

Los cementos para trabajos en el mar¹

Inalterabilidad del hormigón ante las aguas peligrosas,
por el profesor Dr. Hans Kühl, Berlin-Lichterfelde

IV. La teoría del gel

Con lo que dejamos expuesto respecto a la composición de las nuevas combinaciones que pueden originarse en la hidratación de los cementos, nada ha quedado afirmado respecto de la forma cómo dichas combinaciones se separan; esto es, si se trata de compuestos amorfos o cristalinos. El hidrato cálcico, el hidroaluminato cálcico y los hidratos complejos que se derivan del hidroaluminato tricálcico pueden ser obtenidos de manera relativamente fácil en forma de cristales bien definidos, lo mismo si se preparan en gran escala que si se trabaja en el microscopio; tal obtención es, en cambio, mucho más difícil cuando de los hidrosilicatos se trata. Se comprende que al principio no se haya dado importancia a esta materia, ya que la teoría de Le Chatelier (aun hoy día ampliamente difundida) sobre el endurecimiento de los aglomerantes hidráulicos atribuye dicho endurecimiento a la formación de compuestos cristalinos, explicando la consolidación por un entretrejido o entrelazado mecánico de dichos productos nuevamente formados.

Profundizando algo más, sin embargo, en las propiedades de los cementos endurecidos, se llega, apartándose de tan sencilla teoría, a la convicción de que la interpretación de los procesos del endurecimiento hidráulico sólo es posible a base de la *teoría del gel*, tal y como fué expuesta y minuciosamente razonada por W. Michaelis². Esta teoría del gel, sólo muy lentamente ha podido ir abriéndose camino, cosa que, en gran parte, ha sido debida a que muchas veces ha sido mal comprendida; las manifestaciones de los señores De la Reguera y Dr. Rengade sobre este tema parecen confirmarlo.

La teoría del gel admite que la consolidación o endurecimiento es el resultado de la formación de estructuras finísimas de dimensiones coloidales. Supone que tales estructuras son un reticulado de finas laminillas entrelazadas o entretrejidas, pero no dictamina acerca de la naturaleza de los elementos de tal microestructura; *pueden* ser amorfos, pero *no es indispensable* que lo sean. En 1922 ya tuve ocasión de exponer³ que en este caso conviene distinguir bien los conceptos de "geloide", "microcristalino" y "amorfo", pues da lugar a equívocos el confundir los calificativos de "geloide" y "amorfo"; un gel, las más de las veces, está constituido por microelementos amorfos, pero puede muy bien asimismo estar estructurado por partículas microcristalinas, cabiendo, entre estos dos casos extremos, todas las gradaciones intermedias.

La teoría del gel a primera vista sólo se distingue

de la de Le Chatelier en que, en lugar de un entretrejido de cristales gruesos, establece la formación de estructuras finísimas y organizadas; sin embargo, la tendencia moderna, en el estudio de los cementos, es a aceptar, cada vez más, la hipótesis de que todos, o cuando menos la mayor parte de los compuestos de nueva formación (y de un modo especial el hidrosilicato cálcico), se separan al principio en forma amorfa, y que las estructuras geloides del cemento que se endurece se forman, en primer término, a base de tales sustancias amorfas. Esta hipótesis está perfectamente de acuerdo con los principios de la química de coloides, ya que, como indicó hace ya muchos años el investigador ruso P. P. de Weimarn, casi todas las sustancias se separan en forma amorfa cuando se precipitan de soluciones concentradas. Ahora bien: como quiera que, efectivamente, todos los nuevos productos que del cemento se forman se originan siempre en el seno de soluciones concentradas, la hipótesis de que, por lo menos en sus primeros momentos, se hallan en estado amorfo está completamente de acuerdo con las bases generales de la química de coloides.

Es preciso suponer que las estructuras coloidales forman al principio un suave elemento de enlace entre los gránulos de cemento, y que poseen las propiedades características de los tabiques celulares semipermeables; al principio dejan pasar todavía agua pura, pero muy pronto impiden la circulación de las sales del cemento que se endurece. A medida que va adelantando la hidratación de los gránulos de cemento, las mencionadas estructuras van haciéndose cada vez más compactas y menos permeables al agua, de forma que el cemento endurecido acaba por alcanzar un elevado grado de impermeabilidad.

