

---

ANALES  
DEL  
INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

---

Uso del concreto y del concreto armado para construcciones marítimas

POR

LEONARDO LIRA

(Conferencia dada en el Instituto el Miércoles 27 de Marzo de 1918)

Para aquellos de mis colegas que no han tenido que preocuparse de poner al día sus conocimientos sobre construcciones marítimas, la cuestión de la resistencia del concreto y del concreto armado a la acción del agua del mar, aparece como uno de tantos puntos oscuros de la ingeniería, en que las opiniones están divididas.

Los que hayan avanzado algo en el conocimiento de esta cuestión recordarán en estos momentos conclusiones más precisas que pueden representar como el estado actual de las ideas corrientes sobre esta materia. Esas conclusiones serían más o menos las siguientes: no hay cemento que tenga una resistencia absoluta contra la acción del agua del mar; el cemento para construcciones marítimas debe tener poca alúmina y cal; el enemigo más terrible del concreto sería según unos la magnesia que existe en el agua del mar y, según otros, el ácido sulfúrico contenido en ella en forma de sulfatos solubles. Ingenieros tan autorizados como Taylor y Thompson sostienen tales ideas.

El propósito de la presente conferencia es dar a conocer las conclusiones que sobre esta cuestión han llegado a sentarse en Estados Unidos después del más concienzudo, paciente y científico estudio que se haya hecho en el mundo sobre la materia. Estas conclusiones si no son definitivas pueden considerarse por lo menos como el principio de la base más segura de la solución de este problema. Me ha parecido que en este país, en que se ha comenzado y se piensa continuar la construcción de algunos puertos, en cuya estructura se emplean y se emplearán algunas decenas de miles de metros cúbicos de concreto y concreto armado, avaluados en millones de pesos, me ha parecido, digo, que es útil dar a conocer estas conclusiones a los que no hayan tenido oportunidad de leerlas en

sociation, quienes bajo los auspicios del Gobierno de los Estados Unidos de Norte América, visitaron casi todas las construcciones marítimas de ambas costas de los Estados Unidos, Canadá y Cuba, acumulando, además, voluminosa documentación sobre las demás construcciones marítimas del mundo. Dos años enteros, 1915 y 1916, han sido dedicados a este estudio y el resultado de él queda basado sobre el examen minucioso de 146 construcciones marítimas. Tan enorme base experimental autoriza para considerar este estudio; como el más importante que haya aparecido hasta hoy. Cabe observar que este mismo gran número de construcciones examinadas, colocadas en climas absolutamente diferentes, sujetas a las más diversas condiciones de sollicitación, elimina la posibilidad de interpretaciones erradas de los hechos atribuibles al examen de casos particulares determinados, que no permiten sacar conclusiones de carácter general. En el escaso número de casos examinados se encuentra la causa del nacimiento de explicaciones contradictorias las unas de las otras o erradas, que mis colegas ya conocen. Naturalmente que al proceder al estudio de estas 146 construcciones, fué necesario examinar desde los proyectos y sus especificaciones para continuar con el examen de los materiales empleados, de los métodos de construcción usados. Hubo de buscarse fotografías de las faenas, informaciones de las personas que trabajaron en ellas y, excusado es decir la dificultad que ha habido en reconstruir la historia de estas construcciones y la influencia decisiva que han tenido en la explicación de muchos hechos, las informaciones de las personas que tomaron parte en la construcción. Es una lección que se desprende para nosotros sobre la necesidad y conveniencia de dejar la mayor documentación posible sobre cada obra que ejecutemos, a fin de que ella pueda servir de base a cualquiera investigación posterior en pró del progreso de la ciencia de la construcción.

La investigación practicada ha venido a demostrar que es cierto que un proyecto defectuoso, la mala calidad de los materiales o métodos de construcción criticables pueden causar la desintegración del concreto, pero es también cierto que el mejor concreto que pueda fabricarse hoy día será irremediamente destruído si no se protege su superficie contra la acción física de raspaje por el roce. La causa primera de la destrucción del concreto en el mar está aquí: en la destrucción por el roce de la película superficial de carbonato de calcio que se forma en toda construcción de concreto. Es sabido que uno de los componentes del cemento es la cal, que cuando el concreto está fresco queda en él en forma combinable con el anhídrido carbónico del aire, formando así la película protectora de carbonato de calcio insoluble en agua. Esta reacción tiene también lugar en el concreto bajo agua y allí el anhídrido carbónico es proporcionado por la misma agua del mar. Destruída físicamente esta película, sobreviene la acción química por medio de los sulfatos del agua del mar, especialmente el sulfato de magnesio. En tal caso, la cal se transforma en sulfato de calcio soluble en el agua y las sales de magnesio se precipitan en forma de hidróxido de magnesio, formando esas conocidas eflorescencias blandas que denuncian el proceso de destrucción del concreto. Estas

