

la durabilidad del hormigón armado en agua de mar

the durability of reinforced concrete in sea water

F. M. LEA y C. M. WATKINS

(«B. R. S. Department of Scientific and Industrial Research Papers», núm. 30, 1960.)

Esta investigación se proyectó para estudiar los siguientes factores:

1. Tipo de cemento.—2. Relación cemento-árido.—3. Relación cemento/agua y consistencia.—4. Adición de puzolanas.—5. Profundidad a que se encuentran las armaduras.

Las probetas de ensayo consistían en pilotes de hormigón armado de 32 cm² de sección y 1,50 m de longitud. En un grupo de pilotes, la armadura (varilla de acero de 2,5 cm de diámetro) se colocó en el centro del pilote, cubriéndose así con una capa de 50 mm de hormigón; en otro grupo, se dispusieron cuatro redondos de acero de 12,5 mm de diámetro en cada ángulo del pilote, colocados de manera que quedaran cubiertos con 25 mm de espesor de hormigón.

Los pilotes se separaron de los moldes de madera a las 24 horas y se curaron durante 7 días en ambiente húmedo y después 21 días al ambiente, antes de su exposición al medio agresivo (se hicieron algunas excepciones). Se prepararon tres pilotes de cada mezcla y con cada distribución de armadura en los distintos medios de conservación.

Además de los pilotes, se prepararon cilindros de 15 cm de longitud \times 7,5 cm de diámetro para el ensayo de resistencia a compresión a varias edades y conservándose en condiciones similares a los pilotes (se trataba de medir el comportamiento del hormigón en masa).

La serie principal se preparó en el año 1929. El número total de probetas preparadas fueron 540 pilotes y 8.000 cilindros.

Los cementos usados en la serie original (1929) eran: cemento Portland ordinario, cemento Portland de endurecimiento rápido, cemento Portland de Alto Horno, cemento aluminoso y mezclas de cemento Portland, bien con una puzolana trass o bien con arena finamente molida en la proporción en peso 60 : 40. Las series más modernas se hicieron con cemento aluminoso y puzolánico, empleando trass, pizarras bituminosas y arcillas activadas.

Los agregados empleados en el hormigón se componían de una parte de arena de río lavada (inferior a 6 mm) y dos partes de grava de río lavada (6 a 12 mm) en peso.

Se emplearon tres proporciones de mezcla en peso:

- mezcla rica: 1 cemento, 0,87 arena, 1,73 grava (1 : 2,6);
- mezcla media: 1 cemento, 1,7 arena, 3,3 grava (1 : 5);
- mezcla pobre: 1 cemento, 3 arena, 6 grava (1 : 9).

Estas mezclas corresponden a 592, 355 y 213 kg de cemento por m³ de hormigón.

Algunas dosificaciones se hicieron con dos consistencias, correspondientes a asentamiento de 12,5 y 50 mm, respectivamente.

Los pilotes de ensayo se expusieron tanto al agua de mar natural como al agua de mar sintética, con una concentración en sales tres veces superior para acelerar cualquier deterioración. En ambos casos se hacían renovaciones periódicas del agua, siguiendo, incluso, los movimientos propios de las mareas.

Conclusiones

1. La conclusión general que surge de este estudio es que la causa primaria de destrucción de los pilotes de hormigón armado era la corrosión de la armadura y no la desintegración del hormigón a consecuencia de efectos físicos o químicos de las sales del agua de mar. Esto último, sin embargo, tiene una influencia sobre la incidencia de la corrosión, puesto que ésta se hace progresivamente mayor a medida que disminuye la resistencia del cemento al ataque directo.

2. El contenido de cemento y el espesor de la capa protectora de la armadura es de la mayor importancia al considerar la durabilidad de los pilotes.

Con la mezcla rica (1 : 2,6), rara vez empleada, y una capa de 5 cm de hormigón sobre las barras de la armadura, no se presentó agrietamiento alguno en el hormigón, empleando cualquier cemento, tanto en los diez primeros años de exposición controlada como en los trece años siguien-

tes de exposición incontrolada. Esto es también aplicable a los pilotes con hormigón puzolánico (1 de cemento: 0,66 de puzolana: 4,33 de árido), que suponiendo la puzolana árido fino equivale a una relación 1 : 5 con cemento normal. No se encontró corrosión del acero al romper los pilotes.

