

REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS

PUBLICACION TECNICA DEL CUERPO DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

DIRECTOR

D. MANUEL MALUQUER Y SALVADOR

COLABORADORES

LOS INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

SE PUBLICA LOS JUEVES

Dirección y Administración: Plaza de Oriente, 6, primero derecha.

Los cementos en las obras marítimas.

Trabajando hace ya años en obras de mar he necesitado dedicar bastante atención al estudio de los cementos. Todos los Ingenieros de puertos estarán seguramente de acuerdo en que no hay otra cuestión de tanta importancia y trascendencia en las obras marítimas como la referente á la estabilidad, ante la acción destructora del agua del mar, de los morteros y hormigones. Como que va en ello el porvenir de todas las obras que se están construyendo.

He de advertir de antemano lo difícil que es el estudio de este problema. Digamos, desde luego, que radica la principal dificultad en que ignoramos lo que es un cemento; y en que igualmente ignoramos en lo que consiste el proceso de su fraguado. Las cualidades de los silicatos mono, di y tricálcicos, las de los aluminatos de cal, la acción del hierro, de la alúmina y de la magnesia, los efectos que la hidratación produce en los silicatos, todo ello está envuelto en vaguedades, sin que haya nada claro y definido que sea aceptado por todos y que esté comprobado por la experiencia.

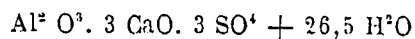
Y si esto es así, debo salvar mi aparente atrevimiento al traer aquí este estudio casi inútil, puesto que ni llego á ninguna conclusión, ni hago afirmación categórica alguna, ni casi me atrevo á dar una opinión. Para deducir tan sólo que éste es un problema difícil y que se debe seguir estudiando no hace falta dar publicidad á mi trabajo. Creo, sin embargo, que para los que de esto se preocupan, pueda ser de alguna utilidad el conocer las investigaciones que he llevado á cabo. Así podrán servir de punto de partida para algunos, de confirmación para otros si sus observaciones concuerdan con éstas ó de origen de nuevas indagaciones si llegamos á resultados diferentes.

Causas de la descomposición.

No se conocen bien cuáles son las causas de las alteraciones que sufren los cementos sumergidos en el mar. Una opinión muy generalizada es la de que la descomposición es debida á la acción del sulfato de magnesio del agua del mar al reaccionar con la cal y formar sulfato de calcio que aumenta de volumen y desagrega la masa. No toda la cal pasa al estado de sulfato; una parte de ella, en virtud de una doble descomposición, puede convertirse en cloruro de cal. Lo mismo el cloruro que el sulfato se disuelven y queda en definitiva la cal sustituida por una masa sin consistencia, cuyo principal elemento es la magnesia.

Esta fué la opinión de Vicat, que hoy está muy extendida, pero que no todos aceptan en absoluto.

Según Meyer, el sulfato de magnesia reacciona con el silicato tricálcico del cemento, formando óxido de magnesio hidratado y sulfato de cal; éste actúa sobre la alúmina y la cal libre y forma un sulfoaluminato de cal de la fórmula



que cristaliza y que aumenta mucho de volumen. Cuando ya no hay cal, el sulfoaluminato sigue reaccionando sobre las sales de magnesia, formando óxidos de alúmina y magnesia hidratados, sulfato de cal y cloruro de cal.

Muchos comparten esta opinión en cuanto á la formación del sulfoaluminato de cal, y á los perjudiciales efectos del mismo por su gran aumento de volumen, pero no puede admitirse sin reservas que el sulfato de magnesia ejerza su acción sobre el silicato tricálcico, pues ya sabemos que hasta se duda que exista ese silicato.

Otra opinión, y ciertamente de las mejor fundamentadas, es la que atribuye el principal papel en las desintegraciones al exceso de alúmina atacable, afirmando la inestabilidad de los cementos aluminosos. Fabricantes hay que fían la bondad de su cemento á la escasez de alúmina, y hay procedimientos de fabricación fundados en la sustitución de ésta por el hierro, hallándose constituida la mezcla de origen por carbonato de cal, sílice y óxido de hierro.

No falta quien crea que las descomposiciones son debidas á la simple acción del ácido sulfúrico, y W. Thörner cita un caso de destrucción del hormigón, de un dren que daba paso á las aguas de un pantano que contenían mucho ácido sulfúrico; se notaron los primeros síntomas á los seis meses; el cemento se coloreaba de rojizo ó verde oscuro, y se deshacía con un cuchillo. La mayor parte del cemento estaba convertida en sulfato de cal, sobre todo entre los niveles extremos del agua.

Como la cantidad de ácido sulfúrico era muy grande (86,9 gramos por litro) no puede equipararse este caso al del agua del mar, y si sólo deducir de él el perjudicial efecto del mencionado ácido y la necesidad de analizar químicamente el cemento rechazando el que lo contenga en cantidad excesiva.

Le Chatellier y Tärnebohm, estudiando el cemento al microscopio, identificaron cuatro elementos, á los que llamaron alita, belita, celita y felita, diferentes por su color y propiedades ópticas. H. Kappen, en 1905, afirmó la desintegración espontánea de los silicatos de cal cuando se había mezclado la caliza con escoria de los hornos altos. Sus opiniones acerca de la importancia rela-

tiva de la belita y la felita no son concluyentes, y tampoco esta teoría da luz sobre tan intrincado asunto.

Un caso conocemos en que la causa de una avería de importancia se achacó á la presencia del yeso en las arenas de los morteros; probablemente este yeso no haría otro efecto que el mecánico de hinchazón con la consiguiente desagregación de la masa. Como el yeso se añade á muchos cementos, podría en algún caso ser á él debida alguna alteración.

