

IMPERMEABILIZACION DE OBRAS DE HORMIGON (*)

Por FRANCISCO PAN MONTOJO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

VIRGILIO OÑATE DE MORA

Alumno de la Escuela de
Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

El propósito de este trabajo es estudiar los efectos de los aditivos en general, con vistas a la mejora de las condiciones de impermeabilidad de los hormigones.

Aunque el planteamiento teórico es de sobra conocido, se empezará por hacer una breve exposición de los materiales utilizados clásicamente para este cometido.

A continuación, y basándonos en dos características fundamentales del hormigón, docilidad y bajo contenido en agua, se hará un completo estudio de los superplastificantes.

Es bien conocido que de la docilidad de un hormigón (que facilita su puesta en obra) y del posible bajo contenido en agua (que disminuye el número de poros) depende la compacidad. Es por ello que si se quiere obtener un hormigón impermeable han de cuidarse muy especialmente estos tres matices. En la segunda parte se hará un estudio sobre los efectos de los superplastificantes en este cometido.

Dos son los motivos que nos han inducido a orientar el trabajo en la forma indicada. Primero, por las notables características que de la adición de un superplastificante se deducen, y segundo, el considerar que, por tratarse de unos productos de muy reciente existencia, pueden ser de interés en los hormigones españoles.

Para terminar esta introducción queremos hacer la puntualización siguiente: así como la mayoría de los impermeabilizantes tienen el efecto secundario de producir disminución en la resistencia de los hormigones, los superplastificantes no sólo no alteran estas características, sino que las mejoran.

Consideramos esta propiedad de gran importancia, pero, para no salirnos del objeto central del trabajo, no se profundizará en este tema.

Se estudian los superplastificantes, indicando sus dosis y el aumento de docilidad que producen, así como otros factores de igual importancia, ya que hemos creído que era cuestión importante conocer cómo influyen sobre los hormigones, para determinar, combinando los diferentes factores, las posibilidades impermeabilizantes de este producto.

Este trabajo obtuvo el premio HALESA en la convocatoria de 1976.

1.1. ¿Son necesarios los impermeabilizantes?

Si un hormigón se ejecutase, previo cálculo teórico lo más riguroso posible, con un control exhaustivo en obra, se obtendría un producto de baja permeabilidad y porosidad. Se obtienen, en efecto, hormigones con un coeficiente de permeabilidad de $K = 10^{-10}$ - 10^{-12} cm/seg.

Sin embargo, en la práctica, sabemos por experiencia que el hormigón, sin ningún elemento añadido, permite el paso del agua no sólo a través de juntas y discontinuidades, sino a través de la propia masa.

1. Motivos de la penetración del agua.

Existen dos razones por las cuales el agua atraviesa la masa del hormigón. En primer lugar,

*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que pueden remitirse a la Redacción de esta revista hasta el 28 de febrero de 1977.

gar, por efecto de la presión hidrostática, caso éste que se presenta, de forma habitual, en los depósitos y conducciones. Asimismo, por capilaridad: El agua está absorbida a través de una cara del hormigón, y se evapora a través de la opuesta, ya que la presión de vapor es inferior a la de saturación. Ahora bien, para que sea posible el paso de agua es necesario la existencia de poros y capilares intercomunicados, y la existencia de estas redes capilares y poros se incrementan notablemente por las siguientes razones:

- 1.º Cuanto menos finamente molido esté el cemento.
- 2.º Mayor sea la relación agua-cemento.
- 3.º Peor sea la composición granulometría del hormigón.
- 4.º Más corto sea el curado.

Estos son, en grandes rasgos, las causas del

paso del agua a través de la masa de hormigón (las dos expuestas en primer lugar), siendo las segundas, circunstancias que concurren a facilitar el paso de la misma.

1.3. Soluciones.

Ante lo dicho, la solución lógica es la de cerrar poros y capilares, esto de una forma general.

Podemos distinguir, sin embargo, dos casos:

1.º Que sea de gran importancia la presión hidrostática: En este caso, son efectivos los aditivos que reducen la permeabilidad.

2.º Que lo sea la capilaridad: Aquí son efectivos los productos que repelen el agua.

Al comienzo de este párrafo, se indicó, implícitamente, que el paso del agua no sería posible si no existiera intercomunicación entre los poros. Vamos a considerar cómo la porosidad puede ser modificada.

Un camino, para reducir el número de canales y capilaridades, es controlando la relación agua-cemento.

Durante el proceso de hidratación del cemento se produce gel de cemento ($30 \text{ Ca} \cdot 20 \text{ Si} \cdot 3 \text{ H}_2\text{O}$) con un bajo coeficiente de permeabilidad ($7 \times 10^{-14} \text{ cm/seg.}$) que bloquea parcialmente las capilaridades. A partir de una cierta relación agua-cemento, el gel formado resulta insuficiente para bloquear las capilaridades, apareciendo interconexiones.

Lo indicado anteriormente, es para masa de cemento, pero la adición de agregados modifica muy poco estos valores.

En la práctica el gel no se forma en cantidad suficiente para bloquear los poros, por lo que es necesaria la presencia de aditivos que provoquen dicho bloqueo.

Los diferentes productos que se utilizan como tales, los diversos autores los clasifican de diferentes formas. Así, Frederick M. Lea (Director of Building Research) los clasifica (los aditivos en masa) única y exclusivamente en aditivos integrales que subdivide en:

- 1.º Materiales que repelen el agua.
- 2.º Líquidos hidrófobos.
- 3.º *Fillers* inertes.

Indica que pueden ser líquidos, pastas o sólidos,

y que han de añadirse bien al agua, bien al hormigón, e incluso a veces directamente al cemento.

En general, considera todo tipo de elementos que provocan un incremento de la impermeabilidad del hormigón.

Nosotros, en la exposición del trabajo seguimos la clasificación de los doctores P. C. Hewlett, R. W. Edweader y R. L. Holdsworth, que coincide sensiblemente con la del Dr. Arredondo.

Considera, asimismo, los aditivos integrales que subdivide en varios grupos:

- 1.º Reductores de permeabilidad.
- 2.º Materiales hidrófobos.
- 3.º Varios.

En general, los miembros de cada grupo pueden ser reactivos o no reactivos. Los primeros en contacto con cemento fresco reaccional químicamente, dando lugar a un nuevo material que posee propiedades de impermeabilidad.

Los reactivos son los conocidos como *fillers*.

Los aditivos integrales han de añadirse bien al agua, bien al hormigón fresco.

Pasamos a realizar un breve análisis de cada uno de los subgrupos, para por fin realizar un estudio sobre los superplastificantes, que constituye el cuerpo del trabajo.

1.4. Estudio de los aditivos integrales.

a) Reductores de permeabilidad.

Podemos subclasificar los materiales comprendidos en este subgrupo en:

- a.1. Materiales constituidos por partículas muy finas.
- a.2. Productos que aumentan la docilidad y mezclas que aumentan el aire ocluido.
- a.3. Acelerantes.

a.1. Están comprendidos materiales como la arena, bentonita, tierra de diatomeas, limos, pumita, sílice coloidal y fluorosilicatos.

Se prefieren, para su uso, si el material posee un cierto grado de actividad puzolánica, lográndose así beneficiar el gel matriz por sustitución de los cristales de hidróxido cálcico por un gel más fino del tipo de los productos de silicato de calcio hidratado.

Los hormigones, en los que se puede aplicar estos productos con éxito, son aquéllos de bajo contenido en cemento, o bien en finos. En mezclas ricas en cemento el efecto puede ser el contrario al deseado, puesto que la adición de partículas finas puede incrementar la necesidad de agua perdiéndose densidad y resistencia.

a.2. Productos que aumentan la docilidad y mezclas que aumentan el aire ocluido.

La incorporación de agentes plastificantes disminuye la formación de poros y las necesidades de agua.

Entre este tipo de materiales, los más utilizados son las sales de lignosulfatos, a menudo combinándolo con unos determinados *fillers* minerales.

El lignosulfato es absorbido dentro de los productos de la hidratación del C_3A , dando lugar a una mejor dispersión de las partículas de cemento, al mismo tiempo disminuye la tensión superficial de la fase líquida.

