

684-48

## **lo que debe saber un ingeniero sobre la naturaleza de las adiciones o aditivos**

**SANDOR POPOVICS**

**Concrete, nº 7, julio 1968, págs. 272-277**

Un aditivo, según las "Definiciones Standard de términos referentes a hormigón y aridos para el hormigón" (ASTM C 125), es "un material distinto del agua, áridos y cemento portland (incluyendo el cemento portland con aire ocluido y los cementos portland de alto horno) que se emplea como ingrediente del hormigón y se añade a la amasada inmediatamente antes o durante la mezcla".

El empleo de un aditivo adecuado puede llevar consigo ciertas características deseables que no pueden asegurarse por otros métodos, o, al menos, de una manera tan económica. En otros casos, el objetivo proyectado puede lograrse más económicamente por cambios en la composición de la mezcla de hormigón que empleando un aditivo. Los aditivos no son un sustituto para la buena práctica del hormigonado. Deberán cumplir con los requisitos establecidos en las normas ASTM u otras especificaciones de importancia reconocida. Al emplear cualquier adición ha de prestarse una cuidadosa atención a las instrucciones dadas por el fabricante del producto (1).

Muchas adiciones influyen en más de una propiedad del hormigón, afectando también a veces ciertas propiedades importantes de un modo adverso. El empleo óptimo de ciertas adiciones puede requerir la redosificación del hormigón. Los efectos específicos de una adición dependen generalmente de un número de variables, tales como el tipo y cantidad de aditivo, la composición potencial, el contenido de yeso, el tipo, fabricación y cantidad de cemento, factores que afectan la cinética de la hidratación, el momento de la adición del aditivo al hormigón fresco, etc. Por lo tanto, un aditivo debe emplearse sólo después de una adecuada valoración de sus efectos, a ser posible con un hormigón ya definido y bajo las condiciones de uso establecidas.

Un report del American Concrete Institute (1) clasifica las adiciones en 15 grupos, de acuerdo con el material base de la adición o al efecto característico de su uso. Estos grupos de aditivos son:

- 1) acelerantes;
- 2) agentes reductores de agua y reguladoras de fraguado;
- 3) inyecciones;
- 4) oclusores de aire;
- 5) expulsos de aire;
- 6) creadores de gas;

- 7) agentes expansivos;
- 8) mineral finamente dividido;
- 9) impermeabilizantes y reductores de permeabilidad;
- 10) ligantes;
- 11) aditivos químicos para reducir la expansión árido-álcali;
- 12) inhibidores de corrosión;
- 13) fungicidas, germicidas e insecticidas;
- 14) agentes floculantes, y
- 15) colorantes.

Se han hecho intentos para emplear emulsiones de polímeros como aditivos (2). Debe reconocerse que las adiciones pueden contener materiales que, separadamente, también contengan materiales que pertenezcan a dos o más de los grupos anteriores. Por ejemplo, un aditivo que reduce el agua de amasado puede combinar con un aditivo oclisor de aire.

Daremos a continuación una descripción general de algunos de estos grupos.

## **ADITIVOS GENERALES**

### **Objeto**

El objeto de emplear adiciones acelerantes, o aceleradores, en el hormigón es aumentar la velocidad de fraguado, o la velocidad en el endurecimiento inicial, o ambas cosas a la vez. A pesar de la más alta resistencia inicial, la resistencia del hormigón a edades más avanzadas no se influye notoriamente por el acelerador; esto significa que también se intensifica la deceleración del proceso de endurecimiento. Por lo tanto, el nombre de “acelerador” no es del todo correcto.

Los beneficios de un aumento en la resistencia inicial puede incluir:

- a) la retirada más temprana de los encofrados;
- b) una reducción del período requerido de curado y protección;
- c) la puesta en servicio más inmediata de una estructura o una reparación, y
- d) una parcial o total compensación de los efectos de bajas temperaturas sobre el desarrollo de resistencias.

Los beneficios de un tiempo de fraguado reducido pueden incluir:

- a) el acabado más temprano de superficies;
- b) una reducción de la presión sobre los encofrados, y
- c) un cierre más efectivo de los canales contra la presión hidráulica.

### **Composición**

Los compuestos químicos que aceleran el fraguado y endurecimiento de las pastas de cemento portland, incluyen parte de los cloruros solubles, carbonatos, silicatos, fluosilicatos e hidróxidos y también algunos compuestos orgánicos tales como la trietanolamina. También se han mencionado los cementos aluminosos y la adición de cemento portland hidratado finamente molido, o sea, lo que se llama “germinación”.

El acelerador más común para hormigón es el cloruro cálcico,  $\text{Cl}_2\text{Ca}$ , bien solo o como ingrediente de la mayor parte de los aceleradores fabricados bajo varias marcas comerciales. El cloruro cálcico está disponible en dos formas:

- a) en escamas regulares, ASTM D 98 tipo 1, que contiene un mínimo de 77 % de  $\text{Cl}_2\text{Ca}$ , y
- b) granular o escamas concentrado, ASTM D 98 tipo 2, que contiene un mínimo de 94 % de  $\text{Cl}_2\text{Ca}$ .