Por último, y para no citar más que las opiniones más importantes, citaremos la de que las descomposiciones se deben á la hidratación de la cal viva. Todos están conformes en que la cal viva, sometida á la alta temperatura de los hornos de cemento, no se hidrata por la acción de la humedad del aire, ni aun por la del agua para la fabricación del mortero, necesitando muchos días, y á veces meses, para convertirse en cal apagada. El apagamiento con su correspondiente aumento de volumen es, según muchos, la causa de la destrucción de las obras.

Estudio de una avería.

He tenido ocasión de estudiar con bastante detenimiento un caso concreto de descomposición de un hormigón.

Se trata de unos bloques en que el cemento de portland entraba en la proporción de 180 kilogramos por metro cúbico, y que después de varios años sumergidos aparecieron totalmente descompuestos. Esta descomposición se presentaba con preferencia en la zona inmediata á la baja mar.

La alteración no era uniforme en toda la masa del bloque. En ella alternaban trozos de buen aspecto y en los que el hormigón se conservaba duro, con otras bolsadas de materia blanda y blanca que se deshacen con las manos.

Lo primero que debía hacerse era el estudiar y analizar la parte descompuesta para poderse dar cuenta de las causas de la desintegración. Así creemos que debería hacerse siempre, y, si posible fuera, centralizando ese estudio en un laboratorio, para que no quedasen dispersas toda la serie de observaciones y datos que se toman siempre cuando una avería de esta clase se presenta.

Dejemos á un lado, por ahora, la pobreza excesiva de un mortero con tan escasa cantidad de cemento. Luego insistiremos sobre ello, y veamos ahora lo que es esa materia blanca y blanda que se nos presenta en los bloques descompuestos.

Repetidos análisis químicos han dado el siguiente resultado:

	Muestra mojada Por ciento.	Muestra seca. Por ciento.
Cal.....	11,26	13,42
Magnesia.....	10,80	12,87
Alúmina.....	7,15	8,52
Sílice y arena.....	29,38	35,01
Acido carbónico.....	17,81	21,22
Acido sulfúrico.....	3,85	4,59
Cloro.....	1,73	2,06
Oxido férrico.....	1,75	2,08
Humedad.....	16,06	0,00
	99,79	99,77

Estas proporciones concuerdan bastante bien con las siguientes formuladas aproximadas:

	Muestra mojada Por ciento.	Muestra seca. Por ciento.
Sulfato cálcico.....	6,54	7,79
Cloruro cálcico.....	2,70	3,22
Carbonato cálcico.....	13,53	16,12
Carbonato magnésico.....	22,66	27,00
Sílice y arena.....	29,38	35,00
Acido férrico.....	1,75	2,08
Alúmina.....	7,15	8,52
Humedad.....	16,06	»
	99,77	99,73

Tenemos con esto bastante para juzgar acerca de las causas de la descomposición de los morteros en este caso que estamos estudiando.

En primer lugar vemos, que no hay efecto mecánico sino-químico, ó, por lo menos, que aquél servirá para favorecer las reacciones, pero que no es el decisivo. Hay, por tanto, que desechar como causa la hidratación de la cal viva, la que, por otra parte, tampoco tardaría años y sí sólo meses en producirse.

Vemos que hay una gran cantidad de magnesia, probablemente en forma de carbonato, y que es natural sea consecuencia de la recación del sulfato de magnesia sobre el carbonato de cal.

La existencia del carbonato de cal se explica fácilmente, ó por haberlo habido en el cemento como materia inerte y haber subsistido sin descomposición, ó por carbonatación posterior espontánea por la acción del aire.

Vemos que hay, ó, mejor dicho, es probable que haya, cloruro cálcico, contribuyendo todo ello á que no sea aventurado el suponer que en esta avería se cae dentro de la causa de descomposición señalada por Vicart.

Es decir, acción de las sales de magnesia del mar sobre la cal, bien directamente, bien por una doble descomposición, en la que se forma el cloruro de calcio, que ha de ser lo mismo que el yeso disuelto por el agua.

Este resultado, unido á la preocupación tan extendida de los deplorables efectos de la cal libre, hizo que estudiase si había algún medio rápido y seguro para determinarla.

Creo que tal medio existe, y vamos á describirlo, pasando antes ligera revista á algunos otros que deben también ser conocidos.

Investigación de la cal libre.

El primer procedimiento que debe mencionarse es el de la prueba del agua hirviendo de Le Chatellier, tan universalmente extendida, y que nosotros aplicamos á diario para la recepción de cementos. Ningún otro tendrá tanta autoridad como éste; basta para tenerla el nombre de su autor.

No da resultado este ensayo más que con la cal recocida, con la que por haberse sometido á una temperatura muy elevada no se apaga en el agua, sino al cabo de mucho tiempo. Así he podido comprobarlo repetidas veces, efectuando esa prueba con cementos, á los cuales había previamente añadido cantidades variables que llegaron hasta un 10 por 100 de cal apagada sin que se notara el menor síntoma de entumecimiento.

Hecha la prueba con cal viva pulverizada, tampoco había hinchazón si la cal procedía de un calero donde la temperatura no había sido más que la suficiente para expulsar el ácido carbónico de la caliza.

Se presentaban, en cambio, las grietas y demás señales de expansión cuando la cal viva añadida se había sometido, bien en

un horno especial, bien por la acción del soplete á una temperatura muy elevada.

