

Ing. Jorge Lira Orrego

Empleo del hormigón en las obras marítimas

Desde que principiaron a construirse obras en el mar se recurrió al empleo de la mampostería y poco después al del hormigón en los macizos de todas dimensiones, que fué necesario ejecutar para compensar la falta de piedras de grandes pesos unitarios, y pasados algunos años de esas aplicaciones ya se pudo notar que los morteros eran atacados más o menos rápidamente por el agua del mar. Los romanos, que sin duda no pudieron conocer el problema que se presenta a los químicos como se le conoce ahora, pudieron, sin embargo, encontrar una manera de oponerse a la descomposición de los morteros, recurriendo en su composición a la mezcla de cal con puzolana, resistiendo así perfectamente a la acción del tiempo; cuando en los tiempos modernos las construcciones marítimas principiaron a tomar desarrollo, los Ingenieros se dieron cuenta luego del problema de la acción del agua del mar sobre los morteros, es decir, sobre los aglomerantes que se emplean en ellos, y principiaron a efectuar estudios para resolverlo, tanto desde el punto de vista teórico como desde el experimental, habiendo llegado a algunas conclusiones muy interesantes en ese sentido, que permiten adoptar normas encaminadas a aminorar por lo menos los efectos perjudiciales del agua del mar, si no a suprimirlos siempre por completo.

Entre esos estudios merece una mención particular uno que ordenó el Gobierno francés a los directores de sus puertos hace a la fecha unos noventa años, que consistió en construir bloques artificiales con mamposterías diferentes, en las que se hicieron variar las proporciones de los materiales que componían el mortero y los tipos de cementos y cales que se emplearon y en sumergir esos bloques en el mar; cincuenta años más tarde se sacaron esos bloques y se pudo notar que sólo dos cementos habían resistido perfectamente: uno de fabricación inglesa, de White, y otro hecho especialmente por Vicat para resistir a la acción del agua de mar, en la fábrica francesa de Boulogne sur Mer. Muy poco después Lechатель emprendió un estudio de laboratorio muy completo, en el cual se ocupó separadamente de la acción sobre los cementos de cada uno de los elementos contenidos en el agua del mar, operando sobre soluciones muy fuertes, con el objeto de que la acción fuera más rápida; entre estas experiencias, que llevó a cabo sobre muestras de la forma de 8, que se emplea corrientemente para los ensayos de tracción, hizo una muy intere-

sante, al estudiar la acción del anhídrido sulfúrico, que consistió en conservar dos grupos de muestras, idénticos en cuanto a su composición, uno bajo el agua, sin tocarlo, y el otro, sacando diariamente las muestras y escobillándolas: el resultado de esta experiencia fué el que él esperaba: que las muestras escobilladas resistieron mucho menos, porque la capa de sulfoaluminato de calcio que se formaba en la superficie de las muestras, con aumento de volumen, servía de protección al mortero que quedaba debajo en las muestras que no se tocaban, y al quitarla en las otras con la escobilla, quedaba al desnudo el mortero intacto y se encontraba más expuesto a la acción del agua de mar. Esta experiencia vino a explicar un hecho ya observado sobre la influencia de la acción mecánica de la agitación del mar sobre la conservación de los morteros de cemento, acción que se manifiesta tanto por las olas como por las corrientes de filtración que produce el juego de la marea. Durante los años corridos de este siglo han sido innumerables los estudios de todo género que se han emprendido para dilucidar esta cuestión y se ha llegado a algunas conclusiones interesantes, que pueden servir de guía a los Ingenieros, tanto en la elección de los aglomerantes que empleen como en la composición de los morteros y hormigones; ordenar esas conclusiones es el objeto del presente estudio y tratar de aclarar algunos puntos sobre los cuales hay todavía discusión.

Desde luego, considerando a los aglomerantes en su generalidad, se ha observado desde hace muchos años que las cales hidráulicas, las únicas que pueden emplearse, se conservan mal en el mar; hay, sin embargo, una cal francesa, la de Teil, que ha dado buenos resultados en el Mar Mediterráneo, aunque no siempre, pero que ha fracasado en el Océano Atlántico; parece que la razón de esto puede encontrarse en el hecho de que en el Mediterráneo no hay marea o la hay muy pequeña, y en el Atlántico, particularmente en las costas de Francia, que es donde se han hecho estas observaciones, la amplitud de la marea es considerable, del orden de 8 a 9,00 m. En Chile se ha hecho una aplicación de esta cal en la construcción del dique seco de Talcahuano N° 1, que fué terminado hace unos cincuenta años, y el resultado ha sido hasta ahora satisfactorio; podría ser la causa de ello la pequeña amplitud de la marea en la costa chilena, que no pasa de 1,20 en las mareas ordinarias. De todas maneras, como regla general, a pesar de que esta cal particular haya dado buenos resultados en muchos casos, no se aconseja aceptar el empleo de las cales en el mar, sino en circunstancias muy excepcionales y después de maduro estudio, a no ser que se las asocie con la puzolana, como se hace corrientemente en Italia, a imitación de lo que hicieron los romanos. En Chile no hay cales hidráulicas manufacturadas en condiciones de regularidad que ofrezcan garantías suficientes y por eso sólo podemos decir que nos interesan los cementos, tanto más cuanto que tenemos el de El Melón, que puede ser considerado como bueno.