Generalmente, el cloruro cálcico puede emplearse con seguridad en proporciones de hasta 2 % del peso del cemento. Mayores cantidades resultan a veces perniciosas y, salvo en raras ocasiones, proporcionan pocas ventajas adicionales.

### **Efectos**

El aumento en la resistencia inicial y la reducción del tiempo de fraguado son más significativos cuando el cloruro cálcico se emplea en el hormigón con una temperatura de curado por debajo de 21°C. Otros efectos que resultan del empleo del cloruro cálcico incluyen un aumento en el contenido de aire del hormigón fresco cuando se emplea con un agente ocluidor de aire y, quizás, un pequeño aumento en la trabajabilidad. Con algunos cementos se ha expresado un anticipo en la aparición de rigidez y, de acuerdo con esto, una reducción en la exudación. Generalmente, la retracción por secado, aunque no siempre, se aumenta con el empleo de cloruro cálcico, lo cual puede tener efectos perniciosos sobre las resistencias a flexión y tracción de un hormigón acelerado. Al añadir cloruro cálcico se aumenta materialmente la velocidad en la evolución de calor, pero el calor total liberado no cambia de modo apreciable. El empleo de cloruro cálcico en hormigón fresco caliente puede resultar en una aparición de rigidez tan rápida que impida su puesta en obra y acabado. Generalmente aumenta la expansión motivada por la reacción árido-álcali, pero el efecto del cloruro cálcico parece no tener importancia cuando la expansión se controla empleando un cemento bajo en álcalis o puzolana.

El uso de cloruro cálcico rebaja la resistencia del hormigón al ataque por sulfatos y a los ciclos de hielo-deshielo a edades más avanzadas. Esto puede atribuirse al hecho de que esta adición parece aumentar el tamaño medio de los poros de aire en el hormigón cuando se utiliza junto con agentes ocluidores de aire.

No se ha encontrado que el cloruro cálcico promueva la corrosión de la armadura normal del hormigón, en los casos en que se ha cuidado de cubrir el acero con una capa adecuada de hormigón. Sin embargo, no debe emplearse donde sean de esperar corrientes eléctricas vagabundas, ni tampoco en la preparación de hormigón pretensado por la posible aparición de la corrosión por tensión de los alambres de pretensado (1).

### **Probable mecanismo de acción**

Los efectos del cloruro cálcico sobre la hidratación del cemento portland es conocida desde 1885 (4) y (5), aunque el mecanismo exacto de esta "aceleración" no está claro.

La mayor parte de las explicaciones previas se basaba en la reacción química entre  $\text{AC}_3$  y  $\text{Cl}_2\text{Ca}$ . De acuerdo con las recientes investigaciones, sin embargo, la esencia de la intensificación del endurecimiento reside en que el cloruro cálcico actúa como catalizador de

la hidratación de los silicatos cálcicos. Por ejemplo Rosenberg (6) ha demostrado que.

- a) aunque el cloruro cálcico reacciona con el  $AC_3$ , la velocidad de reacción, particularmente en presencia de yeso, es muy lenta como para participar en el aumento de la velocidad de fraguado y endurecimiento;
- b) el  $Cl_2Ca$  aumenta definitivamente la velocidad en el desarrollo de resistencias al hidratarse el  $SC_3$ , pero no reacciona químicamente con él;
- c) el carácter fuertemente iónico de la disolución de  $Cl_2Ca$  a la vez que los silicatos están hidratándose, puede conducir a éstos a cristalizar más rápidamente en pequeños cristales fibrosos; este mecanismo es apoyado por posteriores investigaciones, no sólo en condiciones de curado convencionales (7), sino también cuando la hidratación tiene lugar con curado al vapor a alta y baja presión (8).

## **AGENTES REDUCTORES DE AGUA Y REGULADORES DE FRAGUADO**

### **Objeto y composición**

Ciertos compuestos orgánicos o mezclas de compuestos orgánicos e inorgánicos pueden emplearse como aditivos para reducir el agua requerida por un hormigón, retardar el fraguado o ambas cosas a la vez. Los materiales que se disponen con estos fines se encuentran clasificados en cuatro categorías (9):

- a) ácidos ligninsulfónicos y sus sales;
- b) modificaciones y derivaciones de ácidos ligninsulfónicos y sus sales;
- c) ácidos hidroxicarboxílicos y sus sales;
- d) modificaciones y derivaciones de los ácidos y sales del apartado c).

Los aditivos de las clases a) y c) son reductores de agua y retardadores del fraguado; los de las clases b) y d) son aditivos reductores de agua, bien para no tener efectos sustanciales sobre la velocidad de endurecimiento o bien para conseguir grados variables de aceleración o retraso en la velocidad de endurecimiento del hormigón. Estas adiciones pueden llevar consigo un agente oclisor de aire (1).

