

**ASPECTOS RELATIVOS A LA DURABILIDAD
DE HORMIGONES DE CEMENTO PORTLAND**

Ing. Marcelo Wainsztein

Ing. Luis P. Traversa

SERIE II, N° 286

I. GENERALIDADES

La calidad de un hormigón será satisfactoria si es trabajable en estado fresco y uniforme, resistente, impermeable, durable y tiene constancia de volumen cuando ha endurecido.

La durabilidad es una de las características más importantes y la que en más alto grado interesa obtener, sobre todo en aquellas estructuras que están sometidas a los efectos, simples o combinados, de:

a) acción de los agentes atmosféricos, especialmente los efectos alternados de mojado y secado, y de las bajas temperaturas que provocan la congelación del agua;

b) acción de agentes agresivos naturales o artificiales, como son los que derivan de procesos de naturaleza química, o fisicoquímica, que corroen y desintegran el hormigón.

Debido a que el hormigón es un material esencialmente heterogéneo, digamos que la pasta de cemento es, en particular atacada por reacción química, son por disolución de las sales hidratadas formadas (aguas puras, soluciones ácidas), sea por formación de compuestos expansivos (reacción con el AC_3 , corrosión de los aceros).

Los áridos, aunque en general son inertes, si son calizos pueden ser atacados por soluciones ácidas y aparte puede producirse, cuando se dan condiciones que luego se verán, la reacción álcali-agregado.

El hormigón puede también ser destruido por las acciones físicas, tal como la expansión producida por las heladas, las expansiones sucesivas debidas a la absorción capilar de soluciones salinas que depositan cristales en la zona de evaporación.

Las medidas preventivas, necesarias, se tomarán después del estudio de los siguientes factores:

- a) examen del medio agresivo;
- b) elección del conglomerante más apropiado;
- c) composición del hormigón que da la máxima compacidad; y

d) protección eventual de los elementos de hormigón en contacto con el medio agresivo.

Por otra parte debe recordarse que el consumo de cemento portland del año 1972, según las estadísticas publicadas por la Asociación de Fabricantes de cemento portland, permite estimar que durante ese año, en nuestro país se emplearon alrededor de 15 millones de metros cúbicos de hormigón para la construcción de obras de distintos tipos, simples y armadas, la importancia de la cifra indica las grandes posibilidades de este material y el lugar de privilegio que ocupa entre los materiales de construcción.

Los conocimientos actuales permiten dimensionar las estructuras con un grado de seguridad adecuado. Pero si esa preocupación se circunscribe únicamente al campo de cálculo estructural resultará incompleta e insuficiente y además puede quedar totalmente invalidada como consecuencia de las acciones que en una u otra forma atacan a la estructura y eventualmente podrían llegar a destruirla.

¿Qué debe hacerse para evitarlo?

Calleja, en las Primeras Jornadas de Durabilidad del Hormigón realizadas en 1972 expresó que "se debe aumentar y mantener la garantía de seguridad de las casas, de los puentes, de las carreteras, de las presas, de los diques y, en suma, de cuanto debe ser estructura resistente de uno u otro modo, es decir, lograr que estas estructuras sean durables; ser durable, tener durabilidad, significa para una obra conservar a lo largo del tiempo, y en condiciones ordinarias, y aun extraordinarias de su servicio, un coeficiente de seguridad amplio y razonablemente tranquilizador".

El mismo autor comenta: "¿Qué se opone a la durabilidad de las obras?. Pues, genéricamente, la mala calidad de las mismas. Por razones económicas, baratura a ultranza, o por razones técnicas, proyectos inadecuados, cálculos erróneos, materiales no aptos, ejecución defectuosa, falta de vigilancia y de control o de conocimientos, personal incompetente o irresponsable. Y con harta frecuencia, la prisa o el azar, haciendo entrar en conjunción a varias de estas razones e inclinando la balanza del lado del desastre. Porque rara vez una sola de las causas señaladas pesa tanto como para ser

capaz, por sí misma, de provocar catástrofes; pero basta que se junten dos o tres, y a veces se juntan más, para que éstas se desencadenen. ¿Cómo anular esa causa genérica que es la mala calidad, eliminando las específicas señales que dan lugar a ella?. Parece también sencillo: con mucho conocimiento y bien hacer; y con responsabilidad, es decir, aplicando siempre a lo que se hace, sin regateos, los códigos de buena práctica en uso, basados en la ciencia y en la experiencia, esto es, en el saber y en la tecnología. Y sometiendo lo que se hace, y lo ya hecho, a una vigilancia y a un estricto control de comprobación".

El mismo investigador asevera que toda obra tiene dos precios: el de recién concluida y el resultante a varios o muchos años vista, ¿Qué obra resulta a la postre más económica, la de mayor costo inicial y bien hecha, que no necesita reparaciones, ni apenas mantenimiento, o la que hay que rehacer en su totalidad a los pocos años o meses, de su inauguración?. Todo ello sin contar con los riesgos y peligros de toda obra defectuosa o mal construida.

Concluye Calleja diciendo que la conciencia de una durabilidad del hormigón, es decir, del conjunto de precauciones que hacen que el material conserve al final de su vida útil prevista, un coeficiente de seguridad aceptable, ha despertado en los últimos tiempos, siendo ya posible prevenir, allí donde antes era imposible curar.

El objeto de esta comunicación no es ni puede ser, evidentemente analizar todos los factores que puedan influir sobre la durabilidad del hormigón. Luego de enunciar la mayoría, se analizarán brevemente aquellos factores o grupos de acciones de mayor importancia o que hemos desarrollado en nuestra actividad profesional en el LEMIT.

II. ESTRUCTURA DE POROS Y CAPILARES DEL HORMIGON ENDURECIDO Y SU VINCULACION CON LA ABSORCION Y LA PERMEABILIDAD

La mayor parte de la destrucción del hormigón está int. i-

mamente vinculada al proceso de circulación de un líquido dentro de la masa del hormigón. Dicha circulación está relacionada con la porosidad y capilaridad del hormigón.

Hummel ha establecido que no hay ningún hormigón sin poros. A su vez los mismos son frecuentes y predominantemente poros abiertos, es decir, poros que se hallan en comunicación por medio de finos conductos con el exterior.

Los hormigones normales de construcción, cuando están endurecidos y desecados tienen volúmenes de poros comprendidos entre el 8 y el 25 %. Pero ese volumen de poros nos proporciona sólo la suma de poros en porcentual, pero nada dice acerca del tamaño de los mismos, de su forma y de su distribución, factores que pueden tener notable influencia sobre muchas de las propiedades del hormigón.

Un mismo volumen de poros puede estar compuesto de una pequeña cantidad de poros grandes y oquedades o bien de numerosos poros de tamaño medio o finalmente de una infinidad de poros minúsculos. En general se trata de una mezcla de poros de los más diversos tamaños.

Consideremos la forma, en que dichos vacíos se originan en el hormigón endurecido.

a) En primer lugar, la necesidad de obtener mezclas trabajables y que permitan llenar con facilidad los encofrados, obliga a utilizar una cantidad de agua de mezclado mucho mayor que la necesaria para completar la hidratación y el endurecimiento del cemento, del orden del 20 % del peso de cemento, quedando la mayor parte de ella como agua libre en la masa del hormigón. El volumen que esta agua libre ocupa, está inicialmente determinado por la razón agua/cemento y representa espacio libre para ser ocupado por los productos de hidratación del cemento. De ahí la importancia que revisten los bajos contenidos unitarios de agua y un curado eficiente y prolongado. Los diámetros de estos poros son del orden de 10^{-3} a 10^{-4} cm. El volumen total estará comprendido entre aproximadamente 0 y 40 % del volumen de la pasta, para razones agua/cemento dentro de la gama de valores de trabajo normal.

b) En segundo lugar, el volumen sólido de los produc-

tos que se forman por la hidratación del cemento, es menor que la suma de los volúmenes de agua y sólido del cemento que entran en la reacción. Así es como resulta imposible que la pasta endurecida de cemento y agua llene íntegramente el espacio que originariamente ocupaba la misma en estado fresco. La consecuencia es que la pasta endurecida contiene cierta cantidad de vacíos. Estos pequeñísimos poros del gel, de diámetros del orden de 10^{-7} cm ocupan aproximadamente el 25 % del volumen aparente de los productos de hidratación.

c) En cuanto a los agregados, que constituyen algo más del 70 % del volumen del hormigón, influyen sobre las características de aquél. El volumen de poros de los agregados del tipo normal varía entre 1 y 5 % y sus diámetros son variables y del orden de los mayores diámetros de los canales capilares de la pasta.

d) El hormigón contiene cierta cantidad de aire natural o intencionalmente incorporado en su masa. Su volumen puede variar entre 1 y 10 % aproximadamente, dependiendo del tipo y de la cantidad de agente incorporador de aire empleado y de otras circunstancias. Sus diámetros oscilan entre 10^{-1} a 10^{-3} centímetros. Asimismo, si la mezcla no está correctamente proyectada o si existen defectos de compactación, en las estructuras se observan los tan indeseables "nidos de abeja".

e) Otro tipo de vacíos se desarrolla cuando el hormigón está en estado plástico, inmediatamente después de haberlo colocado en obra. Estando las partículas sólidas, incluso el cemento, en un estado de equilibrio inestable, al producirse el asentamiento de dichas partículas como consecuencia de la acción de las fuerzas gravitatorias, el agua es forzada a dirigirse hacia las partes superiores, comenzando entonces la formación de una serie de canales capilares que pueden llegar, y llegan, hasta las superficies exteriores de las estructuras (exudación). Estos pequeños e innumerables canales de agua interconectados, constituyen una red dentro de la masa del hormigón. Parte del agua que asciende como consecuencia de la exudación, es detenida debajo de algunas de las partículas de agregados de mayor tamaño constituyendo una película de agua, que tenderá a desaparecer dejando vacíos, que constituyen zonas de debilidad, de alta razón agua/cemento y de pobre adherencia entre la pasta y los agregados.

Por lo tanto el hormigón es un material poroso, con vías de acceso abiertos al ingreso, dentro de su masa, de sustancias que están en contacto con el hormigón y también, naturalmente, al egreso, desde su masa al exterior de sustancias en condiciones de recorrer los poros y capilares en sentido inverso. Esto también nos muestra que la superficie de contacto del hormigón con un medio agresivo no es solamente la externa, delimitada por las formas exteriores de la estructura, sino que a ella debe agregarse la enorme superficie interna constituida por los poros y capilares.

La circulación de los líquidos, agresivos o no, puede producirse tanto por permeabilidad, es decir líquido sometido a una presión exterior, como por capilaridad (absorción capilar).

Analicemos sumariamente ambos casos.

Permeabilidad. Varios son los factores que influyen para determinar la mayor o menor permeabilidad del hormigón.

Si se desea obtener hormigones de baja permeabilidad es esencial trabajar con bajas razones agua/cemento. También para una misma razón P_a/P_c la permeabilidad aumenta con el tamaño máximo del agregado grueso (fig. 1).

Otro factor muy importante es el curado, debido a la reducción del diámetro de los capilares por acción de los productos de hidratación que van ocupando los espacios vacíos.

Es natural que la permeabilidad del hormigón aumente con la de los agregados, aunque no es función directa. Influyen también los vacíos de aire natural o intencionalmente incorporado.

El aire intencionalmente incorporado, que reduce la segregación y exudación, dando hormigones de mayor uniformidad, de menor P_a/P_c , hace, que a pesar de la presencia de dichos vacíos, el hormigón resulte más impermeable.

Asimismo la compactación por vibración reduce la permeabilidad con respecto a la compactación manual.