En la avería que antes estudiábamos parece que no hay duda de que nada trata de hidratación de la cal, pues si tal fuera, ni la masa descompuesta tendría una alteración química tan esencial como la que en ella se manifiesta, ni habría en esa masa tan gran cantidad de magnesia, ni hubieran tardado años en presentarse síntomas de desagregación, mucho tiempo después de lo necesario para hidratarse la cal por recocida que estuviera.

Esto parece probar que la acción química se ejerce sobre la cal aun después de apagada, y que pueden, por lo tanto, comportarse mal cementos que hayan salido victoriosos de la prueba de Le Chatellier, y que sería muy conveniente tener un procedimiento para investigar la existencia de la cal libre, sea viva ó sea apagada.

He pasado revista á muchos de esos procedimientos, y he de indicarlos ligeramente señalando los resultados obtenidos.

Siguiendo un orden cronológico, empezaré por el de Fresenius, que consiste en medir la alcalinidad del agua, agitada después de añadir una pequeña cantidad de cemento. Los límites que Fresenius dió, han sido abandonados por la Asociación de fabricantes alemanes. Gemmell afirma que el cemento se descompone con la agitación, y que los resultados no son concluyentes porque el agua disuelve la mayor parte de la cal.

Otro procedimiento que tiende á evitar este inconveniente consiste en sustituir el agua por la glicerina, que no disuelve casi la cal. El sistema parece aceptable, pero basta enunciarlo para que se vea no es práctico por su mucha lentitud como ensayo corriente para la recepción de los cementos (1).

Otro sistema de R. Brandenburg, que consiste en hervir el cemento en una disolución saturada de bromuro de amonio en alcohol, no nos ha dado resultado, pues cementos á los que se había añadido previamente cal viva, no han respondido á la prueba como debieran.

Baikoff aplicó una disolución alcohólica de fenoltaleína á cemento de escorias, cemento romano y portland. Según él, el primero da inmediatamente una coloración rojiza debida á la presencia de la cal hidratada libre. El segundo da la coloración después de algún tiempo. Y el portland no la da nunca cuando la cal está totalmente combinada en forma de silicato.

Encontró, además, que el tinte rojizo, debido á la cal libre, se descoloraba por la adición de portland, y volvía el color al añadir nuevamente hidróxido de cal.

Afirma el autor, que en una muestra de portland que había dado buen resultado en la prueba del agua hirviendo, se demostró que tenía cal libre por la coloración dada á la disolución alcohólica de fenoltaleína.

He hecho algunas pruebas con resultados bastante aceptables, pero no he perseguido con constancia la comprobación del procedimiento por haber encontrado otro que hasta ahora me dió completa satisfacción.

Es éste el procedimiento de A. H. White, publicado en 1909, en el *Journal of the Society of Chemical Industry*.

Se funda en la formación de cristales de fenolato de calcio, que tienen una apariencia muy característica cuando se examinan al microscopio con luz polarizada. El reactivo se forma con 5 gramos de fenol cristalizado, que se disuelven en 5 centí-

metros cúbicos de nitrobencina, y á lo que se añaden dos gotas de agua. Se colocan 2 ó 3 miligramos del cemento en el portaobjeto del microscopio, se añade una gota del reactivo, se coloca el cubreobjeto y se examina al microscopio. El autor aconseja un aumento de 80 diámetros, pero después de muchos ensayos he visto que un aumento, aunque sea del doble, no presenta ningún inconveniente, y aun creo que facilita la investigación.

El cemento es débilmente refractante, pero si hay cal libre, al cabo de algunos minutos empiezan á aparecer puntas brillantes. Estas, al cabo de algún tiempo, se convierten en núcleos de agujas radiantes; crecen éstas, se separan del núcleo, aumentan de longitud, y si el cemento tiene mucha cal, al cabo de media hora aparece todo el campo cubierto de agujas entrelazadas de fenolato de calcio.

El máximo de duración de la prueba es de dos horas, y el autor afirma que si en la primera no se presentan bastantes cristales, es prueba de que el cemento sólo contiene ligeras trazas de cal.

También afirma que sólo el óxido y el hidróxido de calcio responden á la prueba, y fué esto lo que primeramente traté de comprobar. Analicé para esto todas las sustancias que puede contener el cemento: carbonato de cal, kaolin, varias arcillas, magnesia, espato fluor y otras sustancias, crudas y en diferentes grados de coque, se examinaron aisladamente y mezcladas. En ninguna de las pruebas aparecían las agujas, pero se presentaban rápidamente en cuanto á cualquiera de las materias se añadía una insignificante cantidad de cal. Debiendo advertir que lo mismo se obtenía la reacción con cal apagada que con cal viva ó muy cocida.

Se preparó cal viva, dejándola apagar al aire y pasándola por un tamiz de 2.500 mallas, y se prepararon tres muestras, una con cal sola, otra con cemento, al que se había añadido un 5 por 100 de cal y otra con cemento puro. La muestra de cal sola daba, á los quince minutos, todo el campo cubierto de cristales. En la mezcla aparecieron algo después. Y en el cemento puro se presentaron en menor cantidad y después de cuarenta minutos.

Mezclas de kaolin y carbonato de calcio se ensayaron después de sometidas á la temperatura de 800 ó 900 grados en un horno, á la de 1.000 en un mechero y á la de 1.300 en un soplete. Había un exceso de kaolin á fin de que toda la cal debiera estar combinada; y, efectivamente, ni aun al cabo de dos horas se presentaron nunca las agujas reveladoras de la cal.

Muy repetidos ensayos análogos á éstos comprobaron siempre que el procedimiento de White sirve perfectamente para determinar si hay cal libre sea viva ó apagada y sea cual fuere la temperatura á que se haya producido.

