

Durabilidad del hormigón

M.^a JOSE ESCORIHUELA y OLGA FERNANDEZ-PEÑA (1)

IETcc

PROTECCION - I

La durabilidad del hormigón, tal y como la define el Prof. Oldrich Valenta, “es el conjunto de cualidades del hormigón que le permiten poseer al final de su vida prevista útil, un coeficiente de seguridad aceptable”.

Un buen hormigón es resistente en muchos medios a los que está expuesto; por lo tanto, la primera regla de protección que hay que observar, es el asegurarse la ejecución de un hormigón de calidad:

- Calidad de su composición, tanto desde el punto de vista de la granulometría de sus áridos como el de su contenido en cemento, que debe de ser lo bastante rico; el contenido de agua, que debe de limitarse estrictamente a asegurar la impermeabilidad y la compacidad del hormigón y, finalmente, calidad en cuanto a su compactación y curado, cuyo cuidado es muy primordial.

Hay que tener en cuenta que si el hormigón no es de buena calidad o no se ha ejecutado adecuadamente, su resistencia potencial a los distintos medios agresivos se reduce considerablemente. Para que una buena capa protectora sea efectiva, debe de estar intacta. Si el hormigón no está bien hecho, las capas protectoras se agrietan o parten, cuando las grietas del hormigón, sobre el que están aplicadas, originan tensiones.

A veces, hay casos en los que el hormigón necesita una protección adicional contra el ataque producido por distintos agentes agresivos. Esta protección sólo se le puede dar conociendo o previendo el agente causante del daño, así como el grado del daño que se pueda producir.

La degradación del hormigón puede estar provocada por una serie de factores que influyen sobre la durabilidad. En el cuadro 1 damos la clasificación de los agresivos y sus efectos, de O. Valenta.

De todo lo expuesto, se deduce que es importante conocer la naturaleza del ambiente en el que se va a emplazar la obra y, muchas veces, es necesario hacer estudios previos adicionales, tales como prospecciones geofísicas (sobre todo en obras de ingeniería de cierta envergadura), que permitan conocer qué clase de terreno es, en el que se va a realizar la obra y qué problemas de durabilidad pueden plantearse, pudiendo así prever, qué tipo de protección debe aplicarse; es decir, si sólo basta una buena protección adicional, o es necesario hacer el hormigón con cementos especiales.

Estos ambientes, sus efectos y las distintas protecciones que se pueden aplicar, va a ser nuestro tema de Protección.

(1) Conferencia pronunciada por O. F.-Peña, en el curso, **CEMCO-76**.

CUADRO 1

Clasificación de los agresivos y sus efectos (O. Valenta, Simp. Int. Quím. del Cemento en Tokio, 1968)

Grupos	Agente agresivo	Efecto sobre el hormigón
Efectos mecánicos	Carga, sobrecarga, choque. Impactos y rozamientos. Agua corriente y aire.	Grietas, principalmente en el conglomerante. Erosiones. Trituración. Erosión, cavitación.
Efectos físicos	Variaciones de temperatura y diferencias. Cambios de humedad y no uniformidad. Fuego. Temperatura alta. Corriente eléctrica y radiación.	Grietas, fallos en la unión cemento/árido. Grietas y pérdida de unión cemento/árido. Grietas y cambios químicos. Corrosión armaduras, disolución enlace cemento/árido.
Efectos químicos	Aire y otros gases. Aguas agresivas. Productos químicos. Suelos y suelos minerales.	Anulación enlace pasta/árido, SH_2 , SO_2 , CO_2 y NH_3 reaccionan. Anulación unión pasta/árido. Reacciones de SO_4H_2 ; sulfatos aguas carbónicas, cloruros. Reacciones de ácido y sales ácidas. Reacciones de ácidos débiles, de sulfatos zeolitas.
Efectos biológicos	Vegetación. Microorganismos (bacterias, formas microscópicas de vida orgánica).	Fisuras. Ataque por jugos. Humedad. Formación de sulfatos. Relajación mecánica de la textura.

En el cuadro siguiente, se presenta el esquema de las causas que determinan la corrosión en los distintos ambientes.

CUADRO 2

Factores que determinan la agresividad

De una atmósfera	<ul style="list-style-type: none"> — Contenido en gases agresivos. — Contenido en polvo. — Contenido en humedad. 	
De agua	<ul style="list-style-type: none"> — Procedentes del agua — Procedentes del régimen de funcionamiento 	<ul style="list-style-type: none"> — Gases disueltos (CO_2; SO_2; etc. — pH. — Sales disueltas. — Temperatura. — Presencia de microorganismos (bacterias anaerobias y aerobias). — Turbulencia. — Inmersión intermitente.
De un suelo	<ul style="list-style-type: none"> — Porosidad. — Conductividad eléctrica. — Sales. — Grado de humedad. — Corrientes parásitas. 	

Ambientes gaseosos

Los gases más frecuentes que de distintas procedencias actúan como agentes contaminantes y agresivos son:

- Gases procedentes de instalaciones térmicas (todos los procedentes de los distintos sistemas de calefacción).
- Gases procedentes de instalaciones industriales.
- Gases procedentes de los medios de transporte.

El grado de peligrosidad de estos gases depende de la clase de combustible y del grado de combustión. En los dos primeros grupos, el grado de combustión, en gran medida, es función del estado y altura de las chimeneas expulsoras. Tanto por defecto como por exceso de aire en el hogar, especialmente donde se quema fuel-oil, se transforma una parte de dióxido de azufre (SO_2) en trióxido de azufre (SO_3); si la transformación total en condiciones de combustión normal está próxima al 1 %, este total puede alcanzar hasta un 3 %, ya que dicha transformación es función de la temperatura del hogar y, por consiguiente, del tiro.

Bajo ciertas condiciones de temperatura en las chimeneas, este trióxido de azufre se combina con el vapor de agua contenido en los humos, formando ácido sulfúrico (SO_4H_2), que se presenta en suspensión en forma de gotitas y que ataca gravemente al hormigón.

El dióxido de carbono (CO_2) mezclado con el aire, en dosis del 10 al 20 %, no ataca al cemento hidratado del hormigón, incluso puede actuar favorablemente, sobre todo, tratándose de morteros ricos.

Sin embargo, con humedad persistente, existe la tendencia a la formación del ácido carbónico (CO_3H_2) que ataca al cemento endurecido con formación de eflorescencias blancas (de carbonato cálcico).

