

características de los principales aditivos químicos para hormigones y morteros y su empleo en la construcción

CARLOS SAFRANEZ, Dr. ingeniero

sinopsis

Partiendo del punto de vista de un técnico de la construcción y sin pretender abarcar todo el complejo de los aditivos para hormigones y morteros, el autor procura facilitar una visión clara de los aditivos químicos más importantes y de uso más frecuente. Estos se clasifican en pocos grupos claramente definidos, señalando el efecto principal.

Se exponen los efectos de los aditivos y las propiedades que se consiguen, lo mismo en el hormigón fresco que en el hormigón fraguado.

Se destaca la importancia de los efectos de fluidificación, de plastificación y de dispersión del cemento, que producen una mejora muy notable de la calidad del hormigón.

Finalmente, se trata brevemente del aspecto económico de los aditivos.

689-5

1 Introducción

¿Qué son los aditivos para hormigones y morteros y qué finalidad tienen? Según una definición americana, un aditivo está destinado a modificar las propiedades del hormigón con el fin de adaptarlo mejor a la obra a ejecutar.

Un aditivo se incorpora al hormigón fresco, normalmente añadiéndolo al agua de amasado para conseguir ciertas cualidades o características en el hormigón fresco o fraguado, o también en ambos, las cuales se consideran ventajosas o necesarias para una obra determinada. Un aditivo forma una parte integrante del hormigón; hay que considerarlo conjunto con el cemento, áridos y el agua, como un componente más de la mezcla.

Existen también ciertos productos para el tratamiento de superficies del hormigón, como los hidrófugos a base de siliconas, los endurecedores de hormigón a base de fluatos, los filmógenos para el curado de hormigón, etc.; pero, según nuestro criterio, no deben considerarse como aditivos.

¿De qué clase de aditivos dispone la técnica moderna de la construcción? Algunos se emplean desde hace muchos años, tales como los impermeabilizantes, los aceleradores de fraguado y los anticongelantes. Otros son más modernos y los clasificamos como plastificantes-fluidificadores, aireantes, aireantes-plastificantes y retardadores de fraguado.

No nos parece indicado clasificar por separado los aditivos para hormigones y los de morteros, ya que todos los aditivos nombrados se pueden emplear indistintamente en ambos casos.

Ahora bien, normalmente se usan solamente para los hormigones, a excepción de los impermeabilizantes, que se emplean también mucho para los morteros.

Aparte de los aditivos mencionados, disponemos, para el uso exclusivo en morteros, de aireantes-plastificantes especiales y de aditivos expansionantes.

Volvemos a citar por orden de importancia los aditivos que tenemos a nuestra disposición siguiendo el sistema adoptado en Alemania, clasificándolos en pocos grupos claramente definidos, señalando el efecto principal, y que tienen verdadera importancia en la práctica:

- 1.º PLASTIFICANTES-FLUIDIFICADORES.
- 2.º AIREANTES Y AIREANTES-PLASTIFICANTES.
- 3.º IMPERMEABILIZANTES.
- 4.º ACELERADORES DE FRAGUADO Y ANTICONGELANTES.
- 5.º RETARDADORES DE FRAGUADO.

Y para el uso exclusivo en morteros:

- 6.º AIREANTES-PLASTIFICANTES ESPECIALES.
- 7.º ADITIVOS EXPANSIONANTES.

Para formarnos una idea sobre la importancia del empleo de los aditivos en la técnica moderna de la construcción, indicamos que en Alemania, por ejemplo, más de un 60 % de los hormigones se fabrican con adición de aditivos. Teniendo en cuenta que en los hormigones pobres normalmente no se emplean aditivos, el porcentaje es aún mayor para los hormigones de calidad. En los Estados Unidos, el 80 % de los hormigones empleados son prefabricados y en el 80 % de éstos se utilizan aditivos.

Al principio, al emplear un aditivo se buscaba solamente un efecto determinado, sea como impermeabilizante, como acelerador o retardador del fraguado, para la oclusión del aire adicional, etc. Se tomaba en cuenta que al conseguir estos efectos había que contar con la posibilidad, o hasta con la certeza, de perjudicar en cierto grado otras propiedades del hormigón, y en primer lugar con la disminución de su resistencia mecánica. Esto explicaba y justificaba cierta desconfianza que se observaba hacia el uso de los aditivos.

Afortunadamente esta situación ha cambiado radicalmente en los últimos años. Al estudiar más profundamente el proceso del fraguado de cemento se ha descubierto que la adición de ciertos productos químicos producía los efectos de fluidificación, de plastificación, de dispersión del cemento y, como consecuencia, se obtenía una mejora muy notable de la calidad del hormigón.

Debido a la fluidificación se necesita una menor cantidad de agua para amasado, reduciendo la relación agua-cemento (a/c). El hormigón plastificado resulta más trabajable; con la dispersión de las partículas de cemento dentro de la mezcla se obtiene un hormigón más homogéneo; en general, se consigue un hormigón de mejor calidad, de mayor resistencia.

Como resultado de estos descubrimientos se ha producido un cambio radical en el enfoque que le dan los técnicos de la construcción en los países más avanzados referente al empleo de los aditivos. En la mayoría de los casos ya no se busca exclusivamente un efecto determinado; en cambio, lo que se pretende es mejorar en forma general las propiedades del hormigón, en busca de su calidad, para poder trabajar con un mayor coeficiente de seguridad. Factor éste, como sabemos, de suma importancia precisamente para el hormigón, ya que intervienen tantos factores en su preparación, colocación y curado, hasta obtener el material de características deseadas.

Siendo los plastificantes-fluidificadores los que reúnen precisamente los efectos indicados, son ellos los que en mayor cantidad se emplean. Solamente en casos concretos en los que se necesita una propiedad determinada se recurre a un aditivo específico.

Al nombrar como conocidos desde hace mucho tiempo los aditivos impermeabilizantes, aceleradores y anticongelantes, no quiere esto decir que sigamos empleando los mismos tipos.

Vistas las grandes ventajas que ofrecen los plastificantes, se procura, en lo posible, que los demás aditivos tengan también un componente plastificante. Disponemos, efectivamente, de aireantes-plastificantes, impermeabilizantes-plastificantes, aceleradores-plastificantes, retardadores-plastificantes, etc.

2 Plastificantes - fluidificadores

Para aclarar los efectos producidos al utilizar los plastificantes-fluidificadores hay que tener presente, como es natural, lo que ocurre durante el proceso de fraguado o, lo que es lo mismo, durante la hidratación del cemento.

2.1. Proceso de fraguado

En la *figura 1* se representa esquemáticamente el proceso de hidratación. Al ponerse en contacto el agua con el cemento se forma primero una capa de gel, el cual se transforma a continuación en cristales incrustados entre ellos mismos y con los áridos, convirtiendo la masa blanda en una piedra (5) y (15).

El agua penetra poco a poco dentro de la partícula del cemento, y la hidratación se efectúa tanto más rápidamente cuanto más fino es el grano, ya que, de esta manera, se aumenta la superficie de contacto. Pero como existen límites técnicos para la finura del grano, la única posibilidad de intensificar la humectación del cemento nos ofrece el empleo de aditivos químicos especiales.

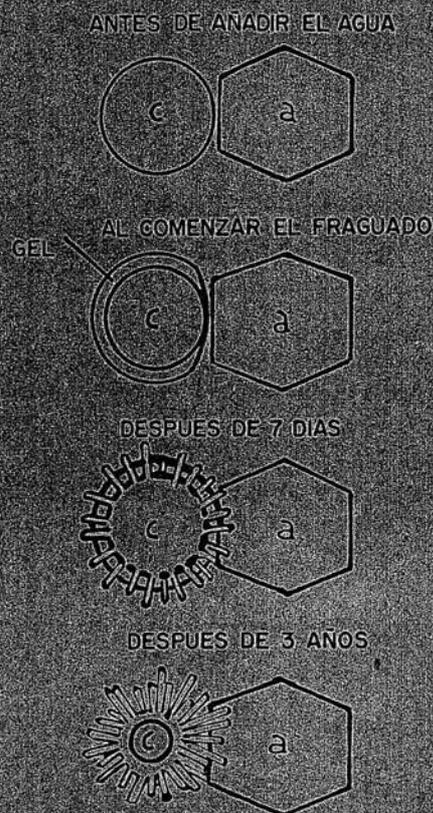
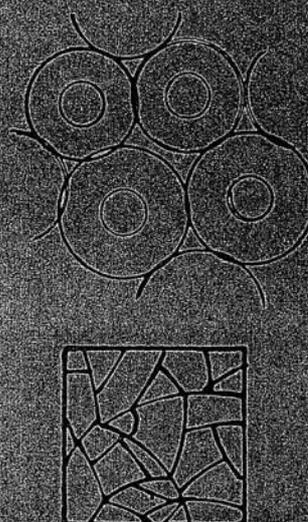


Fig. 1. Esquema del proceso de fraguado: (c) cemento; (a) áridos.

Fig. 2. Formación de conductos capilares.



La *figura 2* nos muestra otro esquema de hidratación, indicando las partículas de cemento rodeadas de agua, y el agua sobrante. Al evaporarse este agua sobrante, quedan en el hormigón conductos capilares reseñados en esta figura.

Afortunadamente ahora los técnicos de la construcción tienen presente la capital importancia de la relación a/c para la calidad del hormigón. El agua forma su tercer componente y cumple una doble misión: por un lado es necesaria para el fraguado del cemento y por otro lado para hacer la mezcla trabajable. Pero al mismo tiempo el agua representa un elemento perjudicial para la calidad del hormigón, ya que su exceso produce, al evaporarse el agua sobrante, la formación en el hormigón de conductos capilares, según queda expuesto en la *figura 2*.

Lo ideal sería amasar el hormigón con la cantidad de agua estrictamente necesaria para su fraguado; pero desgraciadamente esto no es factible, por no resultar entonces trabajable la mezcla, y se emplea siempre una cantidad de agua mayor, dependiendo ésta de la forma de colocación, o sea, de la trabajabilidad necesaria del hormigón o mortero.

Para la hidratación de 100 kg de cemento se necesita, teóricamente, sólo 18 kg de agua; relación a/c 0,18.

Pero para convertir el cemento en una pasta manejable es preciso aumentar la cantidad de agua hasta unos 25 a 30 kg; relación a/c 0,25-0,30. Como también es necesario humedecer los áridos, la relación a/c efectiva oscila, normalmente, entre 0,45 y 0,70 (8).

En el hormigón recién colocado se encuentra, por consiguiente, una cantidad muy considerable de agua que no se combina con el cemento. Este agua sobrante, al evaporarse, produce en el cemento fraguado una red de canales capilares intercomunicados y ramificados, debido a la presencia de granos de arena, adquiriendo la masa del hormigón una estructura microfisurada.

Hay que procurar, por tanto, reducir al mínimo el agua necesaria, o sea, la relación a/c , lo que se consigue solamente por adición de productos químicos especiales, que actúan como plastificantes-fluidificadores.

Con la reducción del agua se obtiene la disminución de los conductos capilares y una notable mejora de la calidad del hormigón, tal como el aumento de su resistencia a la compresión, a la abrasión, al ataque de los agentes agresivos, y también una mayor impermeabilidad.

2.2. Modo de actuar de un plastificante

En la figura 3 indicamos esquemáticamente lo que ocurre al añadir un plastificante al agua de amasado. La parte activa del plastificante la componen moléculas en forma de hilos finos que se concentran en toda la superficie de contacto, o sea, en la del cemento, del hormigón, de los áridos y de las burbujas de aire.

Un extremo del hilo repele el agua y sobresale de la misma, mientras que el otro extremo la absorbe, y, estando metido dentro del agua, la atrae hacia la superficie de los componentes de la mezcla. De esta forma se aumenta de hecho la superficie humedecida, y disminuye, por consiguiente, la cantidad de agua necesaria.

Este fenómeno, conocido como la disminución de la tensión superficial del agua, se efectúa liberando cierta cantidad de energía de trabajo, lo que se demuestra fácilmente al añadir una gotita de plastificante al agua coloreada. Sin agitarla, ésta empieza a moverse, se forman remolinos, quedando el plastificante uniformemente repartido.

