que poseen capilares de $0,035 \mu$ se disuelven con bastante rapidez. Es ciertamente notable que una diferencia tan pequeña (en valor absoluto) del diámetro del poro tengan tanta influencia sobre el comportamiento del mármol. Pero aún es más extraño que, cuando el diámetro de los poros aumenta, hasta llegar a $0,06 \mu$, la velocidad de disolución de la piedra disminuye. Es decir, por aumento en el tamaño de los poros, el mármol se hace más resistente a la intemperie. El tamaño de los poros es pues el factor más importante en la durabilidad de un mármol, pero la interpretación correcta de los fenómenos que tienen lugar no parece demasiado fácil. También son dignos de mención los trabajos de Richard B. Hohl (1948) sobre la naturaleza y origen de la porosidad de la piedra caliza, que los técnicos del hormigón y del cemento deberían imitar. Este autor relacionó la diferente durabilidad de las calizas ricas en cal, de grano fino, con respecto a la

de las dolomitas (carbonato cálcico-magnésico), teniendo en cuenta la diferente porosidad (tamaño de poros) de estos dos tipos de piedra.

Una vez más, Mr. Rockwood que, como se sabe es un entusiasta de la geología y la petrografía, dice que el camino a seguir para las investigaciones de hormigones y cementos es el de los petrógrafos y geólogos, insistiendo en que los técnicos de la construcción no deben desdeñar trabajos como los ya citados y otros como el de K. B. Woods sobre "Porosidad de los ópalos, calizas y gravas", el de Wuerpel y Rexford, sobre "La resistencia del pedernal en relación con la densidad aparente y la absorción", en el que se aborda la cuestión de los microporos. Rhoades y Mielenz han contribuido de una manera notable a estos estudios con su trabajo "Características petrográficas y mineralógicas de los áridos". Dichos autores dicen que los poros de diámetro inferior a 4μ son los que determinan la durabilidad de las partículas sólidas. Hay poros submicroscópicos por los cuales pueden fluir los líquidos, como ha demostrado Bulkley en su trabajo "El flujo viscoso y las películas de superficie". Los mismos autores Rhoades y Mielenz dicen en un trabajo publicado en 1946, a este respecto, que el agua no entra en los áridos que tienen huecos de tamaño considerable, aunque dichos poros estén interconectados y sean penetrables. En cambio, los microporos pueden ser fácilmente penetrados por los líquidos. Cuando los poros del árido son más pequeños que los de la pasta de cemento, el agua emigrará de ésta al inerte.

H. S. Sweet, en su trabajo "Investigaciones sobre la durabilidad del hormigón en función del tamaño de los áridos" (1948) abunda una vez más sobre las teorías anteriores y tiene muy en cuenta los microporos. Dice que, con áridos malos (absorción elevada y numerosos poros finos) es posible fabricar hormigones duraderos si se procura secar estas piedras antes o después de su incorporación al hormigón. Una forma de hacer esto (en el segundo caso) es colocar bajo el hormigón una base porosa (se refiere a pavimentos de hormigón) que tiene por fin un "drenaje" del agua, no permitiendo que la masa permanezca saturada de humedad. El tamaño de poro

equivalente a 0,005 mm. (5 μ) parece ser el crítico para la durabilidad de los áridos.

Si partimos del supuesto de que la pasta de cemento fraguada y endurecida es esencialmente un gel de sílice o alúmina, o de ambos, (μ ?), precipitado y endurecido en el interior de la masa de hormigón y que posee aproximadamente la misma o mayor porosidad que el pedernal (ópalo o sílex) el cual también es un gel de sílice envejecido, podemos comprender el importante papel jugado por el cemento en la desintegración del hormigón para pavimentos. Esta desintegración no se origina por ninguna reacción química del cemento o de los áridos, en sí misma, sino a causa de las características microscópicas, igual que ocurre con el pedernal y otras rocas. Por ello, si se pretende averiguar por qué fallan algunos hormigones, deberán examinarse tanto en lo que respecta a la calidad (diámetro) como a la cantidad (tanto por ciento de huecos) de los poros que contenga. Al parecer, la causa de que muchos hormigones antiguos se conserven en perfecto estado es que, bien fuese accidentalmente o por sistema, dichos materiales eran endurecidos y durados de tal modo que el porcentaje total de huecos (poros) submicroscópicos no alcanzaba al 10%. Un conocimiento más a fondo de la química coloidal puede contribuir a que la fabricación de buenos hormigones deje de ser una cosa accidental.