### **Efectos**

Los aditivos que reducen el agua se emplean para lograr unas resistencias determinadas con menos contenido de cemento sin pérdida de trabajabilidad, o para aumentar las resistencias sin cambios en la trabajabilidad y el contenido de cemento, o para aumentar la trabajabilidad de una mezcla dada sin aumentar el contenido de agua. Se ha escrito en la literatura de la especialidad (10) que los agentes reductores de agua y reguladores de fraguado, empleados correctamente, aumentan también la resistencia del hormigón curado al vapor (57°C) sobre la que adquiriría el mismo hormigón sin dichas adiciones. No obstante, unos experimentos rusos similares han dado numerosos resultados desfavorables.

Otros efectos que resultan del empleo de aditivos reductores de agua, incluyen una mejora en el comportamiento al hielo-deshielo, en primer término como resultado de la resistencia aumentada del hormigón (11). También pueden mejorar la impermeabilidad del hormigón, o mejorar las propiedades del hormigón que contiene áridos que son ásperos, o de mala granulometría, o emplearse con ventaja en hormigones que deben colocarse en

condiciones difíciles. Son útiles cuando se coloca hormigón por bombeo o cuando se emplea una tolva.

Los aditivos que reducen el agua han resultado efectivos con todos los tipos de cemento portland, con portland siderúrgico, con puzolánico y con cemento aluminoso. Sin embargo, la fabricación y tipo de cemento puede influenciar los resultados más que las diferencias que puedan surgir en el comportamiento de un cierto número de aditivos del mismo tipo convenientemente formulados. Asimismo, la reducción de agua conseguida se afecta con la proporción de aditivo empleada, el contenido de cemento, la granulometría y tipo de árido, y la presencia de otros aditivos, tales como los ocluidores de aire y las puzolanas.

Los aditivos que retrasan el fraguado se emplean, en primer término, para compensar los efectos acelerantes de las altas temperaturas y conservar el hormigón manejable durante todo su período de puesta en obra. Este método es muy valioso para prevenir la fisuración que resulta de la desviación de encofrados cuando se hormigonan vigas, losas de puentes u otras formas compuestas.

Los retardadores de fraguado se emplean también para conservar el hormigón plástico por un período de tiempo suficiente que permita la colocación de sucesivas tongadas sin que se creen discontinuidades en una unidad estructural (1).

El tipo de retraso obtenido depende de la adición específica utilizada, de su cantidad, de la marca y tipo de cemento, de la temperatura ambiente y otras condiciones de obra, etc. La cantidad de aditivo debe determinarse y medirse con exactitud, porque una excesiva sobredosificación puede dañar seriamente el fraguado y endurecimiento del hormigón, sobre todo cuando por esta sobredosificación se ocluye un exceso de aire en el hormigón.

### **Probable mecanismo de acción**

El papel principal en el mecanismo de reducción de agua y retraso de fraguado de los aditivos considerados en la clasificación dada anteriormente, corresponde a los llamados agentes de superficie activa (3b) y (9). Estas sustancias están compuestas normalmente de moléculas de cadena larga, que son hidrofóbicas en un extremo e hidrofílicas en el otro. Tales moléculas tienden a concentrarse y formar una película en la interfase entre dos fases no miscibles tales como cemento y agua, y alterar las fuerzas fisicoquímicas que actúan en dicha interfase. Los aditivos reductores de agua se absorberán sobre las partículas de cemento, dándoles una carga negativa que orientará los dipolos del agua alrededor de cada partícula.

De esta forma, la presencia de tales aditivos en un hormigón fresco resulta en:

- a) una reducción de la tensión interfase;
- b) un aumento en el potencial electrocinético, y
- c) una cubierta protectora de dipolos de agua orientados alrededor de cada partícula; es decir, la movilidad del hormigón fresco se hace mayor, en parte por una reducción en las fuerzas interpartícula, y en parte porque el agua está libre de la influencia restrictiva de un sistema altamente floculado que ahora está dispuesto para lubricar la mezcla. Por lo tanto, se requiere menos agua para una consistencia dada (9).

Por otra parte, el mecanismo de retrasar el fraguado se basa en la absorción de acuerdo con Hansen (12). Los grandes aniones y moléculas añadidos se absorben sobre las partícu-

las de cemento perturbando o retrasando posteriores reacciones entre el cemento y el agua, es decir, retrasando su fraguado. Más tarde, como resultado de la reacción entre las sales orgánicas y el aluminato tricálcico del cemento, aquéllas se separan de la fase líquida del sistema, eliminando así nuevos retrasos. Esta explicación está de acuerdo cualitativamente con la observación de que los aditivos retardadores son particularmente efectivos, en muchos casos, con cementos bajos en aluminato tricálcico y que el período de retraso inicial va seguido de una rápida hidratación y endurecimiento de la pasta (13).