La incorporación de lignosulfatos da lugar a un sistema de poros más finos, que aumentando la capilaridad por absorción aumenta la resistencia al paso del agua e incrementa la impermeabilidad. Como se verá más adelante, los superplastificantes, además, disminuyen la permeabilidad por capilaridad. Los agentes aerofluidores actúan de forma similar a los anteriores. Con ellos es necesario menor cantidad de agua y no producen interconexión entre los huecos, con lo que se puede afirmar que disminuyen la permeabilidad.

Se utilizan materiales como resinas neutras de maderas, detergentes, carbohidratos sulfonados, etc.

a.3. Acelerantes.

Es dudosa la función de los acelerantes como impermeabilizantes.

El uso del cloruro cálcico puede mejorar la impermeabilidad inicialmente al adelantar la reacción de hidratación del C_3A y del C_3S , pero a largo plazo la permeabilidad se mantiene sin variaciones.

b) Materiales hidrófobos.

Este grupo de materiales tienen su campo de aplicación cuando intentamos reducir el paso

del agua a través del hormigón seco, siendo la causa del mismo la acción capilar. No son, sin embargo, efectivos en caso de presiones externas.

Por la aplicación de estos aditivos se producen decoloraciones, eflorescencias, etc.

Su forma de trabajo es prácticamente desconocida, aunque se ha sugerido que la acción repelente está asociada a fenómenos electrostáticos, es decir, cargas electrostáticas colocadas en las paredes de los capilares.

Están comprendidos en este grupo los siguientes materiales:

b.1. Jabones.

b.2. Estearatos de butilo.

b.3. Productos seleccionados del petróleo.

Vamos a indicar algunas particularidades de los mismos:

b.1. Jabones.

Son, por lo general, sales de metales y, recientemente, sales de sulfuro, como las de calcio, sodio, o estearatos de amonio, oleatos y dispersiones de ácidos esteáricos.

Los jabones *solubles* están pensados para reaccionar con soluciones de calcio en la fase acuosa del hormigón, precipitando las sales insolubles de calcio.

Este precipitado es el que originará propiedades hidrofóbicas en la superficie de los capilares y, asimismo, cerrará algunos poros en el hormigón fresco.

Sin embargo, los poros que se forman en sucesivas etapas de la hidratación no se ven afectadas por este precipitado, con lo cual el paso del agua por presión hidrostática no se ve disminuida.

Estos materiales poseen el inconveniente de que aumentan la cantidad de aire ocluido, por lo que no es recomendable su uso cuando no sea admisible una pérdida en la resistencia del hormigón. Tienen, por otra parte, la ventaja de aumentar la docilidad del hormigón sin aumentar la formación de cavidades y poros.

En cuanto a la dosificación de los mismos se debe buscar el óptimo, teniendo en cuenta la mezcla proyectada, el aditivo elegido y las propiedades que se exigirán al producto.

b.2. Estearato de butilo.

La acción hidrofóbica del estearato de butilo es similar a la de los jabones mencionados anteriormente.

Sin embargo, este producto hidroliza lentamente en la fase alcalina del hormigón y produce con lentitud el estearato de calcio.

El resultado de todo ello es que el aire oculto es mucho menor que en los casos anteriores, y la reducción de las resistencias no son excesivamente importantes.

Esto permite aumentar las concentraciones del aditivo, lo cual, invariablemente, aumenta las características impermeables del hormigón.

Además, la lenta reacción de este producto mejora la distribución del mismo a través del gel de cemento.

Las dosis usuales son de un 1 por 100 de estearato de butilo en cemento.

b.3. Productos seleccionados del petróleo.

Aceites minerales, ceras, cut-backs y asfaltos emulsionados son los materiales que comprenden este grupo.

En el caso de los asfaltos emulsionados, la dispersión es rota por secado, y el resultado es una hidrofobia del hormigón y algunos poros bloqueados.

El resto de los componentes son, en general, considerados como materiales hidrófobos inertes, actuando fundamentalmente por vía física sin reacción con los componentes del cemento.

El inconveniente principal es la reducción que se presenta de la resistencia del hormigón, debido a la entrada de aire, especialmente si los agentes emulsionantes han sido utilizados para dispersar el hidrocarbón.

Algunas emulsiones de cera pueden mejorar hormigones curados con vapor mediante derretido *in situ* bloqueando así los poros.

c) Varios.

Consideramos aquí diversos materiales que se piensan tienen funciones impermeabilizantes, pero su actuación, desde el punto de vista químico, es obscura y los resultados prácticos dudosos.

Ejemplos de estos materiales son: naftaleno, cera, algunas celulosas, alquitranes diluidos y,

finalmente, silicatos de sodio y polvos de aluminio.

Las propiedades de estos productos son difíciles de justificar, y las explicaciones suelen ser obscuras.

Para juzgar la validez de éstos la única forma de hacerlo, y la de probar los resultados por lo cual no se pueden hacer recomendaciones estrictas sobre los mismos.

En este grupo se pueden considerar, asimismo, materiales obtenidos como mezcla de dos o más de los considerados anteriormente, y poseen características multifuncionales.

Otros materiales, como la silicona, utilizadas con muy buenos resultados en tratamientos superficiales, producen, aplicándolas en masa, un excesivo retardo en la hidratación, por lo que no es conveniente su uso.

Con esto queda finalizado el estudio de los impermeabilizantes en general, y pasamos al de los superplastificantes.

Introducción al uso de los superplastificantes.

Como ya se ha razonado anteriormente, el problema de conseguir un hormigón impermeable es el de lograr un hormigón compacto al máximo, suprimiendo los poros y consiguiendo la no interconexión de la red capilar. En estas condiciones, el hormigón se aproximará al máximo al modelo pétreo teórico.

Por ello, es de la máxima importancia el conseguir durante su confección una pasta fluida al máximo, que dé una red micelar de adición de los áridos homogénea y cerrada.

Para conseguir esto, han aparecido muy recientemente unos nuevos aditivos llamados superplastificantes, cuyas características se van a estudiar a continuación.

Aunque el objeto exclusivo de este trabajo es la impermeabilización de obras de hormigón mediante el empleo de aditivos de masa, por su novedad y sus resultados en muchos casos revolucionarios, se citarán al final otras características conferidas al hormigón por los superplastificantes.

En el planteamiento teórico (ya que la experiencia acumulada, como se verá, es muy poca) distinguiremos entre dos tipos de hormigones de alta compacidad e impermeabilidad. El hor

hormigón fluido y el hormigón de bajo contenido en agua.

En el primer caso, el superplastificante proporcionará al hormigón una gran fluidez (medida mediante el asiento en milímetros del cono de Abrams). Con ello, se busca una máxima compactación, la posibilidad de evitarse el vibrado, la cohesión intermolecular, gran impermeabilidad y facilidad de colocación en lugares de difícil acceso.

Es sabido que la relación teórica agua-cemento para conseguir la hidratación de este último es de 0,27. No obstante, en la generalidad de los casos es preciso incrementar este coeficiente. Ello produce, desde el punto de vista de la impermeabilización del hormigón, malas consecuencias. En estas condiciones la obtención de un hormigón de bajo contenido en agua nos permitiría dar con un hormigón más compacto e impermeable. Veamos en qué medida el uso de un superplastificante puede resolvernos este problema.

Las definiciones que se dan a continuación responden a las definiciones de los informes de la sociedad Cement Admixtures Association y Cement and Concrete Association.

Superplastificantes.

Los superplastificantes forman una, relativamente nueva, categoría dentro de los aditivos químicos al hormigón.

Son unos materiales que han tenido un gran desarrollo en los últimos cinco años en Inglaterra. Desde 1972 son comercialmente utilizados en Alemania, y desde 1960, en Japón, que es el país en el que se descubrieron. De todos modos, no se han puesto en circulación como aditivos homologados hasta hace cinco años en los anteriores países.

En Alemania y Japón, hasta el momento, han sido colocados entre 5 y 6 millones de metros cúbicos de hormigón conteniendo este tipo de aditivo. En Inglaterra, donde las normas oficiales sobre aditivos al hormigón son muy rígidas, el criterio de no permitir casi nunca el uso de aditivos al hormigón prevalece últimamente, como ya se ha expuesto, pero se permiten los superplastificantes.

Los superplastificantes son químicamente di-

ferentes de los plastificantes usuales. Por consecuencia de esto, son utilizados en funciones distintas, aunque no totalmente. Por ello, tienen un interés claro en su uso como impermeabilizantes de masa.