Como acertadamente observan los Sres. De la Reguera y Dr. Rengade, las estructuras en cuestión experimentan un envejecimiento. Este proceso de envejecimiento se produce por efecto de que los átomos y las moléculas, que en los productos amorfos todavía se hallan dispuestos irregularmente y de manera desordenada, van orientándose unos respecto de los otros, adoptando una determinada disposición u orden, proceso que se puede reconocer observando que el cemento fraguado empieza a ejercer efectos sensibles sobre la luz polarizada. De manera muy gradual las estructuras de nueva formación van adquiriendo un grano más grueso, sin que ello implique, en ningún modo, pérdida o merma de su cohesión; ésta subsiste en toda su integridad, aun en el caso de cementos muy antiguos, en los que la mayor parte de los productos que al principio se separaron en forma amorfa se han ido volviendo progresivamente microcristalinos. Un cemento, por viejo que sea, sigue siendo siempre algo muy diferente de un grosero tejido de cristales mecánicamente entrelazados: posee siempre estructura coloidal, y tanto al principio como al fin debe ser considerado como un gel cuyas propiedades típicas en nada quedan debilitadas por el proceso de envejecimiento, sino, al contrario, resultan reforzadas.

Para que el lector puede formarse una idea de la manera como yo imagino la estructura del cemento

¹ Véase el número anterior, página 86.

² "Kolloid-Zeitschrift", V, tomo 1, pág. 9, 1909.

³ "Protok. der Verh. d. Vereins Deutsche Portl. Zem. Fabr.", 1922, pág. 108.

endurecido, me referiré a los ejemplos naturales que ofrecen el pedernal y el ágata. En el ágata, sobre todo, se puede claramente reconocer que en su principio debió producirse en forma de estructura coloidal amorfa. Al ir envejeciendo, parte de la sílice, que en un principio era amorfa, va transformándose en cuarzo microcristalino, de manera que el producto final está constituido por finisimos cristallitos de cuarzo que, junto con las cantidades de sílice conservada en forma amorfa, forman la estructura geloides del ágata. Así como el envejecimiento no altera las típicas propiedades mecánicas del ágata, y no reduce ni su dureza ni su impermeabilidad al agua, tampoco puede admitirse que altere las de las estructuras geloides, que durante el endurecimiento del cemento se forman con los productos de su fraguado.

V. Fenómenos de expansión

Los Sres. De la Reguera y Dr. Rengade creen poder explicar la expansión cálcica del cemento portland admitiendo que el óxido cálcico libre del cemento se hidrata, aumentando de volumen y disgregándose. En particular, creen deber rechazar una teoría por mí desarrollada, según la cual la expansión debe ser atribuida a las cantidades de óxido cálcico que se encuentran en estado de solución sólida. Los Sres. De la Reguera y Dr. Rengade opinan, también, que mi teoría no habrá logrado muchos adeptos, además de afirmar que yo mismo reconozco no estar muy seguro del verdadero estado en que se encuentra aquella "cal libre disuelta".

Aun cuando las manifestaciones que los señores De la Reguera y Dr. Rengade hacen, referentes a Le Chatelier y a otros investigadores, son aparentemente tan claras y sencillas, creo, sin embargo, que, profundizando un poco más en los hechos, los fenómenos que observamos en la expansión no pueden ser explicados a base de las consideraciones que desarrollan dichos señores.

Los Sres. De la Reguera y Dr. Rengade relacionan la expansión con una regla completamente general, según la cual se presentan fenómenos de disgregación siempre que en la reacción intervienen sustancias en estado sólido, y no se producen, en cambio, si la reacción tiene lugar entre fases fluidas. Creo que no es admisible esta regla, dicha así, de manera tan general. Conocemos numerosas reacciones en estado sólido, en las que en modo alguno se producen disgregaciones; así, por ejemplo, la formación de una costra sólida de Fe_3O_4 sobre el hierro candente, o la transformación del silicato dicálcico α en silicato dicálcico β ; en otros casos parece confirmarse, en cambio, la teoría de los Sres. De la Reguera y doctor Rengade, como sucede, por ejemplo, al transformarse el silicato dicálcico β en silicato dicálcico γ .

Tal vez dichos señores pensaban en esta última reacción, precisamente, tan conocida y familiar para los químicos del cemento, como modelo de "disgregaciones", y se imaginaron que todas las reacciones en que interviene una fase sólida tienen que dar lugar a disgregaciones, siempre que impliquen aumento de volumen. Aun cuando hubiese sido así, tampoco serviría la explicación, porque la formación del hidróxido cálcico, partiendo de sus componentes óxido cálcico y agua, se realiza, *no con aumento de volumen*, sino precisamente *con disminución de volumen*. Suma-