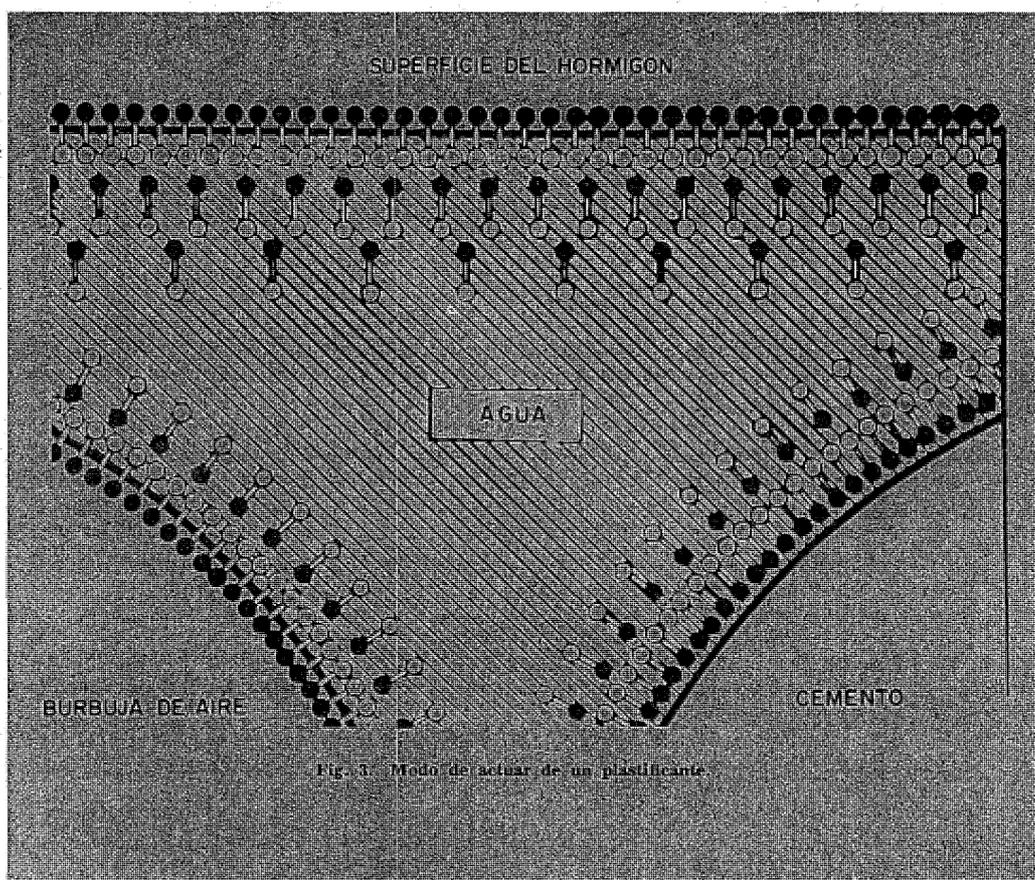


Fig. 3. Modo de actuar de un plastificante.

Este hecho tiene una gran importancia práctica, ya que el plastificante se añade en proporciones muy pequeñas, del 0,1 al 0,7 % sobre el peso del cemento, y es, naturalmente, muy importante que su reparto uniforme se logre con un mínimo de agitación.

2.3. Poder de humectación

El poder de humectación, es decir, la capacidad de humedecer, se determina en el laboratorio midiendo en dinas/cm la tensión superficial del agua con o sin adición del plastificante. A mayor tensión superficial, corresponde menor poder de humectación.

El mercurio, por ejemplo, tiene una tensión superficial muy alta, 472 dinas/cm; su gota forma una esfera, o sea, un cuerpo con un mínimo de superficie. El alcohol, en cambio, la tiene muy baja, prácticamente 0, no forma gotas y se extiende completamente sobre un plano; su poder de humectación es muy elevado.

El agua se encuentra entre ambos materiales, con una tensión superficial de 73 dinas/cm, aproximadamente; su gota forma sobre un plano una media esfera rebajada. Al añadir un plastificante en cantidad normal, baja su tensión a 40-50 dinas/cm, adquiriendo, por consiguiente, un mayor poder de humectación. Aumentando la proporción del plastificante se consigue rebajar aún más la tensión superficial del agua.

En la obra es normalmente suficiente determinar solamente el poder relativo de humectación de un plastificante, comparando el escurrimiento de distintas clases de hormigones en una mesa de sacudidas.

En hormigones de las mismas características, un plastificante de mejor calidad produce un mayor escurrimiento o, lo que es lo mismo, una mayor reducción de la tensión superficial del agua.

En la *figura 4* pueden verse los conos de dos hormigones de idénticas características, con la única diferencia de la adición de un plastificante en el de la derecha. Observamos que este último es mucho más blando y más trabajable.

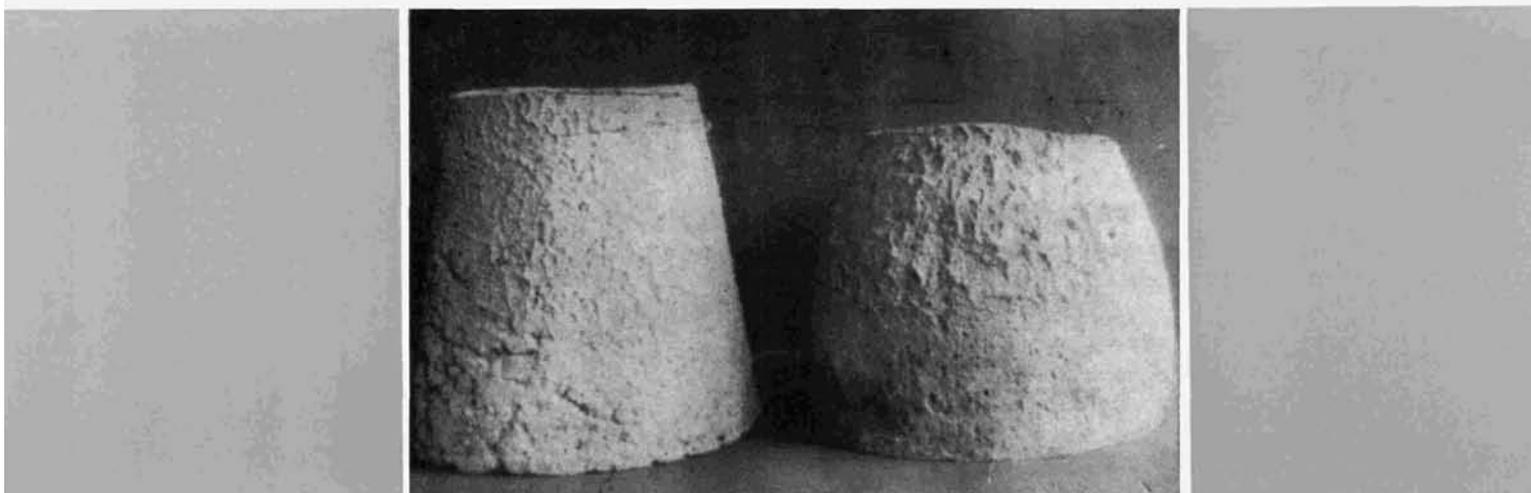


Fig. 4. Escurrimiento de hormigones con y sin el plastificante.

El efecto de un plastificante se manifiesta con mayor intensidad en hormigones ricos de cemento que en hormigones pobres; pero empleando un plastificante de buena calidad se consigue siempre mejorar notablemente también la calidad de un hormigón muy pobre en cemento.

En unos ensayos realizados en el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, utilizando hormigones de solamente 150 kg de cemento por metro cúbico, pudimos observar que conservando la misma trabajabilidad, al añadir 0,5 % de plastificante sobre el peso del cemento, la relación de *a/c* disminuyó en un 8 %, aumentando, no obstante, el escurrimiento en un 5,5 %, según lo comprobado en la mesa de sacudidas. La resistencia a la compresión aumentó a los 7 días en un 12 %, y a los 28 días en un 19 %.

Naturalmente, esta clase de ensayos nos proporcionan solamente valores relativos para comparar distintas clases de aditivos, pero son muy útiles para demostrar su eficacia, valiéndose de procedimientos sencillos y rápidos. Para esta clase de comprobación se recomienda la utilización de morteros, ya que el efecto resulta más pronunciado.

En unos ensayos realizados con morteros de 22 % de cemento y 78 % de arena en peso, y relación *a/c* de 0,53 y 0,67, respectivamente, al añadir un aditivo plastificante, en proporción de 0,5 y 0,7 % sobre el peso del cemento, el escurrimiento aumentó del 16,7 hasta el 88 %.

En la tabla siguiente resumimos el resultado de estos ensayos:

Relación <i>a/c</i>	Sin plastificante		Con plastificante		Aumento del escurrimiento (%)
	Plastificante (%)	Escurrimiento (%)	Plastificante (%)	Escurrimiento (%)	
0,53	0	24	0,5	28	+ 4 = + 16,7
0,60	0	41	0,5	57	+ 16 = + 39
0,67	0	64	0,5	94	+ 47 = + 47
0,53	0	24	0,7	45	+ 21 = + 88
0,60	0	41	0,7	73	+ 32 = + 78

Como demuestra esta tabla, el efecto del plastificante empleado es sumamente intensivo en mezclas ricas en cemento. Al añadir un plastificante se consigue la misma consistencia deseada del hormigón, pero empleando una menor cantidad de agua, del orden del 10 al 15 %. Al mismo tiempo, y a pesar de esta reducción de la relación *a/c*, resulta el hormigón más plástico, o sea, más trabajable.

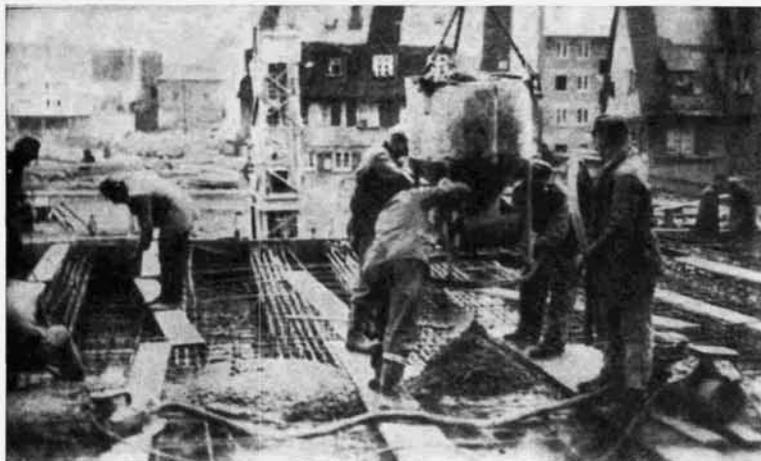


Fig. 5

Se recomienda no hacer los hormigones demasiado fluidos para evitar el peligro de su disgregación durante el transporte. El hormigón no debe fluir de la hormigonera, sino caer en trozos. Conviene que forme un cono ideal de 45° (fig. 5).

También el hormigón bombeado debe formar una masa compacta y romperse de vez en cuando, de acuerdo con la figura 6.

Dada la importancia del tiempo de vibrado para la calidad del hormigón, al mejorar su trabajabilidad debido a la adición de un plastificante, permite reducir, en algunos casos hasta la mitad, el tiempo normal de vibrado, con la economía correspondiente en energía y horas de trabajo.

2.4. Dispersión

Otro efecto muy importante de un plastificante representa su poder de dispersión. Al absorber la superficie del cemento las moléculas que forman la parte activa del plastificante, se produce una carga electrostática. Las partículas del cemento quedan cargadas negativamente, y al repelerse mutuamente se produce una dispersión y, por consiguiente, su reparto más uniforme dentro de la mezcla.

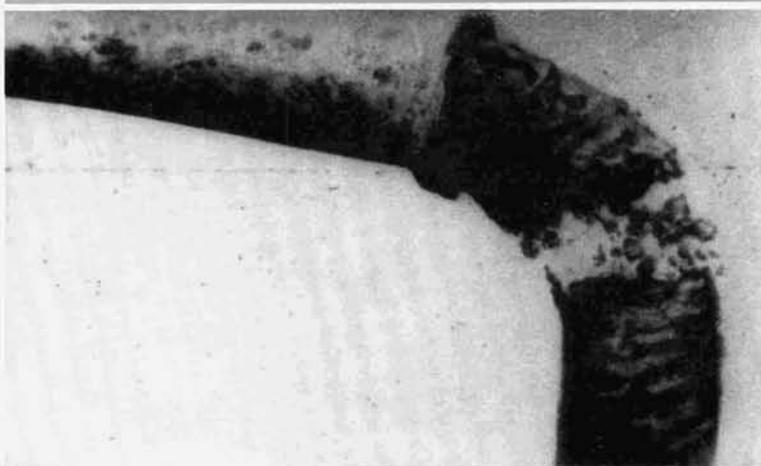


Fig. 6

Al estar las partículas de cemento mejor repartidas, se aumenta también la facilidad de su humectación, resultando, además, el hormigón más homogéneo.

La demostración del efecto de dispersión nos la facilita la figura 7, que representa dos fotografías de una papilla de cemento preparada con mucha agua.

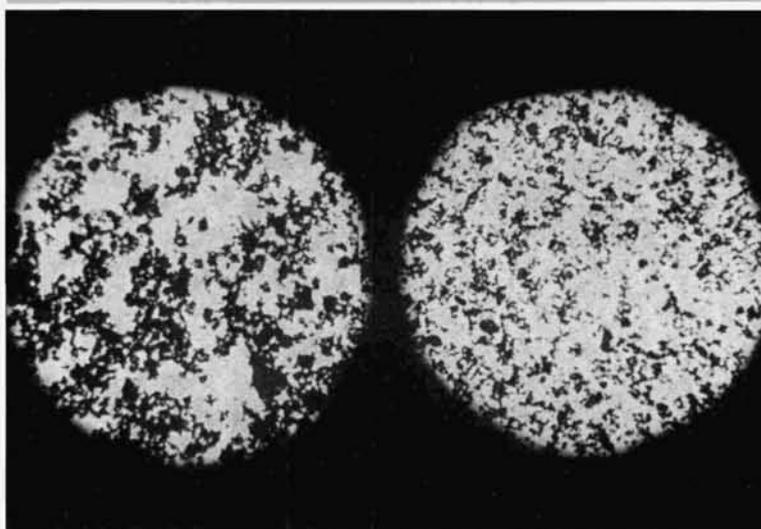


Fig. 7

Observamos en la fotografía de la izquierda una aglomeración del cemento en ciertos lugares, quedando grandes partes de la superficie sin cemento, lo que demuestra que su dispersión era deficiente.