La bondad del procedimiento nos hizo ver si serviría bien para comprobar los efectos de la carbonatación.

Un cemento, en el que aparecían las agujas del fenolato de calcio, fué sometido á una débil corriente de ácido carbónico. La prueba se hizo con pocas precauciones y el ácido no iba puro, sino mezclado con aire, y además la corriente sólo actuó durante veinte ó treinta segundos. Bastó esto para que no aparecieran agujas ni aun después de hora y media.

Se repitió á veces la prueba con cementos que contenían una gran cantidad de cal, y en los más caleados no aparecieron las agujas ni aun al cabo de dos horas, con sólo haberlos sometido durante un minuto á la acción del ácido carbónico.

En todos los casos la adición ulterior de una pequeña cantidad de cal era acusada por el microscopio á los pocos minutos.

Queda, pues, perfectamente demostrado, no sólo la eficacia de la prueba microscópica de White, sino el buen efecto de la aereación para convertir en carbonato de cal, es decir, en mate-

(1) Se pulveriza medio gramo de cemento y se seca. Se añaden 50 centímetros cúbicos de glicerina y se calienta á 40° durante siete días, agitando la mezcla dos veces al día; al séptimo día se añaden 50 centímetros cúbicos de alcohol de 90° y se filtra. El residuo se lava con alcohol, se seca y se pesa. Se disuelve en agua con unas gotas de amoníaco y se precipita la cal con el oxalato amónico.

ria inerte, la cal libre de un cemento. Vemos también cómo puede acelerarse con una corriente de ácido carbónico el efecto de la aereación, lo que quizá pudiera convenir en muchos casos.

Importancia de la cal libre.

Visto todo lo que del procedimiento de White podía esperarse, nos dedicamos á analizar muchas muestras de cemento, siempre con la mira de investigar la cal libre que contuviesen, y dando por sentado que tanto mejores serían cuanto menor fuese la cantidad de cal que en ellos hubiese. Casi todos los cementos nacionales y muchos extranjeros fueron observados al microscopio.

Con ligeras excepciones todos tenían cal, y en esas excepciones cabe la duda de si el no tenerla sería por efecto de la aereación.

Como regla general se observaba que los cementos considerados como buenos por su cernido, resistencias y elaboración más cuidadosa, acusaban la presencia de las agujas mucho después que aquellos otros juzgados como malos ó medianos. Así hemos visto que en algunos cementos (el lector comprenderá bien cuán lejos de la índole de este trabajo está el citar marcas) la presencia de la cal no se ha manifestado hasta al cabo de una hora, ó aun más, y que después de haberse visto los primeros núcleos de agujas se ha terminado la prueba al cabo de tres horas sin que los núcleos aumentasen y quedando sin presentar alteración la mayor parte del campo. Y en otros, por el contrario, se tenía todo el campo cubierto á los quince minutos con la característica cristalización acusadora de una gran cantidad de cal libre.

Aquí habría terminado las investigaciones, que no llevaban otro fin que el de hallar un dato más revelador del buen cemento, si no hubiese sido por haber observado que algunos cementos de fraguado rápido, que se han comportado perfectamente en las obras, acusaban con la prueba de White una alarmante cantidad de cal.

Repetidos ensayos daban, como dato indiscutible, la existencia de cal libre en gran cantidad, pero era también indudable que la sanción del tiempo colocaba, entre los muy buenos, á esos cementos sobre caleados.

Era preciso procurar explicarse esta aparente anomalía.

Ante todo, había que ver si esa cal libre que aparecía en un cemento, indudablemente bueno, era debida á la desintegración del silicato tricálcico por la acción del aire húmedo, y se presentaba, por lo tanto, aun en cementos que no lo contuvieran al salir del horno. En una palabra, había que comprobar la hipótesis de Le Chatellier, que afirma que tal desintegración existe siempre.

Tal comprobación no he podido llevarla á cabo. Un cemento recién fabricado, y que no contenía cal libre, no la acusó ni aun después de estar varias semanas en una cámara húmeda. Y no sólo esto, sino que al mismo cemento, después de haberle añadido cal, dió, igualmente, una prueba negativa, después de sometido algún tiempo á la acción del aire húmedo, lo que parece, indudablemente, debido al efecto del ácido carbónico del aire. Falta sólo hacer la prueba en una atmósfera húmeda, pero privada de ácido carbónico; actualmente nos ocupamos de ello.

Pero sea lo que fuera, y proceda ó no la cal libre de espon-tánea desintegración de algún silicato, queda en pie el hecho de que deban considerarse como buenos algunos cementos que la contengan en gran cantidad. Y el caso merece estudiarse, porque se ve patente la anomalía de que resistan perfectamente, al cabo de muchos años, cementos naturales, de débiles resistencias, de grosero cernido, de desigual dosificación, etc., y no resistan, en

cambio, otros cuya fabricación es más esmerada, más científica y más perfecta por todos conceptos.

Tal anomalía no puede resolverse más que de uno de dos modos: ó no es perjudicial la presencia de la cal, cosa que parece inadmisibile, ó esos cementos sobre caleados que se comportan bien, contienen alguna sustancia que neutralice los efectos de aquella base.

El resultado, al que creo haber llegado, es que la inalterabilidad de esos cementos es debida á que contienen además de la cal una materia puzolánica que forma con aquélla un compuesto hidráulico. Esa materia puzolánica debe ser la arcilla cocida á la temperatura de 800 á 900° que es á la que se manifiestan sus propiedades hidráulicas.