mente difundida está la opinión de que la hidratación del óxido cálcico trae consigo un aumento de volumen; así vemos también a los Sres. De la Reguera y Dr. Rengade referirse al entumecimiento o hinchazón de la cal al ser apagada en la forma corriente. Y, con todo, tal opinión es errónea. Fácil es convencerse de ello tomándose el trabajo de medir con cuidado el volumen de la cal y del agua antes de su combinación, y midiendo luego el volumen del hidrato cálcico formado. Para ello, échese en un matraz de cuello graduado cantidades convenientes de agua y de cal, procurando que ésta esté muy intensamente cocida (con el fin de que el proceso de apagado no se inicie hasta al cabo de cierto tiempo, y luego se desarrolle lentamente); hágase que el nivel del líquido, antes de comenzar la reacción, coincida con una determinada marca o división de la graduación, y procúrese una temperatura excesiva en el contenido del matraz; en tales condiciones se observará que el nivel del líquido durante el curso del proceso de hidratación *va descendiendo*. Así, pues, *el proceso de apagado da por resultado una contracción, y no una dilatación*. Esta demostración la di ya a conocer en el año 1912, no sólo para el apagado de la cal, sino también para el proceso de hidratación de los cementos portland normales y de los expansivos¹. Comprobado así que la suma del óxido cálcico y del agua representa un volumen mayor que el del hidróxido cálcico producido, resulta imposible deducir que el proceso de hidratación dé lugar a una dilatación que pueda ser considerada como la causa de que un cemento sea expansivo.

Se ha tratado de encontrar otras causas para explicar la expansión, tales como la que durante algún tiempo la atribuyó al efecto de cierta presión de cristalización. El concepto de la presión de cristalización no se halla explicado con mucha claridad en la mayor parte de los autores. Algunos de ellos creen que se trata de fuerzas dirigidas, semejantes a las que hacen que los cristales tiendan a crecer preferentemente en determinadas direcciones del espacio. También yo sostuve en otra época dicha opinión; sin embargo, actualmente debo reconocer que es falsa. Los cristales se adaptan a las condiciones del espacio en que se encuentran al producirse la cristalización, y, en todo caso, las fuerzas que determinan su crecimiento preferente en determinadas direcciones son de magnitud tan reducida, que no pueden ser causas suficientes de expansión.

Otros autores, bajo el nombre de fuerzas de presión de cristalización, comprenden aquellas fuerzas que hacen que un sistema en curso de cristalización aumente de volumen. Existen, efectivamente, numerosos casos en que el volumen del líquido, aumentado en el de los cristales, es mayor que el de la solución formada por ambas sustancias. Así, cuando una solución ha llegado a cierto grado de sobresaturación y empieza a cristalizar, puede realmente desplegar esfuerzos de presión semejantes a los del agua cuando se solidifica y forma el hielo. No obstante, tal ensayo de explicación resulta también poco verosímil, porque las soluciones que en el cemento se producen (especialmente el agua de cal) son de una concentración tan débil, que las presiones que pudiesen producirse en la cristalización muy difícilmente podrían llegar a

¹ "Tonindustrie Zeitung", 1912, pág. 1331.

producir esfuerzos del orden necesario para explicar la expansión.

En vista de que todos los demás intentos de explicación han resultado infructuosos, no hay otro remedio que atribuir la expansión a *fenómenos de emigración*. Es preciso suponer que el óxido cálcico libre atrae hacia sí, para su hidratación, el agua que se encuentra a su alrededor, y que de esta manera, en el punto en que se encuentra el óxido cálcico se produce una acumulación de materia a consecuencia de la cual se originan presiones que dan lugar a efectos de expansión y a disgregaciones. *Sólo desde este punto de vista* es lícito afirmar que la hidratación del óxido cálcico para formar hidróxido cálcico se realiza con aumento de volumen. No quiero entrar aquí en más detalles acerca de las hipótesis que en apoyo de esta teoría es necesario hacer sobre el agua químicamente combinada, el agua semicombinada y sobre el agua retenida mecánicamente. Renuncio asimismo a explicar con detalle que se llega también, como es natural, a *procesos de emigración o de transporte* cuando se recurre a consideraciones osmóticas para solucionar el problema de la expansión.

En cambio, necesito indicar que tampoco la teoría de la emigración o del transporte de materia permitiría explicar la expansión cálcica, de no hacerse asimismo una determinada hipótesis acerca del *curso* que sigue dicha reacción, desde el punto de vista *tiempo*. Aunque se ha comprobado que la cal pasada de cocción se apaga con gran lentitud, resulta sumamente improbable que se hidrate más lentamente, por ejemplo, que los silicatos cálcicos contenidos en el clinker del cemento portland. Nos encontramos aquí con contradicciones cuando se quiere admitir, por ejemplo, que el silicato tricálcico se hidrata en primer lugar y forma cemento endurecido, y que luego, con posterioridad, el óxido cálcico destruye su estructura al realizar, a su vez, la hidratación.