Recalcando aún más estas teorías, cita el autor los trabajos de Zamboni, técnico italiano en hormigones, que expuso en 1936 sus ideas sobre las mezclas cemento-puzolanas. Según él, "la determinación de la porosidad en dichas mezclas es el mejor medio para valorar la efectividad de una mezcla puzolánica". Un estudio sobre los viejos hormigones romanos ha demostrado que tal porosidad es el factor más importante en cuanto a la duración de estos materiales. F. H. Jackson, del Departamento de Carreteras de los EE.UU. describía en 1946 los fallos encontrados en los hormigones para pavimentos construidos desde 1930. El examen de estas carreteras demostró que los hormigones contenían muchas líneas de cuarteamiento, poca resistencia y una matriz o aglomerante de aspecto opaco y ceroso, en con-

traste acusado con la matriz densa, compacta y de color azul-grisáceo encontrada en los buenos hormigones. Cuando Jackson se refiere a los hormigones antiguos de excelente calidad dice que "la matriz es densa y cristalina, tal como la que se ha encontrado en algunos hormigones de los más antiguos pavimentos y puentes". En estas frases se encuentra el "quid" de la cuestión, según dice Mr. Rockwood.

La matriz, es decir, la pasta aglomerante, de los hormigones modernos se describe siempre como una materia de aspecto de yeso o graso, queriendo significar con ésto que se trata de una masa "amorfa" o de grano finísimo y muy porosa. Por el contrario, en los buenos hormigones, lo mismo si son de hace 2.000 años (romanos) o de hace 30 (como algunos de las carreteras del Oeste de los Estados Unidos), dicha matriz es predominantemente "cristalina". ¿Cuál es, pues, la causa de que los morteros de los hormigones modernos sean de naturaleza amorfa mientras que los antiguos son - cristalinos? Puede haber, indudablemente, dos razones para ésto: La primera es que el hormigón tuviese poros gruesos y que, en sus primeras edades, fuese permeable. De este modo, la cal disuelta en el seno del hormigón se cristalizaría en forma de carbonato sobre las superficies y en los poros y canalillos capilares. Por otra parte, también podría ocurrir que existiesen pocos microporos, de efecto perjudicial como ya se ha dicho, desde las primeras edades del hormigón.

La primera circunstancia podría resultar del empleo de cementos muy groseramente triturados y arena de grano grueso. Feret ya recomendó - excluir de las mezclas para hormigón las arenas de tamaño de grano inferior a 500 μ , al mismo tiempo que preconizaba la adición de puzolana finamente dividida. La cal y la puzolana podrían rellenar huecos en la masa formando un silicato estable y dando lugar a un hormigón no solo exento de poros sino impermeable.

Para cumplir el segundo punto mencionado sería factible el empleo de un tipo de cemento cuya hidratación no diese lugar a la formación de tal cantidad de matriz amorfa (que es principalmente un gel) como lo hacen los

cementos actuales. Tales cementos antiguos estaban más groseramente molidos, pero, en todo caso, eran mucho menos reactivos (frente al agua, naturalmente) que los portland modernos ricos en silicato y aluminato tricálcicos.

Buscando siempre lograr las mayores resistencias a la compresión (durante los últimos 25 ó 30 años) en el tiempo más corto posible, se han dejado un poco de lado, no solo los ensayos de tracción con pastas puras - sino el significado de los mismos en cuanto a descubrir la cantidad y calidad de la "cola mineral" o gel que es, en realidad la llave para lograr - buenos hormigones. Al decir cola, el autor parece querer referirse a la masa intersticial que hace de pegamento entre los granos de árido u otros materiales o cristales (incluso procedentes del propio cemento sin hidratar). No cabe duda que de las propiedades de esta cola ha de depender el carácter general de la masa obtenida. Hasta hace poco se sostenía la teoría de que cuanto más gel y más rápidamente se formase, mejor era el cemento. Ahora, sin embargo, estamos comenzando a ver que, cuanto menos gel haya y cuanto más lentamente aparezca en una pasta, menos inconvenientes habrá derivados del calor de fraguado y de los cambios dimensionales. El precipitado gelatinoso, que no es más que la pasta de cemento endurecida, es un gel irreversible y que, por tanto, tiene muchas de las propiedades características a los medios de alto poder absorbente, pudiendo causar dificultades bien por absorción de agua o de coloides minerales presentes en el agua dando lugar a expansiones y retracciones anormales.