Creo, en suma, que esos cementos que proceden de margas muy arcillosas, cocidas á una temperatura relativamente baja, están constituidas por una mezcla de estas tres materias: cemento, en la parte en que se hayan verificado las reacciones; cal libre, procedente del carbonato de cal del que se ha expulsado el ácido carbónico, y arcilla cocida, del exceso que había en la primitiva marga.

Esta arcilla ha estado cocida, precisamente á la temperatura mejor para exaltar sus propiedades puzolánicas, y es la que debe combinarse con la cal libre, formando un compuesto que fragua en el agua. Todo es entonces hidráulico en el cemento, y éste, con toda su cal combinada en forma de silicatos, resulta inatacable por la acción de las sales del mar.

Antes de indicar las investigaciones hechas para llegar á este resultado, es conveniente mencionar los importantes estudios llevados á cabo en Inglaterra por Charles J. Potter.

Experiencias de Potter.

Después de haber estudiado muchas averías en obras de mar, emprendió Mr. Potter una serie de observaciones que han durado muchos años, y que son, á nuestro juicio, de gran trascendencia en este estudio de la inalterabilidad de los cementos en el mar.

Empezó sus ensayos con pequeños bloques de mortero formado por una parte de cemento y tres de arena, que después de fraguar se sumergían en disoluciones concentradas de las diversas sales que contiene el agua del mar.

Pronto encontró que de todas ellas la más importante por sus malos efectos era el sulfato de magnesia.

Sus estudios se dirigieron á investigar cuáles serían las sustancias que habría que añadir al cemento para retener la cal, é impedir que entre en reacciones con la magnesia. Hizo pruebas con sílex calcinado, puzolanas, trass y ladrillo recocho, y después de innumerables ensayos llegó á la conclusión de que la adición de seis partes en peso de arcilla calcinada á diez partes de cemento era lo mejor para los resultados prácticos. Una mezcla íntima y un molido perfecto eran imprescindibles. A ese cemento le llamó cemento rojo.

Hizo ensayos con agua dulce, con agua del mar, y con esta misma agua, á la cual añadió un 10 por 100 de sulfato de magnesia: combinación enérgica que acelera en grado sumo los malos efectos del agua del mar sola.

Sus estudios duraron muchos años. Los resultados que obtuvo, que él expone acompañados de curiosos gráficos, pueden resumirse así:

El portland corriente es mejor que el rojo en el agua dulce.

En agua del mar, el corriente aumenta en resistencia durante doce semanas y baja á 0 á los cinco años; algunos al año ya mostraban señales de averías. El cemento rojo, en cambio, em-

pieza con mucha menos resistencia, pero sigue aumentando hasta los seis años que duraron las pruebas.

Los morteros de 3×1 con cemento corriente y rojo, en agua dulce estuvieron prácticamente iguales durante diez años.

Con los mismos morteros, en agua del mar, obtuvo resistencias superiores con el cemento rojo.

Con morteros de 4×1 también estuvieron los rojos por encima, y lo mismo con los de 5×1 con cuyas dosis el corriente bajó á 0 á los seis años, mientras que el rojo subió sin cesar durante nueve años de experiencias.

Hizo otros ensayos comparativos con probetas sometidas á la acción de la marea, habiendo también hallado que el mortero de 3×1 con cemento corriente empezaba á perder resistencia á los dos años, mientras que el de cemento rojo subía hasta los seis.

Con proporciones de 5×1 , el cemento corriente llegó á 0 á los cinco años, y el rojo creció durante seis años, hasta que terminaron las experiencias.

Otros ensayos con disoluciones concentradas de sulfato de magnesia dieron también resultados concluyentes.

El cemento corriente sube en resistencias durante un mes en que llega á 500 libras, y baja á 0 al año. El rojo no tiene, al fin del primer mes, más que 250 libras, pero sigue aumentando hasta los dos años. Una briqueta se probó á los ocho años y dió 1.015 libras.

Con mortero de 3×1 los resultados fueron análogos; el corriente dió 0 á las ocho semanas; el rojo subió hasta los dos años que duraron las pruebas, quedando por encima de 300 libras.

Vemos ya los notabilísimos efectos obtenidos con la adición de arcillas calcinadas.

Acaso bastase esto para explicar la hipótesis que más arriba hacíamos del por qué de la inalterabilidad de los cementos que contengan un exceso de arcilla calcinada, como ocurre á muchos de los nacionales de fraguado rápido.

Las experiencias de Potter, tan minuciosas y bien hechas, no necesitan de ser comprobadas. No con ánimo de comprobación, pero sí como curiosidad, he hecho algunas pruebas parecidas, habiendo obtenido siempre análogos resultados.

Adición de puzolanas.

Una experiencia ya milenaria nos demuestra cómo se forman compuestos hidráulicos perfectamente estables adicionando puzolanas á las calces grasas.

Estas materias puzolánicas son productos muy diversos, que se conocen con los nombres de trass, tobas, peperitas y otros, y que tienen como caracteres generales su origen volcánico y su composición química, en la que predomina el ácido silícico apto para combinarse con la cal.

En la actualidad se ha extendido considerablemente la práctica de añadir el trass á los morteros de cemento, y Michaelis explica su beneficiosa acción diciendo que, puesto que el mortero de cemento deja al endurecerse una cantidad notable de cal libre, preciso es que se le añada una sustancia que neutralice esa cal formando silicatos, y para ello nada más apropiado que el mencionado trass.

En los ensayos hechos en Alemania adicionando trass á los cementos se ha encontrado siempre que, á igualdad de cemento, esta adición aumenta la resistencia. Y nosotros, en algunos modestos ensayos, hemos podido comprobar el mismo hecho.