Alguna razón debe existir para que se retrase la hidratación del óxido cálcico en mayor grado que lo efectúa el calentamiento hasta la temperatura de cocción del cemento. Tal vez haya que suponer que los cristallitos de óxido cálcico se hallan embebidos en los gránulos de cemento, y en virtud de ello permanecen protegidos en forma puramente mecánica contra la acción del agua, en tanto que el proceso de hidratación no ha logrado penetrar hasta el interior de los gránulos de cemento. Esta hipótesis no explica, sin embargo, por qué no es posible eliminar la expansión, ni aun recurriendo a una molturación extremadamente fina. Es preciso admitir que el óxido cálcico se halla todavía más protegido de lo que puede resultar de una película o costra mecánica, y entonces nos hallamos ante la hipótesis de una *solución sólida* del óxido cálcico libre, que ya he mencionado, entre otras cosas, en la primera parte de este artículo. Creo que, además del óxido cálcico mecánicamente incluído, es el óxido cálcico en solución sólida lo que hay que considerar principalmente como la causa de la expansión.

Sólo mediante esta hipótesis pueden explicarse todos los fenómenos de expansión que se observan en las cales hidráulicas pasadas de cocción y mal apagadas. Como quiera que los gránulos expansivos, tan temidos, que contienen esas clases de cales expansivas no han sido sometidos a temperaturas más elevadas que las porciones restantes del aglomerante en cuestión, no es posible explicar su expansión atribu-

yéndola a una mayor temperatura de cocción. Por esta razón creo que también en esas clases de aglomerantes la expansión es producida por la fracción de óxido cálcico que se encuentra en forma de solución sólida en un magma residual vítreo, que también contienen dichos aglomerantes.

Los Sres. De la Reguera y Dr. Rengade aplican también su teoría de la aparición de disgregaciones, cuando las reacciones tienen lugar entre sólidos, al caso de la expansión por el yeso, opinando que ésta se presenta cuando el yeso actúa sobre un aluminato sólido, y no cuando no se dan estas circunstancias.

Los Sres. De la Reguera y Dr. Rengade se apoyan, para confirmar tal teoría, en las investigaciones de Lafuma; no obstante, a mi modo de ver, Lafuma no ha sido, en este caso, del todo bien interpretado. Ciertamente que los hidroaluminatos cálcicos, *una vez logrado el equilibrio*, sólo tienen una solubilidad muy reducida en el agua; de todos modos, como ya he indicado antes, la solubilidad del hidroaluminato tricálcico es sensible (46 mg por litro en el agua de cal) y la del hidroaluminato dicálcico es todavía bastante mayor (575 mg por litro de agua). En cambio, *durante el curso de la reacción* tienen lugar concentraciones de alúmina mucho mayores, porque el grano del cemento que se está endureciendo alimenta constantemente la solución con nuevas cantidades de aluminato cálcico, que se hidratan en dicha solución. Así es que, durante el proceso de hidratación, hay siempre en disolución una cantidad considerable de alúmina; circunstancia que hace que, en este punto, la teoría de los Sres. De la Reguera y Dr. Rengade se halle falta de base.

La pregunta relativa a cómo tiene lugar, en realidad, la expansión por el yeso (y la expansión por el cloro) tiene que ser contestada desde otro punto de vista, pero la contestación es muy sencilla. Basta considerar el hecho de que, con las pequeñas cantidades de hidroaluminato cálcico disuelto que se encuentran en el cemento portland en proceso de endurecimiento, se forma el sulfoaluminato o el cloroaluminato, según que la reacción se efectúe con el yeso disuelto o con el cloruro cálcico. Esta circunstancia explica también la ausencia de la expansión por el yeso (y de la expansión por el cloro) en el cemento de alúmina, porque en su endurecimiento no se forma hidroaluminato tricálcico, sino sólo hidroaluminato dicálcico; los compuestos complejos sulfoaluminato y cloroaluminato cálcicos se derivan, única y exclusivamente, del aluminato tricálcico; pueden formarse en presencia del yeso o del cloruro cálcico, respectivamente, en el cemento portland que se halla en proceso de endurecimiento, pero no se forman en el cemento de alúmina.

Conviene hacer observar, finalmente, que al mecanismo de la expansión por el yeso y por el cloro pueden aplicarse las mismas consideraciones expuestas ya con motivo de la expansión por la cal: la formación del sulfoaluminato (y del cloroaluminato) no implica por sí misma aumento de volumen; la expansión sólo se puede explicar por el hecho de que ambas sales, que contienen una cantidad considerable de agua de cristalización, requieren para su formación la absorción de una elevada dosis de agua, a condición de que se admita que en este caso también *emigra* el agua hacia aquellos puntos en que existe la tendencia a la formación de una de ambas sales;

de este modo, en tales puntos se produce una acumulación de materia que da lugar al efecto expansivo.