Los cementos de fraguado rápido, llamados ordinariamente *romanos*, son atacados rápidamente por el agua de mar; su duración no pasa de unos 13 a 15 años, y por eso se les reserva para trabajos que necesitan la fragua rápida y que no sean de carácter definitivo. En vista de esto vamos a referirnos en todo lo que sigue exclusivamente a los cementos de fraguado lento, generalmente llamados Portland; cuya fabricación se ha perfeccionado mucho y en la cual se ejerce un control constante, que permite obtener productos que pueden ser empleados con suficiente garantía en el agua de mar, cuando las materias primas empleadas en la fabricación son adecuadas. Conviene tener presente a este

respecto que no es la resistencia mecánica lo que más interesa en las aplicaciones de las obras marítimas, sino la resistencia al ataque químico del agua del mar, de manera que puede haber cementos que se aplican perfectamente al uso en otras circunstancias, y que no son adecuados para ser empleados en las obras marítimas. Fuera de los cementos del tipo Portland hay muchos, fabricados con subproductos de otras industrias, que se designan con el nombre de *cementos de escorias*, que son muchas veces siliciosos y que pueden prestarse muy bien al empleo en el agua de mar, gracias a la sílice que contienen, que neutraliza la cal libre, que puede existir en el cemento o desprenderse durante las reacciones que acompañan al fraguado.

No podemos ocuparnos ahora con detalle de las circunstancias que acompañan a esas reacciones, porque eso sería salirnos completamente del marco que nos hemos propuesto y vamos sólo a ocuparnos rápidamente de algunas de ellas. Durante mucho tiempo se pensó que el efecto perjudicial del agua del mar sobre los cementos se debía a la magnesia, que existe en el agua del mar y que también se encuentra, en proporción más o menos grande en el cemento; pero después se ha reconocido que el elemento más dañino es el anhídrido sulfúrico, que existe en el cemento y en el sulfato de magnesia, disuelto en el agua.

Los fenómenos de aumento de volumen, que acompañan a la descomposición del cemento, parecen deberse, ya sea a la hidratación de la cal no apagada, que contienen los aglomerantes hidráulicos, o ya sea a la formación de un sulfoaluminato de calcio, cuya cristalización, acompañada de una fuerte absorción de agua, acarrea la fisuración del cemento. La formación de este sulfoaluminato ha sido considerada de diferentes maneras, lo que indica que las reacciones que las originan no son bien conocidas. En este sentido parece que experiencias hechas en el Japón por el Dr. Lafuma indican con bastante claridad cómo suceden las cosas. Según ellas un aluminato tetracálcico sería descompuesto en presencia del cloruro de sodio, aun antes de que el sulfato de calcio pueda obrar sobre el aluminato, para dar lugar a la formación del sulfoaluminato de cal; esta descomposición da lugar a la formación de aluminato bicálcico y cal, que desplaza a la magnesia del cloruro de magnesia, contenido en el agua de mar, y da lugar a la formación de cloruro de cal, que, obrando sobre el aluminato, da lugar a un cloro-aluminato. Al mismo tiempo la acción de la cal sobre el sulfato de magnesia da, por substitución, sulfato de cal, que reacciona sobre el cloroaluminato de cal y sobre el aluminato bicálcico para producir el sulfoaluminato.

Si no hay cal libre en el cemento, y si la reacción no se lleva a cabo en presencia de cal disuelta, el sulfoaluminato y el aluminato bicálcico se descomponen con producción de alúmina disuelta; el sulfoaluminato se produce entonces a expensas de elementos en solución, el mortero no se hincha y por consiguiente no se producen desagregaciones de las mamposterías o de los hormigones.

Si, por el contrario, la acción del sulfato de cal se produce en presencia de cal libre, el aluminato bicálcico no disuelve alúmina y la reacción se produce sobre esta alúmina y sobre el cloro-aluminato sólido, que son insolubles en presencia de la cal. El sulfoaluminato desagrega entonces a esos compuestos sólidos.