El Ingeniero V. de Blocq van Kuffeler publica en una Memoria observaciones muy precisas acerca de este asunto, y afirma lo esencial que es forzar las dosis de cemento y añadirle siempre trass.

La proporción 1 c., 0,5 tr. y 3 a. (1), que puede ser aceptable para hormigón previamente endurecido al aire libre, la considera débil para los hormigones sumergidos en masa, citando en su apoyo los malos resultados que dió en los diques de Schevenin, y afirmando que allí debió emplearse por lo menos la de 1 c., 0,5 tr. y 2,5 a.

En los rompeolas de Inmyden se empleó con mal resultado la mezcla 1 c., 3 a. y 5 gr. Después se modificó por la proporción 1 c., 1,5 a. y 3 gr., y desde 1905 se emplea la de 1 c., 0,33 tr., 2 a. y 3,66 gr.

Cada vez se tiende más al empleo de las fuertes dosis de cemento y á mezclarlo con trass. Sirvan de comprobación de esto los siguientes ejemplos:

En el faro de hormigón armado de la embocadura de l'Isel, en el Zuyderzee, se empleó la proporción 1 c., 1,66 a. y 2,66 gr. En una estacada del puerto de Inmyden se llegó á 450 kilogramos de cemento por metro cúbico de hormigón. En el muro-muelle de Wieland el hormigón armado está formado por 1 c., 0,5 tr., 3 a. y 4,0 gr. En el mismo muelle y en los hormigones en masa, expuestos, desde luego, á la acción del mar, la mezcla fué 1 c., 0,5 tr., 2,5 a. y 3,5 gr. Y en los hormigones para las obras de defensa de la Holanda septentrional las proporciones fueron 1 c., 0,33 tr., 1,66 a. y 2,66 gr.

Creemos que fué en el dique seco del puerto de Nagasaki donde los japoneses emplearon, por primera vez, las mezclas de cementos y puzolanas, y hoy ya su empleo se ha extendido considerablemente en Inglaterra, Holanda, Alemania é Italia.

El Ingeniero Luigi Luiggi, profesor de la Escuela Politécnica de Roma, afirma la necesidad del empleo de las puzolanas y dice que siendo las averías producidas por la acción del ácido sulfúrico del sulfato de magnesia sobre la cal libre, el remedio es añadir puzolanas que neutralicen esa cal.

Cree que una buena mezcla se obtendrá añadiendo 100 á 150 kilogramos de puzolana pulverizada á la dosificación de 300 kilogramos de cemento, 0,4 m³ a. y 0,8 m³ gr., y añade que así será como se obtenga un cemento impermeable é inalterable en el agua del mar.

Otros análisis microscópicos.

Todos los estudios que anteceden no dejan lugar á duda. El cemento portland necesita la adición de una sustancia puzolánica cuando haya de emplearse en obras marítimas.

Sea el trass, sea la arcilla cocida de las experiencias de Potter, necesita el cemento una sustancia rica en ácido silícico que convierta á la cal libre en silicatos.

Todo ello comprueba también la hipótesis que hacíamos respecto á las causas de la estabilidad de algunos cementos de fraguado rápido. Esos cementos que se han calcinado á la temperatura de 800 á 900°, y que tienen generalmente un exceso de arcilla, resultan de composición muy análoga á los cementos con adición de trass ú otra puzolana, y al cemento rojo de Potter.

A pesar de sus defectos de fabricación, y á pesar de sus malas cualidades físicas, resultan buenos en el mar por su exceso de arcilla cocida que hace el papel de puzolana, y porque la temperatura á que esta arcilla se coció es casualmente la mejor para que lleguen al máximo sus propiedades puzolánicas. La generalidad de los buenos cementos de portland, viniendo de mezclas más ricas en cal y más pobres en arcilla y sometidos á una temperatura bastante más elevada, ó no tienen el sobrante arcilloso necesario, ó si lo tienen es con propiedades puzolánicas más débiles.

(1) c., cemento; tr., trass; a., arena; gr. grava.

biles, y resultan muchas veces malos en el mar á pesar de ser más perfectos y mejores por todos los demás conceptos.

No es que creamos mejor el cemento de zumaya, es que creemos preferible el que contenga un exceso de arcilla cocida, y esto, casualmente, ocurre con muchos de los cementos de fraguado rápido. Pero claro es que mejor sería tener ese exceso en un buen cemento, bien dosificado, bien cocido y bien molido.

Esta opinión, que si nos atrevemos á dar es con el doble temor de nuestra incompetencia y de lo difícil que es el pretender resolver cuestión tan complicada, hemos procurado comprobarla siguiendo el procedimiento microscópico de White.

Para ello hemos llevado á cabo varias experiencias de investigación de la cal libre con cementos, á las que había añadido cal y puzolana.

La puzolana de que hemos hecho uso, ha sido una arcilla cocida á la temperatura de 900°; se ha utilizado el polvo fino que dejaba pasar el tamiz de 2.500 mallas, y se la ha incorporado al cemento, procurando que la mezcla sea lo más íntima y perfecta posible.

Desde que empezamos los ensayos, encontramos una innegable ventaja. Cementos á los que se había añadido una fuerte dosis de cal, y que daban en el microscopio un campo completamente cubierto de agujas, sólo acusaban ligeros vestigios de cal después de haberlas mezclado con arcilla.