VI. La inalterabilidad química

Quando se desea estudiar el problema de la inalterabilidad química de los cementos es necesario, ante todo, evitar las generalizaciones indebidas. Aun cuando, indudablemente, se conocen muchos casos en que las obras de cemento han sido deterioradas por la acción destructora de índole química de las aguas y soluciones agresivas, no debe dejarse de mencionar que todavía es mucho mayor el número de los casos en que las obras de cemento *han resistido con éxito satisfactorio* la acción de las soluciones agresivas. Conviene sentar esto por adelantado, ya que es frecuente el deducir conclusiones de carácter general a base de algunas observaciones aisladas.

No hace muchas semanas que las sesiones de la Nueva Liga Internacional para el Ensayo de Materiales, celebradas en Zürich, han aportado muy interesantes datos al problema de la inalterabilidad de los cementos contra las soluciones agresivas. Así, por ejemplo, el profesor Wiegner¹ disertó acerca de unas experiencias realizadas en Suiza, y explicó que, de seis clases de tubos de hormigón fabricados con cemento portland por Casas de gran nombradía, unos resultaron inalterables contra los ataques químicos, en tanto que otros se deterioraron, sin que pudiera caber duda alguna acerca de la buena calidad de los cementos empleados en su fabricación. Interviniendo entonces en la discusión, dirigió a la Asamblea la pregunta de si creían que en aquellos cementos portland contenidos en los tubos que habían dado buenos resultados se había desprendido o no *cal libre* durante su endurecimiento. No obtuve contestación alguna a esta pregunta.

Igualmente instructivas fueron las notas del profesor Roos af Hjelsäter acerca de la experiencia recogida en Suecia, donde suelen tener gran importancia los deterioros de las obras hidráulicas en los saltos de agua por la acción de las aguas, excesivamente puras, de las montañas. Como resumen de diversos trabajos científicos, el profesor Roos af Hjelsäter² comunicó que, al deslavarse el cemento portland por la acción del agua pura, se disolvían siempre las mismas cantidades de cal, tanto si ésta se hallaba "bloqueada" por la adición de puzolanas (en el sentido a que aluden los Sres. De la Reguera y doctor Rengade), como si no lo estaba y se trataba de cemento portland puro.

Los Sres. De la Reguera y Dr. Rengade dieron cuenta de ensayos en los que unas probetas de cemento aluminoso resistieron perfectamente la acción de un chorro de agua pura, en tanto que las probetas de comparación de cemento portland, bajo la acción del chorro en cuestión, durante el mismo tiempo fueron corroyéndose o excavándose gradualmente. Tales resultados no deben generalizarse sin un exacto conocimiento de todos los detalles y modalidades del ensayo, y parece poderse decir esto con tanto mayor motivo cuanto que, según el profesor Roos af Hjelsäter explicó en Zürich, se ensayaron unas probetas

de cemento aluminoso bajo la acción del agua, y, en contraposición con los resultados citados por los señores De la Reguera y Dr. Rengade, se comprobó en ellas una resistencia o inalterabilidad relativamente escasa del cemento aluminoso. En particular, se ha comprobado en Suecia¹ que, al deslavarse el cemento de alúmina, sólo se disolvía una cantidad de la cal igual a la mitad de la que se disuelve cuando se deslava el cemento portland, pero que, en cambio, se disolvía una cantidad de igual importancia de alúmina. Hice también algunas observaciones sobre esta cuestión, y pregunté a la Asamblea qué consideraba más peligroso: si el que se disuelva y deslave *sólo uno de los elementos componentes* (la cal en el caso del cemento portland fraguado), o bien que se disuelvan y deslaven *los dos elementos componentes, cal y alúmina*, del cemento aluminoso.

Estas consideraciones demuestran ya claramente que el problema de la inalterabilidad de los cementos, contra el agua muy pura y contra las soluciones agresivas, no puede ser solucionado con sólo unas pocas explicaciones químicas, sino que se trata de un conjunto de problemas sumamente complicado.