En dosis del 50 % y mayores, el CO_2 al reaccionar con los compuestos hidratados del cemento provoca un desprendimiento de calor, con la consiguiente variación de volumen.

Como medidas de protección, además de una buena compacidad del hormigón, como ya hemos indicado; sobre todo en aquellas partes que están directamente expuestas a la acción de los humos, se recomienda:

- Recubrir las armaduras con un anticorrosivo; p. e. resinas epoxi sobre todo cerca de la superficie que recibe directamente el efecto de los humos; Kleinlogel recomienda dar a las armaduras, antes del hormigonado, una lechada de mortero rico en sal de cromo.
- La distancia entre armaduras y la superficie debe de ser por lo menos de 4 cm, sin contar en esta distancia, el espesor del enlucido.
- Empleo de cementos pobres en cal (cementos de alto horno, siderúrgicos y de escorias) añadidos de puzolanas.
- Evitar a todo trance la entrada de humedades, ya que éstas empeoran esencialmente las condiciones.
- Evitar que los humos actúen sobre el hormigón fresco o insuficientemente endurecido.
- En muchos casos se precisa (debido a las elevadas temperaturas de los gases emitidos) un revestimiento interior con ladrillos de clínker refractarios; a veces se emplea la fluatación o una capa de vidrio soluble con carburundo que con temperaturas elevadas forma un vidriado protector.

- Los humos serán menos nocivos cuanto más diluídos estén en la atmósfera. Hay que procurar que los humos no recaigan alrededor de la chimenea exenta emisora.

Polvo

El polvo, que en la atmósfera está en suspensión en el aire en forma de aerosoles de diferentes tamaños, en función de su naturaleza y procedencia, es un elemento permanente de contaminación y agresividad que, aunque no es el más efectivo, sí es un elemento coadyuvante ya que a través de diversos procesos fisicoquímicos fija en la atmósfera otros gases nocivos (tales como el sulfúrico).

Aguas

El agua es realmente el vehículo principal de los agresivos del hormigón. Los principales fenómenos destructivos que proporcionan las aguas vienen también, expresados en el Cuadro 1.

Como ya les habrán explicado, el grado de agresividad de las aguas aumenta o disminuye según las condiciones locales; así por ejemplo, aumentan el grado de agresividad: el agua que fluye; nivel acuoso muy variable; presión hidráulica unilateral; temperatura del agua superior a 45°C y cuando la estructura de hormigón es laminar.

Por el contrario, el grado de agresividad de las aguas se disminuye cuando: el hormigón se pone en contacto con el agua a una edad de 28 días o mayor; el hormigón se pone en contacto con las aguas agresivas pocas veces durante el año (por ejemplo, en construcciones sobre pilares, durante las lluvias por el alto nivel alcanzado entonces por el agua); cuando el hormigón se encuentra embutido o recubierto por terrenos muy compactos; por ejemplo, en arcilla, limo o marga arcillosa.

Todo esto proporciona una orientación de cómo se podría combatir la actividad agresiva de las aguas.

En general, la principal precaución y protección para una buena durabilidad de un hormigón frente a las aguas agresivas y suelos húmedos, es la preparación de un hormigón lo más compacto y regular posible, así como el empleo de un conglomerante apropiado. Cuanto más denso se haya confeccionado el hormigón y más acertada haya sido la elección del conglomerante, tanto más durable será el hormigón. Por lo tanto se cuidará, particularmente:

- La elección y calidad de los materiales de construcción.
- Los conglomerantes empleados deberán de cumplir las Normas del respectivo país.

Las adiciones de puzolana han sido experimentadas con éxito, independientemente del tipo de conglomerante utilizado. Si se añade puzolana no se tendrá en cuenta al calcular la relación A/C.

Es aconsejable el empleo de cementos sulfato-resistentes, frente a aguas con sulfatos (hasta 1.200 mg/litro de SO_4^{2-}). También, ya les han explicado, es aconsejable el cemento sobresulfatado. Puede emplearse el cemento portland con un contenido máximo de un 5 % en aluminato tricálcico y el cemento portland resistente a los sulfatos exento de aluminato tricálcico.

- En casos especiales, se podrá utilizar el cemento aluminoso o fundido, para aguas con sulfatos; pero que no contengan sales de amonio, no den reacción alcalina, ni la temperatura del agua sea elevada.

Si el hormigón ha de estar en contacto con aguas que contienen muy pocas impurezas o carecen de ellas, por lo que son casi químicamente puras; o con aguas que contienen un pH menor que 6; o contienen más de 10 mg/litro de CO_2 agresivo para la cal, se aconseja aumentar la cantidad de cemento, y mantener alejado el hormigón fresco, de las aguas agresivas, hasta que éste no haya alcanzado el grado de madurez adecuado (o curado).

- Si el hormigón ha de entrar en contacto con el agua antes de estar bien curado o, ha de estar en contacto con agua de alto grado de agresividad, se recomienda revestir el hormigón de una espesa capa compacta de caliza para amortiguar la agresividad del agua o, se incrementarán las dimensiones de los prefabricados de hormigón utilizando simultáneamente lajas de caliza compacta como áridos.
- Los áridos deben cumplir las exigencias de sus Normas, con relación a su contenido en componentes perjudiciales.
- En caso de sollicitaciones mecánicas; por ejemplo, pulimentado con arena, erosión producida por el hielo o por la acción del oleaje, es necesario un recubrimiento todavía mayor de alta resistencia al pulimento.

El agua de mar actúa sobre el hormigón de tres formas diferentes. Al ataque químico producido por las sales disueltas del mar, se suman la acción del hielo y deshielo; la acción de la humidificación-deseccación alternas y la acción mecánica de las olas que desprenden de la superficie del hormigón el material degradado.

A pesar del número de sales disueltas en el mar y cuyo ataque cabría esperar fuera considerable, son mucho menos peligrosas. Se ha comprobado que el ataque producido por las sales disueltas en el mar es mucho más lento que el producido por un agua que contiene sulfatos. También se ha comprobado que el hidróxido magnésico $\text{Mg}(\text{OH})_2$, en presencia del cloruro sódico ClNa se disuelve más rápidamente y esta disolución que justificaría un ataque más violento produce una película que tiene un efecto retardador y, por lo tanto, decrece el grado de agresividad de las disoluciones.

También el CO_2 del mar, al combinarse con la cal libre del conglomerante, forma sobre la estructura del hormigón, una capa de carbonato cálcico que le protege.