Los superplastificantes cumplen una doble misión al actuar como plastificantes (aumento de docilidad) y reductores de cantidad de agua. Ambas cualidades conducen directamente a una mayor impermeabilidad.

A pesar de que los superplastificantes tienen un campo más amplio de aplicación que el de los aditivos para el hormigón, se restringirá el estudio a este último.

Definiciones.

Superplastificante.

Sustancia química o conjunto de ellas que adicionadas al hormigón le proporcionan:

- Elevada docilidad.
- Permiten la disminución del contenido de agua.
- Gran compactación.
- Impermeabilidad.

Hormigón fluido.

Aquel que contiene un superplastificante como agente incrementador de la docilidad.

El hormigón tiene un asiento de 200 mm o más, un factor de compactación de aproximadamente 0,98 y un valor de deslizamiento desde 51 y 62 cm (según el comité de medidas alemanas DIN 1048, *Tests para el hormigón*, enero 1972).

En el hormigón fluido no debe existir exceso de segregación.

No deben presentarse retardos anormales en la hidratación, así como aire diluido.

Otros términos usados para describir el hormigón de estas características son: hormigón autocompactante, floculo-hormigón, hormigón jabonoso, hormigón líquido fluido y de asiento en colapso.

Hormigón con reducción de agua.

Es hormigón conteniendo superplastificante, pero hecho con un bajo contenido de agua (reducción de alrededor del 30 por 100).

Es sabido que para poder amasar y colocar en obra un hormigón se necesita mucha más agua que la teórica de hidratación del cemento.

Según un gran número de autores, este agua es la principal causante de la formación de huecos en el hormigón endurecido. Además, todo exceso de agua, que necesita ser eliminada en su camino hacia la superficie, abre vías que facilitarán, una vez puesto en obra el hormigón, la entrada del agua.

En el hormigón de bajo contenido en agua con la adición de un superplastificante, el gel de hidratación del cemento que adhiere los agregados no dejará huecos ni sus vías de comunicación, como sucede con el hormigón convencional.

Tipos de superplastificantes.

Categoría A.

Condensados a base de formaldehidos de melaminas sulfonados.

Categoría B.

Condensados a base de formaldehidos naltalenos sulfonados.

Categoría C.

Lignosulfatos modificados.

Categoría D.

Otros.

Dentro de cada tipo existen variaciones, y a que materiales químicamente parecidos, por su complejidad molecular, dan lugar a diferentes plastificantes.

El método de actuación de los aditivos superplastificantes.

Sin excepción, los superplastificantes actúan como dispersadores de las partículas de cemento en el seno del agua. Su capacidad es muy superior, en este cometido, de la de los lignosulfatos inalterados o de la de los plastificantes ácidos.

Los superplastificantes están pensados para ser absorbidos por las partículas de cemento. Así, causan en ellas el volverse repulsivas como resultado de la naturaleza anodina de los superplastificantes. Esto es causa de que las partículas de cemento lleguen a estar negativamente

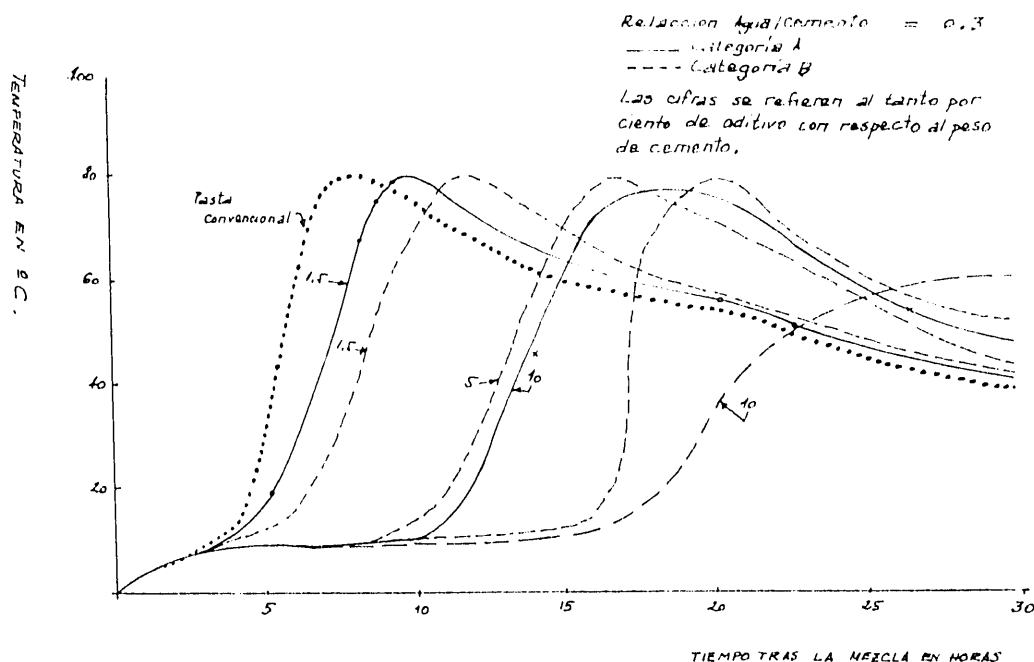


Fig. 1. — Calor de hidratación de las pastas conteniendo superplastificantes de las categorías A y B.

argadas. En principio, este efecto de absorción dispersión es similar al producido por los plastificantes convencionales.

Es interesante anotar que la dosis óptima de superplastificante de la categoría A es proporcional a la superficie específica del hormigón, según la teoría de absorción.

Los superplastificantes de las categorías A y B se distinguen de los otros en el sentido de que su actividad química no causa un descenso apreciable de la tensión superficial. Por esta razón, es probable que pueden ser soportados más altos niveles de dosificación sin llegar a producirse un excesivo contenido de aire. Como contraste, el material *Liquidol* está considerado como reductor de la tensión superficial, aumentando la capacidad humidificadora del agua a los granos de cemento, dando además mejor lubricación.

Las medidas de los calores de hidratación de las pastas de cemento Pórtland ordinario, hechas con la misma proporción agua-cemento y conteniendo superplastificantes de las categorías A y B, han mostrado que el calor total de reacción no es afectado en ninguno de los casos por el uso de aditivos, aunque alguna variación en el retardo inicial ha sido observada.

La figura 1 también muestra que el calor total de hidratación no ha sido afectado por la inclusión de superplastificante de las categorías A y B. Además, para las pastas de cemento estudiadas se retarda la liberación de calor. Esto sucede con la colocación de aditivos en exceso (más del 10 por 100 con respecto a la cantidad de cemento), siendo mayor el retardo para los aditivos de la categoría B que los de la A.

La conclusión general es que el mecanismo y tipo de hidratación no se altera con la presencia de superplastificantes utilizados en dosis normales. Ciertamente, existe dependencia de la resistencia del hormigón con la proporción agua-cemento.

Hormigón fluido.

Introducción y fundamentos históricos.

El desarrollo de los aditivos que hacen el hormigón extraordinariamente dócil, empezó en los años 60 en Alemania y Japón. En Alemania la iniciativa fue tomada por la compañía SKW, y en Japón, por las compañías Kao Soap Co., Ltd. y Onoda Cement Company.

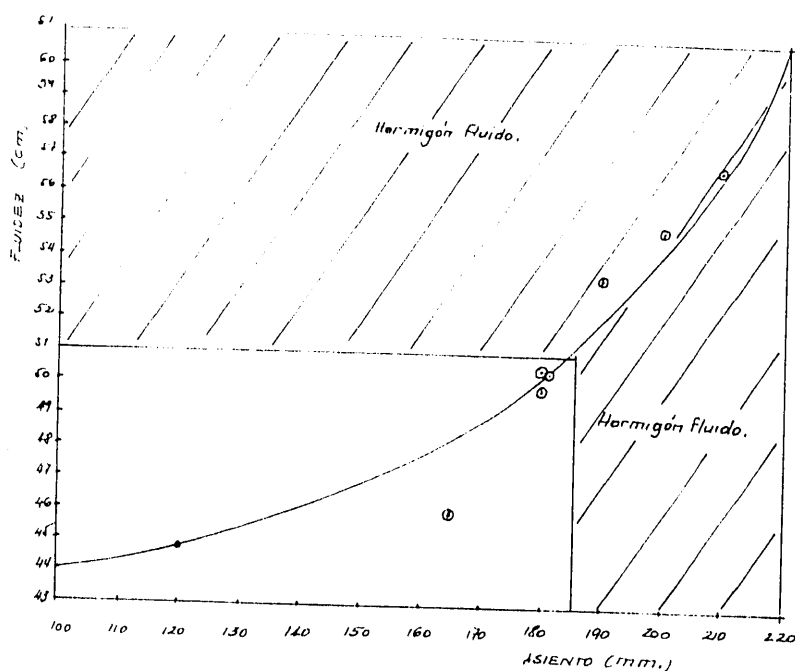


Fig. 2. — Relación entre el aumento de la huella de asiento y asiento para un hormigón fluido, conteniendo superplastificante de la clase B.