Para una relación en peso más corriente (1 : 5), también con 5 cm de hormigón sobre la armadura, empleando cementos Portland, aparecieron agrietamientos en mayor o menor extensión los diez primeros años, acentuándose el fenómeno en los trece años posteriores. Pilotes similares hechos con cemento aluminoso, cemento Portland de Alto Horno y cementos trass-Portland (estos últimos equivalentes a una mezcla 1 : 9 de cemento Portland, supuesto el trass árido fino), no manifestaron defecto alguno en los diez primeros años, pero después de los trece años siguientes sólo se mantuvieron íntegros los preparados con cemento aluminoso y mezcla de Portland y trass. Al romper estos últimos pilotes se encontró alguna corrosión de las armaduras en la mitad de ellos para ambos cementos.

Con una capa de 25 mm de hormigón sobre la armadura y una mezcla rica (1 : 2,6) sólo quedaron libres de grietas los pilotes hechos con cemento aluminoso y cementos Portland de Alto Horno, después de diez años; y sólo dos cementos aluminosos después de los trece años siguientes. Incluso en este último caso se observó corrosión del acero a lo largo de varios centímetros. En la mezcla media, sólo los dos cementos aluminosos se mantuvieron en perfecto estado los diez primeros años, aun cuando más tarde se agrietaron los pilotes.

Los resultados de las series que se hicieron con puzolana artificial son menos concluyentes porque en la mayor parte de los casos se ensayaron sólo pilotes con 25 mm de hormigón que cubre la armadura y expuestos nada más que al agua de mar artificial; los mejores resultados eran análogos a los obtenidos con el trass.

3. En muchos casos, los pequeños cilindros de hormigón de 15 cm de longitud y 7,5 cm de diámetro sufrieron mayores desperfectos que los pilotes mayores. El cemento aluminoso era el más resistente, seguido por el Portland de Alto Horno y los puzolánicos, siendo los cementos Portland los menos resistentes.

4. Las observaciones en el agrietamiento de los pilotes, corrosión de la armadura en piezas no agrietadas y deterioro de los cilindros de hormigón constituyen una imagen completa del efecto del contenido de cemento en el hormigón, de la importancia de la capa protectora de la armadura y del interés en el tipo de cemento a emplear. Empleando cementos Portland y trass-Portland, el orden de resistencia decreciente al "cracking" era:

1. Pilotes con dosificación rica (1 : 2,6) y 5 cm de cobertura.
2. Pilotes con dosificación media (1 : 5) y 5 cm de cobertura.
3. Pilotes con dosificación rica (1 : 2,6) y 2,5 cm de cobertura.
4. Pilotes con dosificación media (1 : 5) y 2,5 cm de cobertura.
5. Pilotes con dosificación pobre (1 : 9) con 5 ó 2,5 cm de cobertura.

Empleando cementos aluminosos y Portland de Alto Horno había poca diferencia entre (2) y (3) con alguna tendencia a una inversión en el orden.

Aun cuando no apareció en una extensión apreciable la desintegración del hormigón de pilotes por ataque químico del agua de mar, había, en general, un paralelismo entre el orden de resistencia al ataque químico de los varios tipos de cemento empleados y el grado de protección contra la corrosión proporcionado a la armadura. En los ensayos no se empleó ningún cemento Portland resistente a los sulfatos, pero es de esperar que proporcione mejor protección a las armaduras que los cementos Portland ordinario y de endurecimiento rápido empleados en estos ensayos.

5. Los resultados del presente trabajo muestran que, empleando un hormigón 1 : 5 con cemento Portland (ordinario o de rápido endurecimiento), una cobertura de hormigón de 5 cm sobre la armadura es insuficiente para garantizar la protección contra la corrosión del acero en la parte de los pilotes que quede sobre el nivel de marea baja, y que se requiere o dosificación más rica o una cobertura mayor.

En un período de diez años, una cobertura de 5 cm de hormigón 1 : 5 es suficiente para proteger a las armaduras de la corrosión, empleando cementos Portland de Alto Horno y trass-Portland, aunque al cabo de veintitrés años algún pilote hecho con el primer cemento se ha fisurado y algunos de uno de los cementos trass empleados.

Por encima de todos, el cemento aluminoso fue el que se comportó mejor hasta los veintitrés años, aunque debe señalarse que el comportamiento de este cemento puede afectarse mucho si se alcanza una temperatura alta en la masa de hormigón. La evolución de calor en la reacción del cemento con el agua es rápida, y el riesgo de alcanzarse temperaturas elevadas aumenta con la sección del pilote. El cemento aluminoso es inadecuado para emplear en aguas tropicales.