Todas las reacciones mencionadas por los señores De la Reguera y Dr. Rengade *pueden* tener lugar si se reúnen las condiciones necesarias para que así suceda: el hidrato cálcico, que en el endurecimiento del cemento portland queda en libertad, *puede* ser disuelto y arrastrado cuando la masa del cemento es atravesada por una circulación de agua pura, y *puede* también reaccionar con los sulfatos y cloruros (así como con las sales de otros ácidos) cuando dichas sales penetran en el interior de la masa del cemento. No obstante, es necesario indicar con toda insistencia que, además de las reacciones señaladas por los señores De la Reguera y Dr. Rengade como muy peligrosas, *tienen* que desarrollarse también *otras reacciones* de diversas clases, tan pronto un hormigón poroso sea atravesado por una circulación de agua o de soluciones agresivas. Sólo cuando se tengan en cuenta también estas reacciones se podrá juzgar debidamente acerca de la inalterabilidad química de un hormigón. A continuación vamos a indicarlo con algo más de detalle todavía.

Quando circula agua pura a través de una masa de cemento portland en proceso de endurecimiento, indudablemente lo primero que se disuelve es el hidrato cálcico formado durante dicho proceso. Cuando toda la cal se ha disuelto se produce, como segunda fase, la descomposición de los aluminatos; empieza por transformarse el hidroaluminato tricálcico en hidroaluminato dicálcico, y este último, a causa de su solubilidad no despreciable, va sufriendo un progresivo deslavado, de manera semejante a lo ocurrido antes con el hidrato cálcico. A medida que va desapareciendo la cal va decreciendo la concentración en cal de la fase líquida, y entonces el hidrosilicato cálcico va sufriendo progresivamente también los efectos de la hidrólisis, hasta que, al final, de toda la masa del cemento no queda más que un esqueleto silíceo flojo e inconsistente, desprovisto de toda resistencia.

Ahora bien: ¿cómo suceden las cosas en el caso en que, conservándose iguales las demás circunstancias, el cemento atravesado por el agua no sea ya un cé-

¹ Informe previo del Congreso de Zürich, pág. 18 (1931).

² Informe previo del Congreso de Zürich, pág. 20 (1931).

¹ Informe previo del Congreso de Zürich, pág. 20 (1931).

mento portland puro, sino un cemento portland en el que el hidrato cálcico libre haya sido "bloqueado" mediante una adición de puzolana? La respuesta a esta pregunta es extraordinariamente sencilla. Si prescindimos de que un cemento puzolánico bien preparado y bien endurecido contiene hidrosilicato cálcico en lugar de contener hidrato cálcico libre, en todo lo demás no difiere lo más mínimo de un cemento portland puro. Bajo la acción del agua se produce en él la hidrólisis, de manera exactamente igual que en el portland puro; sólo sucede que las reacciones son algo más lentas, por no existir la primera fase de las mismas, o sea la del deslavado del hidrato cálcico, y, a consecuencia de ello, la estructura del mortero puede conservar cierta compacidad durante más largo tiempo, y porque todas las reacciones tienen lugar con alguna mayor lentitud. Pero, en último término, y considerado desde el punto de vista puramente químico, el cemento portland adicionado con puzolana, cuando es permeable, en nada difiere su modo de conducirse del del cemento portland puro. Desde luego, si las condiciones del ensayo se hallan convenientemente elegidas, puede incluso eliminarse el retraso que dejamos mencionado, como lo indican los trabajos reseñados por el profesor Roos af Hjelmsäter en Zürich.

Cuando el mortero de cemento portland sea atraesado por soluciones salinas, en lugar de serlo por agua sola, las sales disueltas reaccionarán, según fuere su naturaleza, con los elementos componentes del cemento endurecido. En casos aislados, cuando, por ejemplo, penetran en el mortero soluciones de sales magnésicas, puede tener lugar un intercambio de bases, de tal manera, que, en lugar de quedar hidrato cálcico libre, quede hidróxido magnésico libre. Mucho más peligrosas son, sin embargo, aquellas reacciones en que se forman sales complejas, con abundante agua, tales como el sulfoaluminato cálcico y el cloroaluminato cálcico. Ahora bien: ¿es posible que una adición de trass o de otras materias puzolánicas logre impedir la producción de dichas sales complejas, tan peligrosas? Seguramente, no. Aun cuando casi la totalidad del hidrato cálcico libre se combinara con las puzolanas, la concentración cálcica de la fase líquida (agua mecánicamente retenida) no descendería por debajo de la concentración correspondiente al agua de cal saturada. Y, desde luego, mientras en el mortero haya agua de cal saturada, el hidroaluminato tricálcico no se hidroliza, y no puede, por consiguiente, eliminarse la causa de las expansiones por el yeso y por el cloro.