## **ADITIVOS OCLUSORES DE AIRE**

### **Objeto y composición**

La oclusión de aire es la introducción intencionada de un sistema relativamente estable de pequeñas burbujas de aire en el hormigón fresco durante el amasado, por medio de productos químicos de superficie activa llamados agentes oclusores de aire (16). Este aire ocluido debe distinguirse del aire incorporado. Este último es el resultado de una compactación incompleta del hormigón y forma burbujas de aire mucho mayores. Un hormigón con aire ocluido es varias veces más resistente a la acción de la helada que un hormigón sin aire ocluido hecho con los mismos materiales. Los hormigones con aire ocluido deben emplearse siempre que las condiciones ambiente son severas y donde se emplean cloruros sódico o cálcico para eliminar hielo de los pavimentos.

En la preparación de los aditivos oclusores de aire pueden emplearse grasas, aceites y resinas de maderas naturales. Estos materiales son, normalmente, insolubles en agua. En algunos países —Estados Unidos de América entre ellos— se venden cementos portland con aire ocluido en la propia fábrica. Normalmente, es conveniente añadir el aditivo en la hormigonera, porque así es posible hacer rápidamente cualquier cambio en el contenido de aire que pueda requerirse para producir los resultados óptimos en varios productos. Por otra parte, es fácil el empleo de cemento con aire ocluido.

Independientemente del método utilizado en la preparación de hormigón con aire ocluido, deben mantenerse lo más constantes posible las propiedades de los constituyentes del hormigón, la proporción de los mismos y todos los aspectos de amasado, transporte y métodos de puesta en obra, para que el contenido de aire en el hormigón sea uniforme y se mantenga dentro de los límites especificados para la obra. El contenido de aire en el hormigón será controlado a lo largo de la obra. Debe prestarse particular atención a las cantidades rara vez elevadas de aditivo que requieren los hormigones que contienen cemento portland de endurecimiento rápido, cementos puzolánicos, cenizas volantes y otros polvos finamente divididos (1). El aire puede ocluirse en cantidades muy altas: 60 % en volumen y aún más. Tales mezclas se llaman “hormigones celulares”, en los que las burbujas de aire o gas sustituyen totalmente, o en parte, los áridos.

### **Efectos**

El aire ocluido altera materialmente las propiedades de los hormigones, tanto frescos como endurecidos. El hormigón con aire ocluido es considerablemente más plástico y dócil que el hormigón sin aire ocluido. Puede manejarse y colocarse con menos segregación y hay menos tendencia a la exudación. Quizás se reduzca la resistencia con la oclusión de aire, pero se mejora considerablemente la durabilidad del hormigón endurecido no sólo directamente, sino también indirectamente al aumentar la uniformidad, disminuir la absorción y permeabilidad, y eliminar zonas débiles en las juntas de hormigonado.

Estos efectos se deben a la presencia de un gran número de pequeñas burbujas en la pasta de cemento.

Debido a la textura superficial y forma desfavorables de la fracción fina de la mayoría de los áridos ligeros utilizados en el hormigón estructural, normalmente es conveniente emplear aditivos oclusores de aire en estos casos. Sin ellos, los hormigones son ásperos, tienen una exudación rápida y requieren mucha agua. Las mayores ventajas se obtienen con mezclas pobres y ásperas. Los hormigones que contienen más de  $360 \text{ kg/m}^3$  de hormigón no siempre requieren estos aditivos.

El contenido de aire y la distribución de tamaños en los poros de aire producidos en un hormigón con aditivo, se influyen por muchos factores, de los que los más importantes son:

- a) la naturaleza y concentración del aditivo oclusor de aire;
- b) la naturaleza y proporciones de los ingredientes del hormigón;
- c) el tipo y duración de la mezcla empleada;
- d) la consistencia, y
- e) el tipo y grado de compactación aplicado al consolidar el hormigón.

Por ejemplo, un porcentaje dado de aditivo entraña progresivamente más aire a medida que:

- a) el contenido de cemento en el hormigón disminuye;
- b) el contenido de arena aumenta, y
- c) a medida que aumenta la proporción de arena que pasa el tamiz de 0,6 mm y retenido por el de 0,3 ó 15 mm, a igualdad de otras condiciones (14) y (15); donde sea una consideración la exposición a condiciones climáticas severas, debe fijarse una proporción de aditivos mínima para cumplir el ensayo de resistencia a la helada; en otros casos, la cantidad debe ajustarse a la requerida por la trabajabilidad sin crear una excesiva reducción en las resistencias mecánicas (1).