En ambos países el uso de hormigón fluido se ha vuelto bastante generalizado.

En Japón, el uso principal de los superplastificantes ha sido el producir hormigón de alto asentamiento (en el sentido dado por el cono de Abrams), pero con un reducido contenido de agua. Este aspecto se estudiará más adelante.

Más recientemente, varias compañías británicas han desarrollado sus propios materiales o marcas, dando las mismas propiedades iniciales en cuanto a la fluidez del hormigón.

Entre 30 y 35.000 m³ de hormigón con superplastificantes han sido colocados en el Reino Unido, de los cuales el 40 por 100 se ha utilizado en la industria del hormigón prefabricado como ayuda para el incremento de las resistencias iniciales y el 60 por 100 para la construcción y la ingeniería civil, primariamente como hormigón fluido para cimientos en zonas sometidas a gran humedad.

El hormigón diseñado para tener un asentamiento inicial de 75 mm, podrá con la adición de un superplastificante, según la dosificación del fabricante, usualmente entre 1 y 6 litros por metro cúbico, aumentar su asentamiento ligeramente por encima de los 200 mm. Este efecto se muestra en la figura 2.

El grado de fluidez que puede conseguirse depende también del tipo de los agregados, de la forma y, sobre todo, de la granulometría. Hay usualmente un límite superior para la dosificación, por encima del cual el hormigón se vuelve tan fluido que puede dar lugar a la segregación

Diseño de la mezcla.

Primeramente, debe recordarse que los superplastificantes no fluidificarán con éxito a todos los hormigones, simplemente porque tengan un asentamiento inicial de hasta 75 mm.

Para el diseño, es un punto razonable de partida el que sirva para bombeo, y, asimismo, como base para hacer hormigón fluido.

A pesar de ello, durante la puesta en obra, deberá estudiarse en cada caso la dosificación adecuada, según las condiciones locales.

Han de verificarse las proporciones de cemento y arena, ajustándolas de tal modo que se evite la segregación.

Para ello, se recomiendan dos aproximaciones:

Primera.

Si se tiene una mezcla de hormigón con un asentamiento nominal de 75 mm, las condiciones para la producción de hormigón fluido son las siguientes. Habrá de aumentarse en un 4 ó 5 por 100 la cantidad de arena, y tras la adición del superplastificante una dosificación típica será:

Componentes	Cantidades (Kg)
Cemento (Pórtland ordinario)	3
Finos	7,43
Gravillas	11,20
Agua	1,73
Superplastificante	1 dosis
Relación finos-cemento	40/60
Relación agregado-cemento	6,2/1

Segunda.

Si el máximo tamaño del agregado es de 38 mm, deben ser utilizados un número de 400 Kg/m³ de finos combinados (cemento y arena) que tengan un tamaño de partículas de menos de 300 mm.

Si el máximo tamaño del agregado es de 20 mm, entonces se requieren 450 Kg/m³ de finos combinados. Para un contenido de cemento de 270 Kg/m³ o más debe añadirse del 24 al 35 por 100 de arena de tamaño correspondido entre 0 y 1,18 mm.

Si el contenido de cemento es menos de 270 Kg/m³, el porcentaje de arena que pasa de 1,18 mm debe ser incrementado alrededor del 35 por 100. El fallo al alcanzar el óptimo contenido de arena puede materializarse en segregación y obviamente en sudación.

En áreas en las que la arena tienda a ser limpia y con escasez de partículas finas, el reemplazamiento parcial por materiales inertes, tales como la puzolana o una apropiada arena de construcción, pueden aumentar las características de fluidez de un hormigón hecho con ellas.

Hay conocimientos bastantes para sugerir que el uso de piedras de cal trituradas de razonablemente consistente granulometría da particulares beneficios en términos de resistencias tempranas.

La adición de un superplastificante al hormigón en una relación nominalmente fijada de

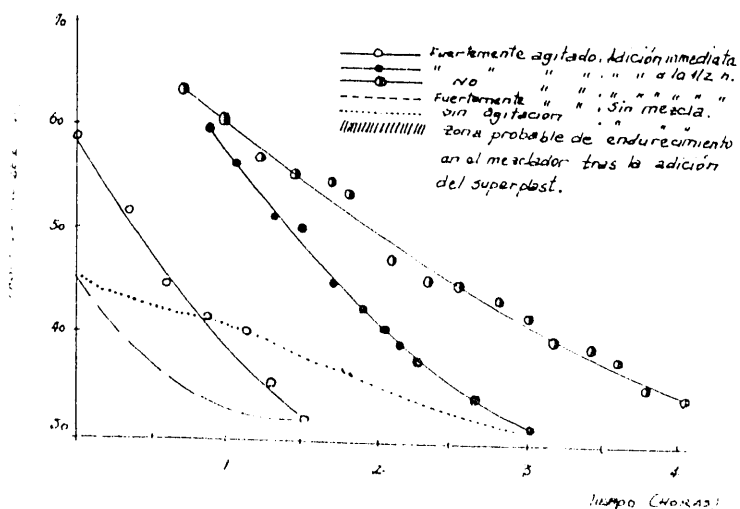


Fig. 3. — Dependencia de la retención de la manejabilidad con las condiciones de mezcla. Ensayo realizado con un superplastificante de la categoría A.

agua-cemento, permite la producción de auto-compactante u hormigón fluido que pueda ser colocado con el mínimo esfuerzo. Aunque algunos experimentos han mostrado que el hormigón fluido puede ser obtenido con combinaciones de gravas y arenas o trozos de piedras de cal y arena en el diseño de la mezcla, es claro que los mejores resultados se obtienen cuando existe un alto contenido de finos en la mezcla. Esto se manifiesta no solamente en las propiedades físicas del hormigón resultante, sino también en su aspecto cohesivo.

Modo de uso.

Todos los superplastificantes citados son surtidos en forma líquida, y se añaden directamente a una mezcla de hormigón en el punto de uso, bien a mano o a máquina.

Las dosificaciones son, usualmente, del orden de unos 6 l/m³ de hormigón. Después de la adición, la mezcla total es batida a la velocidad máxima por lo menos dos minutos. El efecto de la adición y dispersión producida por el superplastificante se observa rápidamente por el cambio de régimen del motor, así como por el ruido de la mezcla. Encontramos el hormigón fluido y preparado para su uso. Debe ser utilizado sin demora en cuanto que la máxima manejabilidad se obtiene entre los treinta y sesenta minutos. El grado con el que se retiene la alta dosificación es de alguna forma dependiente del tipo de mezclador y del tipo de mezcla. Cuanto

más rápida sea la acción de la mezcla antes se llegará a la alta manejabilidad. En la figura 3 se describen las curvas obtenidas por Lewanduski y Peterfy.

En éstas también se indica la región que tipifica las condiciones de mezclado para la obtención de la mezcla rápida.

Es posible, si hubiese demora, añadir una segunda dosis de aditivo para reinstaurar el alto asentamiento.

De todas formas, la práctica de adiciones secundarias no está recomendado.

En la publicación DIN 1045 se especifica la prohibición de añadir, sucesivamente, dosis de superplastificante.

En el momento de escribir este trabajo no existen recomendaciones similares en los British Standard.

Puede ser observado inmediatamente, tras la adición de un superplastificante y durante la mezcla, que considerables cantidades de aire salen de la misma. Este efecto parece tener poca importancia, y es el resultado de la capacidad normal de soltar aire asociada con adiciones de plastificantes o reductores de agua (consecuencia directa de su capacidad de dispersión), y de la más baja viscosidad del hormigón fluidificado, que facilita el dejar libre el aire atrapado. Son típicas cifras de contenido de aire 1,2 al 2,7 por 100.