A continuación, se añadió una gota de plastificante a la mezcla sin removerla; se notó al poco tiempo un cierto movimiento de las partículas del cemento con la tendencia de separarse y dispersarse, debido a

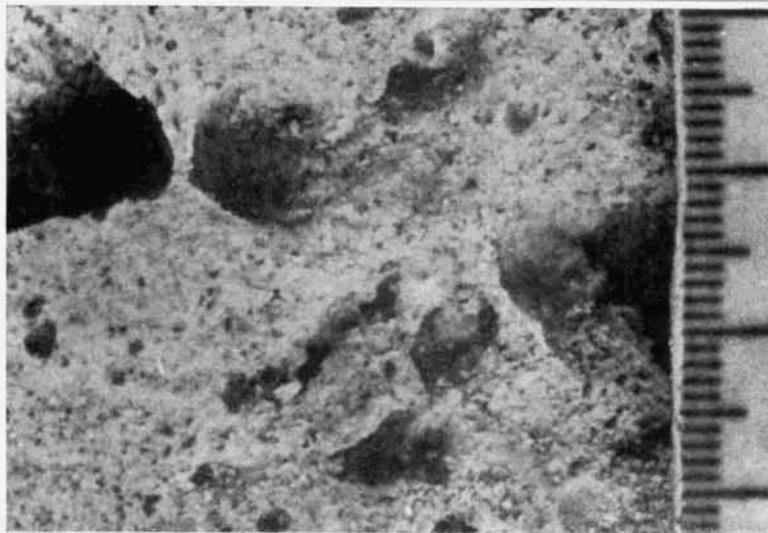


Fig. 8

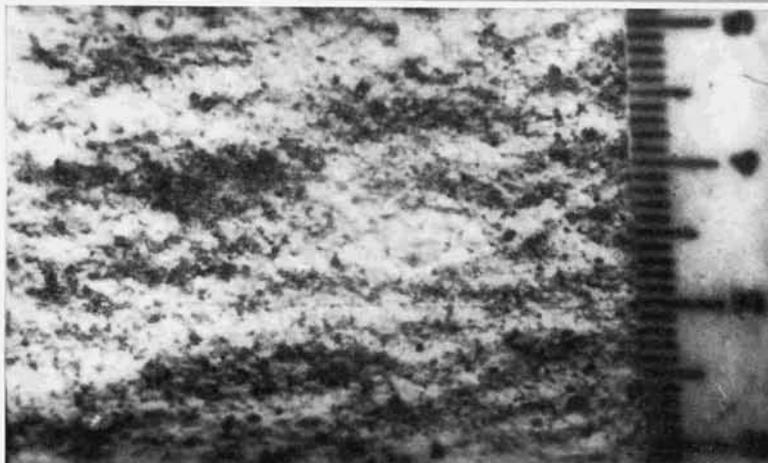


Fig. 9



Fig. 10

la carga electrostática negativa que recibieron al absorber la parte activa del plastificante, según lo expuesto anteriormente. La superficie de la papilla adquirió un aspecto mucho más uniforme, tal como lo demuestra la fotografía de la derecha.

Las figuras 8 y 9 son fotografías, obtenidas valiéndose de un microscopio (escala entre 5 y 8 mm), de la superficie de dos morteros, una vez fraguados, de idéntica composición, con relación a/c de 0.5 solamente, y habiendo añadido un plastificante al de la figura 9.

Observamos muchos huecos de tamaño relativamente grande en la figura 8; en cambio, en la figura 9 solamente notamos huecos capilares formados al evaporarse el agua sobrante. La superficie de este mortero presenta un aspecto mucho más uniforme y homogéneo.

Una comparación entre hormigones de distinta calidad nos facilita la fotografía de su superficie de rotura (fig. 10). El hormigón del segundo término tiene numerosas coqueras; la rotura se produjo fuera de la grava, casi sin afectar a la misma.

Por el contrario, el hormigón del primer plano tiene una estructura muy uniforme, no se observan huecos apreciables; la rotura se efectuó a través de la grava.

2.5. Resistencia del hormigón

Hemos expuesto los tres efectos fundamentales que debe reunir un aditivo plastificante de calidad. Debido a la plastificación resulta el hormigón más trabajable; a causa de la fluidificación se reduce la relación a/c , disminuyen los poros y conductos capilares y, como resultado de la dispersión del cemento, intensificamos su humectación y obtenemos el hormigón más homogéneo.

Es lógico esperar una influencia favorable de estos efectos en el hormigón fraguado. Efectivamente,

te, y según lo demuestran los ensayos, observamos, al añadir un plastificante, un aumento de resistencia, entre el 10 y el 20 %.

En la *figura 11* están marcadas las curvas de resistencia a la compresión y a la tracción de dos hormigones de idéntica composición, salvo la adición de un plastificante y la correspondiente reducción de su relación a/c . Las curvas a trazos corresponden al hormigón sin aditivo.

Conservando la misma trabajabilidad, la reducción de la relación a/c es más pronunciada en los hormigones de consistencia fluida, y disminuye a medida que los hormigones se hacen más secos. El empleo de plastificante está indicado principalmente en hormigones vibrados, de consistencia relativamente fluida.

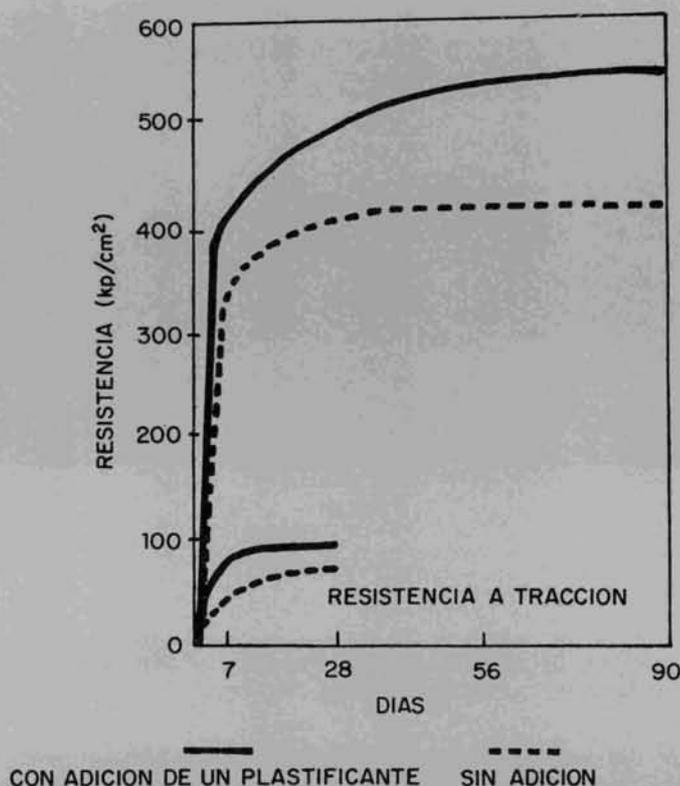


Fig. 11. Resistencia de hormigones con o sin plastificante.

Aparte del aumento de la resistencia, al resultar la estructura del hormigón más homogénea y con menor volumen de huecos se consigue una mayor impermeabilidad, así como también una más elevada resistencia a la abrasión. Un procedimiento sencillo para demostrar esto último consiste en cubrir el hormigón con una plancha de hierro perforada, siendo el diámetro del hueco de unos 10 cm, y someterlo durante un tiempo al desgaste por medio de un chorro de arena.

En la *figura 12* vemos la fotografía de dos hormigones sometidos a esta prueba. Su composición es idéntica, solamente que el de la derecha tiene 15 % menos de agua, debido a la adición de un plastificante. Se observa claramente que este último ha sufrido mucho menos desgaste que el hormigón sin plastificante. Naturalmente, esta prueba nos facilita únicamente valores relativos para comparar la resistencia a la abrasión de distintas clases de hormigones.

3 Aireantes y aireantes - plastificantes

Al emplear aditivos aireantes se pretende ocluir, dentro de la masa del hormigón, aire adicional en forma de burbujas minúsculas, esféricas de 50-300 μ , estables y uniformemente repartidas, para hacer el hormigón resistente contra los efectos de las heladas. También se utilizan para fabricar hormigones aligerados.

Debido a la oclusión de aire en la forma indicada, se interrumpe la continuidad de los conductos capilares, por lo que se obstaculiza la penetración de agua y de sales de deshielo dentro del hormigón. También ofrecen estas burbujas espacio de expansión al aumentar de volumen el agua al helarse.

El empleo de los aditivos aireantes tiene su origen en los EE. UU. de América, y el descubrimiento de sus efectos beneficiosos se debe realmente a una casualidad. Con ocasión del hormigonado de una autopista sobrevino de repente, en una madrugada del año 1938, una helada completamente imprevisible para aquella época del año, causando graves daños en un hormigón recién colocado que cumplía perfectamente las exigencias de las normas establecidas (9).

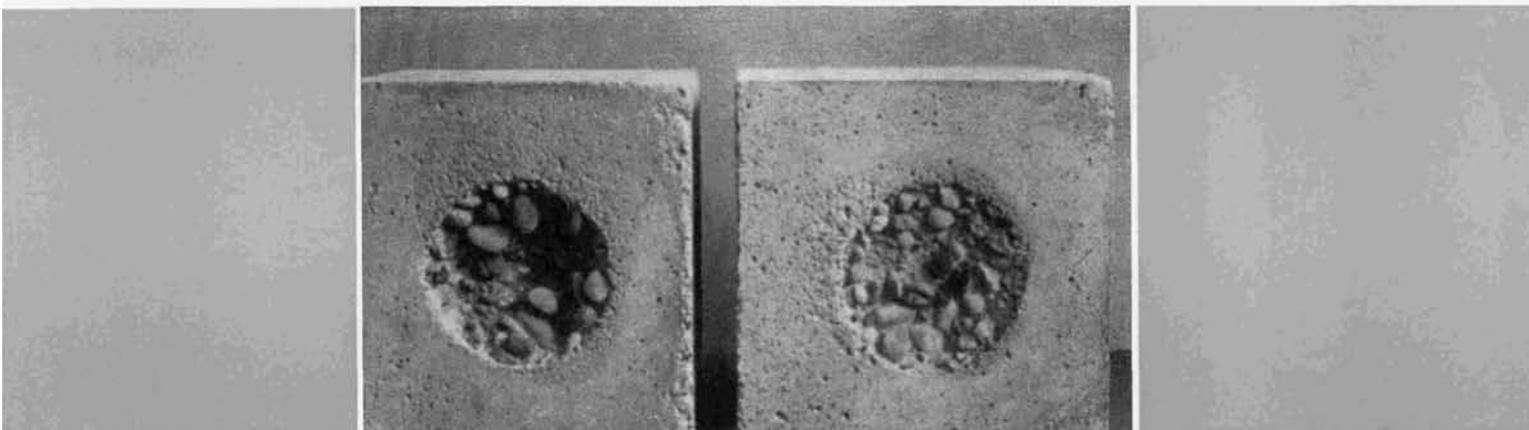


Fig. 12

Pero llamó la atención el hecho de que una parte de aquel sector no quedó afectado por dicha helada, a pesar de tratarse de hormigón de idénticas características, colocado prácticamente al mismo tiempo, con la única diferencia de la distinta procedencia del cemento.

Al profundizar la investigación para aclarar las causas de este distinto comportamiento, se averiguó que el cemento utilizado para el hormigón que quedó intacto contenía, en proporción muy pequeña, ciertas resinas y aceites vegetales que fueron añadidos en plan de ensayo al clínker normal durante el proceso de molido, con el fin exclusivo de mejorar el rendimiento de la fabricación.

Se demostró que la adición de los citados productos al cemento produce, durante el proceso de amasado, la oclusión de minúsculas y estables burbujas de aire dentro de la mezcla, las cuales tienen la propiedad de cortar los conductos capilares que se forman dentro del hormigón fraguado, haciéndolo más resistente contra los efectos de las heladas.

Una vez conocido este hecho, se comprende que los técnicos de la construcción empezaron a prestar el debido interés al empleo de los aditivos aireantes.

Al tratar de la hidratación del cemento hemos indicado que para amasar el hormigón o el mortero se emplea siempre para hacer la mezcla trabajable una cantidad de agua muy superior a la estrictamente necesaria para el fraguado del cemento empleado.

En el hormigón recién colocado se encuentra, por consiguiente, una cantidad muy considerable de agua que no se combina con el cemento. Esta agua sobrante produce al evaporarse una red de canales capilares adquiriendo la masa del hormigón una estructura microfisurada.

A través de esta red capilar, y debido a la llamada fuerza capilar, el agua del exterior puede penetrar dentro del hormigón y subir por encima del nivel freático, tal como está indicado en la *figura 13*.