dos fases de la destrucción no son el resultado de suposiciones más o menos lógicas, sino que su existencia ha sido comprobada con largos estudios físicos, químicos y microscópicos, cuya exposición aborro en obsequio a la brevedad. Sólo de paso contestaré una observación que probablemente ya se habrá hecho más de alguno de los que me escuchan y que es la siguiente: si la capa protectora del concreto la constituye el carbonato de calcio que forma la cal del cemento con el anhídrido carbónico del aire o del agua, ¿por qué después de raspada la película superficial no vuelve a formarse más carbonato con la cal del concreto que está más al interior? La razón está en que en el concreto ya fraguado la cal se ha cristalizado transformándose en hidróxido que no reacciona con las pequeñas cantidades de anhídrido carbónico existentes en el aire o en el agua.

Hemos llegado, en consecuencia, a la conclusión de que no hay destrucción del concreto, o sea, acción química del agua de mar, sin una previa acción física sobre su película superficial. Por consiguiente, se hace necesario proteger esta película superficial contra la acción del roce de los cuerpos flotantes, algas, arenas, embarcaciones, hielo, acción de las heladas que hacen reventar el agua en los poros de esta película.

Resultan ahora fácilmente explicables una serie de hechos observados en las construcciones de concreto y que hasta ahora aparecían como especie de fenómenos naturales. Se explica, por ejemplo, que sea el concreto sobre el nivel de aguas el que sea destruido y que él bajo aguas quede inmune, aún cuando sea de inferior calidad y aún cuando sean las sales del agua del mar las causantes de la destrucción. Se explica esto, digo, porque se necesita la acción física previa del roce que se ejercita en la superficie del agua. Se explica, que la acción destructora sea lenta en buenos concretos, cuando no hay otra acción física que la del roce de las olas, porque éstas no tienen la fuerza suficiente para arrastrar las láminas de sales magnésicas, producto de una primera acción química y que sirven como protección del concreto inferior. Se explica, que la acción destructora sea más activa en los climas fríos, porque ahí las heladas ayudan a la destrucción de la película superficial.

¿Cómo proteger ahora esta película? Evitando, en primer lugar, el presentar al agua puntos en que su acción de roce pueda ser más enérgica; en consecuencia, se evitarán los ángulos y puntas agudas, dando preferencia a los pilotes redondos sobre los rectangulares o poligonales; entre alta y baja marea se usarán chaquetas de metal o madera creosotada o granito, se evitará picar la superficie para colocar adornos. Además, se tendrá un especial cuidado, durante la construcción, en la limpieza de las juntas de trabajo. Sucede con frecuencia que los moldes usados no son estancos, de donde resulta que al subir la marea entra el agua por las juntas y cubre la superficie del concreto, dejando al retirarse una capa de tiza blanda que en parte es cemento y en parte magnesia del agua del mar. Si no se limpia esta capa, queda allí una solución de continuidad en la construcción, pues

esta capa es fácil de sacar por la acción de los rozamientos y enseguida viene la acción química.