Son utilizadas dosis de superplastificantes, llegando hasta 6 l/m³, que comparadas con 1 l/m³ para agentes reductores de agua y mez-

clas impermeabilizadoras, son relativamente altas.

Este punto debe ser considerado si se adopta el sistema de dosificación manual, ya que considerables cantidades de la mezcla han de ser manejadas a mano en el tambor de la hormigonera (36 l para una carga de 6 m³, por ejemplo).

Idealmente, los aditivos han de ser añadidos al hormigón inmediatamente antes del momento de su uso, no sólo a causa de la pérdida de la manejabilidad con el tiempo, sino también a causa de las dificultades prácticas de transportar hormigón de alto asentamiento en camiones-hormigonera estándar.

Si el uso inmediato no es posible, puede ser interesante tomar la precaución de dejar el hormigón con superplastificante en reposo en el mezclador hasta que esté listo para su colocación, en los casos en que se necesite un corto período de mezcla.

Áreas de aplicación.

1. Colocación de hormigón con vibración reducida en áreas de armaduras muy próximas y en áreas de difícil acceso.

Usando hormigón fluido, la necesidad para cortar o adaptar los encofrados puede ser evitada.

2. La capacidad de colocación, muy rápida y fácilmente, prescindiendo de vibrado del hormigón para zonas enlozadas, paneles, cubiertas y estructuras similares.

3. El bombeo muy rápido de hormigón, así se ha conseguido la colocación de 40 m³/hora usando una bomba Schwing.

Hay indicaciones de que existen menos problemas operacionales que con el tradicional hormigón bombeado.

Las presiones de bombeo son menores y generalmente el equipo puede ser utilizado mejor. Existen informes de hormigón superplastificado que ha sido bombeado a alturas de 35 m, en Alemania. La combinación de cohesión y fácil colocación se adapta bien al bombeo.

Los superplastificantes han sido utilizados en alguna ocasión para hormigonar bajo el agua usando una bomba Putzmeister. Una mezcla típica utilizada fue:

Cemento	386 Kg/m ³ .
Finos	50 %.
Gravas	50 % (20-5 mm).
Aditivos	Categoría A (siendo el asentamiento, antes de la adición del aditivo, de 75 mm).

El hormigón fue bombeado 20 m horizontalmente y 20 m verticalmente. Tras su colocación, habiendo nivelado satisfactoriamente el hormigón, se hizo el trabajo de diversificación mucho más fácilmente que en mezclas tradicionales colocadas con un asentamiento de 125 mm.

4. La colocación de hormigón por medio del tubo Tremie, particularmente, en lugares bajo agua, donde la facilidad para extender de 5 a 6 m desde el punto de descarga su asistencia le da una marcada ventaja sobre los hormigones tradicionales.

5. Facilitando la producción de superficies de hormigón con cara uniforme y compacta. Así como en todos estos aspectos el hormigón se beneficia de tener gran fluidez, es necesario mencionar aquellos otros en los cuales no queda realmente beneficiado:

1. Cuando sean normalmente utilizados métodos lentos para la colocación del hormigón.
2. Si el plano en el que ha de ser colocado el hormigón excede más de 3° de la horizontal.
3. Cuando se requiera una cuidada tixotropía.
4. Situaciones en las que la alta trabajabilidad puede ser obtenida por la adición de agua sin efectos secundarios adversos.

Por ejemplo, en los tubos hechos por centrifugación, hormigón vacío y baldosas prensadas.

Dependencia de la acción de los superplastificantes con el tipo de cemento.

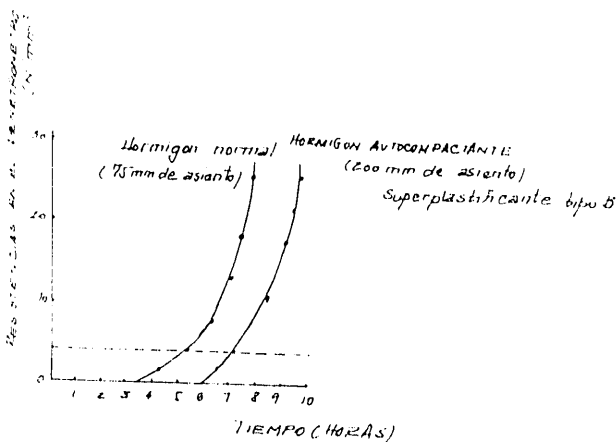
La mayor parte de los datos escritos actualmente existentes han sido obtenidos a partir de hormigones confeccionados con cemento Portland ordinario; no obstante, parece que en los casos en que se desee obtener mayor fluidez inicial estos superplastificantes pueden ser usados con cementos rápidos y sulforresistentes.

Las indicaciones actuales dictan que las resistencias últimas se mantienen con cementos alforresistentes y con los de rápido endurecimiento.

De todas formas, el período en el que se mantiene la fluidez se ve considerablemente reducido.

Propiedades del hormigón fluido en estado fresco.

En la figura 4 se refleja, sobre todo, la fluidez de dichos hormigones con el retardo del



Tiempos de colocación para mezclas conteniendo superplastificante del tipo B

Tipo de cemento	Dosis equivalente de aditivo (l/m³) para hormigón conteniendo 300 Kg/m³ de cemento	Agua/Cem.	Tiempo (mínimo)	
			Puesta inicial	Final
Portland ordinario.	0	0,30	195	270
	1	0,28	210	255
	2	0,27	210	260
	3	0,27	210	265
Superresistente ...	0	0,30	115	215
	1	0,29	120	215
	2	0,28	120	220
De rápido endurecimiento	0	0,30	95	135
	1	0,28	100	135
	2	0,27	100	130

Figura 4.

proceso de hidratación. En términos prácticos, los usuarios del hormigón fluido, téngase en cuenta que éste tiene un retardo de dos a tres horas, en comparación con el hormigón de normal asentamiento.

Dependencia con el tiempo de la manejabilidad.

Como se ve en la figura 5, la fluidez medida por el asentamiento y por el factor de compactación se retiene entre media o una hora después de la adición del superplastificante.

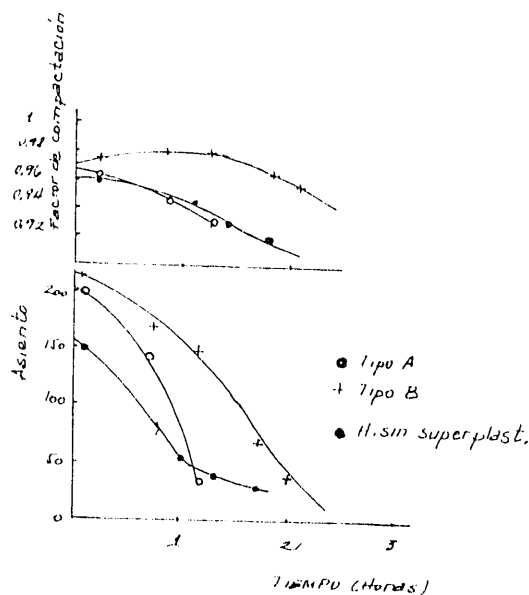
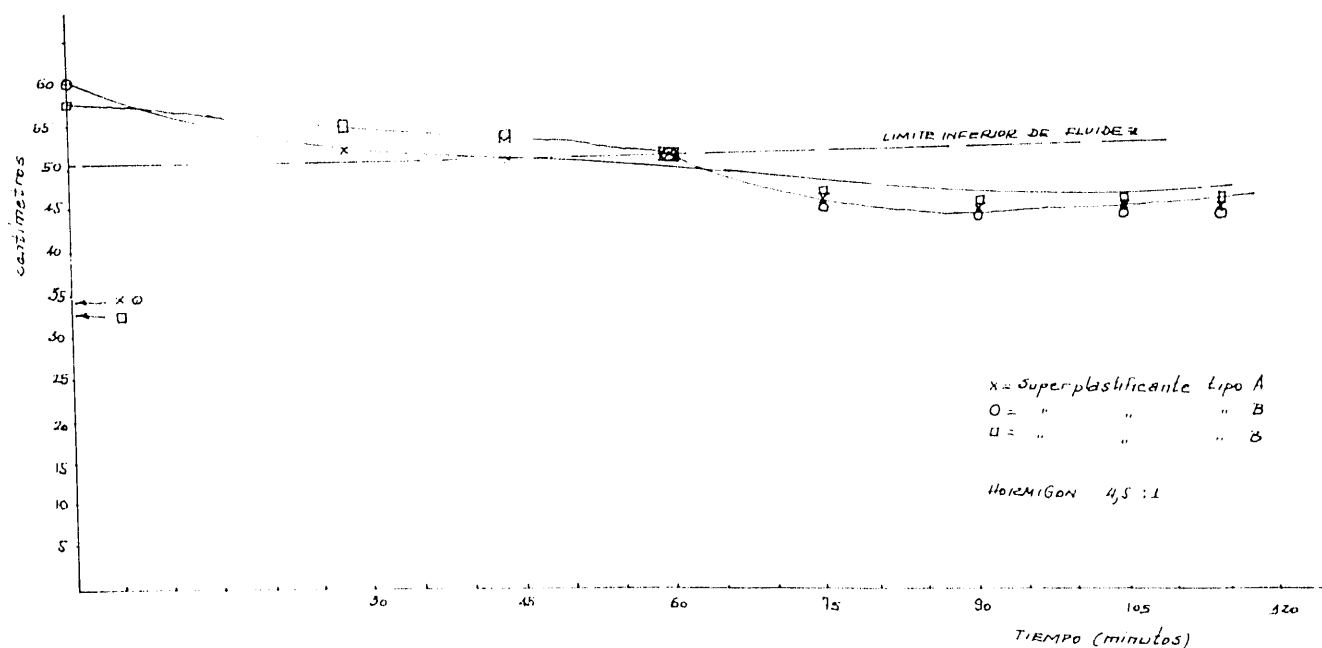