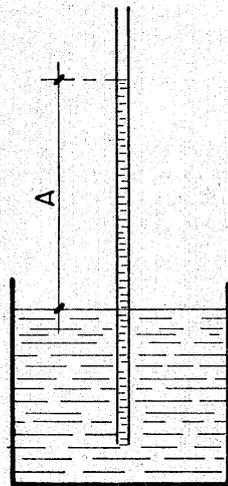


Fig. 13. Subida de agua por capilaridad.

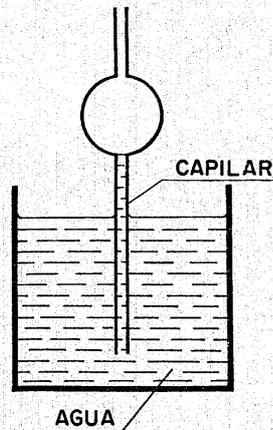


Fig. 14. Efecto de una burbuja de aire sobre la subida de agua.

La altura A de esta subida depende del diámetro d del tubo capilar y de la tensión superficial t del líquido. El peso P de la columna del líquido está sostenido por la fuerza capilar C :

$$P = C$$

$$P = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot P_e \cdot A}{4} \quad (P_e = \text{Peso específico})$$

$$C = \pi \cdot d \cdot t$$

$$\frac{\pi \cdot d^2 \cdot P_e \cdot A}{4} = \pi \cdot d \cdot t$$

$$A = \frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot t}{\pi \cdot d^2 \cdot P_e}$$

$$A = \frac{4 \cdot t}{d \cdot P_e}$$

La altura A de la subida es proporcional a la tensión superficial del líquido e inversamente proporcional a su peso específico y al diámetro del tubo capilar. Al menor diámetro d , corresponde una mayor subida A .

El agua potable tiene normalmente una tensión superficial t de 73 dinas/cm; su peso específico en términos físicos y con la aceleración de gravedad al nivel del mar es $P_e = 981$ dinas/cm³. En un conducto capilar de un diámetro $d = 10 \mu = 0,01$ mm = 0,001 cm, la altura A de la subida del agua resulta:

$$A = \frac{4 \times 73 \text{ dinas} \times 1 \text{ cm}^3}{1 \text{ cm} \times 0,001 \text{ cm} \times 981 \text{ dinas}} = 297 \text{ cm.}$$

Para un conducto capilar de un diámetro $d = 150 \mu = 0,015$ cm, el valor de A se reduce a:

$$A = 19,7 \text{ cm.}$$

Debido al empleo de aditivos aireantes se ocluyen dentro de la masa del hormigón burbujas de aire de forma esférica, de un diámetro entre 50 y 300 μ , que cortan los conductos capilares, tal como se indica esquemáticamente en la figura 14 (la cual no guarda la relación proporcional de las dimensiones), impidiendo así que siga subiendo el agua.

Teniendo presente que los diámetros reales de los conductos capilares pueden ser muy inferiores a las $10\ \mu$, se comprende la influencia tan favorable que ejerce esta oclusión de aire para hacer el hormigón más resistente contra la penetración de agua y, por consiguiente, contra los efectos destructivos de las heladas y la acción de los agentes agresivos contenidos en el agua, como las sales de deshielo.

Para que actúen con plena eficacia es necesario que las burbujas de aire sean estables, uniformemente repartidas dentro de la masa del hormigón y que la distancia entre ellas no sobrepase un cierto límite. De acuerdo con los ensayos realizados, se recomienda que ningún punto dentro de la masa del cemento fraguado debe estar distanciado más de $250\ \mu$ de una burbuja de aire (fig. 15) (17).

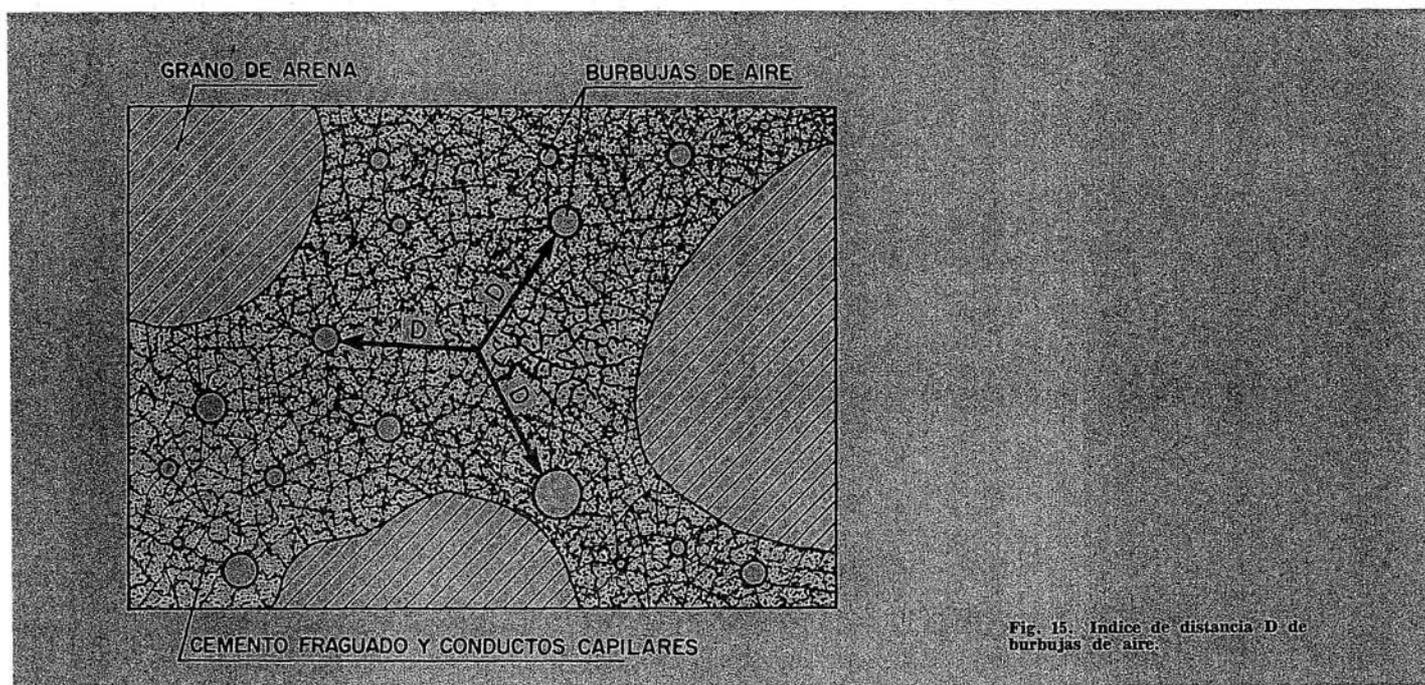


Fig. 15. Índice de distancia D de burbujas de aire.

La fijación del límite de separación entre las burbujas de aire, su índice de distancia, es muy importante, ya que éstas no obstaculizan solamente la penetración de agua, sino que ofrecen también un espacio de expansión al helarse el agua.

Como es sabido, el agua aumenta de volumen al convertirse en hielo, lo que ocurre a partir de $+4^{\circ}\text{C}$, ejerciendo una presión creciente sobre las paredes de sus conductos, a medida que baja la temperatura. En la figura 16 representamos la curva de la presión del hielo sobre el hormigón endurecido en relación con la temperatura, establecida por Venuat y Papadakis, París, 1961 (9).

Esta presión debida a la dilatación es precisamente la causa de la acción destructiva del hielo sobre el hormigón. Al ofrecer las burbujas del aire ocluido un espacio vacío para facilitar esta dilatación, atenúan la presión ejercida y aumentan, de esta forma, la resistencia del hormigón aireado contra las consecuencias de las heladas.

Aparte de los efectos indicados en el hormigón fraguado, la oclusión de aire ejerce también una influencia favorable sobre el hormigón fresco. Las burbujas minúsculas, esféricas y estables actúan de hecho como una especie de rodamiento de bolas, como un plastificante, facilitando el deslizamiento de los áridos y, por consiguiente, se necesita menos agua para hacer el hormigón trabajable, lo que permite una reducción de la relación a/c del orden del 5-10 %.

Por otro lado, tenemos que tener presente que la oclusión de aire adicional influye desfavorablemente

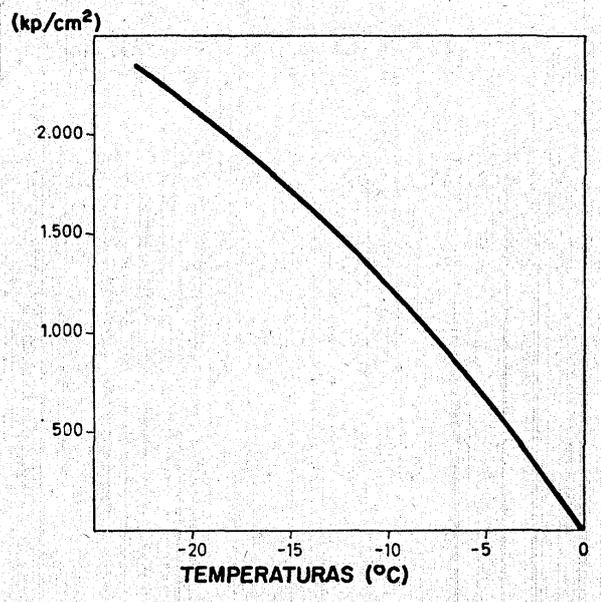


Fig. 16. Acción del hielo sobre el hormigón endurecido (Venuat & Papadakis. París, 1961).

sobre la resistencia mecánica del hormigón. Tal como lo refleja, por ejemplo, la fórmula de Feret, la resistencia del hormigón está en relación inversa con la cantidad de agua y de aire:

$$R = K \left(\frac{1}{1 + \frac{A + a}{C}} \right)^2,$$

donde:

K es un coeficiente.

A , a , C , los volúmenes del agua de amasado, del aire ocluido y del cemento, respectivamente (8).

A título de información, indicamos que para cada 1% de aire ocluido hay que contar con una disminución de la resistencia a la compresión de un 3-4%. Ahora bien, debido al efecto plastificante de las burbujas de aire tenemos la posibilidad de reducir la relación a/c , lo que compensa, por lo menos en gran parte, esta influencia desfavorable.

De acuerdo con la experiencia, la cantidad recomendable de aire ocluido es de un 4%; se señala como muy importante no sobrepasar excesivamente esta cantidad para no rebajar demasiado la resistencia del hormigón. Para un hormigón determinado, la cantidad de aire que debe ocluir para conseguir los mejores resultados depende del tamaño máximo del árido empleado. Al mayor tamaño, corresponde una menor cantidad de aire.

En Alemania se recomiendan los siguientes valores que coinciden, prácticamente, con los del «Manual Norteamericano del Hormigón»:

Tamaño de los áridos (mm)	Aire ocluido (%)
0-30	3,5-5
0-70	3-4
0-100	3-3,5
0-150	2,5-3,5

Tenemos que insistir que, aparte del volumen global del aire ocluido, es de suma importancia la «calidad» de las burbujas. Su tamaño debe estar comprendido entre 50 y 300 μ ; su distribución, uniforme, y su «índice de separación», inferior a 250 μ , según lo tratado anteriormente.

Citamos, como ejemplo, que en unos ensayos realizados se comprobó que utilizando un aditivo aireante se consiguió una oclusión de aire del 4,12 %, con un tamaño medio de las burbujas de 130μ y con el «índice de separación» de 166μ , cumpliendo estos valores ampliamente las condiciones indicadas (17).

Los aditivos aireantes se presentan en forma de líquido que se añade al agua de amasado. Su actuación es muy enérgica y se necesitan cantidades muy pequeñas, que oscilan normalmente entre el 0,06 y 0,15 % sobre el peso del cemento, para ocluir la cantidad de aire indicado en el cuadro citado.

A una cantidad determinada del aditivo aireante no corresponde siempre el mismo volumen del aire ocluido; éste depende de la composición de la mezcla, de la granulometría de los áridos y, sobre todo, de la clase de los mismos. A título informativo, se puede calcular que para los áridos de canto rodado se necesita una doble cantidad y más de aireante que para los áridos procedentes del machaqueo. Para el contenido de aire en el hormigón fraguado influyen también: la consistencia del hormigón, la temperatura ambiente, la duración del vibrado y la clase del transporte (4).

Por todo lo expuesto, es importante controlar periódicamente el contenido de aire para asegurar la calidad del hormigón. Este control se efectúa valiéndose de aparatos sencillos, como el neumómetro, que, actuando por presión, indica el contenido de aire en el hormigón fresco.

3.1. Aireantes - plastificantes

Aparte de los aireantes puros, disponemos también de aireantes-plastificantes donde la componente aireante es menos activa, siendo, en cambio, la componente plastificante mucho más pronunciada. Comparado con un aireante puro, el consumo de un aireante-plastificante es mucho más elevado, del orden de 0,7 % sobre el peso del cemento. Pero, por otro lado, contamos con todas las ventajas de un plastificante-fluidificador para mejorar la calidad del hormigón y aumentar, sobre todo, su resistencia, lo que permite un cierto ahorro en la cantidad del cemento.