De la misma manera que un hormigón de cemento portland permeable no queda protegido contra los ataques químicos por la sola presencia de las puzolanas, tampoco puede decirse que el empleo del *cemento de alúmina* proporcione, en este punto, una protección de carácter general. Como el hidroaluminato dicálcico que se forma al endurecerse el cemento aluminoso posee siempre cierta solubilidad en el agua, aun cuando dicha solubilidad sea algo menor que la del hidrato cálcico, se produce un proceso de deslavado, exactamente lo mismo que en el caso del cemento portland, y como en el cemento de alúmina endurecido se halla casi totalmente, en forma de hidroaluminato dicálcico, resultará que la cal (y con ella casi igual cantidad de alúmina) del mortero de cemento aluminoso sometido a la circulación de agua

pura a través de su masa desaparecerá completamente, lo mismo que cuando se trata de un mortero de cemento portland.

En cambio, el cemento aluminoso dará pruebas de marcada inalterabilidad en todos aquellos casos en que sólo sea de temer la formación de sales complejas. No existiendo aluminato tricálcico no pueden formarse las sales complejas, y comparto completamente la opinión de los Sres. De la Reguera y doctor Rengade cuando sostienen que el peligro de la expansión por el yeso y causas análogas puede eliminarse sea fabricando cemento sin alúmina (cementos férricos), sea reduciendo la proporción de cal de los cementos en forma suficiente, para que no pueda formarse hidroaluminato tricálcico (cementos aluminosos). No debe, sin embargo, perderse de vista que esta elevada inalterabilidad sólo se refiere a la formación de sales complejas; en cambio, contra los fenómenos causados por disoluciones producidas, por ejemplo, por ácidos diluidos, sales amoniacales y sustancias análogas, el cemento aluminoso es tan sensible como puedan serlo los otros cementos; esto no sólo se deduce de consideraciones teóricas, sino que se ha comprobado también repetidas veces en la práctica.

Como conclusión de cuanto queda expuesto se deduce que no existe en absoluto ningún aglomerante cálcico capaz de resistir los efectos de una circulación de agua pura a través de su masa, y que, con relación al ataque por soluciones salinas agresivas, los distintos aglomerantes ofrecen solamente diferencias de grado, pero ninguna de ellas fundamental. El único medio de defensa que puede establecer una protección eficaz de las obras de hormigón contra los ataques químicos es el de hacer *que la masa del hormigón sea impermeable*. Si las soluciones agresivas no pueden penetrar en el hormigón, no pueden destruirlo. Siempre se producirán, desde luego, efectos superficiales; pero tienen una importancia muy secundaria y son más bien útiles que perjudiciales, porque la descomposición superficial origina una capa fangosa protectora que resguarda el cemento del hormigón, que recubre contra nuevos ataques. Sólo así se comprende que haya obras sumergidas en el mar y en aguas salinas agresivas que, a pesar del contacto de tan peligrosos elementos, se hayan mantenido incólumes durante años y años. Se trata, pues, única y exclusivamente, de hacer el hormigón compacto; cuando se logra esto, se tiene un hormigón altamente inalterable, tanto contra el agua pura como contra las soluciones agresivas.

En cuanto a los medios por los cuales puede llegarse a obtener una buena compacidad de las estructuras, son de dos clases: *físicos y químicos*; entre los primeros, y de acuerdo con las experiencias de Suiza¹, cuento, ante todo, la debida ejecución de la obra, a base de una conveniente composición granulométrica de los materiales inertes, una adecuada elección de las proporciones de la mezcla entre cementos y agregados, una baja dosificación de agua y una preparación y puesta en obra lo más cuidadosas posible. Entre los medios o garantías *químicas*, la más importante es la que ofrece la elección de un cemento que en el plazo más corto posible al-

¹ Wiegner: Informe previo para el Congreso de la Nueva Liga Intern. de Zürich (1931).

cance una reducción muy importante en el valor de la permeabilidad. Por este motivo son muy adecuados para las construcciones sumergidas en agua de mar los cementos de endurecimiento rápido, porque con ellos se obtiene una rápida formación de la estructura geloides, que reduce al mínimo la permeabilidad al agua. Son recomendables cuantos medios auxiliares favorezcan un rápido endurecimiento, así como también la agregación de productos químicos que lo estimulen, como, por ejemplo, el aumento de la dosis de yeso, adición de cloruros, nitratos y otros productos semejantes en pequeñas cantidades.