Se ha comprobado por medio de ensayos a largo plazo, que el hormigón sumergido en el mar puede sufrir profundas modificaciones en la composición química y en la estructura del cemento endurecido, sin que la forma exterior y la capacidad de comportamiento del cemento en el hormigón sean perjudicados.

Cuando el hormigón marítimo está bien ejecutado, la corrosión se produce, principalmente, en el nivel variable del agua y sobre las partes del elemento de hormigón que se han mojado por el agua de mar, porque al evaporarse el agua, las sales disueltas en ella, quedan cristalizadas en la superficie del hormigón formando las eflorescencias.

Como ejemplo de hormigones bien ejecutados que han resistido bien el agua de mar, Kleinlogel da dos casos relativos a pilotes de hormigón armado construidos en Berlín y que luego se hincaron en terreno marítimo.

- El primer caso se trataba de pilotes con una relación de la mezcla 1:2:4. Se dejaron endurecer dos meses. Desde 1910 estaban sometidos a la acción del agua de mar y 15 años después se conservaban perfectamente. Estaban tan endurecidos y eran tan elásticos, que al efectuar la hinca con el martinete, no se rompió ni uno sólo.

El segundo caso se trataba de una pared de tablestacas para refuerzo de una margen. Los pilotes se confeccionaron en 1918 en posición horizontal con una relación de la mezcla 1:1,5:3; se prolongó el apisonado hasta que el cemento refluyó en la superficie. Antes de que los pilotes endureciesen por completo, se les aplicó un enlucido superficial con mortero de cemento. Los pilotes tenían una longitud de 12 m y una sección de 45-

55 cm, y para sujetar las planchas de tablestacado llevaban en los costados caja o ranura y espiga. Las aristas se redondearon con esmero. El endurecimiento se prolongó durante 30 días. Se hincaron los pilotes en circunstancias difíciles con un martinete de 10 t y chorro de agua para facilitar la hinca. 6 años después hubo ocasión de examinarlos. La superficie una vez limpia de aceite y lógamo (lodo), presentaba un aspecto metálico y, el material estaba tan duro, que difícilmente se hacía mella en él con instrumentos cortantes. Incluso, en algunos sitios de las ranuras o espigas que habían experimentado algún deterioro al hacer la hinca, no se observaron degradaciones debidas al agua de mar.

Entre las medidas de protección a tomar, en construcciones de obras marítimas, se destacan:

- Clase y tipo de cemento: Son más resistentes los cementos con sílice que los ricos en cal. También se recomienda el empleo de los cementos siderúrgicos.
- En caso de necesidad de emplear cemento portland, éste tiene que ser pobre en alúmina.
- Si no hay más remedio que emplear cemento portland rico en cal, debe de añadirse puzolana molida, bien entendido que la puzolana añadida no debe considerarse como un sustitutivo del cemento; es decir, no hay que tener en cuenta la puzolana para calcular la relación A/C.
- Los cementos aluminosos resisten muy bien el agua de mar, siempre y cuando la temperatura del agua no sea elevada, tal y como hemos dicho anteriormente.

Niebla marina

Aunque la composición de la niebla marina es parecida a la del agua de mar, puede ser, para estructura de hormigón aéreas y marinas o construcciones en la costa, mucho más peligrosa que el agua de mar, porque en su estado de aerogel puede penetrar más fácilmente a través del hormigón y de piedra porosa (sillería). La protección contra la acción de la niebla marina es la misma que la aplicada contra el ataque producido por el agua de mar.

Aguas de albañal o desagües urbanos. Acciones de las bacterias

Las aguas de desagües urbanos, generalmente, no ejercen ningún efecto nocivo, sobre un buen hormigón, como lo han demostrado centenares de miles de tuberías de hormigón y conducciones ampliamente empleadas en desagües.

Sin embargo, algunas bacterias anaerobias, convierten el azufre en sulfuro de hidrógeno, que se desprende en estado gaseoso y pasa a la atmósfera de las alcantarillas.

Las bacterias aerobias actúan sobre este sulfuro de hidrógeno y tras diversas transformaciones pasa a ácido sulfúrico, cuya concentración sobre las paredes húmedas del conducto puede llegar a ser hasta de un 5 %. Como hemos dicho anteriormente el ácido sulfúrico ataca al hormigón desintegrándole (como todos los ácidos).

La temperatura favorece el proceso (como regla general puede decirse que un aumento de 10°C de temperatura, eleva la reacción al doble). Como consecuencia, la producción de sulfuro de hidrógeno es mayor en verano que en invierno.

El pH de las aguas también influye. Los límites de pH entre los cuales la reacción se desarrolla más fácilmente son aproximadamente 5 y 8. En pH = 5, la mayoría de las bacterias no subsisten, aunque algunas especies aerobias se encuentran en pH = 1.

En las alcantarillas, la velocidad de escurrimiento también tiene importancia. Un escurrimiento lento ayuda a la decantación de sólidos y, por lo tanto, a la proliferación de microorganismos productores de sulfuro de hidrógeno. Por otro lado, todo cambio brusco de velocidad o de dirección produce turbulencias que, así mismo, favorecen el desprendimiento gaseoso.

La presencia del CO₂ en la atmósfera de la alcantarilla tiene importancia, puesto que se requiere que esté en una concentración alta para que se desarrolle la reacción a partir del sulfuro de hidrógeno (SH₂). Su influencia es debida a que contribuye a bajar el pH de las aguas, y posiblemente influye en el metabolismo de las bacterias oxidantes del sulfuro de hidrógeno.

La protección para impedir el ataque de las bacterias puede ser:

- un proyecto adecuado de los conductos;
- empleo de un hormigón de mayor resistencia a los ácidos;
- protección de la superficie de hormigón. El material protector debe de ser resistente a los ácidos, impermeable y que se adhiera totalmente al hormigón.

Una limpieza periódica extrayendo todo el fango depositado y lavando enérgicamente las paredes del conducto, puede impedir la deterioración de éstas por la acción de las bacterias.

Otros métodos más efectivos de protección son el empleo de bactericidas; pueden incorporarse a la masa del hormigón, o aplicarse en su superficie como un barniz, o añadidos al agua. Entre los primeros pueden citarse, el polvo de cobre y el óxido verde de cromo.

Aunque el cloro es conocido como bactericida, no es efectivo contra las bacterias reductoras de sulfatos.

En la actualidad se han ensayado nuevos bactericidas, con resultados variados. Así, por ejemplo, policlorofenatos cuaternarios, especialmente del grupo alquil aril y alquil heterocíclicos, aminas grasas, etc. Los mejores resultados se obtuvieron con una mezcla de cuaternarios con aminas grasas.