Siendo su efecto aireante menos enérgico, al sobrepasar la dosificación del aireante-plastificante, no aumenta considerablemente el volumen del aire ocluido y no es necesario su control riguroso, lo que representa una ventaja muy importante.

3.2. Resistencia a la compresión

El Dr. Ingeniero alemán W. Albrecht publicó un interesante estudio sobre los efectos que produce en el hormigón el empleo de los aditivos (2). Debido a su cargo de Presidente de la Comisión de los Estados Federales de Alemania para los Ensayos de los Aditivos para el Hormigón, tenía a su disposición los resultados de los ensayos oficiales obligatorios realizados con estos productos.

Con los aireantes-plastificantes se obtuvieron aumentos de resistencia entre 0 y + 15 %. Con los aireantes puros se observó, en la mayoría de los casos, una disminución de la resistencia en un - 10 % por término medio, debido al mayor volumen del aire ocluido y a la menor posibilidad de la reducción de la relación *a/c*.

Por cierto, con los plastificantes-fluidificadores se obtuvieron, en casi todos los casos, aumentos de la resistencia entre un + 8 y un + 20 %.

3.3. Hormigones aligerados

Los aireantes puros se utilizan también para aligerar el peso del hormigón, sea con objeto de reducir la carga propia de la estructura, sea con el fin de conseguir hormigones sumamente ligeros para establecer las pendientes y lograr un aislamiento térmico, pudiendo llegar hasta unos 0,5 de peso por volumen.

En este último caso, no es suficiente añadir el aireante al agua de amasado, sino que es preciso también convertirlo en una espuma antes de proceder al amasado, por lo que se necesita utilizar una instalación espumante especial.

4 Aditivos impermeabilizantes

Necesitamos conseguir hormigones y morteros impermeables, en primer lugar para impedir el paso del agua o su absorción, pero también con el fin de hacerlos lo más resistentes posible contra la penetración de agentes agresivos que puedan producir la descomposición de la estructura del hormigón.

Disponemos de dos procedimientos diferentes para lograr esta impermeabilidad: El primero consiste en revestir la superficie del hormigón con una capa impermeable, normalmente a base de materiales bituminosos, si no se trata de ciertos agentes agresivos, como gasolina, aceites, etc., donde hay que recurrir, naturalmente, a los recubrimientos especiales. En las publicaciones del autor nos ocupamos detalladamente de este procedimiento (12) y (13). El segundo se basa en hacer impermeable toda la masa del hormigón o del mortero, o sea, la impermeabilización integral de los mismos, lo que se alcanza normalmente añadiendo a la mezcla un aditivo impermeabilizante adecuado.

Sabemos que la condición primordial para obtener un hormigón impermeable, es una adecuada composición granulométrica de los áridos y la cantidad necesaria de cemento: unos 300 kg/m³ como mínimo para los hormigones y unos 450 kg/m³ para los morteros. Es posible conseguir un hormigón impermeable empleando solamente cemento, áridos con una granulometría adecuada y, esto sí es importantísimo, la cantidad mínima de agua.

Pero este procedimiento resulta a menudo demasiado costoso, por lo que se recurre al empleo de un aditivo impermeabilizante, procedimiento éste generalizado al tratarse de morteros.

Además, debido al mejor conocimiento de la actuación de los aditivos, unido a los progresos conseguidos en los últimos años en la elaboración y en la composición de los mismos, disponemos actualmente de productos que, aparte de hacer el hormigón impermeable, tienen otros efectos favorables para la calidad del hormigón en general.

4.1. Propiedades que debe reunir un aditivo impermeabilizante de calidad

Al emplear un aditivo impermeabilizante, procuramos corregir una deficiencia del hormigón y, en este caso especial, su excesiva permeabilidad.

Contando con una cantidad de cemento suficiente y con una composición granulométrica de los áridos aceptable, las causas de la permeabilidad se deben, principalmente, a la mala trabajabilidad de la mezcla y al exceso de agua de amasado. Una mezcla difícilmente trabajable, de consistencia áspera, facilita la formación de poros y huecos. Un exceso de agua de amasado, tiene como consecuencia la formación de numerosos conductos capilares dentro de la masa del hormigón.

Por consiguiente, tenemos marcados los siguientes caminos para aumentar la impermeabilidad del hormigón:

- 1) Hacerlo más homogéneo y más trabajable.
- 2) Reducir la relación *a/c*.
- 3) Cortar los conductos capilares.
- 4) Rellenar los poros.

De acuerdo con lo tratado anteriormente, sabemos que debido a los efectos de plastificación, de fluidificación, de dispersión y de oclusión de aire, conseguimos un hormigón más homogéneo y más trabajable, reducimos la relación *a/c* y cortamos los conductos capilares. Es evidente que para aumentar la eficacia de un aditivo impermeabilizante es muy importante que, aparte de rellenar los poros, tenga también algunos o todos de los citados efectos.

Efectivamente, y gracias a los progresos en la técnica de los aditivos realizados en los últimos años, disponemos ahora de aditivos impermeabilizantes que reúnen estas propiedades, lo que nos permite mejorar la calidad del hormigón, haciéndolo impermeable, y aumentar al mismo tiempo su resistencia.

Referente al relleno de los poros, se conoce la influencia favorable para la impermeabilidad del hormigón de los productos, tales como bentonita, trass, etc., los cuales aumentan de volumen en contacto con el agua. Es conveniente que el impermeabilizante actúe también de una manera parecida, que se hinche al absorber el agua, cerrando los poros y los conductos capilares, sobre todo en presencia de agua a presión. De esta manera no actúa como un hidrófugo, no repele el agua, sino que al principio absorbe una pequeña cantidad, antes de poder actuar con plena eficacia (3) y (14).

4.2. Resistencia de hormigón

Una de las primeras condiciones que se exigen de un aditivo es que no debe disminuir la resistencia del hormigón. Solamente en casos determinados, y salvo otro remedio, se admite una cierta reducción de la resistencia.

Al tratar de los aditivos aireantes indicamos que la oclusión de aire adicional disminuye la resistencia del hormigón a la compresión.

¿Qué ocurre con los aditivos impermeabilizantes que tienen también un efecto aireante? Sabemos que hay un arrastre adicional de aire, pero esta clase de aditivos impermeabilizantes tienen normalmente un efecto plastificante muy pronunciado, y la posibilidad de reducir la relación a/c es lo suficientemente amplia para compensar sobradamente la disminución de la resistencia debido al efecto desfavorable derivado del arrastre del aire.

En la tabla 1 están indicados los resultados de los ensayos realizados con dos clases de hormigones de 240 kg/m³, unos de cemento portland y otros de altos hornos, añadiendo un aditivo impermeabilizante a base de materiales albuminoides en la proporción de 15 cm³/kg de cemento, siendo la proporción normal solamente de 0,7 % sobre el peso del cemento (3) y (14).

TABLA 1. ENSAYOS DE LA RESISTENCIA

Aditivo impermeabilizante	Cemento portland 240 kg/m ³		Cemento de altos hornos 240 kg/m ³	
	0	15 cm ³ /kg de cemento	0	15 cm ³ /kg de cemento
Resistencia a la compresión A los 28 días (cubos de 20 cm de arista)	266 kp/cm ²	295 kp/cm ²	265 kp/cm ²	313 kp/cm ²
Diferencia		+ 12,5 %		+ 18 %
Peso m ³ de hormigón fresco	2.300 kg	2.190 kg	2.295 kg	2.174 kg
Aire ocluido	2,5 %	8,7 %	3,0 %	9,1 %
Agua/cemento	0,795	0,615	0,76	0,61

El aire ocluido aumentó desde 2,5 hasta 8,7 % y desde 3,0 hasta 9,1 %, respectivamente, con la disminución correspondiente del peso por volumen. Sin embargo, y a pesar de la cantidad exagerada del aditivo, se observó un aumento de la resistencia a la compresión a los 28 días en + 12,5 y + 18,0 %, respectivamente.

Esta notable mejora de la resistencia era debida al efecto plastificante del aditivo y a la posibilidad de reducir la relación a/c desde 0,795 hasta 0,615 y desde 0,760 hasta 0,610, respectivamente, pero conservando, lo que es importante, la misma trabajabilidad del hormigón.

En la citada publicación del Dr. Ing. W. Albrecht se trata también del resultado de los ensayos realizados con distintas clases de aditivos impermeabilizantes (2).

Se ensayaron un total de 37 productos, 26 con hormigones de cemento portland y de altos hornos, los otros 11 solamente con cemento portland. En el primer grupo, 8 productos arrojaron como resultado un aumento de la resistencia a la compresión a los 28 días, lo mismo para el cemento portland que para el de altos hornos. Otros 7 aditivos produjeron una disminución de la resistencia con el cemento portland y, en cambio, un aumento en el de altos hornos. Los 11 restantes dieron una disminución de la resistencia en ambas clases de cemento.

En el segundo grupo se observó un aumento de la resistencia con 3 productos, mientras en los 8 restantes se apreció una disminución.

Los aumentos de la resistencia en los ensayos referidos alcanzaron hasta un + 20 %, aproximadamente, y las disminuciones llegaron hasta un - 20 %, también aproximadamente.

Los resultados de los ensayos publicados por el Dr. Ing. W. Albrecht demuestran que existe una diferencia muy amplia en la calidad de aditivos impermeabilizantes, por lo que se recomienda la selección correspondiente en el empleo de los mismos.

4.3. Impermeabilidad

En la tabla 2 indicamos los resultados de los ensayos de impermeabilidad efectuados con hormigones de 240 kg/m³, empleando probetas en forma de placas de 20 × 20 cm² y 12 cm de espesor, y añadiendo igualmente un aditivo impermeabilizante a base de materiales albuminoides en la proporción de 8,0 cm³ por 1 kg de cemento. En las placas sin el aditivo se produjo un goteo después de estar sometidas 20 horas a la presión de 1 kp/cm² y después de 3 horas con la presión de 3 kp/cm². En cambio, no se observó ningún goteo en las placas con el aditivo (3) y (14).

TABLA 2. ENSAYOS DE LA IMPERMEABILIDAD

Aditivo impermeabilizante	0		8,0 cm ³ /kg de cemento	
Cemento	239 kg/m ³		238 kg/m ³	
Agua	188 l/m ³		153 l/m ³	
Agua/cemento	0,785		0,64	
Presión	1 kp/cm ²	3 kp/cm ²	1 kp/cm ²	3 kp/cm ²
Goteo después de	20 horas	3 horas	no hay goteo	no hay goteo
Resistencia a la compresión (cubos de 20 cm de arista)	211 kp/cm ²		257 kp/cm ²	
Diferencia			+ 28 %	
Aire ocluido	3,5 %		8,0 %	

También se llevaron a cabo, con los mismos hormigones, ensayos de la resistencia a la compresión a los 28 días en probetas cúbicas de 20 cm de arista. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

211 kp/cm² en los hormigones sin el aditivo y 257 kp/cm² en los hormigones con el aditivo, lo que representa un aumento en un + 28 %. Este aumento tan elevado fue debido, sobre todo, a la posibilidad de reducir la relación *a/c* desde 0,785 hasta 0,640, o sea, en un 18,7 %.

En la *figura 17* se indica un procedimiento sencillo y de fácil ejecución para hacer visible, en plan de demostración, el efecto de un aditivo impermeabilizante. Se necesitan solamente una pequeña pila eléctrica y un amperímetro.

El hueco practicado en los distintos bloques de hormigón se llena con agua, y la posición de la aguja del amperímetro nos indica el grado relativo de humedad de estos hormigones. Para aumentar la conductibilidad se recomienda en vez de utilizar agua pura, emplear una solución de cloruro de sodio al 10 % de concentración.

Se trata, naturalmente, de un procedimiento puramente demostrativo. Para comprobar la eficacia de un aditivo impermeabilizante, hay que efectuar los ensayos con agua a presión.

Es comprensible el recelo que se observa entre algunos técnicos en lo que se refiere al empleo de aditivos impermeabilizantes para el hormigón. Pero seleccionando debidamente el producto, sobre todo respecto a su efecto plastificante y la posibilidad de la reducción de la relación *a/c*, se puede tener la seguridad de no evitar solamente la disminución de la resistencia, sino, al contrario, de conseguir un considerable aumento de la misma.