Fig. 5. — Relación ante la alta trabajabilidad y el tiempo para hormigones con superplastificantes de los tipos A y B.

Es esta la razón por la que el hormigón fluido debe ser usado sin demora. La caída de la facilidad de puesta en obra depende del canon y tipo de mezcla usada (la figura 5 se obtuvo en un trabajo de laboratorio usando un mezclador de tambor Benford y un agregado de grava).

Las figuras 6 y 7 muestran la caída con el tiempo de la inicial gran fluidez, habiendo sido hecho el hormigón en este caso con agregados de piedra de cal. De nuevo la manejabilidad inicial se demora de cincuenta a sesenta minutos.



Figs. 6 y 7. — Relación entre el aumento de la huella del hormigón superplastificado y el tiempo transcurrido desde su colocación.

Efecto del retardo antes de la adición del superplastificante.

En cuanto que para la mayor parte de las aplicaciones la adición del superplastificante suele hacerse en el lugar de uso, el hormigón puede tener ya una edad de cuarenta o cincuenta minutos antes de la introducción del aditivo. La capacidad fluidificante de un superplastificante se reduce con el aumento de la edad del hormigón; aumentando la dosis del superplastificante puede suprimirse este efecto, pero esta solución necesita tenerse en cuenta cuando se quieran establecer las óptimas dosis para una aplicación particular.

Reología del hormigón fluido.

El hormigón que ha sido fluidificado por la adición de un superplastificante se caracteriza por altos valores de asiento y fluidez. De todos modos ambos tests son semiestáticos y no muestran realmente de qué forma una mezcla de hormigón fluido se comporta bajo condiciones dinámicas, condiciones que reflejan los métodos usuales de colocación de hormigón. Faltan verdaderos datos reológicos en dichos hormigones, pero merece la pena mencionar algunos

resultados preliminares y sus posibles tendencias.

Estos datos fueron obtenidos usando una técnica de mezcla actualmente en desarrollo y que es particularmente conveniente para hormigones de alta manejabilidad.

En la figura 8 se muestran unas curvas que dan las características de fluidez de hormigones que contienen una doble dosis de aditivo plastificante normal de diferentes proporciones agua-cemento. Las pendientes de las curvas dependen de la viscosidad de la mezcla (a mayor pendiente, menor viscosidad). Esta propiedad controla la general facilidad con la que dicho hormigón puede ser colocado. La intersección con el eje horizontal nos da el esfuerzo cortante del hormigón (esta propiedad muestra hasta qué grado un hormigón puede fluir). En todos los casos tanto la viscosidad como la resistencia a esfuerzo cortante se reducen, ya sea o bien agua, o bien un plastificante se hayan añadido.

Durabilidad del hormigón endurecido.

Existen datos para calibrar la permeabilidad en ambas superficies. Es decir, la permeabilidad por capilaridad.

El test de la absorción superficial da los

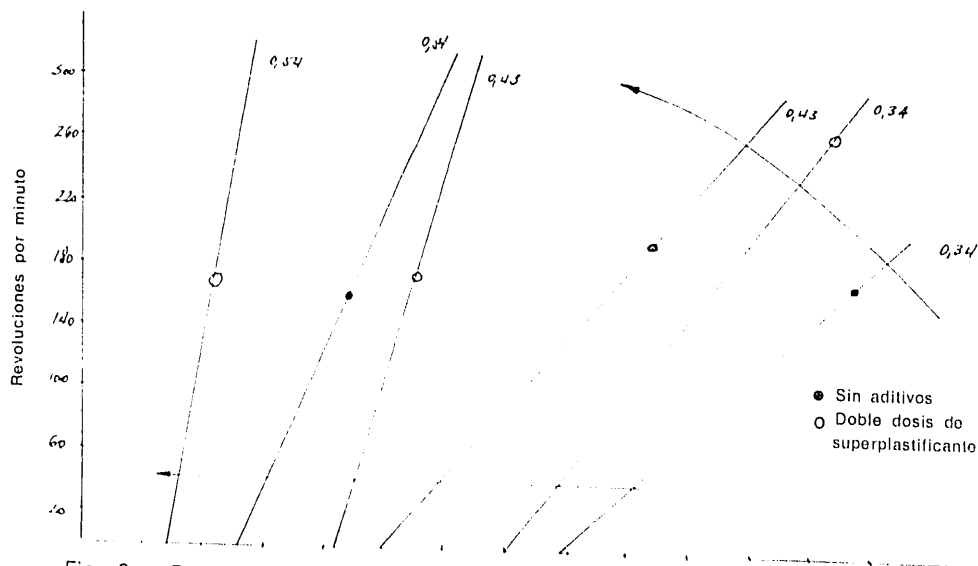


Fig. 8. — Reología del hormigón conteniendo plastificante normal (hormigón de 300 kilogramos por metro cúbico).

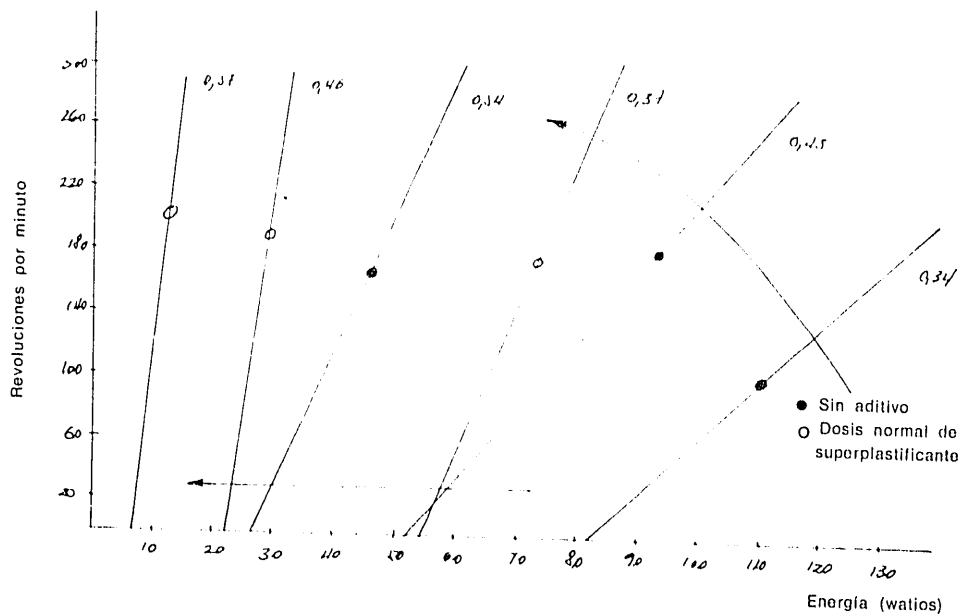


Fig. 9. — Reología del hormigón conteniendo superplastificante de categoría B.

siguientes resultados, comparando un hormigón normal bien ejecutado con el superplastificado:

Tiempo (minutos)	Hormigón normal	Superplastificado
Valores en $(mm/m^2 \times seg \times 10^{-2})$		
10	0,51	0,40
30	0,42	0,31
60	0,26	0,20

Como se puede observar de los datos de la tabla el hormigón tratado presenta una permea-

bilidad inferior a la del convencional. Por otra parte, la mayor porosidad de un hormigón le hace menos resistente a los efectos de las heladas. A continuación se incluyen los resultados de diversos ensayos sobre pruebas sometidas al ciclo de hielo-deshielo.