Absorción. Si un líquido se encuentra en contacto con hormigón no saturado, las diferencias de humedad pueden dar

K_q es una medida relativa de la permeabilidad del hormigón

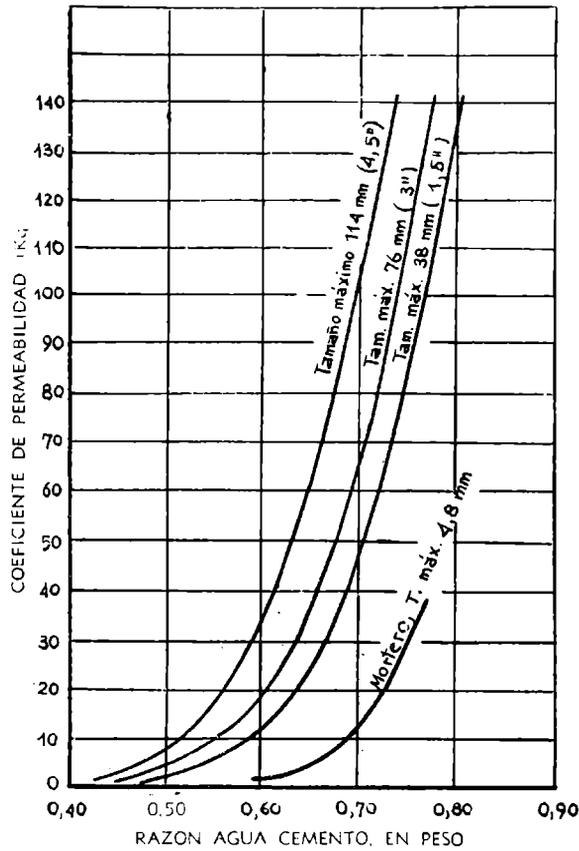


Fig. 1

Relación entre el coeficiente de permeabilidad del hormigón y la razón agua/cemento, para hormigones y morteros que contienen áridos de distintos tamaños máximos. La permeabilidad aumenta rápidamente para razones agua/cemento mayores de 0,55 en peso. Una baja permeabilidad es uno de los requisitos previos para obtener durabilidad (Fava, 3).

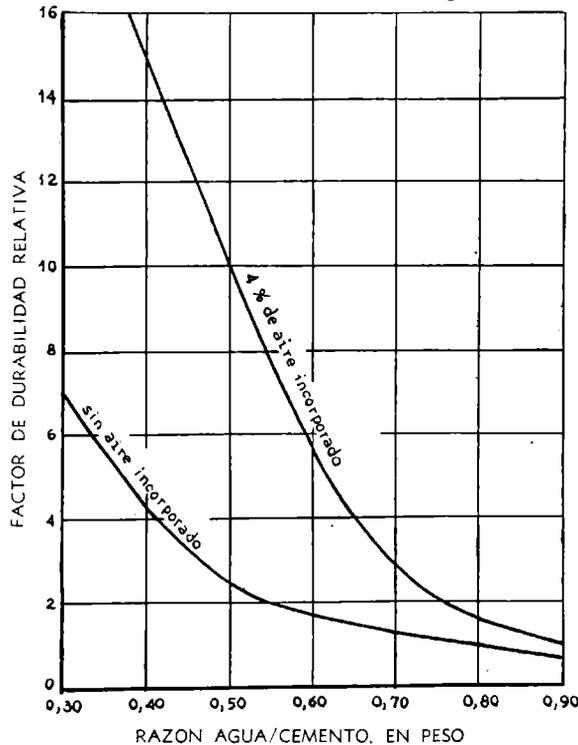


Fig. 2

Influencia de la razón agua/cemento sobre la durabilidad del hormigón. La obtención de una alta durabilidad está condicionada al empleo de aire incorporado y también al empleo de una baja razón agua/cemento. U.S. Bureau of Reclamation. Tamaño máximo del árido grueso, 20 mm (Fava, 3).

lugar a la aparición de tensión capilar y con ella al movimiento de líquido hacia el interior de la masa del hormigón.

Un hormigón con aire intencionalmente incorporado en su masa, está mejor dotado que un hormigón normal para resistir a las variaciones de humedad ambiente y a los movimientos de un líquido hacia adentro o hacia afuera de la masa de hormigón endurecido.

En resumen podemos decir que los mayores contenidos unitarios de agua y las mayores razones agua/cemento, tenderán

a producir hormigones más porosos. Más porosidad puede significar mayor absorción y permeabilidad y, en determinadas condiciones desfavorables, como en el caso en que sobrevienen bajas temperaturas (congelación del agua) o cuando la obra está en contacto con sustancias, especialmente líquidos, capaces de producir ataques de naturaleza química, o físico-química, ello puede significar una mayor facilidad para el ataque y consiguiente destrucción de la estructura.

De ahí la importancia que reviste el empleo de bajos contenidos unitarios de agua y bajas razones agua/cemento, como medios para obtener hormigones durables, empleando agregados poco porosos y de tamaño máximo reducido. Además las mezclas deben ser homogéneas, no segregadas, compactadas por vibración, con aire intencionalmente incorporado, y el curado eficiente y prolongado (fig. 2).

III. DESTRUCCION PROVOCADA POR LA ACCION CLIMATICA NATURAL

Comprende efectos provocados por la congelación y deshielo, efectos provocados por mojado y secado y calentamiento y enfriamiento.

1. Efectos provocados por la congelación y deshielo

Al inicio de obras en zonas de nuestro país, donde la temperatura invernal llega hasta los 15°C bajo cero y también donde pueden producirse grandes variaciones entre los valores extremos del día y la noche (zona patagónica y zona cordillerana), la dosificación de hormigones requiere un estudio adecuado y el uso de técnicas para que su comportamiento sea satisfactorio. Sólo en estos casos es posible contar con hormigones de vida útil prolongada, siendo además más bajos los gastos de mantenimiento de los mismos. Eso haría que el uso del hormigón de cemento portland sea el material indicado para soportar las acciones de congelación y deshielo. El efecto destructivo de este proceso sólo apareció cuando se encuentra

agua libre en cantidad suficiente (del orden del 90 % del volumen de vacíos) en los poros y capilares del hormigón. Por eso se observará la importancia de confeccionar hormigones con baja permeabilidad y baja absorción. Consideremos la influencia sobre el hormigón fresco y luego sobre el hormigón endurecido.

1.1 Influencia de la acción de congelación y deshielo sobre hormigón fresco

Cuando las bajas temperaturas actúan, sobre el hormigón fresco, es decir, recién colocado y en estado plástico, la influencia puede manifestarse según la bibliografía en dos formas distintas: disminución o anulación de la actividad química necesaria para el endurecimiento del hormigón o destrucción por acción del hielo.

Las experiencias realizadas con hormigones recién mezclados y otros de 4,8 y 24 horas de edad, son ilustrativas de la importancia que tienen estas acciones.

La pérdida de resistencia a la edad de 28 días, de hormigones que enseguida de mezclados fueron sometidos a un ciclo de congelación y deshielo y luego mantenidos en curado normal hasta el momento del ensayo, fue de 30 a 40. Si el ciclo se aplica después de 4 horas, un 15 %; a las 8 horas, la pérdida de resistencia fue de 5 % y a las 24 horas tuvo un efecto prácticamente despreciable.

También se utilizaron hormigones con adición de cloruro de calcio y aire incorporado. Ninguna de estas variaciones modificó de manera apreciable la reducción de resistencia observada y destacamos el hecho de que el aire incorporado no protege al hormigón fresco contra la acción del hielo.

Se concluye de las experiencias anteriores que la única solución es proteger el hormigón contra las bajas temperaturas mientras esté fresco. Es aconsejable, alcanzar resistencias mínimas, capaces de soportar los efectos de congelación, del orden de 120-130 kg/cm². Para tal fin se debe utilizar cemento de alta resistencia inicial o emplear aditivos adecuados (previo ensayo con el mismo y con los agregados a emplear). El curado en tiempo frío debe ser efectivo para que, aparte de obtener una resisten-

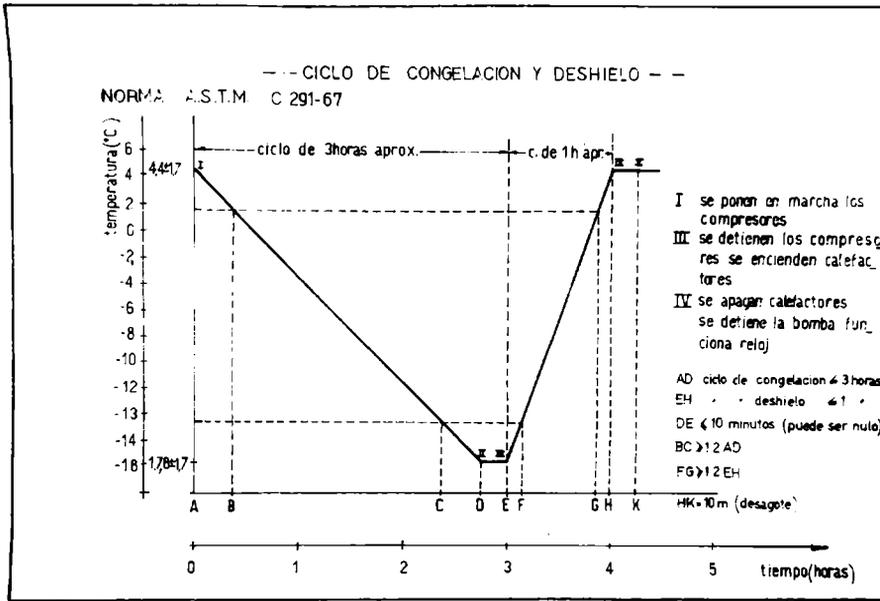


Fig. 3.- Congelación y deshielo

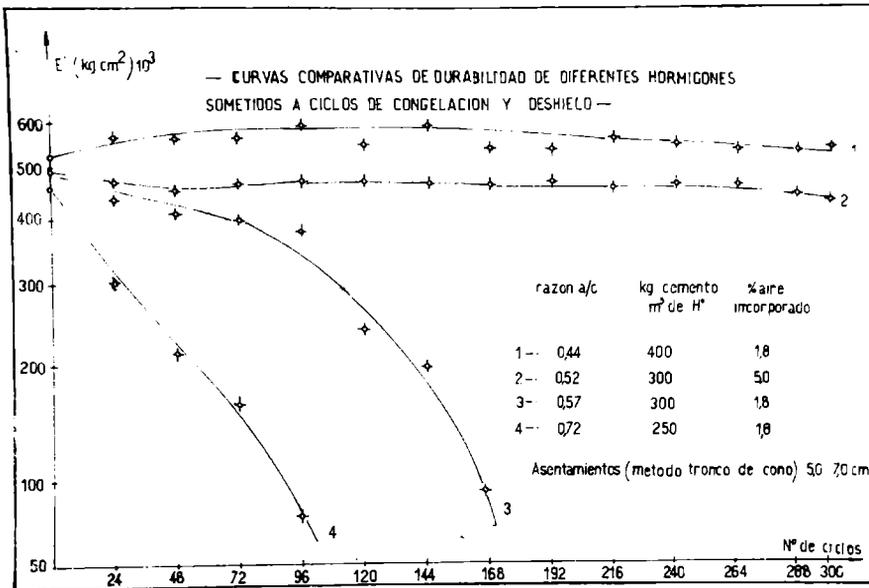


Fig. 4.- Congelación y deshielo

cia adecuada, se evite el secado rápido del hormigón, que produciría grietas, facilitando posteriormente su destrucción por acción del hielo u otra agresión.

El PRAEH en sus capítulos III B-6 y III B-12-2 nos indica las condiciones para hormigonado en tiempo frío (10).

1.2 Influencia de la acción de congelación y deshielo sobre el hormigón endurecido.

Según la bibliografía la mejor teoría que explica el comportamiento del hormigón bajo el efecto del hielo parece ser la de Powers, quien establece que el hormigón se disgrega bajo el efecto de tensiones provocadas por la presión hidráulica producida por el agua al congelarse.

La cantidad de agua congelable en el hormigón disminuye con el tiempo, tendiendo a un valor que se sitúa aproximadamente en el 10 % del volumen total.

Además la resistencia a la tracción de la pasta tiende también hacia un valor límite (por ejemplo 50 kg/cm^2). Cuando el agua se transforma en hielo, se desarrollan fuerzas considerables debidas al aumento de volumen. La rotura de la pasta se efectuará, por ejemplo, bajo una presión de 500 kg/cm^2 , valor obtenido a -4°C aproximadamente. El cálculo es aproximado, ya que el agua no es pura. Sin embargo, demuestra que el efecto del hielo no es ciertamente peligroso más que por debajo de temperaturas de -4°C a -5°C .