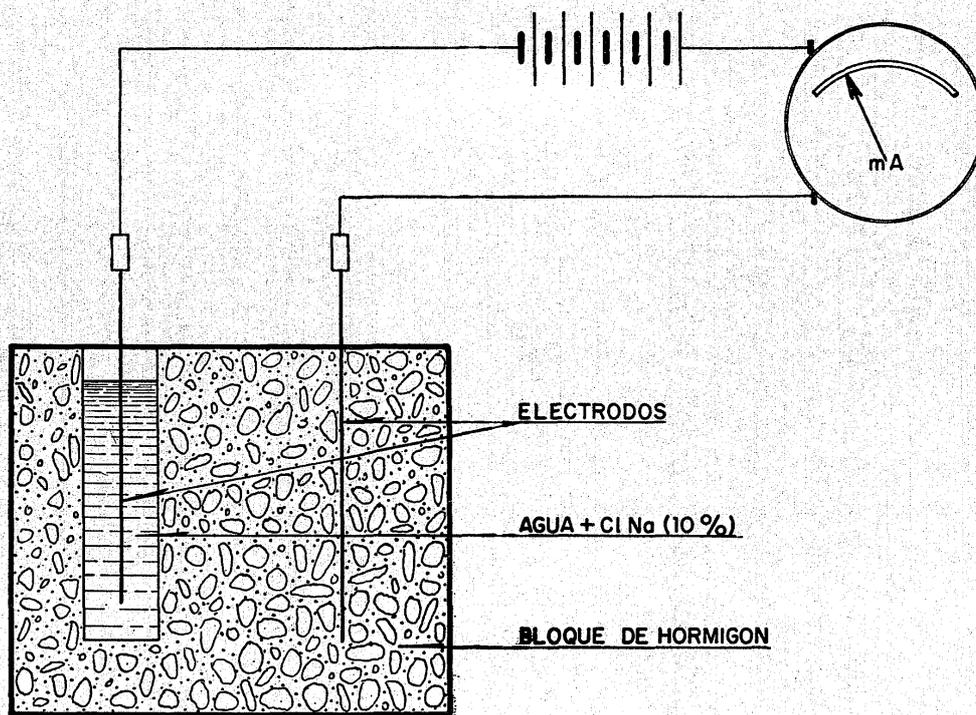


Fig. 17. Medida de la permeabilidad.

5 Aceleradores y anticongelantes

A los no familiarizados con los problemas de la construcción, quizás pueda parecer extraño que tratamos los aditivos aceleradores y anticongelantes bajo el mismo epígrafe. Pero sabemos que al emplear un anticongelante no pretendemos conseguir concretamente que el agua de amasado no se hiele al bajar la temperatura por debajo de 0°C, tal como buscamos, por ejemplo, para el agua de los radiadores. Sabemos que añadir al agua de amasado ciertos productos químicos para rebajar su punto de congelación, puede tener para el hormigón efectos desastrosos.

Lo que pretendemos es lograr que se inicie y siga el proceso de fraguado a pesar de la temperatura ambiente baja, para lo cual se necesita calor. La hidratación del cemento está acompañada de producción de calor en cantidad suficiente en circunstancias normales. Pero con temperatura ambiente alrededor de 0°C, el calor producido resulta deficiente y queda paralizado el proceso de fraguado.

Acelerando el fraguado aumentamos la producción de calor, y dosificando la cantidad de acelerador de acuerdo con la temperatura ambiente nos permite amoldarnos a las circunstancias de la obra.

No vamos a extendernos en este tratado sobre las demás precauciones que hay que tomar para hormigonar en invierno y que consisten, principalmente, en las medidas necesarias para conservar el calor producido.

¿Qué ocurre con el hormigón al acelerar su fraguado? Hemos visto en la *figura 1* la representación esquemática del proceso del fraguado. La capa de gel que se forma en contacto del cemento con el agua y que rodea la partícula del cemento, se convierte poco a poco en cristales duros y resistentes. Al acelerar este proceso, el hormigón adquiere una resistencia inicial más elevada, pero, por otro lado, la capa cristalina obstaculiza el paso del agua hacia el núcleo de la partícula de cemento. Una parte más o menos grande del cemento queda sin fraguar, lo que significa de hecho para el hormigón una rebaja de su contenido en cemento, con la consiguiente reducción de la resistencia.

En la *figura 18* están representadas las curvas de resistencia relativa, con distintas dosificaciones de acelerador. Al añadir una cantidad exagerada, observamos que a las 6 horas el hormigón supera en un 600% la resistencia del hormigón sin acelerador; en cambio, su resistencia final es bastante más baja.

Al reducir la cantidad de acelerador, el aumento de la resistencia inicial es menos pronunciado, siendo, por otro lado, la resistencia final más elevada.

¿Quiere esto decir que al emplear un acelerador tenemos que contar siempre con una reducción de la resistencia? De ningún modo. La técnica moderna de los aditivos nos proporciona aceleradores que tienen también un efecto plastificante y nos hemos ocupado ya de la importancia de esta propiedad. Al

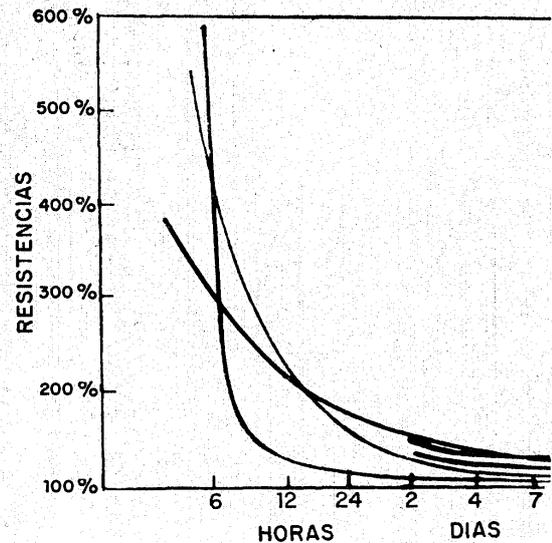


Fig. 18. Resistencia del hormigón con acelerador.

reducir la relación a/c y al obtener el hormigón más trabajable y homogéneo se consigue no solamente compensar la pérdida de resistencia debida a la aceleración del fraguado, sino aumentarla notablemente, siempre y cuando no se necesite una aceleración exagerada.

Efectivamente, en los ensayos realizados con adición de un 10 % de un acelerador sobre el peso del cemento, observamos un aumento de la resistencia en un 10 % (fig. 19).

Para la obstrucción de una filtración se emplea el acelerador puro o diluido con poca agua, y se cuenta de antemano con la disminución de la resistencia final. En cambio, para las obras de estructura, tanto para hormigonar en invierno, como para obras en presencia de agua subterránea, se añade normalmente el acelerador en la proporción del 3 al 10 % sobre el peso del cemento, lo que permite incluso mejorar la calidad del hormigón, según lo expuesto anteriormente.

Ya que la actuación de un acelerador sobre el cemento es una reacción físico-química y la composición de los cementos de distinta procedencia no es idéntica, son necesarios ensayos previos para determinar la dosificación adecuada del acelerador de acuerdo con las circunstancias de la obra.

Para las obras en presencia de agua subterránea es muy ventajoso disponer de un acelerador compatible con un impermeabilizante, con el fin de acelerar el fraguado e impermeabilizar el hormigón en el mismo proceso.

Para las estructuras de hormigón armado es muy importante que la armadura quede bien envuelta en hormigón, lo que es imprescindible empleando un acelerante con contenido de cloruros, ya que éstos pueden provocar la corrosión del hierro deficientemente envuelto. En sitios donde abunda la armadura es muchas veces difícil conseguirlo; pero en vez de aumentar el agua de amasado, para hacer el hormigón más fluido es aconsejable añadir también un aditivo plastificante-fluidificador, compatible naturalmente con el acelerador.

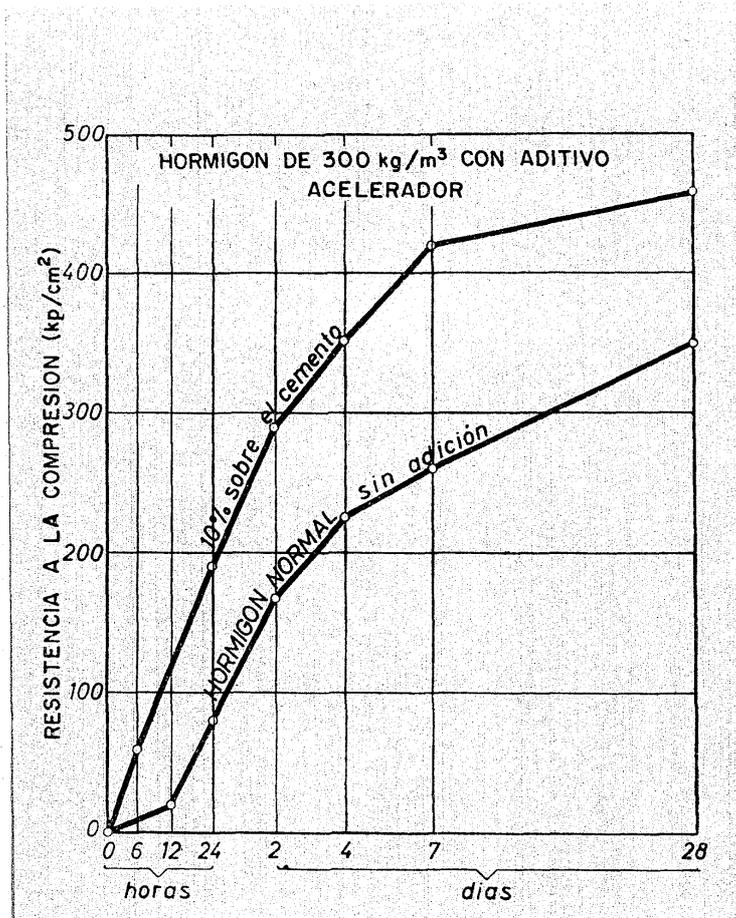


Fig. 19

6 Retardadores de fraguado

Al tratar de los aditivos plastificantes-fluidificadores hemos indicado sus principales efectos, que son: plastificación, reducción del agua de amasado y la dispersión. Pero aparte de estos, los plastificantes producen normalmente también un ligero aumento del tiempo de fraguado y, por consiguiente, un aumento del tiempo de trabajabilidad del hormigón. Donde interesa aumentar considerablemente este tiempo, hay que emplear aditivos especiales, los llamados retardadores de fraguado, que actúan también como plastificantes, pero cuyo efecto retardador es muy pronunciado.

Es importante tener presente que casi todos los productos químicos que se añaden al cemento actúan, bien como aceleradores, o bien como retardadores, y muchos de éstos, como cloruro de calcio, cloruro de magnesio, sulfato sódico, etc., pueden tener ambos efectos, según la cantidad añadida. El cloruro de calcio, tan conocido como acelerador de fraguado, añadido en cantidades muy pequeñas, actúa, por el contrario, como retardador.

Los retardadores se añaden normalmente en proporciones muy pequeñas, del 0,2 al 0,6 % sobre el peso del cemento, y producen en estas dosificaciones el aumento deseado del tiempo de trabajabilidad del hormigón. Si, en cambio, debido a un descuido o avería en la instalación del dosificador, el mismo retardador se añade en una proporción muy exagerada, puede ocurrir que, en vez de retardar, se produzca una aceleración del fraguado, o sea, una inversión del efecto deseado.

6.1. Resistencia

Para decidir sobre la conveniencia del empleo de un retardador, se precisa aclarar primero, como es natural, si su adición puede producir una disminución de la resistencia del hormigón.

En principio, se puede afirmar que, empleado en forma adecuada, la adición del retardador tiene una influencia favorable sobre la resistencia del hormigón. Esto resulta plausible al tener presente que el pro-

ceso del fraguado, es decir, la hidratación del cemento, es tanto más perfecta cuanto más intensivo es su contacto con el agua.

Sabemos que a mayor finura del molido del cemento corresponde una mayor resistencia, siendo esta diferencia muy pronunciada, sobre todo al principio del fraguado. Las resistencias finales, en cambio, se igualan bastante en muchos casos.

La partícula fina del cemento facilita la penetración del agua hasta su núcleo y, por consiguiente, el fraguado rápido perfecto. En cambio, en la partícula más gruesa resulta el proceso de hidratación más lento.

Algo análogo ocurre al emplear aditivos aceleradores o retardadores.

Al tratar de los aditivos aceleradores, hemos visto que al acelerar el fraguado la capa de gel que envuelve la partícula del cemento (*fig. 1*) queda rápidamente transformada en capa cristalina, dura. Lo contrario ocurre al retardar el fraguado, cosa que se consigue al añadir un aditivo retardador.

Al retrasar en varias horas y hasta en varios días la transformación del gel del cemento en capa cristalina, se facilita la reacción entre el cemento y el agua. Esta puede penetrar hasta el núcleo de la partícula del cemento, efectuándose su fraguado completo. Se aprovecha al máximo toda la cantidad del cemento empleado y se obtiene, por consiguiente, la mayor resistencia posible. En los ensayos realizados se ha demostrado que se pueden lograr aumentos de resistencia hasta de un 30 % sin aprovechar la posibilidad de la reducción de la relación a/c (5) y (15).

6.2. ¿Dónde se emplean los retardadores de fraguado?

Habiendo demostrado la influencia favorable de la adición de retardadores sobre la resistencia del hormigón, vamos a citar algunos casos donde su empleo resulta indicado:

Al principio se usaba el retardador de fraguado, principalmente para salvar el tiempo de interrupción del hormigonado durante las horas de descanso y al terminar la jornada de trabajo. Al conservarse aún trabajable el hormigón ya colocado, al reanudarse el hormigonado permite empalmar bien, por medio del vibrado, el hormigón anterior con el nuevo, evitando, de este modo, las juntas de trabajo, siempre molestas y peligrosas.

Las primeras mezclas del hormigón nuevo se preparan, en este caso, sin adición de retardador.