Test del ciclo de heladas.

El método usado está basado ampliamente en la especificación BS 73/10487, para hormi-

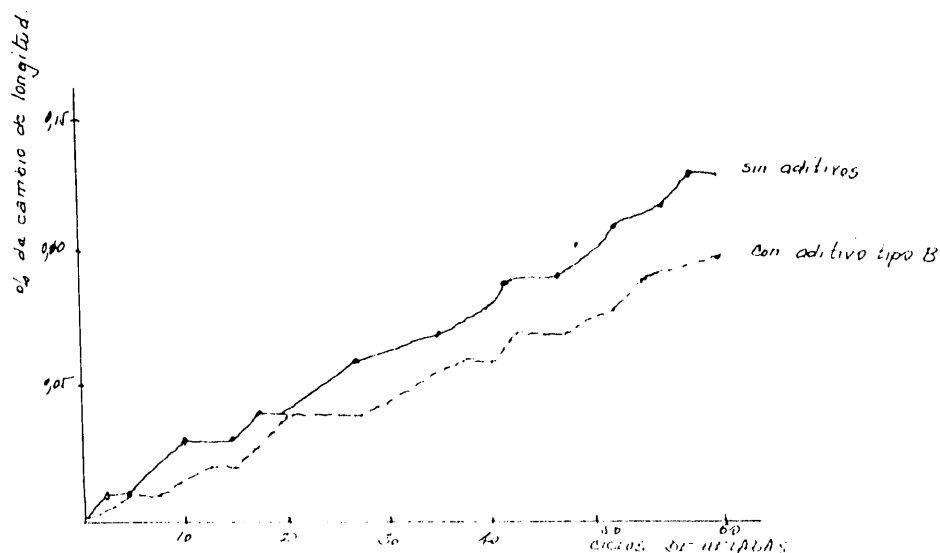


Fig. 10. — Test de dilatación.

gón aerocluso. Existen *test* adicionales basados en los del departamento de autopistas, siguiendo el método Ontario usando soluciones salinas. Veamos ambos métodos:

Documento BS 73/10487.

Moldes de 75 x 75 x 225 mm con testigos en ambos extremos.

Curados en agua a 20° ± 1° durante veintiocho días, y tras ello, sometidos a *test* del ciclo de heladas en agua. Este *test* consta de ciclos

de dieciséis horas de heladas y ocho de deshielo, siendo el *test* de unos 60 ciclos. El incremento de longitud se expresó como un porcentaje de la longitud inicial cuando estaba húmedo y a 20°. Resultados en la figura 10.

Test Ontario.

Pruebas similares a los anteriores.

Curadas bajo agua durante catorce días y curadas al aire hasta los veintiocho días de edad.

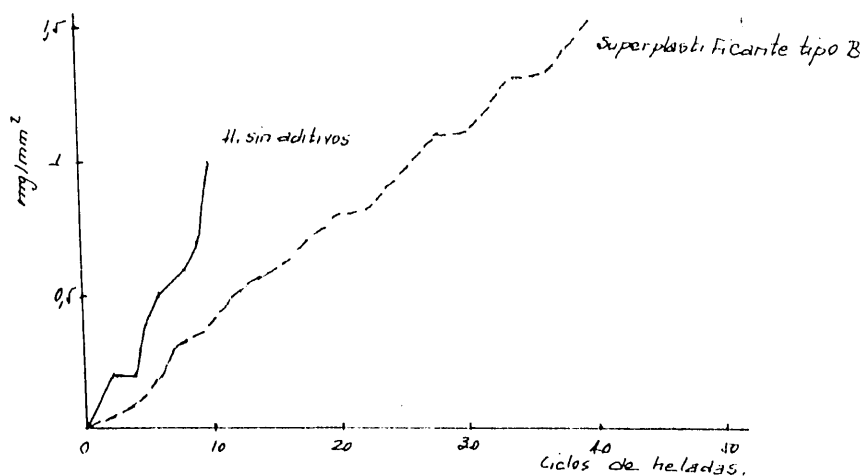


Fig. 11. — Test del ciclo de heladas.

El test hielo-deshielo se hace durante el mismo período, pero en una solución de un por 100 de cloruro sódico.

Resultados en la figura 11.

La refrigeración en todos los casos fue al menos de 17° C durante la noche, y el deshielo durante el día de, como mínimo, 20° C.

Ambos tests del ciclo hielo-deshielo muestran que el hormigón de alto asiento, conteniendo superplastificante B, es superior en resistencias que el hormigón normal.

Se han llevado a cabo una considerable cantidad de test del ciclo de heladas en la Universidad de Innsbruck usando superplastificante A, pero son de escasa fiabilidad por existir pocos datos.

De los resultados anteriores puede deducirse que el hormigón tratado reduce el número de poros con respecto al normal. Factor este fundamental, como es sabido, desde el punto de vista de la impermeabilización.

Hormigón de alta resistencia con baja cantidad de agua.

Introducción e historia.

Como resultado de la gran docilidad que la adición de un superplastificante da a un hormigón hecho con una proporción normal de agua-cemento, es posible hacer hormigón de una manejabilidad convencional (asiento de 50 a 75 milímetros), pero con la relación agua-cemento muy reducida. La mayor parte del desarrollo del uso del superplastificante, así como el de hormigones con bajo contenido en agua, ha sucedido en el Japón, donde la manejabilidad convencional es de un asiento de 200 mm, o más.

Merece la pena remarcar que, en teoría, una proporción de 0,27 agua-cemento es adecuada para la total hidratación del cemento. Cualquier cantidad adicional de agua disminuye la resistencia a compresión que podía haber sido alcanzada. Por ejemplo, la correcta selección de cemento, agregados y condiciones de curado puede dar lugar a hormigones de 96 Newtons/mm² y resistencia a flexión mayor de 11 Newtons/mm². De todas formas, suele suceder que en la mayor parte de las prácticas de colocación de hormigón se requiere un nivel de manejabilidad que no puede obtenerse normal-

mente sin la adición de alguna y, a menudo, considerable cantidad de agua por encima de las necesidades teóricas, rebajando así la posible resistencia e impermeabilidad.

Con una relación de agua-cemento de 0,3 o más, la docilidad de la mayor parte de los hormigones es muy mala con vistas a su uso.

Aumentando el contenido de cemento puede dar lugar a un exceso de calor de reacción, causando fisuras, así como una retracción no deseada. El aumento de cemento no es tan deseable como una reducción de la proporción de agua-cemento para alcanzar el mismo fin.

Es de una claridad meridiana, que cualquier propósito, habiendo hormigonado convenientemente, de reducir esta proporción más cerca del nivel teórico (0,27) es deseable.

Los superplastificantes están llamados a satisfacer este requerimiento, como reductores de agua en la proporción del 20 al 33 por 100, aunque limitados por el tipo de cemento, agregados y temperatura. Comparativamente, reducciones de agua de tan sólo del 15 al 16 por 100 son obtenibles con plastificantes basados en lignosulfonatos.

Los hormigones con bajo contenido de agua, conteniendo superplastificantes, se caracterizan por su resistencia a corto y largo plazo, excelente durabilidad y altas características impermeabilizantes. Estas proporciones se desarrollan en las secciones siguientes.

La técnica de producir hormigones con baja proporción de agua-cemento, con el fin de obtener altas resistencias, gran impermeabilización y con ello amplio período de manejabilidad con bajo contenido en agua, fue inicialmente estudiada en Japón hace doce años, usando superplastificantes de categoría B.