Se ha podido comprobar que el tratamiento de las aguas es caro y no siempre efectivo.

De los resultados hasta la fecha obtenidos, los bactericidas añadidos al agua son más efectivos que los incorporados al hormigón.

La ventilación, es también, un medio para reducir el ataque de las bacterias. La ventilación natural no es suficiente; es necesario una ventilación forzada. Al mantener secas las paredes, no pueden vivir las bacterias (que sólo pueden sobrevivir en superficies húmedas), así como tampoco puede disolverse el sulfuro de hidrógeno, eliminando en gran parte el gas de la alcantarilla. Su realización no es sencilla, especialmente en grandes ciudades donde la red es vasta.

Aunque no hemos hablado de fibro-cemento o amianto-cemento, haremos ahora un pequeño inciso, para hablar de la protección de tuberías confeccionadas con este material, ya que en la actualidad son muchos los proyectos de conducción tanto de abastecimientos de aguas como desagües, que emplean tuberías en fibro-cemento.

En general, el comportamiento del fibro-cemento frente a la acción de los líquidos que transporta, así como frente a los terrenos en los que están embutidos o que atraviesan, es satisfactorio. Por lo tanto, un revestimiento protector sólo se justifica cuando cualquiera de los elementos antes mencionados ataque al fibro-cemento.

La protección más corriente es una aplicación de revestimiento impermeable, en forma de enlucido, que se aplica por pulverización, con brocha o por inmersión.

Según el uso que se vaya a dar a la tubería de fibro-cemento y el grado de agresividad del agua transportada o del medio que atraviese, pueden considerarse diversos grupos o familias de productos, que se emplean en el revestimiento del fibro-cemento; a saber productos a base de:

- betún de petróleo;
- alquitrán de hulla;
- alquitrán-epoxi;
- butadieno;
- epoxi;
- caucho clorado;
- latex natural;
- y — resinas sintéticas no saponificables.

Para las conducciones de agua potable, el enlucido debe de ser tal, que no transmita ningún elemento nocivo para la salud, ni influencie el gusto del agua. En este caso la protección puede obtenerse normalmente, aplicando disoluciones de betún de petróleo exentas de fenol.

Como revestimiento exterior de materiales enterrados o para el interior de tuberías de desagües, son preferibles los alquitranes de hulla. Estos están caracterizados por una mejor adherencia a la superficie de fibro-cemento, por una menor absorción del agua y por un contenido en fenol que le hace biocida; es decir, combate a todos los gérmenes y microorganismos vivos; impide que las raíces de las plantas se acerquen a las tuberías y, también impide la descomposición biológica de la película protectora por medio de las bacterias. Por otro lado, los alquitranes de hulla resisten bien a los efectos disolventes y plastificantes de las grasas y de los aceites.

Si el riesgo del ataque es grande, la protección puede realizarse por medio de una mezcla alquitran epoxi o por medio de resinas epoxi.

Protección del hormigón fresco

El ataque químico es más violento sobre el hormigón fresco. Como hemos visto a lo largo del tema la edad de un hormigón ejerce grandes efectos sobre su resistencia a la corrosión. Insistimos: No debe permitirse que el agua agresiva alcance al hormigón fresco, por lo menos durante las dos primeras semanas. Hay Normas que lo especifican muy tajantemente.

Se ha observado que cuanto más se tarda en exponer un hormigón a la acción agresiva, mayor es su resistencia al ataque químico; es decir, la resistencia del hormigón al ataque químico crece al aumentar el tiempo de curado del hormigón.

Cuando la exclusión del agua de lluvia, para proteger el hormigón fresco, lleva consigo un elevado costo desproporcionado, las superficies de hormigón puede ser alternativamente tratadas con protectores bituminosos o emulsiones de alquitrán. Aunque las emulsiones de alquitran no le ofrecen una protección permanente, puede garantizarse con su empleo la protección del hormigón fresco (durante un período de dos o tres semanas).

También es importante que las estructuras de hormigón expuestas a efectos corrosivos sean confeccionadas, siempre que sea posible, en una sólo e ininterrumpida operación. Con objeto de obtener una estructura de hormigón monolítica, deberá vigilarse tenga lugar una perfecta unión entre el hormigón endurecido y el hormigón fresco. Cuando son inevitables las juntas en la construcción, éstas deberán colocarse por encima o bien por debajo de la zona de fluctuaciones del nivel del agua.

Para resumir: Las mejores conclusiones en lo que concierne a la resistencia química de los hormigones, en agua de mar y de pantanos, las han proporcionado las investigaciones a largo plazo ejecutadas en medios agresivos naturales.

En los últimos años se han publicado los siguientes trabajos:

- F. CAMPUS (Bélgica) ha seguido el comportamiento de probetas cilíndricas y prismáticas de hormigón, sometidas durante más de 30 años a la acción del agua de mar y a comprobado que los cilindros se comportan mejor que los prismas y los hormigones, mejor que los morteros.
- A. HUMMEL y K. WESCHE (Alemania), han dejado durante 20 años probetas cilíndricas de hormigón en agua de mar y han comprobado que la estructura y la porosidad del hormigón juegan un papel que tiene tanta importancia para la resistencia al ataque químico, como la naturaleza del conglomerante.
- K. SIEDEL (Alemania), ha estudiado una serie de hormigones fabricados con tres clases de cemento, sometidos durante 50 años a la acción del agua de mar y 35 años sometidos a la acción de aguas de pantanos. En los dos casos, ha comprobado, que la densidad del hormigón y su curado previo, ejercen una influencia mayor sobre la durabilidad del hormigón, que la que pueda ejercer la naturaleza del cemento.
- J. L. TYLER (Estados Unidos), ha trabajado con vigas de hormigón armado confeccionadas con 22 clases de cemento. Las vigas han estado sumergidas hasta la mitad en el mar y en agua dulce (agua simplemente). También ha demostrado que la estructura del hormigón desempeña el papel principal en la durabilidad del hormigón, mientras que el papel desempeñado por el cemento es secundario, siempre que éste no contenga nada más que un 12 % de aluminato tricálcico.
- F. W. LOCHER (Alemania), ha examinado probetas extriadas de 7 bloques de rompeolas ejecutados en 1916 y 1938 en Helgoland (Alemania) y ha comprobado que el hormigón compacto no ha sido atacado por el agua de mar.