En lo que se refiere a las construcciones de concreto armado, la investigación practicada por los señores Wig y Ferguson ha venido a demostrar que la mayoría de las construcciones marítimas de concreto armado, muestran hoy deterioros por corrosión de las armaduras sobre el nivel de aguas. La ingeniería ha sufrido un error lamentable al creer, como se ha creído hasta el presente, que basta un pequeño espesor de concreto para proteger completamente la armadura. La experiencia ha venido a demostrar que aún un espesor de 5 cms. de un concreto de primera clase es insuficiente. Este resultado es indiscutible, pues se ha observado en construcciones de 1 a 10 años de edad. La observación ha demostrado que la corrosión comienza en la parte de las armaduras, situada sobre el nivel de aguas y que, posteriormente, se extiende algo hacia abajo, pero rara vez llega al nivel de baja marea. Se ha observado también que la acción corrosiva es más intensa en los climas cálidos y húmedos. ¿A qué atribuir esta destrucción? Mis colegas saben que hasta hoy se ha atribuido ésto a la acción de corrientes eléctricas. Desde luego, hay que desechar la suposición de que la causa exista en el empleo de agua de mar para hacer las mezclas, pues la corrosión se observa tanto en las mezclas hechas con agua de mar como en las fabricadas con agua dulce e ingredientes libres de agua de mar. La causa es algo más complicada y reside en la acumulación de sales en los poros del concreto, en la región situada sobre marea media; acumulación que tiene lugar del modo siguiente: el aire del mar lleva en suspensión partículas de agua de mar que son absorbidas por capilaridad por estos poros y, posteriormente, esta humedad se evapora precipitando las sales disueltas en ella. Esta humedad del aire del mar no es solamente vapor de agua, como podría pensarse a primera vista, y en tal caso no tendría explicación la presencia de sales en ella, sino que está formada por pequeñísimas gotitas de agua de mar. Los minuciosos estudios del Geological Survey, han demostrado que esta humedad llega, tierra adentro, hasta algunas millas de la costa. El ácido que corroe las armaduras y que va en estas sales, es el  $\text{ClO}_2\text{H}$ . Ahora, ¿cómo es posible que este ácido llegue a penetrar tan adentro en el concreto para alcanzar al interior de la masa? Es que la acción de capilaridad se encuentra ayudada por una acción física que proviene de la oxidación del fierro: el acero corroido ocupa dos veces su volumen primitivo, desarrollando, en consecuencia, presiones tan enormes que causan la rasgadura del concreto, lo que facilita la entrada de los ácidos. Que el fenómeno se verifica en esta forma lo viene a demostrar, en parte, el hecho de que las rasgaduras del concreto armado se observan siempre en las vecindades de las armaduras. Además, se observa que la destrucción desaparece en la parte de la construcción bajo alta marea, lo que indica que la corrosión del fierro antecede a la ruptura, pues en esta parte de la construcción cubierta por el agua, el aire que lleva la humedad no tiene posibilidad de entrar en las aberturas capilares.

Conocida la causa del mal, queda indicar el remedio. El remedio radical como se ve, no puede ser sino la supresión de las armaduras sobre el nivel de alta marea, conservando las armaduras en la parte inferior. La acción destructora puede retardarse considerablemente disminuyendo el fierro en lo posible en la parte sobre aguas, usando barras de pequeño diámetro y doblando las armaduras, hacia el interior, al nivel de marea media, con el objeto de aumentar el espesor de la capa de concreto protectora, que no debe bajar de 7 cms. Una buena solución consistiría en usar fierro galvanizado.

Por lo que se refiere a la calidad del cemento, la investigación de Wig y Ferguson ha venido a demostrar que las ideas existentes a este respecto eran bastante erradas. Así, por ejemplo, no es efectivo que sean nocivos ni la magnesia ni el anhídrido sulfúrico pudiendo aceptarse de estos componentes, sin inconveniente, hasta un 8 y un 2<sup>o</sup>%, respectivamente. En realidad, la proporción de óxido de aluminio, magnesia y anhídrido sulfúrico, puede ser cualesquiera, pues en las construcciones en buen estado se ha observado que los cementos usados en ellas contenían desde un 4,6 a un 11,4% del primero, desde un 0,9 a un 16,4% de la segunda y desde un 0,96 a un 1,7% del tercero. La parte del cemento más vulnerable es la cal, pero, desgraciadamente, su porcentaje que alcanza como se sabe a un 60% no puede disminuirse sin disminuir la hidráulicidad del cemento. No hay inconveniente en usar en la preparación de las mezclas el agua de mar, siempre que no se trate de concreto armado; en éste no conviene usarla, pues, se favorece la corrosión del fierro. Por lo que se refiere al uso del agua de mar, como se ve, la investigación no ha venido a sentar una novedad, pues ya en Gran Bretaña se permitía el uso de esta agua en la fabricación de los concretos. Por lo que se refiere a la arena y a la piedra deberían usarse materiales que den el concreto más denso de acuerdo con lo indicado en una conferencia que tuve el honor de dictar el año pasado. Para terminar con lo que se refiere a materiales, conviene indicar que ninguno de los ingredientes recomendados para obtener la impermeabilidad del concreto han dado resultado y, en cambio, a veces disminuyen la resistencia del concreto. Entre tales ingredientes pueden citarse el Toxcement, Impervite, Keystone, Trus Con, Hydrolithic, Wemco, Medusa, etc.

Tiene grande influencia en el éxito de las construcciones de concreto la calidad de la mano de obra. Sólo contratistas experimentados que empleen obreros competentes y bien equipados pueden obtener éxito en esta clase de obras. Y en este sentido ha sido concluyente la investigación en cuanto al mal resultado de aceptar la propuesta más baja, por el solo hecho de serlo, prescindiendo de la competencia y antecedentes del proponente. Como corolario se ha demostrado que es necesario que los inspectores de obra sean especialmente preparados, que las especificaciones sean más estrictas que para las obras hechas en tierra y que en la inspección se sea más exigente, pues pequeñas tolerancias que en las obras en tierra pueden ser aceptables, aquí no deben admitirse. Merecen particular atención los siguientes puntos: limpia de las juntas de trabajo, extracción de la are-

na que se infiltra en los moldes, calafateo de las filtraciones de los moldes, retiro de éstos.