Powers admite que en la pasta pura endurecida existe un conjunto de pequeñas cavidades comunicadas por capilares. La disposición de estas cavidades depende principalmente: de la naturaleza del cemento, el grado de hidratación y de la razón agua/cemento.

El aumento de volumen debido a la transformación del agua en hielo provoca un crecimiento de la presión hidrostática del agua libre restante, que ejerce sobre las paredes de los capilares tensiones más fuertes cuanto más intenso es el frío. La rotura se produce cuando el esfuerzo ejercido es superior a la resistencia a tracción de la pasta.

El aire intencionalmente incorporado (introducido bajo la forma de burbujas de 10 a 100μ de diámetro) desempeña el pa-

pel de vaso de expansión y limita la presión hidrostática. Estas cavidades suplementarias deben estar bien repartidas en la masa de la pasta: son eficaces cuando su volumen alcanza como mínimo el 4 % del volumen total del hormigón.

1.3 Ensayos de congelación y deshielo

Normalizar los ensayos es muy difícil, ya que es necesario normalizar las temperaturas de congelación y deshielo, la forma de las probetas, su tamaño, tiempo de exposición y si se efectúa al aire o en estado saturado. Lógicamente, los resultados obtenidos serán diferentes. Asimismo fue necesario estudiar los métodos para valorar los efectos destructivos. Luego de grandes experiencias, ASTM normalizó métodos. Los ensayos se realizan sobre probetas prismáticas, que luego de saturadas en agua se someten a ciclos alternados de congelación y deshielo.

La congelación puede hacerse en agua o aire, a temperaturas entre -15°C y -20°C y el deshielo en agua a temperaturas comprendidas entre 5°C y 25°C . ASTM lo ha normalizado en la norma ASTM C-666-71.

El progreso de la acción destructiva se puede medir mediante:

- 1) Pérdida de peso.
- 2) Pérdida de resistencia a compresión o flexión.
- 3) Expansión.
- 4) Apreciación visual.
- 5) Reducción del módulo de elasticidad dinámico.

De estos medios, los más utilizados en la actualidad son los de medidas de expansión de la probeta y reducción del módulo de elasticidad dinámico, valores entre los que se ha encontrado una buena correlación. En lo referente a la medición del módulo de elasticidad dinámico, el número de ciclos entre mediciones no debe superar los 30.

El ensayo se continúa hasta los 300 ciclos o hasta que el módulo alcanza el 60 % del módulo inicial. IRAM ha normalizado también el ensayo de congelación y deshielo en la norma nº 1 661 y la medición del módulo de elasticidad dinámico en la norma IRAM 1 693/69 y de acuerdo a las indicaciones de las mis-

mas fueron realizadas las cámaras del LEMIT.

1.4 Precauciones a adoptar

Según Venaut y Papadakis, los factores que influyen en la resistencia al hielo son los siguientes:

a) Dosificación del cemento: está recomendado no bajar de una cierta dosificación, por ejemplo 250 kg/m^3 para un árido de tamaño máximo de 120 a 150 mm.

b) Razón Pa/Pc: la resistencia al hielo es tanto más débil cuanto mayor es Pa/Pc.

c) Naturaleza del cemento: los cementos ricos en SC_3 parecen ser los más resistentes. Se recomienda evitar el empleo de cementos supersulfatados.

d) Finura del cemento: un cemento molido más finamente, resiste mejor.

e) Áridos: los áridos no deben estar helados. Deben estar limpios y poseer un coeficiente de dilatación térmica próximo al de la pasta pura (10μ por metro y grado). Los áridos de débil coeficiente deben rechazarse. La granulometría desempeña un papel importante. La curva granulométrica debe corresponder con la compacticidad máxima. Los áridos deben presentar una buena adherencia con la pasta.

f) Amasado: debe ser eficaz para que el hormigón resulte homogéneo.

g) Colocación: la compactación debe ser también lo más enérgica posible (ya que interesa que la razón Pa/Pc sea pequeña). Evidentemente debe evitarse la segregación y la compactación debe efectuarse mediante vibradores.

h) Edad del hormigón: el hielo es tanto más peligroso, cuanto más pronto se manifiesta, y sobre todo durante el fraguado del hormigón. El efecto del hielo es independiente de la edad del hormigón si interviene algunas semanas después del endurecimiento.

i) Otros factores: la acción del hielo será diferente según las dimensiones, la forma de la obra y el destino que tenga la misma. Un revestimiento de carreteras y los de

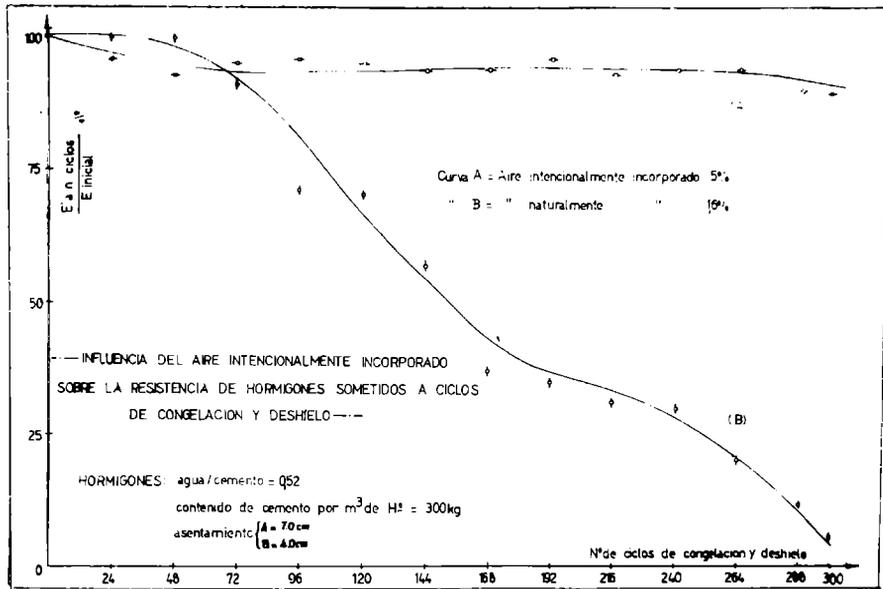


Fig. 5
Congelación y
deshielo

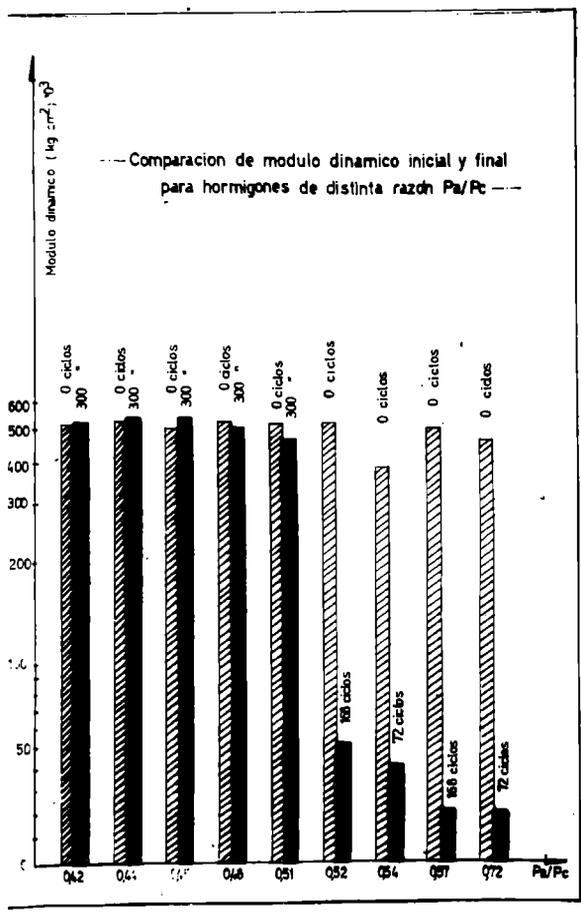


Fig. 6
Congelación y
deshielo

una presa estarán, por su destino, más expuestos al hielo. Toda fisura es perjudicial. (Fig. 3, 4, 5 y 6).

2. Acciones provocadas por efectos del mojado y secado.

Los cambios de volumen del hormigón originados en variaciones de su contenido de humedad constituyen una de las causas más frecuentes de destrucción de las estructuras, especialmente de aquellas que, como los pavimentos, tienen grandes superficies directamente expuestas a la acción de la intemperie.

Las variaciones de volumen, especialmente la contracción, producen diversos efectos perjudiciales. Por ejemplo, en los hormigones privados de moverse libremente, la contracción por secado produce agrietamientos debido a una insuficiencia de resistencia a la tracción. Este agrietamiento no sólo, es perjudicial porque debilita al hormigón en relación a su capacidad para resistir las cargas, sino que es un factor importante de reducción de la durabilidad, especialmente en el caso de climas rigurosos o de un medio ambiente especialmente agresivo. En efecto, de nada valdría tomar precauciones para disminuir el volumen de poros y capilares, si posteriormente a la colocación del hormigón se formarían grietas que permitan el fácil acceso del agua con la consiguiente aceleración de los efectos de disolución y posible eliminación de los compuestos más solubles de la pasta de cemento endurecida, corrosión de las armaduras y aumento de la destrucción producida por efecto de la congelación y deshielo.

En general los esfuerzos diferenciales producidos por diferencias del contenido de humedad entre distintas porciones de la estructura o como consecuencia de la distinta variación de volumen de los materiales componentes del hormigón, tenderán a destruir la estructura interna y la adherencia entre la pasta de cemento y las partículas de agregados, pudiendo llegarse a la desintegración de la masa, sobre todo en casos de ciclos alternados de contracciones y expansiones.

Las causas del fenómeno de contracción y expansión pueden interpretarse de manera sencilla si recordamos que el gel de cemento endurecido tiene una estructura porosa y, lo mismo que muchos otros aglomerantes, aumenta de volumen cuando absorbe

agua y se contrae al perderla.

Las rocas que se emplean como agregados también tienen, aunque en mucho menor grado, cambios volumétricos provocados al modificarse el contenido de humedad.

En consecuencia los cambios de volumen del hormigón resultarán de la suma de los correspondientes a la pasta de cemento y a los agregados.

En general, los efectos provocados por la contracción del hormigón por secado son más importantes que los correspondientes a la expansión provocada por el mojado.

Entre los factores que influyen para modificar la contracción del hormigón, podemos citar:

- a) La calidad y cantidad de la pasta de agua y de cementos.
- b) La composición y finura del cemento.
- c) La composición mineralógica, tamaño, forma y granulometría de los agregados.
- d) Características y cantidad de los materiales adicionales.
- e) Cantidad y distribución de las armaduras.
- f) Condiciones de curado y humedad y temperatura del medio ambiente.

La importancia de la calidad y cantidad de la pasta de cemento, surge claramente si recordamos que ella tiene entre 5 y 15 veces más contracción que el hormigón. A su vez la calidad de la pasta depende en primer lugar de la razón agua/cemento y de las características del ligante.

La pasta, de razón agua/cemento 0,56 en peso, tiene una contracción 50 % mayor que otra de razón 0,40.(Fig. 7).

Los efectos de la finura del cemento sobre la contracción, no están todavía claramente establecida, pero las experiencias realizadas indican que, en general, las contracciones son mayores para los cementos más finos.

De los compuestos del ligante, el AC_3 es el responsable de las mayores contracciones, siguiéndole el SC_2 y luego el SC_3 .

La composición mineralógica de los agregados es también un factor importante, al respecto cabe decir que las mayores contracciones corresponden a hormigones preparados con areniscas y los menores a los preparados con granitos y calizas, en el orden en que han sido citados.

El tamaño máximo, la forma y la granulometría de los agregados, influyen en cuanto permiten modificar el contenido de pasta y fundamentalmente, la cantidad de agua de mezclado del hormigón.

El efecto de los materiales adicionales está también vinculado con el mayor o menor requerimiento de agua que producen.

Tal por ejemplo el caso de las puzolanas, que por su gran superficie específica, aumentan el requerimiento de agua de mezclado.