Todo esto viene a demostrar que la resistencia al ataque o agresión de un hormigón, depende sobre todo de la calidad del hormigón. La naturaleza del cemento tiene una importancia secundaria, salvo en el caso del ataque, producido por los sulfatos.

PROTECCION - II

La eficacia técnica y la económica de las medidas de protección dependen de un número de factores tan elevado que es imposible exponer la totalidad de detalles adoptados en la práctica de la construcción. En cada caso el problema ha de resolverse teniendo en cuenta todas las circunstancias de causa y ambientes existentes; tal y como hemos visto durante la primera parte de Protección.

Bizock da dos grandes grupos de medidas de protección “MEDIDAS ACTIVAS” y “MEDIDAS PASIVAS”.

Las medidas activas comprenden:

- Exclusión o alejamiento del agua agresiva subterránea.
- Eliminación del agua agresiva por medio de obras de albañilería, o por medio de la técnica de electrólisis y,
- Neutralización del agua agresiva por medio de procedimientos químicos.

El alejamiento de las aguas de las obras puede realizarse colocando la cimentación por encima del nivel de las aguas subterráneas, contando también con la subida por capilaridad del agua hasta la cimentación y entonces, adicionalmente colocando una capa de grava como base de la cimentación, con el fin de evitar que el agua pueda subir.

Otra forma de alejar o de eliminar el agua agresiva es un aislamiento electrosmótico, basado en el fenómeno de electroósmosis, obteniéndose en el punto deseado una zona impermeable eléctrica que cierra el camino ascendente al agua capilar, de manera que la parte de muro, situada por encima de la zona impermeable, se deseca paulatinamente al cesar la aportación de agua. El empleo de este método es posible, no sólo en la parte de muros situada fuera del terreno, sino también en las partes situadas debajo del suelo. Esto permite la desecación de subterráneos y bodegas, con lo cual se evitan las tan incómodas humedades y sus consiguientes daños de corrosión. Mientras que otros métodos (aislamiento del agua por impermeabilización con materiales bituminosos) empleados anteriormente eran de gran lentitud y costo elevado, o no garantizaban un éxito completo, este método —descubierto por I. Bizock y sus colaboradores— cuyo principio ha sido patentado tanto en Europa como en América, es barato, rápido y absolutamente seguro. Ha sido aplicado ya en Inglaterra, Holanda, Alemania Occidental y Alemania Oriental e introducido en numerosos países.

Entre las neutralizaciones de las aguas agresivas por procedimientos químicos, las inyecciones de lechada de cal para formar una envoltura de las cimentaciones, son un medio muy eficaz de neutralización del agua, incluso, en terrenos arcillosos.

Entre las medidas de protección pasiva se encuentran:

- dosificación y puesta en obra, adecuados del hormigón;
- tratamientos superficiales;
- estancamiento perfecto (impermeabilización) y,
- otros métodos.

Sobre la dosificación y puesta en obra, adecuados del hormigón, a lo largo de este primer Ciclo, han oído hablar bastante; nosotros aunque de pasada también hemos mencionado y supongo que a lo largo de todo el curso Cemco 1976, oirán bastante del tema, así que no vamos a insistir sobre él.

Los tratamientos o capas superficiales protectoras pueden ser:

- capas protectoras con participación química del cemento endurecido o,
- capas protectoras por simple aplicación sobre la superficie del hormigón de materiales anticorrosivos.

Entre las del primer grupo, las más características son:

Carbonatación

Parte del hidróxido cálcico liberado durante el proceso de hidratación del cemento, se combina, durante el proceso de endurecimiento del mismo, con el dióxido de carbono de la atmósfera, formándose carbonato cálcico, poco soluble en agua. Cuanto más poroso es el hormigón y más expuesto al aire se encuentra, más intensa es la acción del dióxido de carbono. El cemento portland normal, atacado por los sulfatos, puede hacerse sulforresistente por este método.

La carbonatación va acompañada de cierto aumento de las resistencias mecánicas, fenómeno que es esencialmente visible en las construcciones de gran superficie. El valor de este aumento de las resistencias mecánicas varía con el tipo de cemento.

La capa carbonatada no proporciona protección alguna contra la acción de los ácidos, aunque sí retrasa la acción disolvente del agua, así como, en cierta medida, también retrasa la acción agresiva del agua en movimiento que contenga un agente medianamente perjudicial. Si en la superficie del hormigón no existiese esta capa carbonatada, su vida útil expuesta a la acción del agua agresiva, sería considerablemente más corta.

La carbonatación de la cal liberada por la pasta endurecida de cemento, se produce, en un hormigón de compacidad normal, tan sólo en las inmediaciones de la superficie. Si se estudian los daños que se producen en un hormigón, por la acción del agua que está en contacto con la superficie del mismo, pero que no penetra en su interior, debe de tenerse en cuenta, no la solubilidad del hidróxido cálcico, sino la del carbonato cálcico.

La carbonatación artificial consiste en un tratamiento inicial por vacío y un tratamiento posterior, con dióxido de carbono a presión, pudiendo incrementarse en un plazo muy corto el espesor de la capa carbonatada. Como la carbonatación disminuye la pasividad del hormigón puede de esta manera dar paso a la pasividad de las armaduras. Por lo tanto, debe evitarse en lo posible, la carbonatación artificial del hormigón armado. La eficacia de la carbonatación depende del tipo de cemento (aclarar, hablando).

Para alcanzar un buen grado de carbonatación hay que tener en cuenta muchos factores, tales como por ejemplo, tiempo de curado del hormigón; cuanto mayor sea el tiempo de curado previo a la carbonatación, más eficaz será ésta; grado de humedad del hormigón y del ambiente donde se efectúa la carbonatación (aclarar de palabra); el grado óptimo de humedad relativa, es de 50 %; concentración de CO_2 y tiempo que dura el tratamiento con CO_2 (aclarar, hemos dicho curado previo ...) el curado previo también influye en la permeabilidad del hormigón y ésta influye sobre la carbonatación). También influye la sección del hormigón; los productos de hormigón de sección delgada, se carbonatan mejor que los productos de gran masa de hormigón.