### **Probable mecanismo de acción**

La oclusión de aire se lleva a cabo por adición a la mezcla de uno de los diversos tipos de agentes de superficie activa mencionados que son adsorbidos en la interfase aire-agua. Estos aditivos no sólo facilitan la formación de una espuma relativamente estable en el hormigón durante la operación de amasado, sino que también disminuyen la velocidad a que las burbujas disuelven o escapan de la mezcla durante y después de la puesta en obra del hormigón. En condiciones óptimas, el aire se ocluye en cantidades equivalentes a  $1/4$ - $1/6$  del volumen de la pasta de cemento (de 3 a 10 % en volumen de hormigón) en burbujas aproximadamente esféricas que oscilan de 10 a 1.000 micras de diámetro [ $1/100$  a 1 mm] (16). Por su estabilidad, estas burbujas actúan en el hormigón fresco como gotas de agua o partículas de arena y, por lo tanto, la oclusión de aire aumenta la plasticidad si la composición de la mezcla permanece constante. A contenido de cemento y trabajabilidad constantes, el aire ocluido desplaza árido fino y agua, desplazando tanto más agua y menos árido cuanto más pobre es la mezcla. Powers (17) ha expuesto una discusión muy completa del desarrollo de burbujas de aire en pastas, morteros y hormigones.

Powers (18), (19) y (20) ha sugerido un mecanismo que indica la manera cómo los poros de aire pueden prevenir los desperfectos causados por la helada en pasta u hormigón endurecidos. De acuerdo con él, la destrucción por el hielo se debe principalmente a la presión hidráulica producida al helarse el agua más que a la presión directa de los cristales al crecer los núcleos de hielo. El desarrollo de esta presión hidráulica es consecuencia de la expansión del orden del 9 % que acompaña el paso de agua a hielo, porque esta expansión tiende a empujar el agua líquida de la zona de helada a través de los poros capilares.

En consecuencia, se crean tensiones en la pasta endurecida que conducen a la destrucción si exceden la resistencia a tracción de la pasta. La magnitud, tanto de la presión hidráulica como de las tensiones, depende de varios factores. El más importante es, quizás, la longitud de los poros capilares, porque la presión es proporcional a esta longitud. Pero la longitud de los poros capilares puede reducirse con una distribución adecuada de los poros de aire ocluido, resultando una aminoración de la presión hidráulica durante el progreso de la helada. Esto significa que los poros de aire son tanto más efectivos cuanto más próximos están entre sí. O sea, para un contenido de aire dado, la protección proporcionada por los poros frente al peligro del hielo-deshielo es mayor cuando disminuye el tamaño de los poros, es decir, cuando el número de huecos por unidad de volumen de pasta es mayor. Por esta razón, el aire atrapado en el amasado es de poca o ninguna ayuda contra la acción del hielo. La pasta de cemento en el hormigón se protege normalmente contra los efectos del hielo-deshielo si el "factor espacial" del sistema de poros de aire es 0,2 mm o menos, determinado de acuerdo con la Norma ASTM C 457. Dicha Norma define el término "factor espacial" como la distancia máxima de cualquier punto de la pasta de cemento a la periferia de un poro.

La resistencia a la helada no debe de afectarse de modo adverso por la pérdida de aire a consecuencia de la vibración, puesto que el hormigón contenía de origen un sistema adecuado de poros y son, principalmente, las burbujas mayores y menos efectivas las que se expulsan durante la compactación.

## **ADICIONES MINERALES FINAMENTE DIVIDIDAS**

### **Objeto y composición**

Estas adiciones pueden ser materiales que se presentan en la naturaleza o sustancias minerales que se preparan artificialmente. Se distinguen tres tipos:

- a) aquellas sustancias que son relativamente inertes desde el punto de vista químico, tales como el cuarzo molido, caliza molida, bentonita, cal hidratada, talco, etc.;
- b) materiales que son puzolánicos, tales como las cenizas volantes, o los vidrios volcánicos, la tierra de diatomeas, algunas pizarras o arcillas, etc., y
- c) sustancias que son conglomerantes, tales como los cementos naturales, las cales hidráulicas, los cementos de escoria (mezclas de escorias y cal), la escoria granulada de horno alto, etc.

El más importante de los tres tipos antes mencionados es el grupo de los materiales puzolánicos o puzolanas. La puzolana se define, según ASTM C 219, como un material silíceo o sílico-alumínoso que, por sí mismo, posee poco o ningún valor conglomerante, pero, en estado finamente dividido y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido cálcico a la temperatura ordinaria para formar compuestos que poseen

propiedades conglomerantes. La combinación de puzolana y cal constituyó, históricamente hablando, el primer conglomerante hidráulico. Fue desarrollado por los romanos, hace más de 2.000 años, en varias estructuras de hormigón, parte de las cuales aún persiste hoy día. El material puzolánico moderno más popular es la ceniza volante: es el residuo finamente dividido que resulta de la combustión de carbón molido.

Muchas de las adiciones minerales son polvos tan finos o más que el cemento portland. Un hormigón que contiene estos materiales, si se proporciona adecuadamente, requerirá una cantidad menor de cemento portland. Por eso, estos materiales pueden llamarse “sustitutivos” o “reemplazadores” del cemento portland (1). Puesto que el peso específico de la mayor parte de las puzolanas es del orden de 2,5 y el del cemento portland es alrededor de 3,5, el volumen absoluto, cuando se hace la sustitución en peso, será de 20 a 25 % mayor que el del cemento que se ha reemplazado.