Respecto a los procedimientos de construcción mismos, es necesario que los moldes sean estancos tanto para la parte de la construcción bajo aguas, como para aquella situada sobre aguas. Para la juntura del molde con el fondo del terreno es recomendable emplear concreto en sacos y deberá hacerse revisar el trabajo por un buzo. Las maderas de los moldes deberán acepillarse para tener concreto con caras lisas; y para evitar la adherencia con el molde, lo mejor es aceitar con un aceite mineral cualquiera; los mejores resultados se obtienen con dos manos de Kerosene. Debe prohibirse el uso de aceite de ballena.

Con relación a la proporción de las mezclas, vale lo que expuse en mi conferencia anterior: como principio general las proporciones deben tender a obtener el concreto más denso y con decir ésto se dice que es inútil fijar esas proporciones a priori en vista de reglas empíricas. Lo único racional es fijarlas de acuerdo con experiencias directas que deberán repetirse de cuándo en cuándo durante la construcción, cada vez que se vea que la composición granulométrica del material varía. Esto indica la necesidad de que en las grandes obras exista al pie de obra un laboratorio que haga estas investigaciones en forma sistemática y desde el cual deben partir las instrucciones a los inspectores de obras. Sería conveniente que esto se hiciera en nuestras grandes construcciones, y creo que se hace buena obra tratando de formar opinión en el sentido de que estas medidas son absolutamente indispensables para garantizar la buena ejecución de las albañilerías. El país va a invertir algunos millones de pesos en los puertos de Valparaíso, Antofagasta y otros, y esto sólo indica que no hay que despreciar esta cuestión como un asunto baladí.

Es de capital importancia en el éxito la cantidad de agua que se use para las mezclas. Mis colegas saben que en esta materia la ingeniería ha oscilado entre dos escuelas extremas: habiendo comenzado con la escuela de los concretos secos, pasó a la escuela opuesta de los concretos con exceso de agua. La experiencia ha venido a demostrar que ambos extremos son de consecuencias lamentables: un exceso de agua puede hacer disminuir la resistencia del concreto en un 50 %. Las conclusiones a este respecto son categóricas y de toda evidencia, pues existen no pocas obras que son una réclame viva del resultado. Me refiero a obras de grande aliento que, por haber exigido algunos años de trabajo, han tenido secciones que han sido ejecutadas de acuerdo con las dos escuelas, usando en ambas los mismos materiales, idénticos procedimientos, los mismos operarios, etc. El resultado ha sido desastroso para la obra y, en cambio, una tercera sección hecha con una conveniente cantidad de agua, se encuentra en perfecto estado de conservación. Desgraciadamente la cantidad conveniente varía con tantas circunstancias que no es posible dar cifras, y todo lo que puede precisarse al respecto es que debe usarse un concreto lo suficientemente seco para permitir una ligera apiso-

neadura que traiga el agua a la superficie. En el concreto armado es conveniente usar concreto un poco más mojado.

Para terminar, sólo me resta decir unas cuantas palabras respecto a la colocación del concreto. Esta puede hacerse con tolva o con cajas de fondo movibles. Cuando se usa tolva al principiar el trabajo hay que cerrarla para evitar que se depositen capas separadas de piedra y arena con cemento en el fondo. Para iniciar la descarga hay que levantarla ligeramente, pero cuidando que no se vacíe para no perder la carga. Contrariamente a lo que se cree, no se puede hacer subir el concreto sobre el borde inferior, sino unos cuantos centímetros. La colocación con cajas tiene la desventaja de que permite una ligera fragua precipitándose en la superficie algo de magnesia.

Si el mar cubre la construcción durante la marea, después hay que limpiar la superficie con escobas duras y lavar con mangueras. Lo mejor es evitar estas juntas, llevando el trabajo con la debida velocidad. Es conveniente pisonear el concreto contra el molde con una espátula a fin de tener superficies lisas y a veces colocar allí mortero. En cuanto sea posible, es preferible usar piezas hechas en tierra.

En resumen, podríamos decir, que esta investigación ha venido a sentar las siguientes conclusiones:

1.º Que casi todas las construcciones marítimas de concreto actuales están en vías de destrucción;

2.º Que el concreto armado construido de acuerdo con la práctica actual en las construcciones está condenado a una rápida destrucción;

3.º Que es posible obtener construcciones durables en casi todas las condiciones exteriores que se presentan;

4.º Que los materiales, el método y la protección de la construcción tienen una influencia decisiva en la duración.