Fluatación

La fluatación se aplica a los hormigones endurecidos, consiste en tratamientos repetidos con disoluciones de fluatos. Estos son mezcla de sales complejas y solubles del ácido fluorosilícico con metales pesados tales como el Mg, el Zn y el Al (magnesio, zinc y aluminio); es decir, el fluato magnésico, el fluato de zinc y el fluato de aluminio. Bajo la acción de la humedad y el dióxido de carbono de la atmósfera los fluatos se descomponen y a causa de una serie de reacciones en las que interviene el hidróxido cálcico del cemento endurecido, se forma en la superficie del hormigón fluoruro cálcico, CaF_2 y geles de sílice, SiO_2 hidratados, mezclados con el hidróxido correspondiente al metal o catión del fluato empleado; "es decir, si el fluato es un fluato de zinc, el hidróxido que se mezcla con los geles de sílice hidratada será el hidróxido de zinc". Todos estos compuestos son muy poco solubles y resistentes a la corrosión. Al mismo tiempo, los geles obturan los poros del hormigón haciéndole impermeable y resistente a la corrosión. "En ningún caso se han de colocar fluatos sobre yeso", ya que el ácido sulfúrico producido puede combinarse dando ácido fluorhídrico en forma de gas y éste es muy corrosivo.

Método "OCRATE"

La ocratación se aplica sólo a los elementos prefabricados de hormigón con un cierto grado de humedad. El tratamiento se verifica en autoclave con tetrafluoruro de silicio SiF_4 que es gaseoso.

Previamente se hace vacío en el autoclave lleno de elementos prefabricados, después se introduce el tetrafluoruro de silicio bajo presión, de forma que el gas pueda penetrar lo más profundamente posible en la superficie del hormigón. Debido a la reacción con el hidróxido cálcico del cemento endurecido y a la acción de la humedad, se obtiene fluoruro cálcico y geles de sílice hidratada que son muy poco solubles y resistentes a la corrosión tal y como ya hemos dicho en el caso de la fluatación. Al mismo tiempo estos compuestos aumentan la resistencia del hormigón a la erosión.

Este procedimiento, que está patentado por la sociedad holandesa "Ocriet Fabrik" en Baarn (Holanda), necesita una instalación para la preparación del tetrafluoruro de silicio y autoclaves resistentes a la corrosión química.

Entre las capas protectoras por simple aplicación sobre la superficie, tenemos:

- la pintura,
- impregnación,
- vidriado,
- sellado del hormigón y
- aplicación de una capa laminada sobre el hormigón.

Pintura

Los enlucidos sobre el hormigón a base de pinturas al aceite y a base de resinas alquídicas o poliésteres, tal y como se practicaban hasta ahora, pertenecen al pasado. Debido a la penetración subyacente del agua, el hormigón rechaza todas las películas o capas que no estén bien consolidadas (agarradas).

En cuanto a los colores a base de pinturas alquídicas, las dispersiones sintéticas no llegan a penetrar en el hormigón, mucho menos a *agarrarse*. No llegan, incluso, a tocar la superficie del hormigón, de las que están separadas por 10 a 20 angstroms correspondientes a las capas intermedias de aire y de agua. Sólo a partir de los 4 a los 6 Å, empiezan a manifestarse las fuerzas electroquímicas (de Van der Waals), para que se produzca una auténtica adherencia. Pero estas capas de pintura no penetran en las aberturas de los poros ni de los capilares. Los especialistas saben, hasta qué punto es difícil cubrir un poro que reaparece sin cesar en la superficie. Generalmente, esto es debido al efecto muelle del aire aprisionado bajo la capa, y a las fuerzas repelentes de las superficies del material, que se componen de numerosos factores, difícilmente explicables.

Además hay que tener en cuenta, que las resinas resistentes a los álcalis están en minoría; es decir, aquellas pinturas capaces de resistir la alcalinidad relativamente elevada del hormigón. Por lo tanto, si estas pinturas se aplican a un hormigón demasiado fresco, demasiado alcalino, se disgregan (por saponificación). La capa de pintura se descompone, se escama y se desprende, debido a la mala adherencia. En tales casos es necesario esperar seis meses e incluso un año, antes de aplicar una pintura que no es del todo resistente a los álcalis. Por lo tanto, sólo son resistentes los enlucidos siguientes:

- los copolímeros y terpolímeros de los metacrilatos,
- los copolímeros y los terpolímeros del toluol de vinilo con los metacrilatos y,
- las resinas de silicona o de siloxán inhibidas de álcalis.

Las resinas disueltas en estos disolventes se adhieren mejor al hormigón; son los llamados barnices de fachada o, en otras palabras, son resinas verdaderamente disueltas en disolventes, tales como el toluol, el xilol, la bencina reactivo, o las mezclas aromáticas superiores. Siempre que se trate de resinas verdaderamente solubles (a excepción de aqué-

llas que no dan más que grandes grumos o aglomerados hinchados que nadan en el disolvente), pueden también penetrar de verdad en el material. Este poder de penetración es muy débil; pero por lo menos las resinas “conglomerante” y los pigmentos entran bien en contacto con la superficie del material, de forma que las fuerzas electroquímicas pueden actuar. Estas fuerzas son ineficaces, cuando la superficie del material está recubierta por una película de agua.

Impregnaciones

Impregnar es integrar en un material una sustancia en disolución (como es el caso de los barnices de fachada). Las resinas de impregnación deben de ser muy hidrófugas ya que nos servimos de ellas para impedir la penetración del agua. Entre éstas se destacan:

- resinas de silicona o siliconatos,
- ésteres orgánicos del ácido salicílico y,
- algunos anhídridos metálicos raros, saponificables.

De todas estas sustancias, las resinas de silicona (denominadas siloxán), son las que mejor penetran y son las más adherentes sobre un fondo de hormigón. Hasta ahora, eran poco resistentes a los álcalis, pero ya en la actualidad, se han concebido nuevos tipos de siliconas que resisten valores de pH iguales a 11.

El año pasado tuvimos ocasión de asistir a un Simposio de la casa Bayer, en el que al hablar de los productos a base de silicona, por ellos fabricados, nos comunicaron que las pinturas de silicona para hormigones están inhibidas contra los álcalis y resisten pH superiores a 11.

Otra fase en desarrollo, trata de obtener por medio de aditivos una protección suplementaria contra los ataques de alcalinidad. Este proceso funciona bien y sus ensayos se están haciendo desde hace tres años aproximadamente. En la actualidad, las resinas de siloxán penetran aún mejor en el material. Las impregnaciones, siempre y cuando sean resistentes a los álcalis protegen eficazmente, a toda superficie de hormigón. Claro está que al dirigirse al proveedor, hay que insistir en que son pinturas para hormigones y, por lo tanto, tienen que estar inhibidas contra los álcalis. A veces, algunos especialistas objetan que una impregnación podría impedir el secado del hormigón e, incluso, impedir la difusión del vapor de agua. Esto es falso, y estos señores no presentan, más que a medias, verdades mal comprendidas. Primeramente la capa de siloxán es tan delgada que no puede estrechar ni la sección de los capilares, ni de las fisuras, ni la de los poros. Además, rechaza el agua de lluvia que llega a la pared y facilita de este modo un secado rápido de la superficie, ya que no hay acumulación del agua.