Cuando se trata de cementos de índice de hidraulicidad elevado, es decir ricos en sílice y en alúmina y pobres en cal, como los cementos llamados *aluminosos*, la fragua no deja cal libre; la reacción del sulfato de cal sobre el aluminato bicálcico y el cloroaluminato tiene lugar en au-

sencia de cal, la formación de sulfoaluminato se produce a expensas de sales disueltas, de tal manera que no hay lugar ni a hinchazón ni a desagregación del mortero. Es, pues, siempre la presencia de cierta cantidad de cal libre en el cemento lo que es causa de la acción destructiva del agua de mar sobre los morteros con cemento Portland, y es por eso que, para fijar esta cal libre, por una reacción química adecuada, en el momento de la fragua, se recurre al empleo de materias puzolánicas, como ya hemos indicado.

En las aplicaciones del cemento a las obras marítimas se eligen cementos cuya composición química ofrezca garantías de que podrán resistir bien a la acción del agua del mar y además se les emplea en morteros y hormigones impermeables o muy poco permeables, de manera que el contacto con el agua del mar se reduce únicamente a la superficie exterior. Con el objeto de que se cumplan esas condiciones los diferentes países adoptan normas en las que se fijan los límites de tolerancia de los elementos que pueden ser nocivos, entre los cuales merece particular mención el anhídrido sulfúrico, y se fijan ciertas proporciones entre algunos de los otros.

Desde luego se limita la proporción de anhídrido sulfúrico en Francia y en Chile en 1,5%; en otros países se ha admitido hasta 2%, y en otras ocasiones se le ha rebajado hasta 1%, como hizo la Comisión de Puertos (Chile) para las obras de Valparaíso y San Antonio (1911); pero en la práctica se vió que este criterio era demasiado estricto, pues resultaba sumamente difícil de cumplir, mientras la generalidad de los demás países eran más tolerantes. Por otra parte, el límite de 2%, aceptado principalmente en Alemania, parece demasiado alto, y no se recomienda adoptarlo, ya que es relativamente fácil para nosotros y la generalidad de los demás países obtener cementos que quedan por debajo del límite de 1,5%. El cemento Melón, que se fabrica en Chile, no contiene más de 1,3% de anhídrido sulfúrico. Otro elemento nocivo es o puede ser la magnesia, cuya proporción se limita en Chile al 2%, lo mismo que en Francia y otros países. Los sulfuros no deben existir en cantidad apreciable.

Las normas chilenas han fijado que la proporción entre la cal, por una parte, y la sílice, el óxido de hierro y la alúmina, por otra, debe ser igual o mayor que 1,7. Esas mismas normas establecen además un límite inferior de 2,2 a la proporción entre la sílice, por una parte, y la alúmina y el óxido de hierro, por otra.

También se indica en ellas que la pérdida por calcinación debe ser inferior a 5%.

En lo que se refiere a las proporciones entre los elementos que hemos indicado, hay otras maneras de establecerlas, como por ejemplo, la primera de ellas, que Vicat la consideró al revés, dividiendo la suma de las cantidades de sílice y alúmina, como radicales ácidos, por la suma de las de cal y magnesia, como radicales básicos, y llamó la razón así obtenida *índice de hidraulicidad*, cuyo valor le sirvió para clasificar los diferentes tipos de cales y cementos.

Si se comparan las cifras que hemos adoptado en las normas chilenas con otras normas, o si se comparan estas otras normas entre sí, es fácil ver que no siempre están de acuerdo, y que unas son más tolerantes en un elemento y menos en otro, siendo que, por tratarse de elementos que son nocivos, es decir que facilitan la descomposición del cemento, lo natural sería que todas estuvieran de acuerdo. En realidad esto no debe extrañar, porque no es posible fijar límites precisos a la cantidad

de uno cualquiera de esos elementos nocivos, que se pueda aceptar sin peligro, de manera que cada país modificará esos límites, teniendo en cuenta circunstancias que no son de orden puramente técnico, sino económico o comercial, para dar cabida en las obras marítimas a cementos que se producen en ese país, que de otra manera quedarían excluidos. Es conveniente por eso que los Ingenieros encargados de fijar las normas que deben adoptarse en un caso determinado, tengan conocimiento de esas circunstancias, para poder basar su criterio en las consideraciones que se refieren a la conservación del cemento, sin ser influenciados por las de otro orden, cualquiera que sea el país en que se las haya hecho valer.

Como dato ilustrativo se han indicado en el cuadro siguiente los principales datos acerca de la composición química de algunos cementos.

	Melón	Francés	Aluminoso
Sílice.....	22	20 a 25	10
Alúmina.....	6	3 > 10	40
Oxido férrico.....	3,1	2 > 5	10
Cal.....	64,2	55 > 65	40
Magnesia.....	1,1		
Anhídrido sulfúrico.....	1,3		

Las cifras de este cuadro indican que el cemento Melón cumple perfectamente con las normas fijadas en Chile para los cementos que deben emplearse en el agua de mar, de manera que, desde ese punto de vista no necesitamos preocuparnos; pero desgraciadamente la fábrica no es suficientemente grande para poder atender a todas las necesidades del país y además a las que demandara la construcción de obras marítimas de importancia.