Al hormigonar con elevada temperatura ambiente existe el peligro de aceleración del fraguado, por lo que resulta aconsejable el empleo de un retardador.

Se conoce el grave problema que representa la gran elevación de temperatura al colocar grandes masas de hormigón. Al existir pocas posibilidades de transmisión de calor, puede conservarse durante semanas enteras la temperatura elevada, y coincidiendo con temperaturas ambiente bajas existe el peligro de desconchado en la superficie del hormigón y de su agrietamiento.

En muchos casos es preciso recurrir a una refrigeración artificial para resolver este problema.

Otra solución nos ofrece la posibilidad de utilizar un retardador de fraguado.

Hay que tener presente, naturalmente, que al retardar el fraguado no se reduce la cantidad absoluta de calor que se produce durante el proceso del mismo, ya que ésta es una constante.

Lo que ocurre es que la curva de la subida de la temperatura resulta menos acentuada y, por lo tanto, más rebajada. La temperatura máxima alcanzada disminuye más o menos, de acuerdo con la cantidad del retardador añadida.

En la *figura 20* están representadas las curvas de temperatura para hormigones de las mismas características, pero añadiendo un retardador en la cantidad del 0,2, 0,4 y 0,6 %, respectivamente, sobre el peso del cemento (5) y (15).

Vemos que, efectivamente, la curva de temperatura del hormigón con el 0,6 % del retardador se eleva apenas sobre la horizontal; el aumento de la temperatura que se origina es solamente de unos pocos grados.

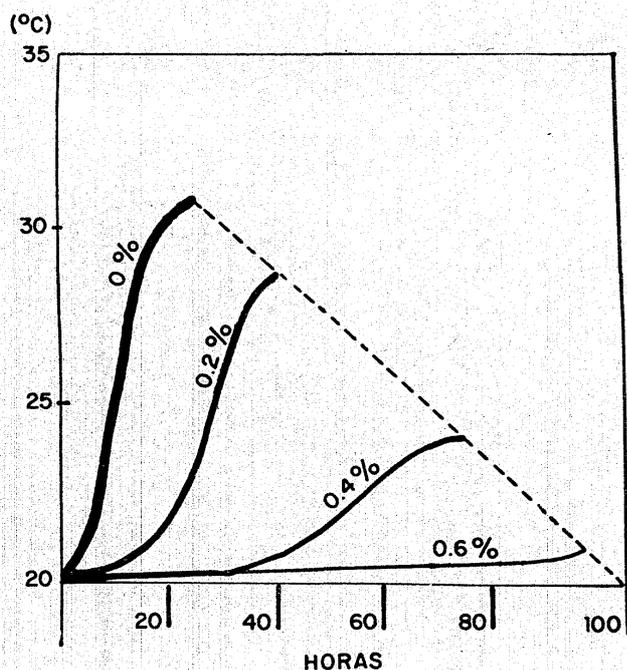


Fig. 20. Curvas de temperaturas con distintas dosificaciones de un retardador.

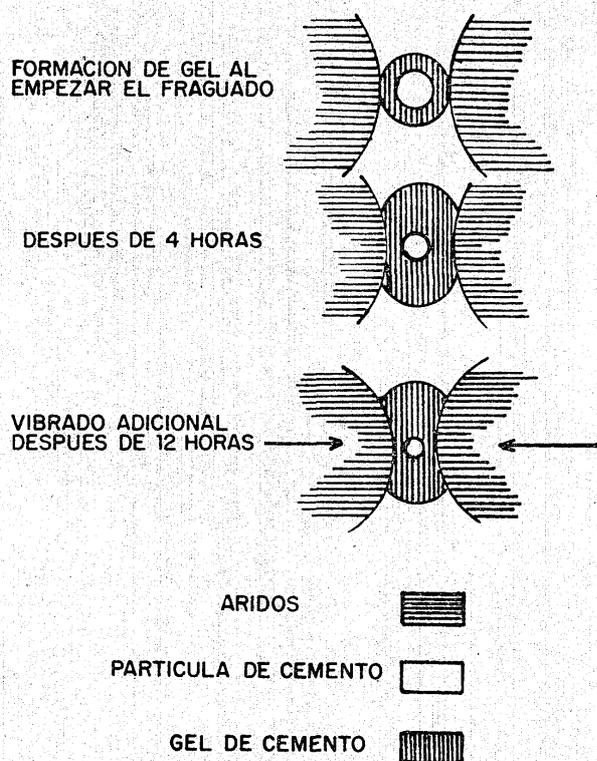


Fig. 21. Efecto de un retardador al aplicar vibrado adicional.

Observamos en los últimos años una creciente tendencia de fabricar el hormigón en una instalación central para su reparto a distintas obras. El uso de un retardador aumenta notablemente las posibilidades de este procedimiento.

También se facilita la colocación del hormigón por medio de bombeo.

6.3. Vibrado adicional

La adición de un retardador de fraguado permite repetir el vibrado, resultando el hormigón más compacto y resistente, disminuyendo también su retracción del fraguado.

Reproducimos en la *figura 21* un esquema del efecto de vibración adicional aplicado en distintas fases del proceso de fraguado, indicando la partícula de cemento con su capa de gel y los áridos que la rodean.

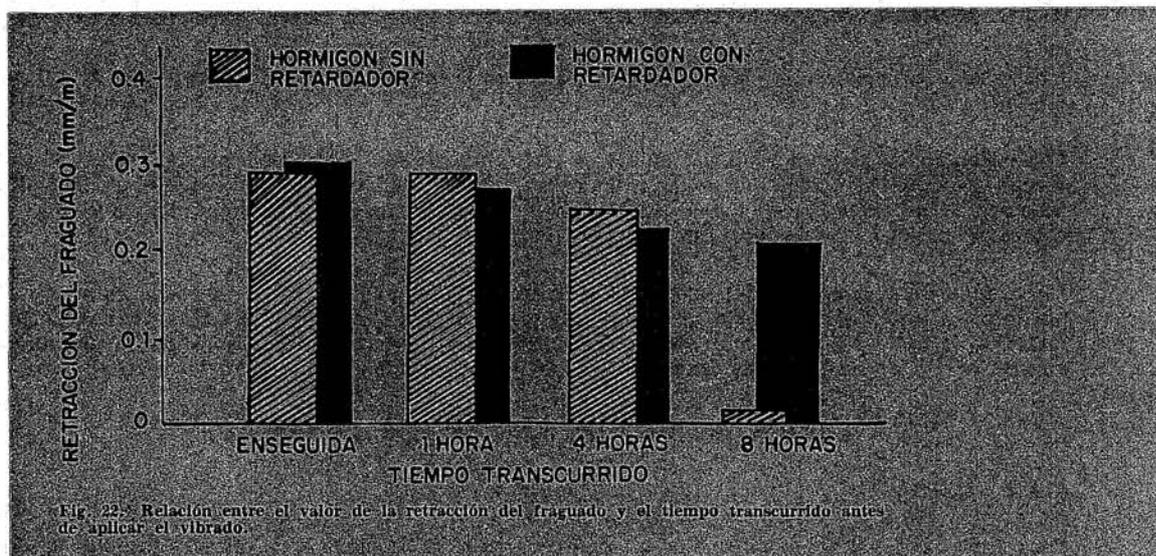
En la parte de arriba está representada la situación después de haber ejecutado el primer vibrado, es decir, inmediatamente después del vertido del hormigón. La hidratación acaba de empezar, la partícula de cemento es aún relativamente grande, mientras que la capa de gel es delgada.

Al transcurrir 4 horas y haber progresado el proceso de hidratación ha disminuido el volumen de la partícula de cemento y ha aumentado el espesor de la capa de gel. Al conservarse ésta todavía blanda, repitiendo el vibrado, los áridos pueden acercarse más.

Lo mismo ocurre, pero en mayor escala, si en vez de dejar pasar 4 horas, se espera 12 horas para repetir el vibrado, siempre y cuando la capa de gel permanezca aún blanda; lo que quiere decir, el hormigón aún trabajable, debido a la adición de un retardador. Al acercarse más los áridos, el gel penetra en los huecos, resultando el hormigón más compacto, de estructura más homogénea, de mejor calidad.

Se conoce la relación que existe entre el valor de la retracción del fraguado y el tiempo transcurrido antes de aplicar el vibrado.

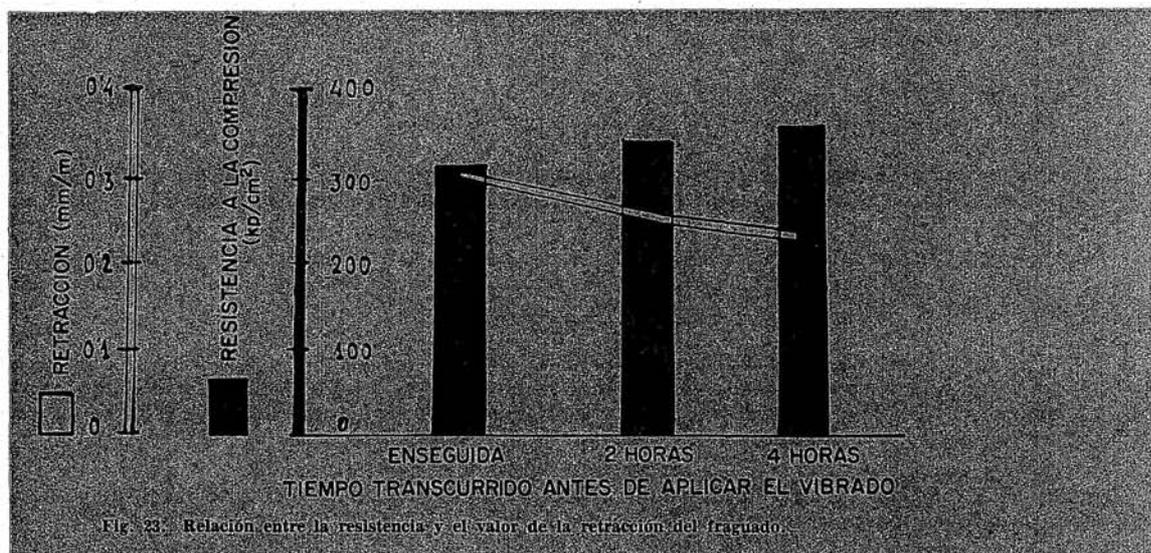
En la *figura 22* está representada en milímetros/metro la retracción del fraguado de hormigones con y sin adición de retardadores, cuyo vibrado fue ejecutado, bien



enseguida después de su vertido, o bien después de haber transcurrido 1, 4 y 8 horas, respectivamente. En el último caso no está indicado el hormigón sin retardador, ya que se hallaría completamente endurecido y no permitiría el vibrado.

Se observa que al aplazar el tiempo de la aplicación del vibrado se disminuye notablemente el valor de la retracción del fraguado, lo que demuestra la influencia favorable del vibrado adicional, siendo este efecto más acentuado en el hormigón con retardador.

En la figura 23 vemos la relación existente entre la resistencia a la compresión de un hormigón con adición de un retardador y el valor de su retracción del fraguado.



Observamos que al repetir el vibrado después de 2 ó 4 horas, respectivamente, disminuye el valor de la retracción del fraguado; en cambio, aumenta la resistencia a la compresión.

Se aprovecha esta posibilidad donde interesa conseguir hormigones de alta calidad, por ejemplo para su aplicación en capas de rodadura de pavimentos de hormigón.

6.4. Modo de empleo de retardadores de fraguado

Los retardadores de fraguado se añaden al agua de amasado, y es recomendable tener en cuenta que su efecto plastificante permite la reducción de la cantidad de la misma, mejorando, por consiguiente, la relación *a/c*.

6.4.1. Dosificación

La cantidad de retardador que se emplea oscila normalmente entre 0,3 y 0,6 % respecto al peso del cemento.

Para determinar la proporción adecuada es muy importante tener bien presente una diferencia fundamental entre la actuación de los retardadores y de los plastificantes puros. Los últimos producen una reacción de carácter físico, y una exageración de su dosificación no representa para el hormigón ningún efecto perjudicial de consideración.

En cambio, la reacción de retardadores tiene un carácter fisicoquímico; su dosificación presenta una importancia primordial. Los hormigones, en general, reaccionan con mucha sensibilidad a la adición de retardadores; hasta el extremo, que una dosificación muy exagerada del mismo puede ocasionar un efecto contrario, o sea, en vez de retardar el fraguado, provocar la aceleración del mismo.

6.4.2. Ensayos

Para fijar la dosificación adecuada es imprescindible la realización de ensayos previos, ya que el tiempo de fraguado del hormigón es bastante más corto que el del cemento puro, y no es suficiente la determinación del comienzo y del fin del fraguado del cemento puro, por medio de la aguja de Vicat. Estos ensayos sirven solamente como una primera orientación; sus resultados no nos proporcionan más que valores relativos sobre la eficacia de los distintos retardadores y sobre el comportamiento de distintas clases de cementos.

Los cementos férricos reaccionan normalmente mejor con los retardadores que los cementos portland; lo contrario, por cierto, de lo que sucede con los aceleradores.