Vidriado del hormigón

El vidriado es semi-cubriente. Casi siempre es suficiente para proteger una superficie hormigonada y enmascarar irregularidades del color. El consumo del material es módico y la operación no exige mucho trabajo. Si se desea una cobertura mucho más sólida y completa, o incluso, colores más vivos, se recurre a las pinturas de siloxán que, en principio, producen el mismo efecto que el vidriado.

En el vidriado debe de tenerse en cuenta que el hormigón exige, en cierta medida, una difusión de vapor de agua y que esta difusión exige su derecho; por lo tanto, el color debe de prepararse en consecuencia. También hay que tener en cuenta que la pintura (vidria-

do) debe de penetrar un poco en el hormigón ya que es sobre una superficie hormigonada, precisamente, donde se forman las exudaciones de hidróxido cálcico, las cuales no pueden constituirse bajo una capa de pintura.

Estancamientos perfectos; impermeabilizaciones

La protección de la lluvia, o con carácter más general de la humedad, además del daño de corrosión o ataque que pueda producir, es esencial por ser una necesidad humana de primer orden. El hombre busca ante todo un “techo que le cobije”.

Por otro lado la humedad reduce la eficacia del aislamiento térmico, por consiguiente, una adecuada impermeabilización que nos proteja del paso de la humedad exterior nos ayuda también a defendernos del frío.

Apareciendo así la estanqueidad al agua como elemento fundamental de nuestro bienestar.

Durante siglos, las cubiertas de tejas, de pizarra o de otros materiales naturales y, los muros de piedra o de ladrillo con grandes espesores, dieron solución adecuada a esta necesidad. Pero la aparición de nuevas técnicas y de nuevas necesidades, exigió, también, nuevas soluciones.

La construcción con estructuras portantes de acero y de hormigón obligó a adelgazar los muros.

Las ventajas que ofrece la azotea, al permitir el aprovechamiento de la cubierta, hicieron que esta solución se extendiese fuera de los climas en que tradicionalmente era empleada. Las construcciones industriales exigieron nuevas soluciones de cubierta. Finalmente, las técnicas de prefabricación han dado especial importancia al problema del sellado de juntas.

Poco a poco la investigación ha ido resolviendo cada una de las dificultades presentadas y dando respuesta a las nuevas necesidades constructivas.

Hoy puede afirmarse que existe solución técnica correcta a cualquier problema de impermeabilización que pueda presentarse. Lo difícil está, realmente, en elegir la solución idónea al problema planteado, entre las muchas que se ofrecen. ¡Una cosa muy importante! es, que en la mayoría de los casos, esta solución es bastante cara.

Entre las impermeabilizaciones más modernas que en la actualidad existen en el mercado, tienen extraordinarias cualidades los poliuretanos.

El poliuretano es un material plástico, con el cual pueden obtenerse piezas moldeadas, espumas, elastómeros, recubrimientos o impermeabilizaciones de superficies.

Un plástico de poliuretano consiste en dos componentes: Grupos isocianatos y los grupos polialcohol. Al reaccionar estos dos grupos, se forma el poliuretano. La dureza y elasticidad pueden ser variados por los químicos, pudiendo obtenerse productos finales elásticos con propiedades similares a las del caucho; o por el contrario productos finales duros. Entre estos componentes hay una escala de componentes intermedios muy extensa.

Los recubrimientos impermeabilizantes a base de poliuretano empleados en la construcción están exentos de disolventes. Las ventajas de trabajo sin disolventes son:

- ninguna molestia debida a vapores del disolvente,
- espesor de la capa sin limitaciones y,
- mínima contracción (< 1 %).

Como desventaja está su limitado tiempo de empleo, ya que su tiempo disponible de uso es aproximadamente 1 hora; a partir de entonces, la consistencia aumenta y el producto queda inservible. A las 12 h de su aplicación, el proceso de endurecimiento está lo suficientemente avanzado para poder, con algunas precauciones, poner en servicio el recubrimiento. A los dos días queda completado el endurecimiento.

Las propiedades típicas de un recubrimiento de poliuretano son las siguientes:

- Carga de rotura, 300 kp/cm²
- Alargamiento de rotura, 15 %
- Dureza Shore D, 75 grados
- Resistencia específica, 10¹⁴ Ohm. cm

Además, presentan buena resistencia frente a los álcalis, pero sobre todo frente a ácidos, así como también frente al fuel-oil, al agua de mar y a otros agentes agresivos.

Es más económico y desde el punto de vista higiénico más ventajoso, el trabajar con recubrimientos de poliuretano sin juntas que con placas de cerámica normales.

Muy importante puede ser el hecho de que también puedan impermeabilizarse con recubrimientos de poliuretano las superficies de asfalto fundido.

La masa de recubrimiento de poliuretano, no contiene productos agresivos para el asfalto. La elasticidad del recubrimiento evita, igualmente, los daños debidos a exigencias por compresión.

Entre los productos de poliuretano, también son de tener en cuenta las masillas de poliuretano para placas cerámicas, ya que con estas últimas forman una buena unión. En la actualidad se tiende a evitar la aplicación de placas o azulejos cerámicos sobre un lecho de mortero de cemento; en su lugar se utiliza el llamado "procedimiento de lecho delgado".

Para este fin pueden emplearse masillas de poliuretano sin disolvente aplicadas con espátula. Se mezclan los dos componentes del poliuretano; es decir, el isocianato y el polialcohol, con cargas de pigmentos, usando colores diferentes, para poder comprobar la perfecta homogeneización de mezcla.

Las placas cerámicas pueden colocarse con facilidad. La resistencia al agua de la unión es excelente y, debido a la elasticidad del poliuretano, pueden compensarse eventuales tensiones.

Una parte de la construcción, en la que la elasticidad es especialmente importante, es el tejado. Sin embargo, no debe de olvidarse que las influencias atmosféricas, las oscilaciones extremas de temperatura, etc., desempeñan un papel importante en la construcción del tejado. Por este motivo y, a pesar de las ventajas que ofrece el recubrimiento elástico por su fácil adaptación a las formas, el arquitecto encargado de la construcción deberá proceder con la máxima cautela a fin de no sobrecargar el plástico, o sobrepasar sus posibilidades. Confiamos que, en un futuro próximo podrán alcanzarse notables progresos en este sector.