Las columnas que corresponden a los cementos Melón y Francesas se refieren a cementos del tipo Portland, que son los más comunmente empleados. La última se refiere a los cementos que ahora se designan con el nombre de *Aluminosos*, que en un principio se llamaron *cementos fundidos*, después cementos *electro fundidos*, cementos *aluminosos fundidos*, y finalmente cementos aluminosos, cementos que se fabrican con una mezcla de bauxita y de cal, y que aparte de tener la cualidad de resistir perfectamente a la acción del agua del mar, por las razones que hemos visto más atrás, tienen además cualidades de endurecimiento, que los hacen particularmente recomendables siempre que se necesite un endurecimiento rápido, como sería el caso de obras que deben ser entregadas al servicio en un plazo muy corto.

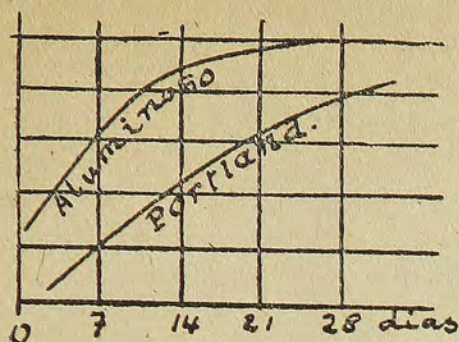


fig. 1

La Fig. 1 reproduce las curvas de endurecimiento de los cementos de tipo Portland y de los aluminosos; en ella puede verse que los aluminosos tienen a los 7 días más o menos la misma resistencia que los de tipo corriente a los 21, y a los 9 días la misma que los otros a los 28. Por otra parte creo innecesario no insistir sobre la *fragua* de los cementos aluminosos, que es sólo muy poco más rápida que la de los cementos Portland, pues principia a los $\frac{3}{4}$ de hora y termina a las 7 horas.

Se trata, pues, de cementos de fragua lenta o semilenta, como los Portland, y de endurecimiento rápido, que se presta muy bien a todas las aplicaciones y resiste a la acción del agua de mar, lo que lo haría particularmente recomendable en las obras de Puertos; pero desgraciadamente su precio es demasiado elevado para este objeto, pues los volúmenes de mampostería o de hormigones en estas obras son demasiado grandes y su valor resultaría desproporcionado.

Antes de dejar este punto conviene recordar que no se recomienda mezclar el cemento aluminoso con los de tipo Portland, porque la fragua se hace entonces excesivamente rápida, lo que constituiría un serio inconveniente para la ejecución de las obras; sin embargo, habrá ocasiones, como será el caso de algunas reparaciones, en las que convendrá hacer esa mezcla para obtener luego una resistencia apreciable.

Las consideraciones resumidas en las páginas anteriores permiten sin duda formarse idea de la importancia que tiene para los Ingenieros marítimos el conocer bien los cementos que van a emplear en una obra determinada y al mismo tiempo fijar bien todos los detalles que se refieren a las condiciones de su empleo, a fin de reducir en lo posible el peligro de que la acción química del agua del mar pueda descomponer el cemento y comprometer la duración de la obra de que se trata; estas consideraciones justifican de más que desde muchos años atrás los Congresos Internacionales de Navegación se hayan ocupado de esta materia, pidiendo estudios sobre ella a los Ingenieros especialistas y discutiendo en las Secciones correspondientes los informes presentados. Es interesante recordar que la lectura de los informes presentados al primero de esos Congresos, que tuvo lugar en 1908, en San Petersburgo, dejaba la impresión de que sus autores temían que los hormigones, principalmente los armados, que se emplean en espesores muy pequeños, no resistieran en buenas condiciones, y algunos de ellos propusieron que en la construcción de las obras, principalmente en la de los cajones monolíticos, que deberían rellenarse posteriormente con hormigón, se dispusieran sólo tabiques transversales y se empleara un hormigón de relleno que pudiera ofrecer garantías de duración por sí solo. Esta impresión fué comentada en las sesiones en que se trató la cuestión, extrañando los miembros del Congreso que los autores de los informes, que tan temerosos se habían manifestado al tratar la materia separadamente, se manifestaran menos desconfiados después, al ver que el número de las aplicaciones del hormigón, y particularmente del hormigón armado, en las Obras Marítimas fueran cada día más numerosas, lo que parece estar en contradicción con los temores que he indicado.