La ASTM, el Bureau of Reclamations y el Cuerpo de Ingenieros han establecido normas para las propiedades físicas y químicas de las puzolanas. Las limitaciones químicas establecen que un mínimo del 70 al 75 % de la puzolana esté compuesta de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ . En una buena puzolana la porción silícea está en estado amorfo. Los materiales silíceos cristalinos, tales como el cuarzo, convinan con la cal muy lentamente, excepto cuando se curan a altas temperaturas (21). En otras palabras, la composición química de las puzolanas, por sí sola, no proporcionan suficiente información para juzgar su calidad y, por esta causa, el realizar mezclas de ensayos dará una información más completa (22 a).

### **Efectos**

El uso de adiciones minerales se justifica en muchos casos por razones económicas, pero, en general, su fin primario es mejorar las propiedades técnicas del hormigón fresco y endurecido. Las adiciones minerales finamente divididas pueden servir en el hormigón fresco como correctores en mezclas deficientes en materiales finos. Si existe tal deficiencia, como es típico en el hormigón pobre, un uso eficiente de una adición mineral mejora la trabajabilidad y reduce la tendencia a la segregación y a la exudación. Si, por el contrario, el hormigón contiene una cantidad de finos adecuada, como es típico en los hormigones ricos, la adición de minerales molidos, como regla, aumenta la cantidad de agua requerida o daña la trabajabilidad (23). También, la llegada de los ocluidores de aire, con sus efectos marcados sobre la trabajabilidad, exudación y segregación, ha desplazado en gran medida la adición de polvos minerales como medio de mejorar la textura física del hormigón fresco. Es posible, no obstante, el uso conjunto de puzolana y ocluidores de aire. Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que la cantidad de aire ocluido se reduce normalmente por la puzolana, particularmente si ésta última es ceniza volante (24).

La resistencia de un hormigón que contiene materiales puzolánicos es normalmente más baja a las primeras edades y más alta a edades avanzadas que la que se obtiene con el cemento portland sólo. Además se disminuye la elevación de temperatura resultante del calor de hidratación del cemento. El empleo de materiales puzolánicos aumenta generalmente la resistencia del hormigón al ataque agresivo de agua de mar, soluciones sulfatadas y aguas ácidas naturales. Los ensayos de laboratorio han indicado también que ciertas puzolanas son capaces de reducir la expansión producida por reacciones árido-álcali (1). El empleo de puzolana va acompañado frecuentemente por una mejora en la impermeabilidad del hormigón, especialmente en mezclas pobres. En muchos casos, la fluencia del hormigón y la retracción por secado son mayores cuando se emplea puzolana, aunque hay excepciones que muestran signo contrario. También la resistencia

al hielo-deshielo puede empeorarse con el uso de la puzolana (22 b), (25) y (26) en hormigones sin aire ocluido, en tanto que la resistencia de los hormigones con aire ocluido se influyen principalmente por el efecto de la puzolana sobre la cantidad de aire ocluido.

### Probable mecanismo de acción

El mecanismo que lleva a cabo mejoras por el uso de adiciones minerales en hormigones frescos ásperos, consiste en un aumento de la aptitud lubricante de la pasta en el hormigón y un aumento de la cohesión en la mezcla. A este respecto son importantes la finura y la forma de las partículas de la adición, teniendo una importancia secundaria las características químicas. No obstante, el contenido en carbono de una ceniza volante desempeña un papel definido en la reducción de la cantidad de aire ocluido en la mezcla fresca, porque tiene una cierta capacidad para la absorción de los agentes oclusores de aire (24). La causa principal de los efectos de las puzolanas sobre el hormigón endurecido es la reacción química entre la fracción silíceo de la puzolana y el hidróxido cálcico liberado por el cemento portland durante la hidratación, para formar sustancias cementicias estables mecánica y químicamente (27) y (28). El proceso de fijar cal se intensifica por la presencia de álcalis. Sin embargo, el proceso es lento, pero continúa por un largo período de tiempo si existe en su presencia el agua necesaria para la reacción. Esto explica, no sólo la baja resistencia a las primeras edades y altas a edades avanzadas, sino también la mejor resistencia química de los hormigones puzolánicos, puesto que la cal hidratada libre representa un punto débil en la pasta de cemento endurecido.