Se cita el caso en que reemplazando un 20 % del peso de cemento por igual peso de puzolanas se obtuvo una contracción 50 % mayor.

La adición de un 2 % de Cl_2Ca respecto al peso de cemento, aumenta, la contracción por secado entre 10 y 50 %.

En cuanto a las barras de acero, que constituyen las armaduras, por su adherencia con el hormigón, limitan la contracción y reducen por lo tanto la separación y dimensiones de las grietas.

En lo referente al curado, es evidente que mientras más prolongado y efectivo sea, menor será la contracción. Extendiendo el período de curado y completando así en mayor grado la hidratación, por una parte se contribuirá a reducir el volumen de capilares y por otra se aumentará la resistencia del hormigón colocándolo en mejores condiciones de resistir los esfuerzos provocados por la contracción.

El curado a vapor, realizado a altas temperaturas y presión en cuanto permite lograr una más completa hidratación en corto tiempo, también contribuirá a reducir los cambios volumétricos.

Las condiciones del medio ambiente; temperatura, humedad ambiente y velocidad del viento en cuanto pueden contribuir a

U.S. BUREAU OF RECLAMATION
 Hormigón curado en agua durante 7 días, luego expuesto al aire a
 21°C y 50 % de humedad relativa.

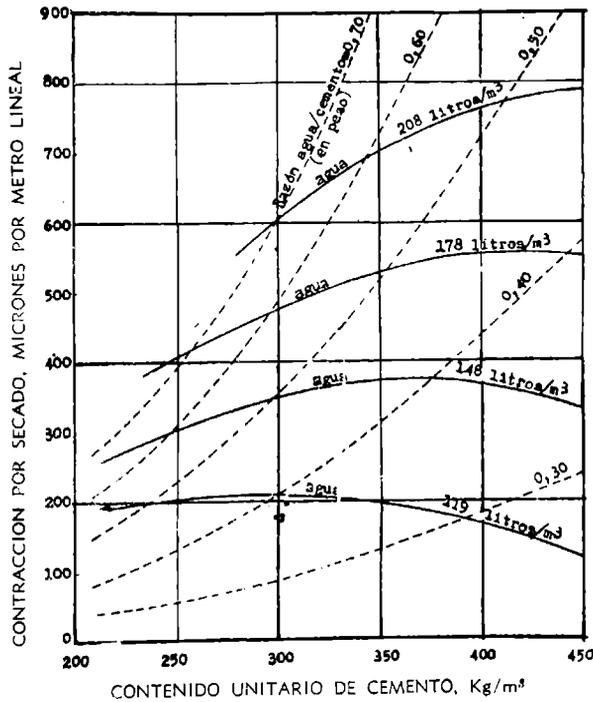


Fig. 7

Influencia de los contenidos unitarios de agua y de cemento y de la razón agua/cemento sobre la contracción del hormigón provocada por el secado del mismo. La contracción por secado aumenta con la razón agua/cemento, pero para hormigones de la misma razón agua/cemento el hormigón que contenga mayor cantidad de agua de mezclado sufrirá una contracción mayor. El factor simple de mayor influencia sobre la contracción por secado es el contenido unitario de agua de la mezcla.

un rápido secado, especialmente en el caso de estructuras con una gran superficie expuestas como los pavimentos, mientras el hormigón aún no ha adquirido suficiente resistencia facilitan el agrietamiento y la producción de tensiones internas, como consecuencia del distinto grado de humedad, correspondiente a las distintas capas de hormigón.

3. Efectos térmicos

Como la mayoría de los materiales de construcción, el hormigón varía de volumen en función de la temperatura. En promedio su coeficiente de dilatación térmica puede estimarse en 11×10^{-6} por cada grado centígrado. En consecuencia, por ejemplo, en una cuadra de pavimento de hormigón para un aumento de 15°C , el aumento de longitud será del orden de 2,5 cm. Esto significa una gran tensión si no hay libertad de movimiento.

El problema es de importancia superior en caso de chimeneas y recipientes industriales que han de estar sometidos de modo permanente a temperaturas constantemente variables y para la protección previa de las construcciones contra incendios.

IV. ATAQUE QUIMICO DEL MEDIO AMBIENTE POR INFLUENCIA DE AGENTES NATURALES Y ARTIFICIALES

1. Agresivos que solubilizan o atacan a los componentes del cemento endurecido permitiendo la eliminación de algunos de ellos sin expansión del hormigón.

Comprende los siguientes: aguas puras, aguas de lluvia y otras aguas superficiales; aguas y suelos ácidos naturales, líquidos ácidos y aguas residuales industriales; y líquidos cloacales.

1.1 Aguas puras

Cuando el cemento se combina con el agua, uno de los compuestos que se forma es el hidróxido de calcio. Esta cal es

Fig. 8

Valoración y graduación esquemática del pH

pH del agua	0-1-2-3	4-5-6	7	8-9-10	11-12-13-14
Tipo del agua	ácida	débilmente ácida	neutra	débilmente alcalina	alcalina
	predominan los iones H^+			predominan los iones OH^-	
Origen	Agua residual industrial	Agua natural	Agua residual industrial		

disuelta por el agua, especialmente si esta no contiene calcio y en cambio contiene anhídrido carbónico.

1.2 Aguas ácidas y aguas residuales industriales

El agua puede haber recibido residuos industriales, haber tenido contacto con suelos más o menos agresivos conteniendo ácido sulfúrico, clorhídrico, húmico, es decir pueden contener ácidos minerales y orgánicos. Ellos son más peligrosos que las anteriores, pero su modo de ataque es análogo. El agua que posea un pH menor de 5 es muy agresiva como se observa en la fig. 8. Para detectar estos casos es conveniente la medición del pH con un aparato portátil.

Debido a las graves consecuencias que acarrea en zonas industriales, el ataque por aguas residuales, se da una breve nómina de algunas de ellas y sus efectos sobre el hormigón endurecido. (3)

Aguas procedentes de agotamientos de minas y canteras (minas de carbón, hierro, cobre, cinc, plomo, etc.). Todas estas aguas suelen contener gran cantidad de sales, materias en suspensión y, en muchos casos, ácido sulfúrico libre. Las sales corresponden al mineral obtenido. Estas aguas son agresivas cuando tienen reacción ácida o contienen una cantidad significativa de sulfatos.

Instalaciones siderúrgicas. Las aguas residuales pro-

cedentes de altos hornos, hornos de fundición de aceros y trenes de laminación, así como las de las centrales térmicas y talleres de fundición, no atacan al hormigón. Las aguas procedentes de las instalaciones de granulación de escorias, por el contrario son agresivas, pues contienen ácido sulfúrico y sulfatos, además de gran cantidad de materia en suspensión. El agua procedente de las instalaciones de lavado de humos y gases es también agresiva, así como las procedentes de los talleres de decapado (baños mordientes) por contener gran cantidad de ácidos libres. Los talleres de decapado de chapas metálicas trabajan con ácidos fuertes. Son particularmente agresivas las soluciones de decapado empleadas para los aceros aleados, que contienen ácido fluorhídrico.

Instalaciones metalúrgicas no férreas. Instalaciones de enriquecimiento de minerales. El agua contiene las sales del metal correspondiente (cobre, plomo, etc.) y puede ser agresiva según sea la composición de las sales.

Talleres de fundiciones metálicas. Si la red de recolección de aguas residuales es objeto de una conservación adecuada, puede evitarse que éstas sean agresivas.

Fábricas de gas que consumen turbas. Las aguas residuales son muy agresivas y contienen, además de las impurezas normales de las fábricas de gas, ácidos orgánicos y ácidos sulfúricos, también los vapores pueden ejercer una acción agresiva.

Industrias químicas, fábricas de ácido sulfúrico, clorhídrico y nítrico. Sus aguas residuales contienen ácidos inorgánicos libres y son muy agresivas. En éstas instalaciones también puede ser atacado el hormigón por productos en estado gaseoso.

Fábricas de carbonato sódico. El agua residual contiene cloruro de calcio, hidróxido de calcio y clorato de calcio, y puede atacar al hormigón si contiene cloruro de amonio.

Instalaciones para la producción y destilación del petróleo crudo, pozos de petróleo. El agua residual puede pre-

sentar distintas composiciones, por lo que su acción agresiva debe determinarse por un análisis químico. No es recomendable el empleo de pinturas bituminosas, pues el betún es soluble en petróleo.

Instalaciones de destilación de aceites minerales. El agua de refrigeración no es agresiva, mientras que el agua empleada para el tratamiento por ácido carbónico del petróleo contiene una notable cantidad de ácidos libres, siendo por ello extraordinariamente agresiva. En caso de que exista anhídrido sulfuroso, su fase gaseosa puede producir la corrosión del hormigón.

Instalaciones de "cracking". El agua residual puede ser, según su composición, débil o intensamente agresiva.

Fábricas de productos orgánicos, fábricas de anilina. El agua puede contener ácidos inorgánicos, cloro libre, nitrobenzono, fenol, etc., y es muy agresiva. No es aconsejable el empleo de pinturas bituminosas. También las fases gaseosas (cloro, óxido nítrico) pueden tener acción agresiva.

Fábricas de explosivos. Pueden existir ácidos libres y sales de mercurio, cobre, plomo, etc. La composición de las aguas residuales es muy variada, pudiendo éstas ser débiles o fuertemente agresivas.

Fábricas de productos alimenticios, fábricas de azúcar. El agua contiene materias ricas en azúcar y es agresiva.

Fábricas de almidón y de jarabes. Existen en el agua almidones y productos de hidrólisis, siendo, por lo tanto, agresivas.

Industrias lácteas. El agua puede contener leche, que fermenta, produciendo ácido sulfhídrico, por lo tanto, es agresiva; la fase gaseosa (ácido sulfhídrico) puede también producir corrosión.

Curtiembre. Las aguas residuales contienen ácido sulfhídrico, sulfatos y otras sales, así como materias orgáni-

nicas, por lo que son agresivas, pudiéndolo ser también sus vapores.

Fábricas de celulosa al sulfato. El agua contiene sulfatos, sulfitos, ácido sulfuroso, siendo también elevado su contenido de materias orgánicas, y es agresiva. La corrosión puede también ser producida por los vapores.

Industria papelera, fábricas de papel. La acción agresiva de sus aguas residuales es débil.

Elaboración de materias fibrosas. En el primer tratamiento del lino y cáñamo, el agua residual contiene ácido sulfhídrico, tiene reacción ácida y es agresiva. También la fase gaseosa puede producir corrosión.

Instalaciones de desengrasado de lanas. El agua residual contiene ácido sulfhídrico e impurezas grasas, por lo que es agresiva.

Fábricas de tejidos. El agua residual no es agresiva en general, pero puede descomponerse formándose ácido sulfhídrico.

Sederías. El agua contiene gran cantidad de materia orgánica y ácido sulfhídrico, por lo que es agresiva. También la fase gaseosa puede provocar corrosión.

Tintorerías e instalaciones para dar apresto a los tejidos. El agua residual es agresiva por contener ácido clorhídrico y sales de álcalis débiles. El ácido sulfhídrico puede causar corrosiones en su fase gaseosa.

Talleres de galvanizado (niquelado, cincado, estañado). El agua residual contiene ácidos libres, así como sales de níquel y cinc, por lo que es intensamente agresiva.

Fábricas de superfosfatos. El agua residual contiene ácidos inorgánicos y es muy agresiva.

Grandes lavanderías y diversas secciones de la industria química. Las aguas residuales presentan reacción alcalina.

lina, siendo su pH del orden de 10 a 12.

En casos de aguas particularmente agresivas, el hormigón debe ser protegido superficialmente. Al respecto se han empleado con buen éxito en conductos provinciales del Gran Buenos Aires resinas epoxy bituminosas.

1.3 Ataque ácido de desagües y líquidos cloacales

El hormigón ha sido utilizado desde hace muchos años con resultado satisfactorio como material para la construcción de conductos para líquidos cloacales. Sin embargo a veces se han producido determinadas condiciones que originan ataques severos. Los mismos se deben a que al desprenderse de la masa del efluente gas hidrógeno sulfurado, éste tiende a elevarse, se combina con el oxígeno y por acción de la humedad condensada sobre la parte superior del conducto forma ácido sulfúrico, que es un agente agresivo. No es éste un ataque directo del líquido cloacal, ni el hidrógeno sulfurado en sí produciría ataque, de no mediar las otras circunstancias señaladas.