En el Congreso Internacional de 1923 volvió a tratarse esta materia y sucedió algo parecido a lo que se había visto quince años antes: todos los ingenieros, al estudiar el punto relativo a la conservación de los

cementos en el agua de mar, habían manifestado su desconfianza y, sin embargo, el número de las aplicaciones era cada vez más considerable.

Posteriormente, en el Congreso de Navegación que se celebró en Venecia en 1931, volvió a figurar entre los temas de que debería ocuparse el Congreso el relativo al "Empleo del hormigón y del Hormigón Armado en el agua de mar"; la discusión del tema fué de las más interesantes, y conviene a este respecto citar algunas palabras del Relator General del tema, que, al presentar las conclusiones que había deducido de la lectura de los 10 informes que sobre él se habían presentado, dijo: "Todo el mundo sabe que el hormigón de cemento Portland está sujeto a alteraciones en el agua de mar; todos los relatores hablan de ello. Yo no puedo modificar mi informe, pues todos los relatores están de acuerdo sobre este punto y mis conclusiones han sido redactadas según esos informes". El pesimismo de estas palabras, semejantes en su sentido a lo que habían expresado en sus informes los relatores de los Congresos anteriores, parece curioso, si se vuelve a considerar que las aplicaciones del hormigón y aún las del hormigón armado, eran cada año más numerosas, lo que parece una contradicción evidente de los temores que ya en varias ocasiones se habían manifestado tan claramente. Sin embargo, esa contradicción es más aparente que real, como es fácil verlo, si se estudia la cuestión en su aspecto general, examinando separadamente las diferentes aplicaciones de estos materiales y buscando las conclusiones que son particulares a cada una de ellas, como vamos a hacer más adelante. Desde luego conviene considerar que el hormigón solo y el hormigón armado se encuentran en condiciones muy diferentes para poder resistir a los efectos perjudiciales del agua del mar, porque el primero se emplea en macizos de grandes dimensiones, ya sean bloques, que tienen 2 metros como menor dimensión, o ya, rellenos de muchos metros cúbicos, en los cuales la descomposición del cemento tiene que empezar por la superficie y forzosamente tiene que tardar mucho en alcanzar a las partes interiores, mientras que en el hormigón armado se construyen siempre elementos de poco espesor, es decir, de gran superficie relativa, en los cuales la descomposición podría, llegar fácilmente al total del cuerpo de ellos; además, en este último material la presencia de barras de acero en el interior de las piezas, situadas a distancias de la superficie que no pueden ser sino pequeñas, para no llevar a costos desproporcionados, añade al peligro que se debe a la acción química del agua del mar sobre el cemento el efecto mecánico de la oxidación del hierro, que produciendo un gran aumento de volumen, termina por agrietar el hormigón, facilitando el contacto directo del agua con el acero y la fractura del hormigón. Se ve, pues, que es necesario examinar por separado las aplicaciones del hormigón solo de las del hormigón armado y buscar para cada uno de ellos la manera de disminuir los riesgos de descomposición, además de emplear cementos de buena calidad, que por sí solos sean ya una garantía de duración más o menos larga, como hemos visto antes.

I.—HORMIGON SOLO

El empleo del hormigón en las obras marítimas es de tal manera extendido, que se le encuentra en todos los parajes y bajo todas las formas; sería superfluo tratar de hacer una enumeración detallada de todas esas aplicaciones, que por otra parte nos llevaría demasiado lejos; pero es de interés fijar las ideas sobre cierto número de puntos de detalle en esas aplicaciones, que son comunes a todas ellas.

Desde luego el empleo del hormigón bajo el agua puede hacerse de tres maneras diferentes, a saber: los bloques artificiales, que son puestos en su sitio después de que el hormigón haya endurecido completamente; los sacos llenos de hormigón, de un empleo mucho más restringido, en los cuales el hormigón se coloca en estado fresco, pero preservado del contacto directo con el agua, y finalmente el de macizos de hormigón colado bajo el agua por medio de capachos especiales o de tubos telescópicos. Sin duda el primero de estos métodos de colocación del hormigón es el que ofrece mayores garantías, desde el punto de vista de la conservación del hormigón, porque todas las reacciones debidas a la fragua y al primer endurecimiento ya han pasado, cuando el agua entra en contacto con la superficie de los bloques o de los macizos, así como el tercero es el que ofrece mayores inseguridades, porque a los efectos químicos del agua del mar se agregan todas las dificultades, bastante conocidas, de la colocación del hormigón bajo agua: se comprende por eso que los ingenieros empleen cada vez menos este último sistema y más el de los bloques artificiales, facilitado por los progresos alcanzados en la fabricación de elementos mecánicos para la colocación de los bloques, que van haciéndose cada vez más pesados. De todos modos, cualquiera que sea la manera de colocar el hormigón en las obras hay dos puntos que deben ser considerados con mucha atención por los ingenieros encargados de su empleo, que son: la composición química del cemento, ya que la del agua del mar no se puede modificar, y las proporciones en que deben entrar en el hormigón los diferentes elementos que lo componen; del primero de estos puntos nos hemos ocupado antes con algún detalle y llegamos naturalmente a la conclusión de que eligiendo cementos cuya composición química cumpla con ciertas condiciones, y si sustraemos, en lo posible, al cemento a la acción del agua del mar, haciendo que los morteros sean impermeables y los hormigones compactos, podemos contar con una duración suficiente en los macizos que construyamos; vamos a ocuparnos ahora de las proporciones en que deben entrar los componentes del hormigón en cada caso, las que naturalmente variarían, según sea la composición granulométrica del esqueleto y la arena.