Una de las ventajas que preconizan los partidarios de los cementos con elevado contenido en SC_3 es que este silicato se hidrata con facilidad originando una gran cantidad de gel de sílice. Los cementos ricos en SC_2 , por el contrario, son relativamente inactivos y se hidratan tan lentamente que se forma muy poco gel. Es curiosa la experiencia realizada por Brown y Carlson en 1936 con especies puras. Una muestra de SC_3 puro, amasada con agua, se hidrata rápidamente dando una resistencia de 703 Kg/cm^2 a la compresión, teniendo en cuenta que el 60% de dicha resistencia ya se -

obtiene a los 7 días del amasado. La misma probeta, pero fabricada con SC_2 , también puro, no se hidrató más que hasta un 25%, al cabo de un año, si bien la resistencia lograda alcanzó a los 703 Kg. Esto constituye una prueba evidente de que, a menos que se requieran grandes resistencias iniciales, pueden lograrse buenas resistencias, de una forma segura y eficaz, sin temor de cambios dimensionales, empleando cementos que den poca masa gelatinosa, es decir, ricos en SC_2 . La adición de puzolana, en cualquiera de los casos, incrementa la cantidad de gel. El hidróxido cálcico presente en los poros y capilares del gel no se encuentra, aparentemente, en forma cristalina sino que, solamente en el caso de exudación derivada de la retracción o sinéresis, sería posible la formación de estructuras cristalinas fuera del gel.

La forma cristalina para el $Ca(OH)_2$ es preferible a la amorfa debido a que, teniendo menos área superficial, es menos reactiva. Sin embargo, no se encuentran nunca cristales de hidróxido cálcico en los viejos hormigones. No cabe duda que la cal se ha transformado en carbonato o se ha disuelto y combinado con otros óxidos para formar compuestos más estables y más solubles, como los aluminatos, silicatos aluminico-cálcicos, etc. La forma cristalina de cualquiera de los productos finales de la hidratación del cemento es preferible a la forma amorfa, por las razones antes mencionadas.

Partiendo del supuesto anterior, se plantea el interrogante: ¿cómo favorecer la formación de productos finales cristalinos? Parece lógico, en primer lugar, evitar que el cemento, como ya dijo Feret, se desintegre rápida y fácilmente. Para ello sería menestar emplear un cemento pobre en SC_3 y AC_3 , o, de no ser así, molido hasta un grano relativamente grueso. Es cierto que los análisis de algunos cementos antiguos, de los que hoy añoramos, demuestran que contenían porcentajes apreciables de alúmina, pero es de suponer que el Al_2O_3 se encontraba combinado con la cal en proporciones inferiores a las del AC_3 . La molturación del cemento hasta un grado de finura apreciablemente inferior al normal, puede ser otra solu-

ción aunque también puede añadirse al cemento finamente pulverizado, otro material triturado que proporcione las fracciones gruesas que están ausentes en el cemento. En tercer lugar, hay que procurar que la granulometría de las partículas se aproxime lo más posible a una línea recta, para que la compacidad sea máxima. La relación agua-cemento es otro factor a considerar. Esta relación debe ser lo más baja posible compatible con una trabajabilidad razonable de las pastas, para lo cual es de la mayor importancia una buena granulometría, desde las más finas partículas de cemento hasta los granos gruesos de árido. Finalmente, es esencial el empleo de áridos que se caractericen por tener menos del 10% de huecos correspondientes a los poros y canales capilares de un diámetro inferior a 5μ (que son los peligrosos, como ya se ha dicho), si dichos espacios están ya llenos de agua. Si no hay más remedio que utilizar tales áridos deben adoptarse métodos de fabricación y curado del hormigón que permitan el secado rápido y total.

El objeto de los granos relativamente grandes de cemento o de los granos finos de sílice, puzolana, caliza o dolomita, es doble. Desde el punto de vista mecánico estas "cargas" sirven para rellenar los intersticios entre los granos de arena del mortero y, por otra parte, actúan como núcleos o "gérmenes" de cristalización para favorecer la ordenación cristalina de los componentes amorfos del hormigón. Ya se sabe que uno de los métodos para provocar la cristalización de un coloide es "sembrar" gérmenes que tienen preferencia por la adsorción de los coloides. Así es como crecen muchos de los cristales en la Naturaleza. El efecto de la puzolana, es probablemente, adsorber la cal hidratada y los coloides de sílice que "flotan" en el magma del hormigón convirtiéndolos en cristales que rellenan poros e intersticios de la masa. Los técnicos de la flotación conocen el hecho de que cuando el cuarzo pulverizado adsorbe bastante cal o iones calcio la carga eléctrica del conjunto cambia de negativa a positiva. Existirá una carga óptima del cuarzo provocada por la adsorción de calcio que, al neutralizar la carga eléctrica del SiO_2 , provoca la aglomeración.