Esto era concluyente, pero aun podía quedar la duda de si la desaparición de la cal era debida, no á su conversión en silicato, sino simplemente á haberse carbonatado por la acción del aire, y continuamos las experiencias haciendo las probetas en un tubo de vidrio, herméticamente cerrado, desprovisto de aire y lleno de nitrógeno, gas inerte, y que nos era más fácil de conseguir que el vacío perfecto que necesitaríamos para tener la seguridad de que no había medio de que el ácido carbónico ejerciese la menor acción.

El resultado fué, igualmente, bueno. Cementos llenos de cal libre, se convertían en otros pobres en esta sustancia, ó completamente desprovistos de ella.

El microscopio sigue fielmente todo el proceso de desaparición de la cal, y podrá servir para señalarnos el momento en que se ha añadido la cantidad de puzolana necesaria para neutralizar la cal sin aumentar inútilmente la materia inerte.

En los ejemplos de dosificaciones que dejamos citados, sólo de un modo empírico se fija la cantidad de trass con que hay que formar los morteros ú hormigones. Pero con el procedimiento de White desaparecerán los empirismos y se podrá señalar, sin lugar á duda, cuál sea, para cada cemento y para cada puzolana de que se disponga, la proporción de uno y otra necesaria para tener una mezcla completamente estable en el mar.

En este estudio trabajo ahora. Pero no bastarán mis modestas experiencias para dejar resuelta cuestión tan debatida y de tanta importancia y trascendencia. Será preciso que otros se dediquen á ello y aporten su experiencia y su trabajo á estas investigaciones.

Algunas deducciones.

Algo práctico y concreto puede deducirse de todo lo que llevamos expuesto. Y preciso es no dejar para cuando la teoría nos haya dado completa luz acerca de esto, si es que llega á darnosla, el adoptar los medios más convenientes para que nuestras obras marítimas no estén expuestas á causa de destrucción tan importante como la acción química del mar.

Es indudable que esta acción se ejercerá con tanta mayor intensidad cuanto más poroso sea el mortero; pues claro es que

entre la acción del mar obrando sólo en la superficie del hormigo, y la misma mar actuando sobre toda la masa y renovándose constantemente por la acción de la marea y del oleaje, y trayendo nuevas sales para seguir su acción destructora, debe haber muy grande diferencia.

Y téngase en cuenta que esta diferencia no es sólo de plazo más ó menos largo para una destrucción al fin inevitable; pues aunque hay opiniones de constructores eminentes que son del todo desconsoladoras, no debe desconfiarse de las defensas naturales que las conchas, la vegetación y sobre todo la carbonatación han de producir.

De todos modos es un hecho probado que los hormigones deben ser impermeables, y todos los autores y constructores, sin excepción, preconizan la riqueza de las mezclas como el mejor medio para conseguir esa impermeabilidad.

Nosotros hemos podido comprobarlo viendo cómo era atacado por el mar un hormigón con 180 kilogramos de cemento por metro cúbico, y cómo con los mismos materiales permanecía inalterable al haber aumentado la dosis á 350 kilogramos.

Y téngase en cuenta que esta cifra es aún baja. Ya hemos visto cómo en Iumyden se llegó á la dosis de 450 kilogramos que el Ingeniero V. de Blocq considera aún escasa. Nosotros hemos construido una obra de hormigón en masa hecho *in situ* sometida á la acción del oleaje en que la cantidad de cemento se elevó á 550 kilogramos, habiéndose conseguido así que fuera del todo impermeable.

El Ingeniero Luigi afirma que para asegurar la impermeabilidad es forzoso emplear más cemento del que sea necesario para llenar completamente los huecos de la arena.

Todos los nuevos pliegos de condiciones deberían redactarse con este criterio, y los antiguos de mezclas pobres que hacen fundadamente prever la destrucción de las obras deberían ser revisados para aumentar considerablemente las proporciones del cemento.

Y si esto no fuera factible por cuestiones económicas, ó mejor dicho de baratura, para sustituir el hormigón de grava por otro en cuya masa se incorporasen grandes mampuestos que permitieran, al reducir el volumen de la argamasa, el que ésta fuera más rica á igualdad de coste.

Otra deducción que de lo expuesto se desprende es que la adición de puzolanas pasó ya del terreno teórico ó experimental para llegar al de la práctica. Tantas obras en que así se hace, y tantos Ingenieros que así lo aconsejan son garantía bastante para que no deba juzgarse como arriesgada innovación lo que es ya corriente en países que van delante de nosotros en esta clase de obras.

La explotación del trass, para ser aplicado á la confección de hormigones, es hoy en Alemania una verdadera industria, y tal es la demanda, que lo que antes se tiraba como inútil alcanza hoy elevados precios, se elabora con esmero, se exporta y se extiende por todos los pueblos que se preocupan del porvenir de sus obras en el mar.

Ni aun la incertidumbre respecto á la dosificación puede justificar su empleo, pues aparte de que hay ya sobrados ejemplos, con la misma incertidumbre se fijan proporciones de hormigones, se eligen arenas, se emplean aguas y se procede en todo aquello que la teoría no ha definido de un modo preciso é indudable.

* *

Antes de terminar he de insistir en la razón que me ha movido á escribir esto, no vaya á creerse que trataba de terciar en lo referente á la impermeabilidad de los morteros ó á la adición

de puzolanas, cosas que han salido aquí incidentalmente, y que ni necesitan de mi voto, ni hacía falta publicarlas aquí por ser de sobra conocidas por los Ingenieros de puertos. He pretendido sólo el llamar la atención sobre el procedimiento microscópico, que puede ser, quizás mejor que ningún otro, origen de fecundas investigaciones en cuestión de tanta trascendencia para los puertos como esta de la estabilidad de los cementos.