La composición de los hormigones que se emplean en las obras marítimas debe variar en realidad bien poco, si se atiende al papel que ese material desempeña en las obras y a la manera cómo se le va a emplear, pues salvo casos excepcionales, las fatigas que soporta el hormigón son muy pequeñas, cosa que no sucede por cierto en las aplicaciones del hormigón armado, y es la necesidad de obtener un material prácticamente impermeable la que va a determinar las proporciones en que van a mezclarse los elementos que lo componen; pero aun así, la cuestión no es tan sencilla como parece a primera vista y hay que dedicarle cierta atención. Desde luego se puede fijar la composición de un hormigón, indicando la cantidad de cemento, en peso, que debe mezclarse con un metro cúbico de arena y dar en seguida la proporción del mortero y de la piedra; esta manera de proceder es lógica, si se adopta para la fabricación del hormigón el método que empleaban los ingenieros franceses, que fabricaban primero el mortero y lo mezclaban en seguida con la piedra para formar el hormigón, método que conduce seguramente a un material de primera calidad, desde el punto de vista de la homogeneidad de su composición, pero que resulta más costoso que el que actualmente se emplea en la mayoría de las faenas; se puede también fijar la proporción de los tres elementos en volumen, bajo la forma $1:m:n$, en que la unidad es el volumen del cemento, m el de la arena y n el de la piedra, sistema que tiene el inconveniente

niente de la gran variación del peso de un metro cúbico de cemento, según la forma como se lo mida; también se pueden fijar, en una forma más precisa, esas proporciones indicando el cemento en peso y la arena y la piedra en volumen, y finalmente se puede fijar por una parte el peso del cemento y por otra el volumen de la piedra y la arena, en conjunto, como entiendo que lo hacen los ingenieros ingleses. En realidad todos estos métodos deberían conducir a resultados prácticamente iguales; pero no sucede así, porque todos ellos tienen algo de incierto, que es necesario aclarar, y al fijar esas proporciones no se indica nunca la de agua, como si no tuviera influencia en las cualidades del material que va a obtenerse.

El sistema de dosificación $1:m:n$ tiene la ventaja de que es muy conocido y que un ingeniero puede decir siempre a qué tipo pertenece el hormigón que necesita; pero como tiene el grave inconveniente de que exige que se fije además la manera de medir el volumen del cemento, y de que es más cómodo medir el cemento por medio de la forma en que se le encuentra en el comercio, es decir, del contenido de un saco o de un barril, lo que equivale a medirlo en peso, resultará siempre más cómodo fijar las proporciones, tomando por una parte cierto número entero de sacos o barriles de cemento y por otra el volumen de la arena y el de la piedra que correspondan a ese peso de cemento. A este respecto conviene hacer una observación relativa al volumen de la arena; en efecto, al fijar las proporciones del hormigón se indica siempre el volumen de la arena seca y tiene que hacerse así, porque es la única manera de que ese volumen quede bien determinado, pues una misma cantidad de arena ocupa volúmenes bastante diferentes, según sea el grado de humedad que tenga. Si se toma cierta cantidad de arena seca, suficiente para llenar exactamente una medida de un volumen determinado y se humedece esa arena, se observará que se llena la medida y sobra arena; si se aumenta el grado de humedad, volverá a sobrar arena y así sucesivamente, hasta llegar a cierto grado de humedad, más allá del cual principia a faltar arena para llenar la medida: sucede algo así como si a medida que aumenta el grado de humedad la arena fuera esponjándose, es decir, que fuera aumentando el volumen de sus huecos, y esto es en realidad lo que sucede, porque la mayor humedad hace que los granos de arena resbalen más difícilmente unos sobre otros y quede mayor número de huecos y más grandes, hasta que se llega a cierto grado, más allá del cual la nueva humedad desempeña el papel de lubricante que hace que los granos de arena se acomoden más fácilmente y ocupen menos lugar, de tal modo que llegará un cierto grado de humedad en que la arena ocupará menos volumen que el que ocupaba, cuando estaba seca. En cada caso será, pues, necesario determinar cuál es el grado de humedad habitual en la arena que debe emplearse y estudiar en seguida, experimentalmente, cómo aumenta el volumen de la arena seca a medida que se aumenta su grado de humedad, para fijar en cuánto habrá que aumentar el volumen de la arena húmeda para obtener la cantidad de arena seca que se necesita. En Valparaíso, por ejemplo, se hizo ese estudio y se llegó a la conclusión de que había que aumentar en 10% aproximadamente el volumen de la arena húmeda, para obtener la cantidad de arena seca que indicaba la composición que debía tener el hormigón.