Es posible comprender ahora por qué algunos de los viejos cementos, de acción lenta, tenían un comportamiento mejor que los portland modernos, altos en cal y muy finamente molidos, en cuanto a la resistencia de los hormigones con ellos fabricados frente a la intemperie, al agua del mar y a las aguas alcalinas. Los componentes más gruesos del cemento, poco cocidos, constituían unos verdaderos promotores de la cristalización reduciendo la porosidad peligrosa de las masas.

Para tener una idea de la peligrosidad de los microporos en las pastas de cemento basta pensar en que, según las investigaciones citadas, se consideran como funestos todos los canales capilares de diámetro inferior a 5μ . Pues bien, un gel de sílice de los que ordinariamente se utilizan como adsorbentes posee infinidad de poros cuyo diámetro está comprendido entre $0,002 \mu$ y $0,005 \mu$. El gel de sílice, que posee enorme cantidad de estos ultramicroporos, tiene un poder adsorbente extraordinario; puede retener hasta 300 moles de agua por mol de SiO_2 . De ahí deriva la peligrosidad de estos geles cuando están presentes en una masa de hormigón, bien sea en la matriz o cola o en los áridos mismos.

Hemos dado, intencionadamente, una extensión desmesurada al trabajo del Sr. Rockwood. Pero juzgamos de gran interés algunas de las opiniones expuestas, sobre todo porque marcan un camino a seguir algo diferente de los clásicos. Ha de haber, indudablemente, aciertos en las líneas que anteceden; aciertos y errores e incluso contradicciones más o menos aparentes. Pero todo aquello que afecta a la constitución del cemento y, sobre todo, a la de las pastas fraguadas, presenta hoy día un interés palpitante para los técnicos y usuarios del cemento.

Conclusiones:

a) Los hormigones antiguos eran de buena calidad a causa de que los productos finales de la hidratación del cemento presentaban estructura cristalina.

- INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO -

b) Los cementos groseramente molidos y poco cocidos (respecto a las normas actuales) ayudan eficazmente a provocar la cristalización de los productos finales.

c) ~~El sand-cemento es eficaz a los mismos efectos del apartado b) porque rebaja el porcentaje de cal y sirve como gérmenes de cristalización.~~

d) Algunas rocas trituradas, ~~intermescladas con el cemento, también ayudan a la obtención de matrices cristalinas, por adsorción de los productos coloidales. Algunos polvos de rocas favorecen la dispersión de las partículas de cemento provocando la mejor distribución e hidratación de las mismas.~~

e) Los cementos con alto contenido en SO_3 o AC_3 (o ambos a la vez) son perjudiciales porque producen una gran abundancia de geles.

f) Si no hay más remedio que utilizar áridos con microporos (más de 10% de capilares de diámetro inferior a 5μ) o cementos que provoquen la formación de matrices micropóricas, es necesario desecar los hormigones para que, al evaporarse el agua, las paredes y células de los capilares se contraigan, haciendo que los espacios que quedan sean más grandes y que el aire venga a sustituir el agua dentro de los canalillos.

g) En todo caso, la relación agua-cemento debe ser mínima.

h) La segregación de las pastas de hormigón no es tan perjudicial como se cree puesto que ayuda a expulsar parte del exceso de agua.

i) Un cemento ideal ha de ser aquél que vaya proporcionando paulatinamente gel fresco para rellenar los huecos del gel anterior que se retrae, provocando, además, la cristalización del gel ya envejecido. Es decir, un cemento que se hidrate lentamente, lo cual puede lograrse, o triturando poco el cemento o escogiendo un portland que sea rico en silicato di cálcico.

j) Los hormigones aireados son convenientes en cuanto a su resistencia frente a las soluciones salinas y a la intemperie. Esto se debe, probablemente, a las tres razones que sigue: 1º-Las burbujas de aire están englobadas en películas de líquido que lleva sustancias minerales en disolución, dando, por tanto una mejor distribución del agua y los coloides en la masa. 2º-Las bolsitas de aire en el hormigón fresco son compresibles, lo cual permite cambios volumétricos "elásticos" sin tensiones de ruptura. Este efecto puede prolongarse durante varios años de la vida de un hormigón. 3º-Las masas de hormigón aireado permiten trabajar con relaciones agua-cemento más bajas (ver punto g).