El ataque no se produce en el conducto debajo del pelo de agua sino en el hormigón que está sobre el nivel del líquido.

Las medidas preventivas para este caso son las siguientes: evitar la formación de hidrógeno sulfurado; evitar la condensación del hidrógeno sulfurado y evitar el ataque.

Como medio para prolongar la vida útil del conducto se aconseja dar un espesor mayor a las paredes (2 a 4 cm más del recubrimiento del hormigón).

Por último un hormigón rico de la mejor calidad posible con aire incorporado, baja razón Pa/Pc, bien curado es indispensable para obtener mayor durabilidad.

Asimismo se han empleado revestimientos protectores, como pinturas a base de asfalto, epoxy bituminosas y láminas de plástico.

2. Agresivos que actúan por cristalización directa o que al reaccionar con algunos de los compuestos del cemento dan lugar a la formación de productos que también cristalizan produciendo tensiones internas, expansión y agrietamiento.

Incluiremos dentro de este grupo, las aguas que contienen sulfatos solubles y el agua de mar.

2.1 Aguas que contienen sulfatos solubles

Algunos de los más espectaculares ataques producidos en las obras de hormigón han sido el resultado de la presencia de sulfatos solubles (de sodio, de magnesio o de calcio) contenidos en suelos o aguas en contacto con las estructuras.

La desintegración del hormigón y el grado de ataque depende, naturalmente de la concentración de las sales.

La experiencia adquirida indica que un hormigón compacto sólo sufre efectos superficiales mientras que si es poroso el efecto destructivo se produce en toda la masa con ablandamiento y desintegración superficial acompañados por expansión y reducción de resistencia.

En cuanto al mecanismo del ataque depende de las siguientes causas fundamentales:

a) Los sulfatos reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio dando lugar a la formación de pequeños cristales de yeso, visibles al microscopio. Esto sucede particularmente cuando hay elevadas concentraciones de sulfatos, especialmente sulfato de magnesio.

b) Por la formación de sulfo-aluminato de calcio fuertemente hidratado, como consecuencia de la acción de los sulfatos sobre el aluminato tricálcico. Diversos autores han demostrado que concentraciones pequeñas de sulfatos producen pérdidas considerables de resistencia en el hormigón. Miller ha encontrado que con 0,1 % de sulfato de calcio y de magnesio se produce una reducción del 10 % en la resistencia, pudiendo llegar a 35 % con concentraciones del 0,5 %. La formación del sulfoaluminato de calcio hidratado partiendo del AC_3 y del sulfato de calcio da origen a un incremento de volumen del 227 %.

Fig. 9

ATAQUE AL HORMIGÓN POR SUELOS Y AGUAS QUE CONTENGAN DISTINTAS CONCENTRACIONES DE SULFATOS SOLUBLES EN AGUA (U.S. BUREAU OF RECLAMATION)

Grado relativo de ataque	Por ciento de sulfatos (expresados en $SO_4^{=}$) contenidos en muestras de suelos	Partes por millón de sulfatos (expresados en $SO_4^{=}$) contenidos en muestras de aguas.
Despreciable	0,00 a 0,10	0 a 150
Positivo (1)	0,10 a 0,20	150 a 1.500
Severo (2)	0,20 a 2,0	1.500 a 10.000
Muy severo (3)	2,0 ó más	10.000 ó más

- 1) Emplear cemento portland especificación ASTM-C-150, tipo II (AC_3 máx = 8,0 %).
 2) Emplear cemento portland especificación ASTM, tipo V (AC_3 máx 5,0 %).
 3) Emplear cemento portland especificación ASTM, tipo V (AC_3 máx 5,0 %) y cenizas volantes que cumplan la especificación Federal 55-P 00570 a (COM-N55) Clase F.

c) Las aguas sulfatadas, en el caso de los hormigones porosos, pueden ingresar a la masa de hormigón y depositar allí sus sales por evaporación del agua, si el hormigón está sometido a efectos alternados de mojado y secado. El aumento de volumen de los cristales, producido por los mencionados ciclos puede eventualmente llenar los poros del hormigón y desarrollar presiones suficientes como para producir la desintegración de la masa.

En las estructuras de hormigón armado, la destrucción puede ser acelerada por la oxidación del hierro y el consiguiente agrietamiento del hormigón.

El empleo de hormigones con baja razón agua/cemento, mezclas ricas en cemento, agregados satisfactorios, buena compactación, terminación superficial adecuada, incorporación intencional de aire y toda medida que reduzca la absorción y la permeabilidad reducen la posibilidad de ataque

Asimismo uno de los requisitos más importantes para obtener una adecuada resistencia a la acción de los sulfatos es el empleo de cementos con reducidos contenidos de aluminato tricálcico (fig. 9).

El PRAEH, capítulo III.1, párrafo c, expresa: en el caso particular de aguas o suelos que contengan sulfatos, se tendrá en cuenta:

Si el contenido de sulfatos solubles (expresado en ión

sulfato) en muestras de suelos, está comprendido entre 0,1 % y 0,2 % o entre 150 y 1 000 partes por millón en muestras de aguas, se emplearán cementos cuyo contenido de aluminato tricálcico (AC_3) sea menos del 8 %; si los contenidos de sulfato fuesen mayores de 0,2 % o de 1 000 partes por millón, para muestras de suelos o de aguas, respectivamente, se preferirán los cementos cuyo contenido de AC_3 sea menores del 5 %.

Para la elaboración del hormigón no se empleará cloruro de calcio, ni materiales de adición que lo contengan.

Los métodos de ensayo actualmente practicados en laboratorios para determinar si el cemento portland es resistente a los sulfatos, se basan en la preparación de probetas de mortero o de hormigón, incorporando al mismo cantidades prefijadas de sulfatos y curados en ambiente húmedo o bajo agua con medición periódica generalmente de las variaciones volumétricas. Estos métodos tienen la ventaja de poner de manifiesto la resistencia potencial, en un tiempo menor que la exposición de las probetas en condiciones normales de exposición.

IRAM ha especificado en la Norma IRAM 1 659, el ensayo para determinar la resistencia de los sulfatos. El método normalizado es aplicable a todos los cementos portland, con o sin adiciones. Tiene el inconveniente que es necesario esperar noventa días para obtener resultados definitivos, por lo tanto no sirve como control de obra.

En ensayos de adopción del mismo, realizados en países en los cuales es conocido con el nombre de sus autores (Le Chatelier y Anstett, modificado por Blondiau) muestran que su severidad es extremada y que desde luego, los cementos que han podido soportarlos poseerán, por su constitución química, una total indiferencia al ataque de los sulfatos.

Los cementos que cumplan con esta norma son calificados como altamente resistentes a la acción de los sulfatos, y se fabrican en nuestro país y están normalizados (Norma IRAM 1 669).

Para cementos portland sin adiciones, ASTM ha normali-

lado e método ASTM C-150, obteniendo respuesta en 14 días. Sus requisitos están normalizados en ASTM C-150.

En un trabajo con distintos métodos, realizado en España, como conclusión se indica que podría pensarse que la rigurosidad de estos ensayos es excesiva y que dicha rigurosidad no se da en la mayor parte de los casos. No obstante, los daños ocasionados por el ataque de los sulfatos a los hormigones en nuestro país y en el resto del mundo, obligan a adoptar una postura de suma prudencia respecto a este problema. En los cálculos de las superestructuras, los coeficientes de seguridad que se emplean son amplios debido a que la experiencia así lo ha aconsejado. Teniendo en cuenta que la agresión química se produce generalmente en las bases de las estructuras de hormigón armado, con tanto cuidado calculadas, no es descabellado el hecho de someter al conglomerante que va a ser empleado en zonas de agresión, a ensayos rigurosos. Cuando la agresividad del medio es grande, la utilización de cementos resistentes a los sulfatos debe ser considerada como totalmente necesaria; en aquellos casos en que la agresividad es moderada, el empleo de estos cementos supondrá dar a la obra la necesaria garantía de durabilidad.

Por último, las que siguen son algunas de las recomendaciones más importantes que resumen los conocimientos y previsiones a que se ha hecho referencia anteriormente.

a) El cemento a emplear tendrá las características necesarias para resistir la acción de los sulfatos. Considerando que el contenido de AC_3 del cemento es el factor de mayor importancia para resistir la acción agresiva, solamente se emplearán cementos de moderado o de bajo contenido de AC_3 (menor de 8,0 % o menor de 5,0 %, respectivamente, de acuerdo a la mayor o menor agresión previsible). Además, en caso de que se compruebe que los áridos son reactivos frente a los álcalis del cemento, éste deberá tener un contenido total de álcalis lo más bajo posible y menor de 0,6 %.

b) Dado que las puzolanas producen efectos variables y distintos, que oscilan entre francamente perjudicial y altamente beneficioso, para la fabricación de cemento puzolánico, o como reemplazantes de una parte del cemento en el caso de agregarlas en la hormigonera, sólo se emplearán aquéllas

que, cumpliendo las especificaciones que aseguren la posibilidad de obtener hormigones capaces de resistir la agresión, permitan reducir la razón agua/cemento respecto a la del hormigón que no contiene puzolana alguna. Al respecto se destaca que los únicos materiales que de acuerdo a las investigaciones realizadas han permitido aumentar, sin excepción, la capacidad de resistencia del hormigón frente a la agresión, son las cenizas volantes.

c) Como agua de mezclado no se empleará agua de mar ni otras que contengan sales en exceso de los máximos contenidos especificados en la Norma IRAM 1 601.

d) Los áridos fino y grueso no serán reactivos frente a los álcalis del cemento, y cumplirán las condiciones establecidas en las normas IRAM 1 512 y 1 531, respectivamente. No se emplearán áridos provenientes de playas marinas, ni los que hayan estado en contacto con aguas saladas o que contengan restos de cloruros o de otras sales que puedan favorecer la corrosión de las armaduras, sin antes haberlos lavado hasta eliminar las mencionadas sales.

e) El hormigón no contendrá cloruro de calcio, ni materiales en los que dicho compuesto se encuentre presente en cantidades tales que la proporción total de cloruro de calcio en el hormigón exceda de 0,2 % del peso del cemento.

f) Para el caso de las estructuras del hormigón simple o armado de secciones delgadas, la razón agua/cemento máxima estará comprendida entre 0,40 y 0,45 en peso. Mientras más baja sea, menor será la permeabilidad. En el caso de estructuras del tipo masivo o semi-masivo, previo estudio y evaluación de todas las circunstancias, cuando se empleen cementos de bajo contenido de AC_3 , la máxima razón agua/cemento podrá elevarse como máximo hasta 0,50 en peso. El contenido unitario de agua se reducirá al mínimo posible que permita cumplir lo indicado en el inciso i).

g) Para estructuras de hormigón simple o armado de secciones delgadas o moderadas, el contenido unitario de cemento no será menor de 375 kg/m^3 ni excederá de 425 kg/m^3 de hormigón compactado. En el caso de estructuras de hormigón simple de secciones masivas se realizarán los estudios necesarios para establecer el contenido de cemento, tenien-

do en cuenta la máxima razón agua/cemento admisible y las características y requisitos de la estructura.

h) El hormigón contendrá entre 3,0 y 6,0 % de aire intencionalmente incorporado en su masa, de acuerdo a lo que corresponda en función del tamaño máximo del árido grueso. Se establecerá un control permanente del porcentaje de aire incorporado. El hormigón contendrá también un aditivo fluidificante de calidad adecuada (ASTM-C-494 o IRAM 1663), que permita reducir al máximo el contenido unitario de agua de mezclado.

i) Para condiciones generales de colocación, el hormigón tendrá un asentamiento (como ASTM) comprendido entre 4 y 7 cm. En secciones de difícil colocación, el asentamiento no excederá de 10,0 cm. El contenido de agua de mezclado se controlará rigurosamente para que en ningún caso se exceda el asentamiento máximo establecido.

j) El hormigón se mezclará mecánicamente. Para las hormigoneras de tipo convencional el tiempo de mezclado no será menor de 2 minutos.

k) La compactación se realizará empleando vibradores mecánicos de alta frecuencia, que permitan obtener máxima densidad y compacidad del hormigón de la estructura.

l) El curado se iniciará a la más temprana edad posible, asegurando una provisión adecuada y continua de agua, que cumpla las especificaciones correspondientes al agua de mezclado. En ningún caso el curado húmedo continuo será menor de 7 días. En caso de emplearse compuestos líquidos de curado de calidad satisfactoria (ASTM-C-309 o IRAM equivalente), se aplicará un curado inicial con agua, durante los primeros tres días, seguido de la aplicación inmediata del compuesto líquido.