Por lo que hemos visto antes, es necesario tratar en cada caso de obtener un mortero o un hormigón lo más compacto que sea posible, lo que en gran parte depende de la proporción que se emplee; pero, como el cemento es siempre el material más costoso, convendrá buscar las maneras de aumentar esa compacidad, disminuyendo en lo posible el peso de cemento

empleado, es decir, reduciendo los huecos de la arena, o sea, mejorando su composición granulométrica, aumentando la proporción de los granos finos o de los granos gruesos de ella, para lo cual será necesario muchas veces recurrir al empleo de un material preparado mecánicamente con ese objeto, o aprovechar uno que resulta de otra operación de la misma faena, como sucede con el polvo del chancado, en el caso de los granos finos. En este sentido es interesante ver el caso del puerto de Iquique, en el cual no se encontraba arena natural de condiciones convenientes para la ejecución de las obras, y se recurrió a fabricarla en la faena misma de bloques artificiales.

El pliego de condiciones para el hormigón destinado a los bloques artificiales de este puerto consultaba para el hormigón la composición que sigue: 400 k. de cemento por metro cúbico de arena y un metro cúbico de mortero por dos de piedra chancada; la arena debía contener solamente granos de menos de 3 milímetros de diámetro, y la piedra chancada debía estar comprendida entre 5 y 60 milímetros. Como era necesario determinar el rendimiento del mortero para fijar la cantidad de materiales que debían entrar en la composición de un metro cúbico de hormigón y en el volumen necesario para alimentar la betonera, se hicieron previamente experiencias para ver la influencia que tenían los granos finos (menores de 0,5 mm.) y los granos gruesos de la arena (de 0,5 a 3 mm.), para lo cual se procedió a preparar arenas de composiciones granulométricas diferentes, comprendidas entre 100% de granos finos y 100% de granos gruesos, y haciendo variar de 10% en 10% la proporción de los dos tipos de granos, se pesaron en seguida litros de las diversas arenas así obtenidas y se obtuvieron los resultados que se indican en el cuadro siguiente:

N.º de la mezcla	Granos de 0,5 a 3 mm.	Granos menores que 0,5	Peso del litro
1	100%	0	1,52 k.
2	90	10	1,65
3	80	20	1,79
4	70	30	1,86
5	60	40	1,94
6	50	50	1,92
7	40	60	1,84
8	0	100	1,57

Las cifras de este cuadro indican que los pesos de las arenas formadas por granos finos o por granos gruesos exclusivamente tienen valores muy parecidos y que el peso va aumentando hasta llegar al tipo N.º 5, en que hay 60% de granos gruesos y 40% de granos finos. La arena que se obtenía de la fabricación hecha en la faena contenía 35% de granos finos y 65% de granos gruesos, es decir, era muy parecida en su composición granulométrica a la que había demostrado ser más compacta. En el Plie-

go de Condiciones se excluían los granos menores de 0,5 mm., de manera que en realidad la arena que se fabricaba era superior, en este sentido, a la que se pedía.

Se hicieron experiencias en que se hizo variar la cantidad de agua, para conocer el rendimiento del mortero. Primero se preparó mortero con la arena que prescribía el Pliego, es decir, compuesta únicamente de granos gruesos (mayores de 0,5 mm. y menores de 3 mm.) y con la arena que se fabricaba, que para mayor comodidad llamaremos *arena del silo*, con 120 litros de agua por metro cúbico de arena y 400 k. de cemento, con el resultado siguiente:

Con arena de 0,5 a 3 mm.	rendimiento de	1,017
Con arena del silo	„	de 1,099

resultado que demuestra la influencia favorable de la mayor compacidad obtenida por la buena proporción de granos finos. Se hicieron en seguida experiencias con arena del silo solamente, haciendo variar la proporción de agua, como se ve en el cuadro que sigue:

Arena del silo	agua	120 lt.	rendimiento	1,099
„	„	160	„	1,189
„	„	200	„	1,308

En estas cifras se ve que el aumento en la cantidad de agua fué favorable al rendimiento del mortero; pero el volumen del agua suplementaria fué siempre mayor que el aumento obtenido en el mortero, lo que indica que aun en el caso de mayor cantidad de agua no hubo exceso de ella.