También se hacen morteros con resinas sintéticas de poliuretanos; se emplean como revestimientos de 6 a 20 mm de espesor, impermeabilizantes en pavimentos de la industria química, por sus ventajas y cualidades, que son:

- resistencia a la compresión y doblado,
- endurecimiento rápido,
- adherencia y,
- resistencia a los agentes químicos.

Resinas epoxi

Como de las resinas epoxi, ya les han hablado, ahora sólo nos limitaremos a decir que, dentro de su amplio campo de aplicación, se emplean también con mucho éxito en la reparación y restauración de edificios y monumentos. Son muchos los monumentos que, tanto de piedra más o menos porosa (sillería), como de hormigón, han sido reparados y protegidos por medio de las resinas epoxi.

En España, por ejemplo, se ha reparado con éxito el Acueducto de Segovia, tal y como han visto en la conferencia dada por el Sr. Ramirez.

La Comisión Veneciana de Monumentos de la que forma parte el Dr. Cabrera, ha ensayado un sistema de restauración que permitirá prolongar la vida de Santa María la Mayor, que tiene una antigüedad superior a 500 años y está amenazada por la corrección y el derrumbamiento. La restauración es un proceso de dos etapas: Primero, mediante un compuesto a base de resinas epoxi para obturar las superficies de los muros de carga, como protección contra la humedad y los ácidos corrosivos de la atmósfera y, después, el mismo compuesto se inyecta en los muros para evitar que el agua ascienda por capilaridad.

Según la Comisión Veneciana de Monumentos, los experimentos indican que el tratamiento de paredes hidroabsorbentes con resinas epoxi, es factible y efectivo y puede representar una contribución positiva a la conservación del patrimonio artístico de Venecia para futuras generaciones.

Finalmente, para terminar, diremos que a veces, por una mala ejecución o por cualquier otra causa, es necesario hacer un saneamiento del hormigón armado. Para que éste sea correcto resulta muy caro, oneroso por eso muchos especialistas no lo quieren aceptar. Sin embargo, siempre que sea necesario hacer cualquier reparación o saneamiento, no valen *pañños templados. HAY QUE HACERLO BIEN O NO HACERLO, CUESTE LO QUE CUESTE.*

Para mayor simplicidad, vamos a representar un ejemplo esquemático de la operación:

- 1.^a Fase. Desprender o quitar con martillo el hormigón superficial desprendido, descubrir el acero subyacente oxidado.
- 2.^a Fase. Tratamiento con arena del acero y de sus inmediaciones directas; tratar así mismo y tanto como sea posible la otra parte o cara del acero subyacente. El tratamiento con chorro de arena, de un sector limitado, se hace simplemente con un aparato que lleva incorporado un aspirador.
- 3.^a Fase. Al acero puesto al desnudo, se le aplica un enlucido antioxidante activo, que puede ser a base de un conglomerante de resinas epoxi.
- 4.^a Fase. Espolvorear con arena el revestimiento de la armadura antes de que esté seco.
- 5.^a Fase. Reparación de los agujeros con una mezcla de resinas epoxi y mortero de arena. En presencia de daños bastante más graves, es necesario trabajar ayudándose con un encofrado ligero.
- 6.^a Fase. Aplicar un enlucido preliminar de resinas epoxi, sin disolvente.
- 7.^a Fase. Aplicar dos capas de acabado con un barniz de resina epoxi pigmentado.

Estas lecciones sobre Protección han sido hechas por las Srtas. encargadas de la Sección de Protección de la División de Durabilidad del Departamento de Química, Srta. M.^a José Escorihuela y Olga Fernández-Peña.

BIBLIOGRAFIA

- GARCIA DE PAREDES, P.: "Recomendaciones elaboradas en el I.E.T.C.C.", Comunicación privada.
- GARCIA DE PAREDES, P.: "La durabilidad del hormigón". Monografía 232 de IETCC.
- GARCIA DE PAREDES, P.: "Medios de lucha contra la corrosión y posibilidades prácticas de su aplicación": A-Corrosión de tuberías de hormigón y fibrocemento. Coloquio sobre corrosión de tuberías enterradas (Madrid, junio de 1963).
- CALLEJA, J.: "Medios de lucha contra la corrosión y posibilidades prácticas de su aplicación": B-Corrosión de armaduras en los hormigones armados y pretensados. Coloquio sobre corrosión de tuberías enterradas (Madrid, junio de 1963).
- ASTM.: "Factores que pueden modificar la durabilidad del hormigón" Cuadro 4 de la publicación técnica especial ASTM, S.T.P. 169 (1956).
- J. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE: "Guía para la protección del hormigón frente al ataque químico por medio de recubrimientos y otros materiales resistentes a la corrosión". Comité ACI 515, publicado en la revista JACI (1966).
- MINISTERIO DE LA VIVIENDA: "La contaminación del medio ambiente". Resúmenes, núm. 49.
- BOURELLY, T.: "La pollution atmosphérique dans la region parienne"; Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, núms. 729 y 770, (febrero y diciembre de 1967).
- COUTRIS, R.: "Les eaux agressives et la lutte contre la corrosion", Travaux, pág. 648, (diciembre de 1969).
- STEOPOE, A.: La durabilité du béton". Ed. EYROLLES.
- BIZOCK, I.: "Concrete corrosion and Concrete protection", Publishing House of the Hungarian Academy of Sciences, Budapest, (1964).
- LA CORROSION DEL HORMIGON CAUSADA POR BACTERIAS: Revista IDEM, vol, 6, n.º 2, Cuba, (octubre de 1967).
- DURABILITY OF CONCRETE CONSTRUCTION: Monografía ACI, n.º 4, (1968).
- KLEINLOGEL, A.: "Influencias fisico-químicas sobre los hormigones en masa y armados" Ed. Labor, (1955).
- MANUAL CONCRETE: United States, Department of the Interior; Bureau of Reclamation, Washington (1966).
- TRATAMIENTOS Y REVESTIMIENTOS PARA EL HORMIGON: Rev. Engineering, n.º 4.888, vol. 188, págs. 683, (diciembre 1969).
- FERNANDEZ-PEÑA, O.: "Protección del hormigón frente a los agentes agresivos". Revista ION, volumen XXXII, núms. 367 y 368 (1972).