El curado de las estructuras es una operación muy importante para lograr una buena durabilidad del hormigón expuesto a un medio agresivo. El curado prolongado es un factor favorable.

3. Agua de mar

El hormigón es un material ampliamente empleado para la

construcción de puertos, diques, rompeolas y otras estructuras, expuestas a la acción del agua de mar. La permanencia de estas estructuras a lo largo del tiempo, tiene entonces mucha importancia.

Las observaciones siguientes también se aplican a las construcciones que aunque no están directamente en contacto con el agua de mar, han sido construídas en la zona costera a menos de 3 km de la costa, hasta donde llegan los efectos de la atmósfera salina.

El ataque puede provenir de las siguientes causas:

- a) reacción química entre las sales disueltas en el agua y algunos de los componentes del cemento;
- b) cristalización de las sales contenidas en el agua de mar, bajo condiciones de ciclos alternados de mojado y secado;
- c) acción del hielo;
- d) desgaste mecánico e impacto de las olas, choques de barcos;
- e) corrosión de las armaduras de acero, en las estructuras de hormigón armado.

El ataque que se produce por una de estas causas hará que el hormigón sea más susceptible a la acción de cualquiera de los demás.

Entre los distintos autores que han estudiado este problema, hay acuerdo bastante general de que el principal agente destructivo de carácter químico es en este caso el sulfato de magnesio.

La forma de actuar del mismo ya fue analizada al desarrollar el tema anterior referente a la acción de las aguas sulfatadas. Sin embargo parece ser que los hechos que suceden no tienen una explicación tan simple como ya se viera anteriormente ya que, por ejemplo, en el hormigón expuesto al agua de mar, es frecuente que el ataque se produzca sin la expansión que caracteriza al ataque de sulfatos, observándose en cambio, más la forma de erosión o pérdida de los constituyentes de la masa.

Estudios de larga duración realizados en los EE.UU. pa-

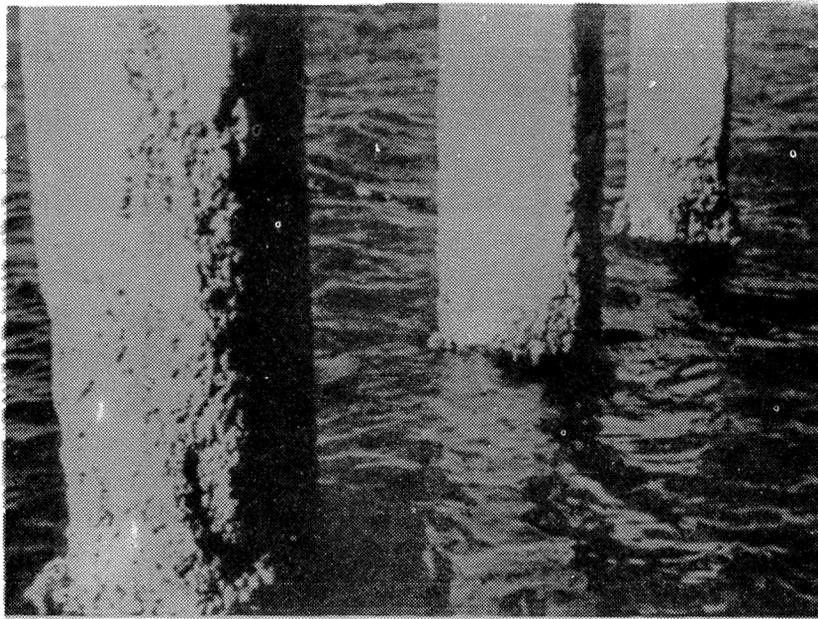


Fig. 10.- Pilares experimentales de hormigón armado en Cabo Cod (EE.UU.), expuestos a una oscilación de marea de 2,70 m por la Portland Cement Association (Imre Biczok, 2)

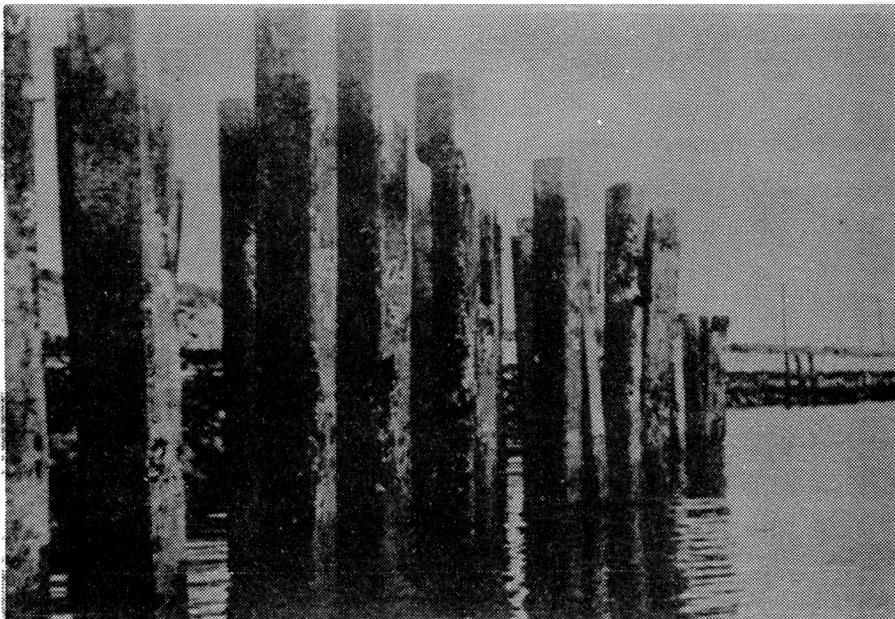


Fig. 11.- Pilares de hormigón fabricados con cemento portland de alto contenido de C_3A (12,2 %), sumergidos en agua de mar, con claros signos de no resistir dicha agresión. Estación experimental de la Portland Cement Association, San Agustin (Florida) (Imre Biczok, 2).

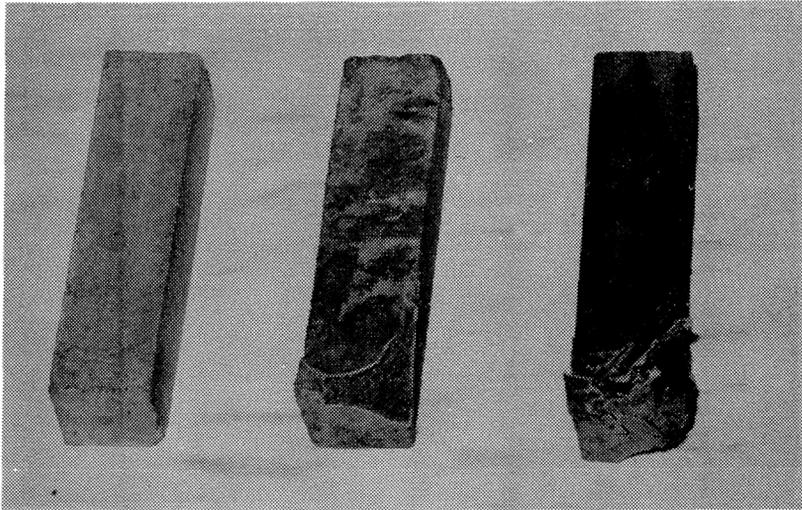


Fig. 12.- Aspecto que presentan probetas elaboradas con diversos cementos luego de 12 meses de inmersión en agua de mar (balsa experimental).

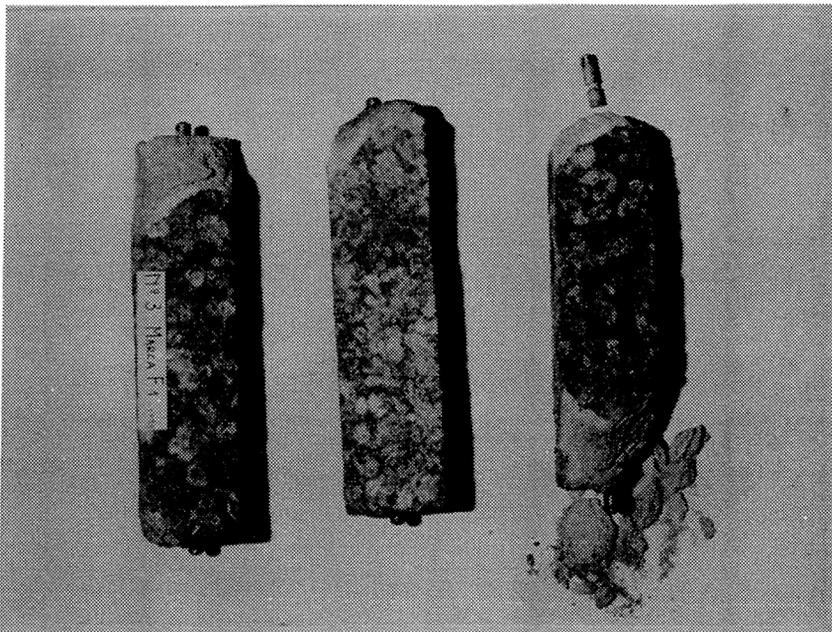


Fig. 13.- Aspecto que presentan probetas elaboradas con diversos cementos luego de 12 meses de inmersión en agua de mar (balsa experimental).



Fig. 14.- Detalle del ataque por acción del agua de mar en una probeta luego de un año de inmersión.



Fig. 15.- Detalle del ataque por acción del agua de mar, en una probeta luego de un año de inmersión.

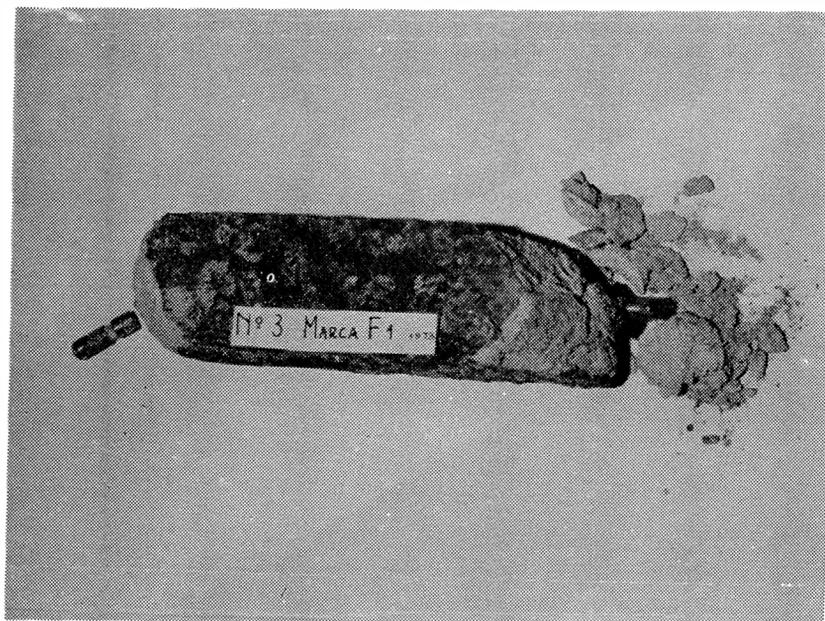


Fig. 16.- Detalle del ataque por acción del agua de mar en probetas luego de un año de inmersión.