EDUARDO DE CASTRO.

REGULACIÓN DEL CAUDAL DE LOS RÍOS (1)

Las variaciones del caudal de las corrientes naturales obligan á la industria á limitar el aprovechamiento de aquélla al gasto de estiaje para que la maquinaria funcione en buenas condiciones de rendimiento, ó, en todo caso, aunque la instalación de varios grupos parciales permita aprovechar los períodos de abundancia de agua, siempre, al llegar la penuria, queda limitada la energía producida á la que consiste el caudal mínimo durante un tiempo que en España llega generalmente á tres meses. En esta época, si la fábrica de que se trata ha de conservar su capacidad de producción, se ve obligada á conseguir la energía que le falta por medio de un manantial térmico con el exceso de coste correspondiente.

Si el agua se destina al riego, la extensión de terrenos regados permanentemente está también limitada por el caudal mínimo que coincide generalmente con la época de la sequía en que los riegos son indispensables.

Conocidos son los medios de regularizar el caudal, almacenando el agua de las crecidas y de las épocas de aguas superiores á las medias, para emplearla en el período de penuria, y el tema será seguramente tratado concienzudamente en su aspecto técnico y general.

Este trabajo tiene por objeto solamente el tratar de dar una idea de la importancia que la solución de este problema alcanza en España, y si es posible de la cuantía del beneficio que se conseguiría al resolverle de una manera sistemática.

Los ríos de España son torrenciales, aun aquellos que por su caudal pueden ser considerados como de primera importancia, y esta condición queda patente en la siguiente nota de los caudales mínimos y módulos de las principales corrientes:

CUADRO I

Nombre del río.	ESTACIÓN DE AFORO		Caudal mínimo. m³ × 1''	Módulo. m³ × 1''	Relación.
	Número	Situación.			
Ebro.....	27	Tortosa.....	167,134	442,490	2,68
Duero.....	62	Toro.....	23,500	169,860	7,22
Tajo.....	32	Talavera.....	15,813	98,181	6,21
Guadalquivir...	8	Cantillana.....	14,000	135,166	9,65
Júcar.....	45	Alcira.....	7,480	24,336	3,24
Segura.....	16	Orihuela.....	7,800	16,726	2,14
Guadiaro.....	1	Colmenar.....	1,220	15,240	12,49
Guadalhorco....	1	El Chorro.....	0,000	18,236	∞
Llobregat.....	5	Martorell.....	0,190	2,564	13,49
Ter.....	10	Gerona.....	2,049	3,987	1,94
Muga.....	12	Boadilla.....	0,456	1,558	3,41
Flaviá.....	16	Esponellá.....	1,359	2,088	1,53

La diferencia es considerable y sirve de indicio para juzgar de la cuantía de la energía perdida por falta de regulación, pero

(1) Memoria presentada al Congreso nacional de Riegos é industrias anexas de Zaragoza.

no se pueden deducir cifras de estos datos por referirse á estaciones situadas en general en los tramos de los ríos más próximas á las desembocadura, en los cuales es difícil el aprovechamiento para la industria.

Para formar una idea exacta es preciso estudiar cada una de las corrientes en el mayor trayecto posible, especialmente en los tramos altos y medios.

He aquí la aplicación para el año 1912 á uno de los ríos, el Duero, en una longitud de 380 kilómetros, á partir de su nacimiento, llamado Fuentes del Duero.

Los datos se refieren á cuatro estaciones escalonadas: La número 1, llamada de Vinuesa, en la provincia de Soria, á 12 kilómetros del origen y 1.400 metros sobre el nivel del mar. La núm. 8, llamada Zuzones, en la provincia de Burgos, lindando con Soria, á 187 kilómetros del origen y 810 metros sobre el nivel del mar. La núm. 15, llamada de Herrera del Duero, en la provincia de Valladolid, á 300 kilómetros del origen y 700 metros sobre el nivel del mar. La núm. 62, llamada Toro, en la provincia de Zamora, á 380 kilómetros del origen y 640 metros sobre el nivel del mar.

Los caudales mínimos y módulos correspondientes son los siguientes:

	Caudal mínimo.	Módulo.	Diferencia.
Estación núm. 1...	0,200 m³ × 1''	5,527 m³ × 1''	5,327 m³ × 1''
— núm. 8...	4,100 —	24,764 —	20,664 —
— núm. 15...	16,000 —	44,830 —	28,830 —
— núm. 62...	23,500 —	169,858 —	146,358 —

La figura 1.ª contiene el perfil longitudinal y los dos polígonos representantes de los caudales, así como las diferencias, que son los trozos de ordenadas contenidos en la zona rayada.

De aquí se deduce que en el estado actual del régimen la capacidad energética del río, desde cada una de las estaciones al nivel del mar, es:

	Kilográmetros.	Equivalente en HP. de vapor.
Estación núm. 1.....	280.000	3 733,33
— núm. 8.....	3.321.000	44 280,00
— núm. 15.....	11.200.000	149.333,33
— núm. 62.....	15.040 000	200 533,33

Después de la regulación absoluta, la capacidad toma los valores insertos á continuación, así como los aumentos conseguidos por aquélla (fig. 2.ª).

	CAPACIDAD		Aumento. — HP	HP. por m de salto.
	Kilográmetros.	HP.		
Estación núm. 1	7.737.800	103.170,66	99.437,37	71,02
— núm. 8	20.058.840	267.451,20	223.171,20	275,52
— núm. 15	31.381.000	418.413,33	269.080,00	385,06
— núm. 62	108.709.120	1.449.454,93	1.248.921,60	1.951,44