### REFERENCIAS

- (1) ACI Committee 212. "Admixtures for Concrete", *ACI Journal*, Proc. Vol. 60, November, 1963. pp. 1481-1524.
- (2) RILEM: "Resin Concretes". Symposium by Correspondence. *RILEM Bulletin*, New Series No. 28. Paris. September, 1965. pp. 4-143.
- (3) DURIEZ, M., y ARRAMBIDE, J.: *Nouveau traité de matériaux de construction* (New Treatise of the of Construction), Vol. 1. Dunod, Paris (a) pp. 873-974. (b) pp. 1116-24.
- (4) Highway Research Board. *Calcium Chloride in Concrete*, Highway Research Board Bibliography 13. Washington, D. C. 1952.
- (5) Highway Research Board. *Admixtures for Highway Concrete*, A. Air-Entraining Admixtures; B. Accelerating Admixtures; C. Water-Reducing and Set-Retarding Admixtures; An Annotated Bibliography. Washington, D. C. 1965.
- (6) ROSENBERG, A. M.: "Study of the Mechanism through which Calcium Chloride Accelerates the Set of Portland Cement". *ACI Journal*, Proc. Vol. 61. October, 1964. pp. 1261-9.
- (7) TAMAS, F. D.: "Acceleration and Retardation of Portland Cement Hydration by Additives". *Symposium on Structure of Portland Cement Paste and Concrete*, Highway Research Board, Special Report 90. Washington, D. C. 1966. pp. 392-397.
- (8) BALAZS, G., y BOROS, M.: "The Effect of Calcium Chloride on Cement Mortars Under the Conditions of High Pressure Steam Curing". *Proceedings of the Technical University of Building and Transport Engineering*, Vol. XII, No. 6. Budapest. 1967. pp. 85-6.
- (9) PRIOR, M. E., y ADAMS, A. B.: "Introduction to Producers Papers on Water-Reducing Admixtures and Set-Retarding Admixtures for Concrete". *Symposium on Effect of Water-Reducing Admixtures and Set-Retarding Admixtures on Properties of Concrete*. ASTM STP No. 266, June 1960. pp. 170-9.
- (10) MIELENZ, R. C.: "Water-Reducing Admixtures and Set-Retarding Admixtures for Concrete: Uses; Specifications; Research Objectives". *Symposium on Effect of Water-Reducing Admixtures and Set-Retarding Admixtures on Properties of Concrete*. ASTM STP No. 266, June 1960. pp. 218-33.

- (11) LARSON, T. D.; MANGUSI, J. L., y RADOMSKI, R. R.: "Preliminary Study of the Effects of Water-Reducing Retarders on the Strength, Air Void Characteristics, and Durability of Concrete". *ACI Journal*, Proc. Vol. 60. December, 1963. pp. 1739-53.
- (12) HANSEN, W. C.: "Actions of Calcium Sulfate and Admixtures in Portland Cement Pastes". *Symposium on Effect of Water-Reducing Admixtures and Set-Retarding Admixtures on Properties of Concrete*. ASTM STP No. 266. June 1960. pp. 3-25.
- (13) FOSTER, B.: "Summary". *Symposium on Effect of Water-Reducing Admixtures and Set-Retarding Admixtures on Properties of Concrete*. ASTM STP No. 266. Philadelphia 1960. pp. 240-6.
- (14) WALKER, S., y BLOEM, D. L.: "Design and Control of Air-Entraining Concrete". *NRMCA Publication*, No. 60. Washington, D. C. December, 1955.
- (15) MIELENZ, R. C.; WOLKODOFF, V. E.; BACKSTROM, J. E.; BURROWS, R. W., y FLACK, H. L.: "Origin, Evolution and Effects the Air Void System in Concrete". *ACI Journal*, Proc. Vol. 55. July-October, 1958. pp. 95-122, 261-72, 359-76 y 507-13.
- (16) MIELENZ, R. C.: "Concrete, as a Modern Material". *Modern Materials*, Vol. 5 (Gonser, B. W., ed.). Academic Press. New York and London, 1965. pp. 259-363.
- (17) POWERS, T. C.: "Topics in Concrete Technology. 3. Mixtures Containing Intentionally Entrained Air". *Journal of the PCA Research and Development Laboratories*, Vol. 6, No. 3. September 1964. pp. 19-42.
- (18) POWERS, T. C.: "A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete". *ACI Journal*, Proc. Vol. 41. February, 1945. pp. 245-72.
- (19) POWERS, T. C.: "The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete". *Proceedings, Highway Research Board*, Vol. 29. Washington, D. C. 1949. pp. 184-202.
- (20) POWERS, T. C., y HELMUTH, R. A.: "Theory of Volume Changes in Hardened Portland Cement Paste During Freezing". *Proceedings, Highway Research Board*, Vol. 32. Washington, D. C. 1953. pp. 285-97.
- (21) HIGGINSON, E. C.: "Mineral Admixtures". *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Making Materials*. ASTM Special Technical Publication No. 169-A. Philadelphia. 1966. pp. 543-55.
- (22) BLANKS, R. F., y KENNEDY, H. L.: *The Technology of Cement and Concrete*, Vol. I. John Wiley & Sons, Inc. New York—Chapman and Hall, Ltd. London. 1965 (a) pp. 164-84. (b) pp. 184-94.
- (23) POWERS, T. C.: "Studies of Workability of Concrete". *ACI Journal*. Proc. Vol. 28. February, 1932. pp. 419-48.
- (24) LARSON, T. D.: "Air Entrainment and Durability Aspects of Fly-Ash Concrete". *Proceedings, American Society for Testing and Materials*, Vol. 64, 1964. pp. 866-86.
- (25) DAVIS, R. E.: "A Review of Pozzolanic Materials and Their Use in Concrete". *Symposium on Use of Pozzolanic Materials in Mortars and Concrete*. ASTM Special Technical Publication No. 99. Philadelphia. 1950. pp. 3-15.
- (26) ABDUN-NUR, E. A.: "Fly Ash in Concrete". *Highway Research Board Bulletin* 284. Washington D. C. 1961.
- (27) MALQUORI, G.: "Portland-Pozzolan Cement". *Chemistry of Cement*. Proceedings of the Fourth International Symposium. NBS Monograph 43. Vol. II. Washington, D. C. 1960. pp. 983-1000.
- (28) TERRIER, P., y MOREAU, M.: "Recherche sur le mécanisme de l'action pouzzolanique des cendres volantes dans le ciment" (Research Concerning the Mechanism of the Pozzolanic Action of Fly Ash in Cement). *Revue des Matériaux de Construction "Ciments et Bétons"* Nos. 613-614, Octobre et Novembre 1966.