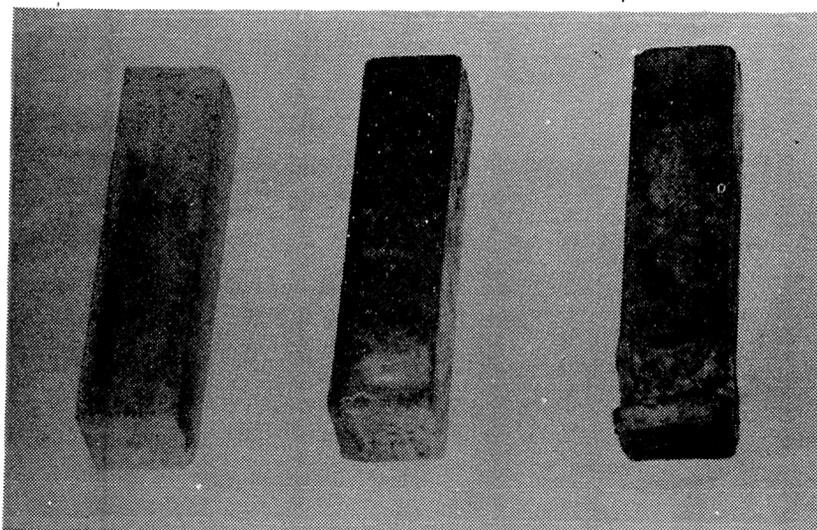


Fig. 17.- Aspecto que presentan probetas elaboradas con diversos cementos, luego de un año de inmersión en agua de mar (balsa experimental)

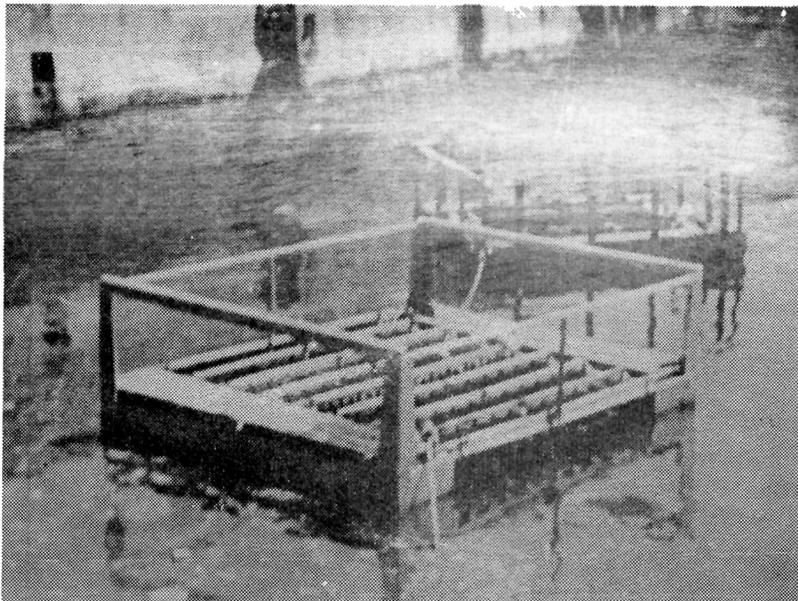


Fig. 18.- Balsa experimental de ensayo de pinturas marinas, en la cuál fueron expuestas las probetas de hormigón



Fig. 19.- Bloques de hormigón de cemento portland normal sometidos a la acción del agua de mar y dañados por una reacción árido-álcali (Imre Biczok, 2)

recen confirmar que el ataque del agua de mar es similar al de las soluciones fuertes de sulfatos, excepto que la acción es mucho más lenta. Muchas de las destrucciones observadas no se han debido tanto a ataque químico sino a la porosidad del hormigón que permitió la eliminación de algunos de los componentes más solubles del cemento, la corrosión de las armaduras y el consiguiente agrietamiento del hormigón, y los efectos de congelación y deshielo.

Cabe acotar que las observaciones realizadas muestran que las zonas que se encuentran siempre sumergidas muy raras veces muestran signos de destrucción, pero sí la correspondiente a la zona de fluctuación del agua y en zonas no sumergidas.

En Francia, para construcciones portuarias, la Administración autoriza un número limitado de cementos. Figuran con la leyenda "prise mer".

El hormigón debe ser tratado en forma tan importante como el cemento (buena granulometría de los áridos, dosaje alto de cemento, bajo tenor de agua, vibrado enérgico, aire incorporado, buen recubrimiento de armaduras).

La admisión de cementos franceses para obras marítimas se hacen luego de pruebas de larga duración que incluyen el cumplimiento de:

a) Buena resistencia y conservación de las probetas de hormigón en el mar libre, conservadas sumergidas o semisumergidas en balsas especiales de ciertos laboratorios franceses.

b) Buenas resistencias mecánicas de probetas conservadas en el laboratorio, en agua de mar. Los cementos que resisten más de 6 años son admitidos para los trabajos en el Mediterráneo. Los que resisten más de 10 años, lo son para el Océano Atlántico, porque este último es más agresivo. En nuestro país el LEMIT comenzó estudios similares en el Puerto de Mar del Plata, empleando para ese fin la balsa experimental para investigaciones sobre características de pinturas marinas.

V. DESTRUCCION PROVOCADA POR LOS MATERIALES COMPONENTES DEL HORMIGON O POR SUSTANCIAS FORMADAS POR ELLOS DENTRO DE LA MASA DEL HORMIGON

Se debe a: reacción álcali-agregado, a reacción cemento-agregado y a reacción álcali-carbonato.

1. Reacción álcali-agregado

Los factores que favorecen la reacción son la presencia de humedad permanente, conjuntamente con un clima templado o cálido, condición esta última que se presenta durante gran parte del año en una importante extensión del país.

La hipótesis generalmente aceptada es que la reacción comienza (9) con el ataque a los minerales silíceos activos del agregado por los hidróxidos alcalinos provenientes de los álcalis (óxido de sodio y óxido de potasio) del cemento portland dando una solución de silicatos alcalinos que con el calcio y el aluminato forman un gel de silicato y silicato aluminato de calcio con características de membrana semipermeable, formado lentamente y con posterioridad al fraguado del cemento.

Este gel en contacto con la humedad aumenta de volumen, pero debido a que el gel está confinado por una estructura rígida formada por la pasta de cemento endurecida que la rodea, da como resultado presiones internas con las consiguientes expansiones, fisuración y, eventualmente, destrucción del hormigón.

Estas presiones, según la información bibliográfica existente, han llegado hasta alcanzar valores del orden de 140 kg/cm^2 (9) y exceden en mucho la resistencia a tracción del hormigón.

La velocidad y magnitud de los deterioros que produce están influenciados por todas las características físicas del mortero o del hormigón, como por ejemplo el contenido unitario de cemento, la razón agua/cemento, contenido de álcalis del cemento, cantidad y reactividad de los agregados, granulometría de los mismos, etc. y también por las condiciones de curado. Se observa, asimismo, la influencia perjudicial de malas técnicas constructivas en la confección de hormigones,

que favorecen el incremento de las expansiones cuando los agregados son reactivos.

2. Métodos de Ensayo

Para ensayar si un agregado es reactivo se aplican tres métodos de acuerdo con la experiencia internacional.

Examen petrográfico (Norma IRAM 1 649)

Consiste esencialmente en determinar en los agregados la existencia o no de componentes de un nómina establecida, que se sabe que aisladamente reaccionan con los álcalis del cemento portland. Asimismo se determina su estado de transformación.

Método químico (Norma IRAM 1 650)

Consiste en un ensayo rápido. Se determina la disminución de alcalinidad de una solución normal de hidróxido de sodio a 80°C puesta en contacto con el agregado pulverizado, valorándose la cantidad de sílice disuelta.

Se presentan los valores de la sílice disuelta en función de la disminución de alcalinidad. En el gráfico quedan determinadas dos zonas, cada una de las cuales representa pares de valores que caracterizan a los agregados potencialmente reactivos o inocuos.

Método de la barra de mortero (Norma IRAM 1 637)

Este ensayo consiste esencialmente en medir la variación de longitud de probetas normalizadas de mortero, preparadas con el agregado y cementos a emplear en la obra o cementos que ensayados de acuerdo con la Norma IRAM 1 671 dan expansiones superiores a las especificaciones en el citado método.

Las probetas son prismáticos, de sección cuadrada, de 25,4 mm de lado y 254 mm de longitud entre los puntos de referencia. Las probetas se preparan con morteros de proporciones cemento-arena 1:2,25 en peso y la plasticidad debe estar entre 105 y 120, medida en la masa de escurrimiento. En el caso de agregados gruesos se los tritura hasta obtener la granulometría normalizada; en cambio la arena se en-

saya tal cual. Luego de un período de curado inicial, se colocan en recipientes metálicos de cierre hermético, con agua en su parte inferior, que se mantienen a la temperatura de $37,8 \pm 1,7^{\circ}\text{C}$.

Las mediciones se efectúan a las edades de 1, 2, 3, 6, 9 y 12 meses y, si es necesario, posteriormente cada 6 meses.

La diferencia de longitud entre cada medida y la inicial se expresa en tanto por ciento y es la expansión para el período considerado

3. Alcance de los métodos de ensayo

El método petrográfico es definitorio para el caso en que no existan en el agregado materiales reactivos (ópalos, ciertas formas de calcedonias, cherts, ciertas rocas volcánicas como: andesitas, dacitas y riolita, etc.) resultando, por lo tanto, innecesario todo otro ensayo. En este caso el agregado es no reactivo. En caso contrario no es posible estimar la reactividad potencial con el solo conocimiento del contenido de los materiales reactivos, debido a que, de acuerdo con lo expuesto más adelante, del análisis de los resultados de ensayos resulta que muchísimos agregados que contienen los elementos citados, no han provocado expansión en las barras de mortero que excedan los límites establecidos en las normas, y más aún, en algunos casos se han producido contracciones, como con las arenas del Río Paraná que contienen calcedonias, y no son reactivas, debido principalmente a su edad geológica. En las pocas muestras de agregados reactivos provenientes de ese río, se encontró ópalo incluido en la calcedonia y a ese componente se debe la expansión.

Debe destacarse que la expansión no es función directa de la cantidad porcentual del material reactivo presente (por ejemplo los valores porcentuales "pessimun" para ópalo son entre 2 y 6 %), pero con contenidos mayores las expansiones obtenidas son de poca significación.

En el método químico la interpretación de los resultados en algunos casos no es bien clara y solamente da una idea de la reactividad potencial del agregado sin carácter definitorio.

De acuerdo con la experiencia acumulada, se considera que el método de la barra de mortero es el único que tiene carácter definitorio para determinar si un agregado es reactivo o no, y así se ha consignado en la Norma IRAM 1 637.

4. Especificaciones

Correlacionando los resultados de los ensayos de expansión de probetas de mortero con el comportamiento de los mismos materiales en estructuras sujetas a las más exigidas condiciones de exposición se llegó a la conclusión que aquellos agregados que sometidos a las condiciones exigidas por la Norma IRAM 1 637 dan expansiones menores de 0,1 % a la edad de 6 meses pueden considerarse inocuos desde el punto de vista de la reacción álcali-agregado.

En consecuencia el agregado en ensayo será catalogado como reactivo si la expansión de las probetas es mayor de 0,05 % a los 3 meses y de 0,1 % a la edad de 6 meses.

Debe entenderse que el resultado de la expansión a los 3 meses de edad de las probetas es solamente orientativo, siendo en cambio definitorio el valor de la expansión a los 6 meses de edad.

5. Prevención de la reacción

La Norma IRAM 1 503 para cemento portland normal expresa claramente la forma de solucionar este problema en su párrafo H-3, que establece que cuando se trate del empleo de cemento portland normal en la preparación de morteros y hormigones para obras hidráulicas o estructuras que puedan estar en contacto permanente con la humedad y para cuya elaboración se deba disponer de agregados que puedan reaccionar con los óxidos alcalinos contenidos en el cemento provocando expansiones, deberá realizarse un estudio de la reacción álcali-agregado con el fin de evitar dicho inconveniente de acuerdo con las siguientes prioridades:

- a) el reemplazo total o parcial de los agregados por otros no reactivos;
- b) la incorporación al mortero, u hormigón de sustancias que impidan la reacción; y

- c) el empleo de cementos que cumplan la Norma IRAM 1 671.