Se hicieron en seguida experiencias de resistencia sobre hormigones de composiciones diferentes, entre los cuales se retuvieron especialmente los dos siguientes, cuyas resistencias fueron prácticamente iguales:

	Tipo A	Tipo B
Cemento	189 k.	164 k.
Arena del silo.....		0,410
Arena de 0,5 a 3 mm.....	0,423	
Piedra chancada	0,946 >	0,922 >
Peso de un m. cúbico.....	2,360 >	2,420 >

Como puede verse, el hormigón fabricado con la arena del silo, es decir, el del tipo B, no solamente es más compacto, lo que es una garantía desde el punto de vista de la resistencia a la acción del agua de mar, sino que es más barato, para una misma resistencia, pues en su composición entra menor cantidad de arena y menor cantidad también de piedra chancada.

Para terminar el estudio de este hormigón quedaba por precisar la cantidad de agua que debía emplearse en la fabricación de un metro cúbico de hormigón, que según lo que hemos visto más atrás, debía ser alrededor de 200 litros. A este efecto, se fabricaron bloques de 16,3 metros cúbicos, hechos con tres tipos diferentes de hormigón, en los cuales se empleó la arena del silo, en la proporción de 400 k. de cemento por metro cúbico de arena y 2,2 metros cúbicos de piedra chancada, lo que equivale sensiblemente a las proporciones del hormigón del tipo B de más arriba, y se hizo variar la cantidad de agua. Estos bloques fueron pesados una semana después de fabricados, y se obtuvieron los resultados que se indican en el cuadro que sigue:

	I	II	III
Cemento.....	149 k.	161 k.	162 k.
Arena del silo.....	373 l.	403 l.	405 l.
Piedra chancada.....	822 l.	885 l.	890 l.
Agua.....	162 l.	191 l.	220 l.
Peso de un metro cúbico.....	2,43 t.	2,58 t.	2,60 t.
Aspecto del hormigón.....	muy seco	normal	muy húmedo

Estos bloques fueron fabricados en la cancha de la faena, empleando los mismos elementos que se emplearía después y haciendo todas las operaciones con la proligidad acostumbrada, de manera que los resultados que se dedujeran de su fabricación pudieran servir de guía para juzgar de lo que podía esperarse en la ejecución de las obras. Naturalmente, se adoptó el hormigón que corresponde al tipo II, de consistencia normal, redondeando las cifras, como se indica a continuación, con lo cual se obtuvo un hormigón extraordinariamente denso:

Cemento.....	162 k.	
Arena del silo.....	0,41	m. cúb.
Piedra chancada.....	0,89	,
Agua.....	0,20	,
Peso de un metro cúbico.....	2,58	toneladas

En el puerto de Antofagasta se empleó un hormigón de este mismo tipo, es decir, de 400 k. de cemento por metro cúbico de arena y un metro cúbico de mortero por dos de piedra chancada, y entraron en su composición los materiales que se indican a continuación, para formar un metro cúbico:

Arena, 0,46 m. cúb.; Piedra, 0,92 m. cúb.; Cemento, 160 k.

Como se ve, las cantidades de piedra chancada y arena fueron aquí un poco mayores que en Iquique y en cambio la cantidad de cemento un poco menor. En Antofagasta se fabricó el hormigón lo más seco que fué posible hacerlo, lo que explica las diferencias en las cifras.

A propósito del estudio hecho para determinar las proporciones de los materiales, en el puerto de Iquique, seguramente llamará la atención que no se hiciera una determinación del volumen de los huecos de la arena, a fin de llenarlos con cemento y obtener así la proporción más conveniente entre estos dos materiales; pero en realidad no tiene ello nada de extraño, puesto que las bases del contrato establecían que se emplearían 400 k. de cemento por metro cúbico de arena seca, proporción que generalmente se estima pobre; en efecto, la mayor parte de las bases para la construcción de hormigones destinados a obras marítimas establecen la dosis de 500 k. de cemento por metro cúbico de arena para los hormigones que van a estar bajo el agua y admiten excepcionalmente 450 k. En el caso de Iquique, en que entraron 0,41 metro cúbico de arena por metro cúbico de hormigón, si los huecos de la arena hubieran representado el 35%, el volumen de ellos habría sido de 143 litros, que se habrían llenado con 216 k. de cemento, contando con que 1 k. de cemento ocupa un volumen de $2\frac{1}{3}$ de litro, hecho pasta, cantidad superior a la que se empleó en la fabricación del hormigón y que equivale a un poco más de 500 k. por metro cúbico de arena.

(Continuará)