## BIBLIOGRAFIA SUPLEMENTARIA

ASTM. *Symposium on Use of Pozzolanic Materials in Mortars and Concretes*. ASTM Special Technical Publication No. 99. Philadelphia. 1950.

ASTM. *Symposium on Effect of Water-Reducing Admixtures and Set-Retarding Admixtures on Properties of Concrete*. ASTM Special Technical Publication No. 266. Philadelphia. 1960.

Highway Research Board. *Symposium on Fly Ash in Concrete, Highway Research Record*, No. 73. Washington, D. C. 1965.

Highway Research Board. "Nature and Use of Air-Entrained Concrete". *Highway Research Circular*, No. 6. July 1965. Washington, D. C.

- Highway Research Board. "Use of Air-Entrained Concrete in Pavements and Bridges". Current Road Problems, No. 13-2R. Revised Ed. November, 1957.
- Highway Research Board. *Freezing and Thawing of Concrete and Use of Silicones*. Highway Research Record No. 18. Washington, D. C. 1963.
- Highway Research Board. *Tests and Investigations of Retarding Admixtures for Concrete*. Highway Research Board Bulletin 310. Washington, D. C. 1962.
- DURIEZ, M., y ARRAMBIDE, J.: *Nouveau traité de matériaux de construction* (New Treatise of the Materials of Construction), Vol. 1. Dunod. Paris. 1961. (c) pp. 495-614. (d) pp. 1107-1205.
- GRAF, O.; ALBRECHT, W., y SCHAFFLER, H.: *Die Eigenschaften des Betons* (Properties of Concrete), Second Edition. Springer Verlag. 1960. Berlin/Göttingen/Heidelberg. pp. 150-60.
- SHACKLOCK, B. W.: "The Use of Admixtures in Concrete". *Concrete and Constructional Engineering*. September 1962.
- The Concrete Society. "Admixtures in Concrete". *Concrete* January 1968. pp. 39-44.
- HALSTEAD, W. J., y CHAIKEN, B.: "Water-Reducing Retarders for Concrete—Chemical and Special Analyses". *Highway Research Board Bulletin* 310. Washington, D. C. 1962, pp. 33-55.
- IVEY, D. L., y HIRSCH, T. J.: "Effects of Chemical Admixtures in Concrete and Mortar". *Research Report* 70-3 Texas Transportation Institute, Texas A&M University. March, 1967.
- JOISEL, A.: "Activité chimique des adjuvants: accélérateurs et retardeurs" (Chemical Activity of Admixtures: Accelerators and Retarders). RILEM Colloque international sur les adjuvants des mortiers et bétons. Bruxelles, August 30-September 1, 1967.
- MCINTOSH, J. D.; JORDAN, J. P. R., y O'CALLAGHAN, W.: "The Effect on Some Properties of Concrete of Partially Replacing Portland Cement by Pulverized Fuel Ash". *Technical Report*, TRA/324. Cement and Concrete Association. London. September, 1959. Revisión: February, 1960.
- TORRANS, P. H., y IVEY, D. L.: "Air Void Systems Affected by Chemical Admixtures and Mixing Methods" Presented at the 47th Annual Meeting of the Highway Research Board. Washington, D. C. January, 1968.
- VENUAT, M.: "Méthodes d'essais utilisables en laboratoire pour caractériser les adjuvants" (Methods of Test Applicable in Laboratory to Characterize Admixtures). RILEM Colloque international sur les adjuvants des mortiers et bétons. Bruxelles, August 30-September 1, 1967.
- VIVIAN, H. E.: "Some Chemical Additions and Admixtures in Cement Paste and Concrete". *Chemistry of Cement*. Proceedings of the Fourth International Symposium. NBS Monograph 43. Vol. 2. Washington, D. C. 1960. pp. 909-923.