Debe apreciarse que es práctica usual en Japón usar hormigones con exceso de arena y con un alto asiento para la construcción general, ya que se hace para resistir terremotos y tifones. Además, los edificios contienen una amplia cantidad de armaduras que hace la colocación del hormigón convencional europeo (no fluido) muy difícil. Los superplastificantes se utilizan para reducir la proporción de agua en esas mezclas, manteniendo un asiento de 200 mm. En muchos casos en Japón, se ha utilizado un superplastificante B, aunque esta adición particular difiere en alguna forma de los

otros miembros de esta categoría en tener un mayor peso molecular.

La capacidad de reducir la proporción de agua de los superplastificantes está especificada por los suministradores para todas las otras categorías de estos aditivos.

En Europa, un aditivo de categoría A empezó a encontrar aplicación en Alemania alrededor de hace cinco años. En este contexto ha sido usado desde entonces en Francia, Bélgica e Italia. En 1974 se mostró interés por esta técnica en Gran Bretaña.

Propiedades del hormigón fresco.

La capacidad de reducir el empleo del agua por medio de la adición de los superplastificantes.

Con el fin de reducir el número de poros de la masa de hormigón, se disminuye la cantidad de agua. Como ya se dijo anteriormente, esto llevaría a una pérdida de docilidad del hormigón. La adición del superplastificante nos permite, conservando el asiento, reducirlo.

En la tabla siguiente queda reflejado las diferentes posibles relaciones agua-cemento, y la reducción en tanto por ciento de la cantidad de agua según las dosis de superplastificante utilizadas. El hormigón ensayado era una mezcla 1 : 2 : 4 con 300 Kg/m³ de cemento.

Dosis	Agua/Cem.	Reducción de agua %	Asiento (mm)
0	0,55	0	50
Normal.	0,48	13	55
Doble.	0,44	20	50
Triple.	0,39	28	45

Durabilidad a largo plazo de hormigón de alta resistencia.

Retención de la resistencia.

Como resultado de reducir el contenido de agua en el hormigón, parece razonable deducir del incremento de densidad e impermeabilidad el incremento de la durabilidad.

Por lo reciente de esta técnica, no existen

datos publicados sobre los resultados del hormigón a largo plazo, exceptuando un reducido número de casos que no creemos puedan ser representativos.

Corrosión de las armaduras y degradación a largo plazo del hormigón.

Así, como de la resistencia a largo plazo se tiene poca información, ésta es ligeramente más amplia en el caso de estudiar la oxidación de las armaduras en un hormigón conteniendo uno de los superplastificantes de la categoría B.

Los experimentos fueron hechos en cilindros huecos y armados de 2.300 mm de largo, 300 mm de diámetro exterior y 60 mm de espesor de pared. Tras ser curados al vapor, las muestras fueron almacenadas al aire libre durante cinco años. La relación agua-cemento fue usualmente de 0,35. Las comparaciones fueron hechas con aditivos normales reductores de agua y con cloruro cálcico.

El hormigón anteriormente citado mostró, además, gran retención de la alcalinidad, incluso después de once años, con pérdida de carbonación y baja permeabilidad.

Aplicaciones.

En la introducción a los hormigones con bajo contenido de agua, se mencionaron varios ejemplos, en los cuales habían sido utilizados superplastificantes.

Veamos otros ejemplos:

1. Unidades de hormigón pretensado y curado en autoclave, capaces de soportar esfuerzos compresivos superiores a 100 N/mm². No hay razones para pensar que un curado a altas temperaturas tenga efectos adversos para el empleo de superplastificantes.

2. Hormigón con alta resistencia temprana que permita el rápido desencofrado.

3. Fabricación de unidades prefabricadas, segmentos, traviesas y pilotes de hormigón armado pretensado.

4. Producción de hormigón de alto asentamiento con baja proporción de agua-cemento.

5. Hormigón con altas resistencias a largo plazo.

6. Hormigón refractario con cemento aluminoso. Es importante señalar que el uso de los superplastificantes en estos casos es necesariamente muy limitado.

costos.

Las ventajas que se pueden obtener a pesar del mayor precio debido a la adición del superplastificante son:

Caso del hormigón fluidificado.

- Mayor facilidad de colocación.
- Menor necesidad de vibrado.
- Menor número de operarios.
- Menor tiempo de realización.
- Mayor compactación inicial.
- Mayor impermeabilidad.

Caso del hormigón con bajo contenido de agua.

Reducción del tiempo de curado a vapor o a altas temperaturas.

Mayor resistencia en los prefabricados, reducción del número de piezas rotas.

Como ejemplo citaremos que en Alemania el rápido incremento en el consumo del hormigón fluido es debido al beneficio económico que obtiene el constructor.

En el caso de obras al nivel del suelo se puede absorber el coste extra, particularmente si el punto de colocación está próximo al de fabricación del hormigón. Para obras bajo el nivel del suelo, el beneficio es considerable, usando hormigones superplastificados.

A parte de los beneficios físicos que proporciona al hormigón, el mayor beneficio está en el ahorro del tiempo.

En secciones muy congestionadas estos tiempos se aumentan considerablemente. Se obtienen grandes ventajas cuando el hormigonado se hace en pequeños volúmenes con mala accesibilidad, evitándose el vibrado para obtener idéntica compactación: Como, por ejemplo, en el caso de los pilotes de un puente sobre un río de gran caudal.

La economía en la utilización del hormigón con superplastificantes depende directamente

de la relación entre los costes del superplastificante y los sueldos horarios de los obreros. Lógicamente, este factor es susceptible de alteraciones, y necesita periódicas revisiones.

Comentario final y tendencias futuras.

Juntamente con los superplastificantes aquí expuestos, en los próximos años, se espera aparezcan otros diferentes. Por ello, alguno de los tests actualmente válidos deberán de ser modificados. Por su mayor experiencia, en los tests de determinación de los valores de resistencias iniciales y de alta manejabilidad en el punto de uso, se prevé que se adoptarán algunos de los japoneses o alemanes.

Asimismo, es preciso obtener un mayor número de tests que nos den valores para las otras características del hormigón y aquellos hechos para la determinación de las propiedades a largo plazo.

Puede decirse, no obstante, que en lo referente al aumento del tiempo de alta manejabilidad del hormigón se han alcanzado magníficos resultados, estando completos los tests en este aspecto.

El relativo alto costo de los superplastificantes con respecto a otros aditivos puede inhibir su general adopción. Pero sus beneficios son muy considerables en situaciones de difícil construcción, lo que se traducirá en su mayor uso.

De la experiencia actual ya puede deducirse que el uso de superplastificantes para obtener hormigón fluido y, por tanto, más compacto, reduce la necesidad en muchos casos del vibrado. De todas formas, es interesante reunir información de los efectos con el tiempo al comparar la impermeabilización producida en hormigones superplastificados y en los convencionales vibrados.

Uno de los problemas encontrados al hacer hormigón armado con acero o fibra de vidrio es la dispersión de las fibras en la mezcla. Este problema tal vez pueda ser superado con la adición de superplastificante para la obtención de un hormigón de alta manejabilidad.

En cada caso, el suministrador deberá dar las instrucciones precisas por no existir criterios oficiales para su uso.

BIBLIOGRAFIA

Entre otros volúmenes consultados, cabe citar los siguientes:

FRANCISCO ARREDONDO VERDU: "Hormigones".

Prof. JIMENEZ MONTOYA: "Hormigón armado".

Normas DIN para aditivos al hormigón.

Normas British Standards para aditivos al hormigón.

Normas ACI.

Instrucción EH-73 del Ministerio de la Vivienda.

F. M. LEA: "The Chemistry of Cement and Concrete".

Patente 3.676.451 de la Sociedad Onoda Cement Ltd. United States Patent Office.

G. SCHNEEBELI: "Les parois moulées dans le sol".

R. LEWANDOWSKI y P. PETERFY: "Transport-beton".

The Pressure of Concrete on Formwork Civil Engineering Research Association.

J. G. ANGLES: "Measuring Workability".

Superplastificantes.

Report Cement Admixtures Association.

Además de los datos bibliográficos anteriormente citados, se han consultado los informes de algunas de las obras civiles realizadas con la adición de un superplastificante.

Los más significativos son:

Bloque subacuático en el puerto de Kokura, Japón.

Acueducto y presa de Midorigawa en Kyushi, Japón.

Túnel para los ferrocarriles japoneses en Tokyo.