Entre los medios auxiliares cuya aplicación permite elevar la inalterabilidad química de las obras de hormigón figura también la adición de *puzolanas*, siempre que, desde luego, tal adición se efectúe en la forma debida. Esta condición previa no se cumple si el problema se considera sólo en su aspecto químico, y únicamente desde el punto de vista de que entre en combinación el hidrato cálcico libre, ya que tal combinación es completamente superfina, en el caso de que el hormigón sea bien compacto, y de nada sirve si el hormigón es permeable. Por esto, la adición de puzolanas debe ser considerada, ante todo, desde el punto de vista de favorecer la compacidad física del hormigón, cosa que, a su vez, presupone que su acción, más que a la combinación con el hidrato cálcico libre, se debe al aumento de volumen o entumecimiento de las puzolanas. *Este entumecimiento de las puzolanas bajo la acción del hidrato cálcico libre es el proceso que hay que procurar se produzca, pues mediante él se logra la compacidad y, en consecuencia, la protección del hormigón.* De esto se deduce asimismo que en ninguna manera es indispensable eliminar totalmente el hidrato cálcico libre, tan injustamente temido, sino que la finalidad perseguida queda ya alcanzada cuando, bajo la acción del hidrato cálcico, las puzolanas adicionales adquieren el entumecimiento mayor posible.

Resulta, además, de estas consideraciones que en el hormigón no debe nunca *reemplazarse* una parte del cemento por puzolanas, pues las ventajas apetecidas sólo se logran a condición de que las puzolanas se incorporen al hormigón como material suplementario y *adicional*, además de la cantidad íntegra de cemento. La sustitución de parte del cemento por puzolanas reduce siempre la velocidad de endurecimiento del hormigón, retrasándose así la formación de la estructura geloides impermeable, y esta desventaja no queda entonces compensada por el entumecimiento de la puzolana, por producirse éste muy lentamente y hacerse sensible únicamente al cabo de muchas semanas. En resumen: la adición de puzolanas al hormigón que tenga que hallarse expuesto a los ataques químicos sólo se halla justificada, y responde a la finalidad propuesta, en el caso en que dichas puzolanas sustituyan a parte de los agregados inertes, y nunca en el caso en que reemplacen a parte del aglomerante ¹.

El empleo del *cemento aluminoso* figura también entre los medios a que puede recurrirse, para impedir los deterioros debidos a las aguas agresivas. Pero, como quiera que el cemento de alúmina está sujeto a la acción de la hidrólisis, exactamente lo mismo que los otros cementos, su empleo sólo podrá tener éxito en el caso en que los deterioros a temer puedan únicamente ser ocasionados por la formación de sales compuestas, derivadas del hidroaluminato tricálcico. En los casos en que se sepa que hay que contar con ataques de soluciones sulfatadas o cloruradas de gran concentración, es recomendable el empleo de los cementos férricos y del cemento aluminoso.

Desde luego, hay que tener siempre el máximo cuidado en la puesta en obra de los materiales y no olvidar nunca que los cementos de alúmina, si bien tienen una elevada resistencia inicial y gran inalterabilidad ante determinadas soluciones salinas, adolecen también de marcados inconvenientes. Entre ellos figura la desfavorable relación entre sus resistencias a la tracción y a la compresión, cosa que favorece la formación de grietas finas, sumamente peligrosas si la obra tiene que estar sujeta a grandes fluctuaciones de temperatura (y a la acción de las heladas), o bien a los efectos de los líquidos agresivos. Los deterioros que pueden originarse por efecto de la aspiración capilar que producen las grietas muy finas (muchas veces invisibles), como penetran muy rápidamente a gran profundidad en la masa, son mucho más peligrosos que los que se derivan de una reacción que vaya avanzando lentamente desde el exterior hacia el interior.

El peligro de la formación de grietas en los cementos de alúmina es tanto mayor cuanto que dichos cementos desarrollan un calor de reacción mucho mayor que los cementos portland. El hormigón de cemento aluminoso en grandes masas puede llegar a calentarse en tal forma, que las dilataciones y contracciones de origen térmico den origen, ya por sí solas, a una marcada tendencia a la formación de grietas. Finalmente, si se tiene en cuenta que casi todos los cementos aluminosos son mucho más delicados en lo que concierne a las excesivas dosis de agua y a los efectos de una desecación prematura, en la mayor parte de los casos se verá que, en resumidas cuentas, es más conveniente poner el mayor cuidado posible en la preparación de un buen hormigón de cemento portland, haciéndolo lo más compacto e impermeable que se pueda, que no exponerse a los peligros que por ahora todavía implica el empleo de los cementos aluminosos. Sólo debería afrontarse este riesgo en el caso concreto de la existencia de determinados agentes o factores químicos, aquellos precisamente que dan lugar a la formación de las sales compuestas derivadas del hidroaluminato tricálcico.

¹ Para datos justificantes de esta tesis, véanse las investigaciones de Burchartz, en el Laboratorio Nacional de Ensayo de

Materiales de Berlín-Dahlem; "Mitteilg. aus d. Materialprüfungsamt", 1923, pág. 53; revista "Zement", 1923, pág. 269.