La solución del problema mediante el reemplazo indicado en a) es generalmente factible en condiciones económicas favorables ya que, de acuerdo con los resultados que se poseen, se observa generalmente que cerca de yacimientos con agregados reactivos existen otros que contienen agregados inocuos.

Respecto a lo expresado en el punto b) es oportuno repetir aquí que la adición de puzolanas, cenizas volantes, etc., tiene un efecto inhibitor. En nuestro país se pueden obtener puzolanas de muy buena calidad. Asimismo se ha encontrado que también tiene un efecto inhibitor el agregado de caliza finamente dividida.

Con referencia al punto c) lo podemos catalogar como un avance en la normalización, ya que ensayando los cementos de acuerdo con la Norma IRAM 1 671 se conoce la reactividad alcalina potencial que puede arrojar un cemento. Ensayos realizados por la Comisión han demostrado que en ciertos casos, cementos con contenidos de álcalis de 0,54 % (expresados en óxido de sodio) con un agregado reactivo, han sobrepasado los límites máximos de expansión, mientras que el mismo agregado con otro cemento que contenía mayor porcentaje de álcalis (0,62 %) no dio reacción expansiva.

Se han ensayado más de 350 agregados de procedencia perfectamente conocida cuyas conclusiones se dan en un trabajo presentado al Congreso de Vialidad y Tránsito realizado en Mendoza en el año 1972 (9).

6. Recomendaciones

Dada la importancia de los deterioros que podría producir en el hormigón esta reacción, cuando se trata de obras que por sus características reúnan las condiciones necesarias para que la misma se produzca. Se recomienda realizar los ensayos necesarios a fin de asegurar el carácter inocuo de los agregados con tiempo suficiente.

En aquellos casos en que no existan antecedentes de los posibles agregados a utilizar, el número de ensayos debe ser

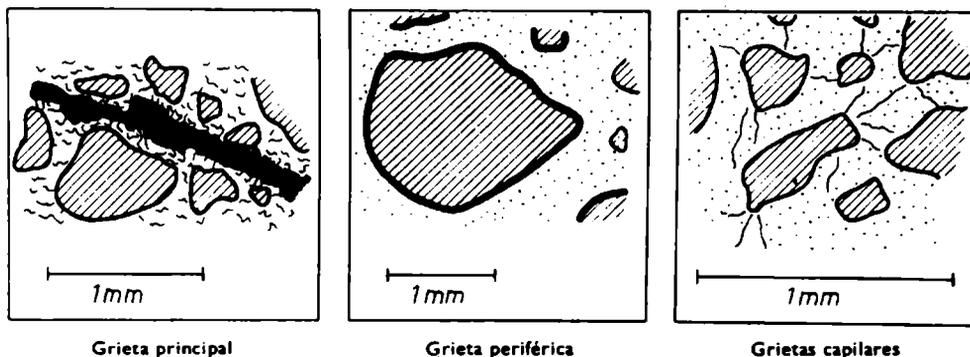


Fig. 20.- Formas típicas de las grietas debidas a expansiones alcalinas (Imre Biczok, 2)

condicionado estrictamente a las normas anteriormente citadas, mientras que en canteras, cuyos agregados fueron motivo de análisis anteriores favorables, al menos se deberá realizar el mínimo de ensayos necesarios para obtener un resultado significativo (fig. 19 a 21).

Respecto a las otras dos reacciones no entraremos en detalles debido a que no se conoce que se haya presentado en el país.

VI. PROTECCION DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON

Se considerarán en este punto los recubrimientos de superficie no aditivos.

Según DIN 4 030 el hormigón debe recibir un recubrimiento protector cuando vaya a estar sometido a un ataque muy fuerte. Un grupo de trabajo alemán, en 1968, en colaboración con las industrias de productos protectores para la construcción y de los productos artificiales sintéticos ha publicado una hoja de instrucciones, elaborada por ellos. Contiene, para los distintos tipos de agresivos, los recubrimientos protectores que son resistentes, frente a ellos, condicionadamente resistentes y no resistentes. La hoja de instrucciones

contiene, además, indicaciones particulares para la aplicación de los recubrimientos mediante brocha, rodillo, espátula o por proyección (pistola) y también acerca de las juntas y bordes especialmente vulnerables al ataque químico. El espesor de un recubrimiento ya desecado, que no ha de ser solicitado por acciones mecánicas, debe ser, como mínimo, de 1 mm, cuando la sollicitación sea muy intensa ha de llegar por lo menos a 3 mm, mientras que para sollicitaciones situadas entre los límites indicados, el espesor oscilará entre 1-3 mm. En EE.UU., Kuenning, en 1966, ha publicado las líneas directrices correspondientes.

En el tratamiento superficial del hormigón se aplican de modo principal resinas de silicona y los productos previos solubles que aparecen en el proceso de su fabricación. Dan lugar a superficies de hormigón no mojables, no empapables, y elevan al mismo tiempo la resistencia química. Sin embargo, no hacen disminuir la permeabilidad para el aire y el vapor de agua. Las siliconas son combinaciones polimerizadas del silicio y del carbono. No olvidemos las resinas epoxídicas de tanta significación en la construcción moderna.

Restauración del hormigón atacado

Como generalmente las alteraciones debidas a los agentes agresivos progresan en relación con la edad de las estructuras de hormigón, eventualmente la restauración es más necesaria para aquellas estructuras expuestas. Para restaurar una estructura muy deteriorada, necesariamente se requiere mucha mayor pericia y habilidad ingenieril que las necesarias para construir una nueva estructura. Evidentemente estos trabajos requieren un alto grado de experiencia e ingenio. El Comité 201 del ACI da una guía para trabajos de restauración.

Para una buena estabilidad y durabilidad, los trabajos de restauración deberán:

- a) ser concienzudamente completos en toda la estructura y no en partes de ella. Se deberán realizar después de retirar todo el hormigón desintegrado;
- b) empleo de refuerzos colocados adecuadamente;
- c) serán elementos esencialmente impermeables y lo más denso posible;

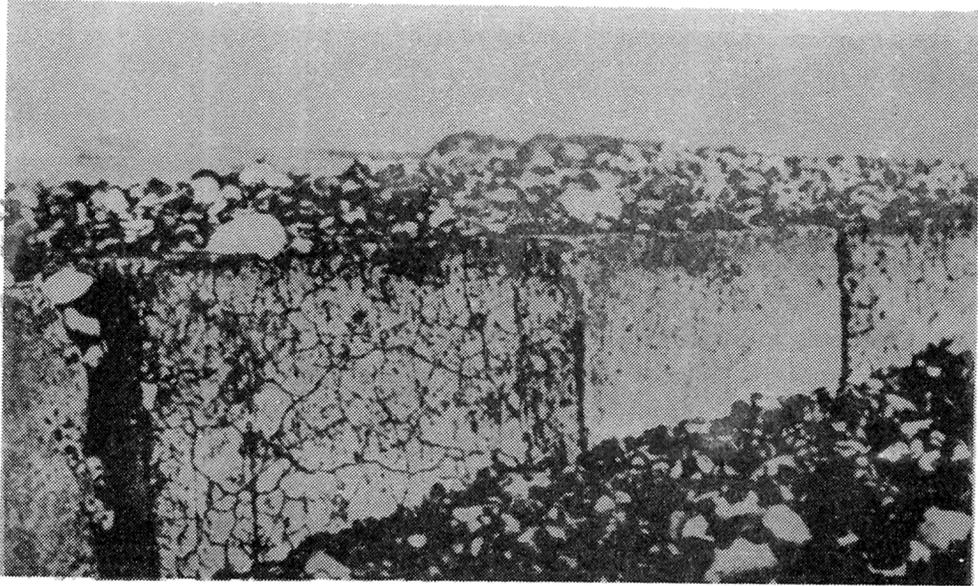


Fig. 21

Bloque de hormigón de un muro de la costa occidental de Jutlandia. Los bloques que presentan redes de grietas están fabricados con cemento portland, y en los que no se presentan grietas se ha sustituido parte del cemento por un material puzolánico, la tierra danesa "mole". Puede apreciarse claramente la reducción de las expansiones producidas por la reacción árido-álcali, debida a la puzolana (Imre Biczok, 2)

- d) proporcionar al nuevo material características de cambios volumétricos correspondientes a aquellos del hormigón viejo pero en su valor actual;
- e) apto para resistir la erosión y desintegración en las condiciones subsistentes;
- f) debe tener suficiente espesor para evitar que los efectos de congelación y deshielo alcancen al hormigón viejo;
- g) no debe ser aplicado transversalmente a fisuras activas o juntas, de lo contrario podrá fisurarse el nuevo material;
- h) será protegido de cargas prematuras y futuros desplazamientos o asentamientos por inadecuados soportes cuando aplicaciones de gran espesor son hechas sobre superficies con pendiente;
- i) debe soportar todas las cargas a la que está sujeta la estructura en servicio.

Para obtener buena adherencia con la superficie de la estructura vieja, el hormigón debe ser cuidadosamente tratado con arena o agua a presión o ambas. Son esenciales anclajes de acero y que la superficie de contacto sea rugosa para lograr buena adherencia. Se puede aplicar una lechada de cemento sobre la superficie vieja previamente humedecida, que ha sido secada superficialmente antes de la colocación del nuevo material, esto ayudará a asegurar un contacto completo y una buena adherencia.

Se requiere particular cuidado de usar una baja razón agua/cemento para el nuevo hormigón a fin de disminuir los movimientos diferenciales que puedan ocurrir y disminuir la adherencia.

En trabajos de arquitectura o en otros trabajos, donde el aspecto es importante, se debe tener cuidado que la textura y el color de la parte reparada sea semejante al hormigón que lo rodea.

El curado debe ser muy cuidadoso porque el hormigón viejo puede absorber humedad de la capa relativamente de poco espesor del nuevo material y causar contracciones excesivas.

Deben ser instalados desagües si hay posibilidad de que se deposite agua y producirse presiones hidráulicas y causar descascaramientos del hormigón nuevo.

Por último, expresemos que los métodos de restauración incluyen:

- a) mortero de arena-cemento, alisado con madera y llana de acero;
- b) mortero colocado con métodos neumáticos gunita, shotcrete;
- c) hormigón colocado por gravedad;
- d) compuestos epoxídicos;
- e) hormigón de grava inyectada (prepack concrete).

VII. BIBLIOGRAFIA

1. Fava A. S. C. y Colina J. F. - Algunas consideraciones sobre durabilidad del hormigón y los medios prácticos para obtenerla. Simposio sobre alterabilidad de materiales y estructuras. LEMIT, 1961.
2. Biczok Imre. - La corrosión del hormigón y su protección. Bilbao - Ediciones URM0 1972.
3. Fava A. S. C. - Procedimientos y medios disponibles para incrementar la productividad en el campo de la tecnología del hormigón. LEMIT, Serie II, nº 129, 1968.
4. Fava A. S. C. - Destrucción de las estructuras de hormigón por la acción agresiva de los sulfatos contenidos en aguas y suelos en contacto con las estructuras. Revista La Ingeniería, nº 1 029, 1973.
5. Wainsztein M. y Cano Olazabal W. - Durabilidad de hormigones de cemento portland sometidos a los efectos de congelación y deshielo. LEMIT-ANALES, 1-1974; pág. 47.

6. Batic O. y Wainsztein M. - Estudio preliminar de la resistencia de los cementos portland nacionales a la acción del agua de mar. LEMIT-ANALES, 1-1974; pág. 245.
7. Colina J. F. y Wainsztein M. - Experiencias realizadas en el LEMIT sobre el comportamiento de cementos nacionales a la acción de los sulfatos. Revista de Ingeniería, XI (41), abril-junio 1963.
8. Colina J. F., Wainsztein M. y Batic O. - Durabilidad de hormigones de cemento portland. Experiencias realizadas en el LEMIT. Serie II, nº 115, 1967.
9. Comisión de Estudio de la Reacción Alkali-agregado. La reacción álcali-agregado. Su implicancia actual en la República Argentina. Documento 132. Memorias del VII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, 1972.
10. PRAEH. Proyecto de Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón, CINEH - INTI, 1964.
11. Calleja Carrete José. Durabilidad de los hormigones. Publicación ICPA, Serie R-5, nº 58, 1971.