Los ensayos definitivos deben ajustarse, en lo posible, a las condiciones reales de la obra, tales como: cantidad y clase de cemento, relación a/c , tipos y dosificación de los áridos. Hay que tomar en cuenta también la temperatura ambiente, ya que ésta tiene mucha influencia sobre el proceso del fraguado y sobre la trabajabilidad del hormigón.

El calor que se produce durante el proceso de hidratación nos permite, midiendo la temperatura del hormigón, conocer los valores exactos del estado del fraguado.

Existen aparatos especiales que registran automáticamente, en forma continua, sobre una cinta, la curva de temperatura en varios puntos de la masa del hormigón, o de varias probetas.

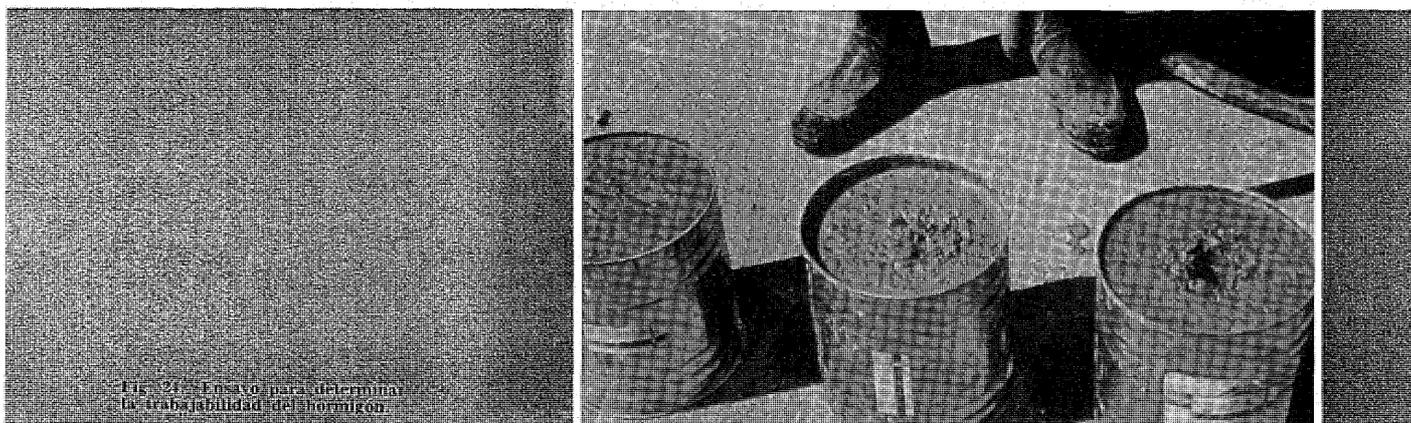
Otro procedimiento, por cierto muy sencillo, pero eficaz y bien adaptado a las condiciones de las obras, consiste en determinar directamente la duración de la trabajabilidad de distintas clases de hormigones por medio de vibradores.

El hormigón se coloca en envases metálicos de plancha delgada, de unos 30 litros de capacidad, y se vibra introduciendo en la masa un vibrador vertical. En la *figura 24* está representado este ensayo realizado con tres hormigones de idéntica composición, pero añadiendo en dos de ellos cierta cantidad de un retardador.

El de la derecha contiene un hormigón normal; el del centro, una cantidad pequeña, y el de la izquierda, una cantidad mayor de retardador.

Después de dejar transcurrir cierto tiempo, estas probetas se sometieron a la acción de un vibrador. Se considera que el hormigón ya no es trabajable cuando al retirar el vibrador no se cierra el espacio que ocupaba, quedando un orificio. Esto último ocurre con la probeta de la derecha, mientras que la de la izquierda permanece aún completamente blanda. En la del centro, el orificio se ha cerrado, pero observamos que la superficie del hormigón es muy desigual. Esto indica que se encuentra casi al límite de su trabajabilidad.

Para esta clase de ensayos es preciso tener presente que cada probeta no debe someterse más que a una sola operación de vibrado, por lo que es conveniente determinar previamente el tiempo aproximado del fin del fraguado. Esto se aprecia fácilmente al ejercer con el dedo una presión sobre la pared del envase, que debe ser de plancha delgada, y observar si el hormigón sigue blando.



7 Aireantes - plastificantes para morteros

Una mención especial merecen los aditivos aireantes-plastificantes para morteros. Añadiéndolos al agua de amasado, se ocluye aire adicional, precisamente en forma de burbujas minúsculas y estables, llegando su volumen hasta un 15 %, con el correspondiente aumento del volumen de la masa del mortero. Al mismo tiempo resulta el mortero más plástico, más homogéneo, más estable, más adhesivo, más trabajable, obteniendo, por consiguiente, una notable economía en material y mano de obra.

La oclusión de aire en cantidad tan elevada repercute naturalmente de forma desfavorable en la resistencia a la compresión del mortero, pero esto no tiene ninguna importancia para su empleo en revocos, enfoscados y asientos de fábrica, donde, como es sabido, la resistencia del mortero es muy superior a la necesaria.

8 Aditivos expansionantes

Vamos a nombrar finalmente los aditivos expansionantes, cuya función es aumentar el volumen del mortero, pero sin oclusión de aire adicional. Se emplean en el hormigón pretensado para el relleno posterior de los canales donde pasan los cables.

También se utilizan en el asiento de la maquinaria para el relleno posterior de los huecos entre la obra de cimentación y la placa metálica. En general, para el relleno posterior más perfecto posible de los huecos resultantes.

9 Conclusión

Al descubrir que añadiendo ciertos productos al hormigón, formando su cuarto componente, se mejoraba notablemente su calidad, se generalizó el uso de aditivos en los países técnicamente avanzados. Como ya se ha indicado, en Alemania, por ejemplo, en un 60 % de todos los hormigones colocados, y en EE. UU. en un 80 % de los hormigones prefabricados, que representan, a su vez, un 80 % del total de hormigones colocados, se emplea una u otra clase de aditivos. No disponemos de datos referentes al 20 % restante de los hormigones de EE. UU.

En la mayoría de los casos ya no se busca una propiedad determinada como impermeabilizante, acelerador, etc., sino que se pretende mejorar la fluidificación, la plastificación, la dispersión, para conseguir un hormigón de mejor calidad. Siendo los plastificantes-fluidificadores los que reúnen precisamente los efectos indicados, son ellos los que en mayor cantidad se utilizan. Pero también donde se necesita una propiedad específica como aireante, impermeabilizante, etc., se considera como muy deseable que el aditivo tenga además los efectos citados, para compensar la posible pérdida de la resistencia.

La tendencia creciente de prescindir de la preparación del hormigón a pie de obra y fabricarlo en grandes centrales, bien dotadas y convenientemente vigiladas, confirma la exigencia de la técnica moderna de disponer de hormigón de calidad.

Una vez aclarado el aspecto técnico del uso de los aditivos y para terminar, vamos a ocuparnos brevemente de su aspecto económico.

Solamente los aceleradores que se utilizan en cantidades relativamente grandes, que oscilan normalmente entre el 6 y el 10 % sobre el peso del cemento, representan una carga importante, del orden de 250-500 pesetas/m³, que se justifica por las necesidades de la obra.

Mucho menos gravosos resultan los impermeabilizantes que se añaden en la proporción de unos 2-3 % sobre el peso del cemento y cuyo importe es de unas 140 ptas./m³.

Por lo que se refiere a los plastificantes, aireantes y retardadores, la cantidad necesaria es sumamente pequeña, 0,1 a 0,7 % sobre el peso del cemento, siendo su importe realmente insignificante, de 10 a 30 pesetas/m³.

Hasta prescindiendo del posible ahorro en la cantidad de cemento debido al aumento de la resistencia, la economía en la mano de obra y en el desgaste de los medios de transporte, compensan ampliamente el gasto del aditivo, por resultar la mezcla más trabajable y más consistente.

Al tratar de los aditivos aireantes-plastificantes para los morteros, hemos indicado anteriormente la ventaja económica que representa el aumento del volumen de la mezcla que se consigue con su adición, aparte de las demás ventajas.

Hemos tratado de aportar con este informe una contribución para extender los conocimientos de las características de los principales aditivos químicos para hormigones y morteros y de las ventajas que ofrece su empleo en la construcción.

Bibliografía

- (1) Prof. Dr. Ing. W. Albrecht y U. Mannherz: «Zusatzmittel, Anstrichstoffe, Hilfsstoffe für Beton und Mörtel», Bauverlag, Wiesbaden.
- (2) Prof. Dr. Ing. W. Albrecht y U. Mannherz: «Eigenschaften von Betonzusatzmitteln». Revista «Betonstein-Zeitung». Heft 6, junio 1963.
- (3) Dr. G. H. Benz: «Bauen mit Eiweiss». Sittler & Federmann, Illertissen/Bayern.
- (4) Dr. G. H. Benz: «Über den Einfluss der Konsistenz auf die Belüftung von Beton». Revista «Strasse und Autobahn». 1966, Heft 1.
- (5) Dr. G. H. Benz: Resultado de sus estudios, puesto a disposición del autor.
- (6) J. Calleja: «Estado actual de los estudios sobre aditivos para hormigón en España». Revista «Afinidad», septiembre 1968.
- (7) Dr. W. Grün: «Erkenntnisse und praktische Erfahrungen mit Betonzusatzmitteln». Revista «Brücke und Strasse», 1968, Heft 1.
- (8) J. C. Le Morvan: «Fabriquemos hormigones mejores y más baratos». «Revista de Obras Públicas», junio 1952.
- (9) M. Pérez Pahisa: «Los aireantes y aeroplastificantes protegen al hormigón contra las heladas». Revista «Afinidad», septiembre 1968.
- (10) M. Pérez Pahisa: «Aditivos físicos y químicos». Revista «Cemento», febrero y marzo 1967.
- (11) E. Paillex: «Aditivos del mortero y del hormigón; su aplicación en la construcción». Revista «Afinidad», septiembre 1968.
- (12) C. Safránec: «Consideraciones sobre la impermeabilización de depósitos». «Revista de Obras Públicas», julio 1965.
- (13) C. Safránec: «Algunas observaciones sobre la impermeabilización de sótanos en presencia de agua a presión». Revista «Alemas», agosto-septiembre 1967.
- (14) C. Safránec: «Aditivos impermeabilizantes a base de materias albuminoides y su efecto en hormigones y morteros». Revista «Cercha», núm. 6, año IV.
- (15) C. Safránec: «Características físico-químicas de los aditivos plastificantes y retardadores de fraguado para hormigones y morteros y su empleo en la construcción». «Revista de Obras Públicas», noviembre 1968.
- (16) Dr. Ing. U. Schmidt: «Betondichtungsmittel erfüllen ihren Zweck». Revista «Das Baugewerbe», 1967, Heft 21.
- (17) Tricosal-Mitteilung, 1/69, Illertissen/Bayern.

Caractéristiques des principaux adjuvants chimiques pour les bétons et mortiers et leur emploi dans la construction

Carlos Safránez, Dr. ingénieur

Partant du point de vue d'un technicien de la construction et sans intention d'examiner tout l'ensemble des adjuvants pour les bétons et mortiers, l'auteur essaie de donner un aperçu clair des adjuvants chimiques les plus importants et les plus employés. Ceux-ci sont classés en quelques groupes clairement définis en signalant l'effet principal.

Il rend compte des effets des adjuvants et des propriétés obtenues tant dans le béton frais que dans le béton pris et signale l'importance des effets de fluidification, de plastification et de dispersion du ciment qui apportent une amélioration considérable à la qualité du béton.

Finalement, l'auteur traite, d'une manière succincte, l'aspect économique des adjuvants.

Characteristics of the main chemical concrete and mortar additives and their use in construction

Carlos Safránez, Dr. engineer

The author seeks to provide a clear understanding of the most important and frequent chemical additives, as they affect the construction specialist, without pretending however to encompass the vast field of concrete and mortar additives. These can be classified in a few clearly defined groups, and their main uses are recorded.

The article states the effects and the resulting properties connected with each additive, both with respect to fresh and to set concrete.

The importance of fluidification is emphasized, as well as the plastification and dispersion of the cement, leading to a notable improvement in the concrete quality.

Finally a brief mention is made of the cost factor of these additives.

Eigenschaften der wichtigsten Zusatzmittel für Beton und Mörtel und deren Einsatz im Baugewerbe

Dr. Ing. Carlos Safránez

Ausgehend vom Standpunkt eines Bautechnikers und ohne den Ehrgeiz, den gesamten Komplex der chemischen Zusatzmittel für Beton und Mörtel erschöpfend behandeln zu wollen, versucht der Autor, eine klare Übersicht zu geben über die wichtigsten und gebräuchlichsten chemischen Zusatzstoffe. Diese werden in einige wenige, klar definierte Gruppen unter Hinweis auf den wichtigsten Effekt eingeteilt.

Der Autor erläutert die Wirkungsweise der Zusatzmittel und die damit erzielten Eigenschaften sowohl im frischen als auch im abgebundenen Beton.

Es wird hingewiesen auf die Bedeutung der Verflüssigungs-, Plastifizierungs- und Streueffekte des Zements, die eine sehr beachtliche Qualitätsverbesserung des Betons bewirken.

Abschliessend wird kurz der wirtschaftliche Aspekt der Zusatzmittel behandelt.