

ADITIVOS PARA EL HORMIGON DE GRANDES PRESAS(*)

INFLUENCIA SOBRE EL CALOR DE HIDRATACION DEL CEMENTO

Por JESUS ESPARZA GARCIA
(Alumno de 5.º curso)

Se publica a continuación el trabajo galardonado con el segundo premio HALESA, otorgado al alumno de quinto curso de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, D. Jesús Esparza García.

INTRODUCCION

Las grandes presas presentan una serie de características peculiares dentro de las obras realizadas con hormigón; estas características provienen, por un lado, del gran volumen de hormigón y los fuertes espesores requeridos, que condicionan los métodos de puesta en obra y ejecución, y por otro, de la doble misión encomendada a la presa: estructura resistente y cauce del agua embalsada.

CARACTERISTICAS Y DOSIFICACION DE LOS COMPONENTES DEL HORMIGON UTILIZADO EN GRANDES PRESAS

La calidad del hormigón utilizado no es sólo un problema de tipo técnico, sino también económico, ya que son muchos miles de metros cúbicos los que se colocan en cada presa.

Este hormigón admite áridos de tamaños grandes, de 10 a 15 cm y en algunas ocasiones superiores a los 20 cm, como consecuencia de ello el porcentaje de arena requerido para obtener una buena compactación es menor.

El empleo de porcentajes bajos de arena tiene una doble ventaja, la primera es que este árido es el más caro y la segunda que de esta manera también se reduce la cantidad de agua requerida para el amasado, lo que influye favorablemente sobre la resistencia, impermeabilidad, retracción, etc.

La dosificación del cemento tiende a ser lo más baja posible para disminuir los efectos del calor de hidratación y de la retracción, pero, a su vez, ha de ser lo suficientemente alta para hacer frente a las resistencias requeridas y también dotar al hormigón de la necesaria impermeabilidad.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la redacción de esta Revista hasta el 31 de diciembre de 1971.

EL CALOR DE HIDRATACION

El fraguado y el endurecimiento se producen al reaccionar los componentes del cemento con el agua, y al ser reacciones exotérmicas, se produce un desprendimiento de calor que eleva la temperatura del hormigón.

Cada componente del clinker contribuye de la siguiente manera:

C ₃ A	207 cal/g
C ₃ S	120 cal/g
C ₄ AF	100 cal/g
C ₂ S	62 cal/g
CaO	279 cal/g
MgO	203 cal/g
SO ₄ Ca + C ₃ A	149 cal/g (por g de SO ₃)

Además de la calidad del cemento, también influye en la velocidad de producción del calor de hidratación la finura de molido del cemento, pues la hidratación es un fenómeno lento que, según Bogue, penetra sólo 0,5 micras en veinticuatro horas y cinco micras al cabo de noventa días, como se indica en el gráfico 1.

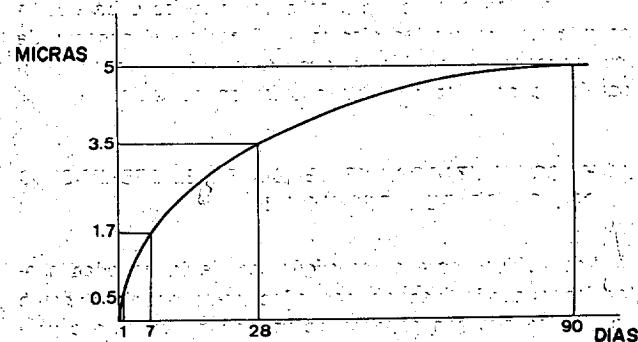


Gráfico 1.

El que la temperatura del hormigón fresco aumente no le perjudica, y siempre que no pase de 70° C favorece los procesos de fraguado y endurecimiento, si se evita el secado del hormigón.

En el gráfico 2 se indica cómo varía la resistencia obtenida en un mismo tipo de hormigón en relación a la temperatura a la que se efectuó el curado.

% DE RESISTENCIA DE LA
PROBETA A 28 DIAS Y 21° C.

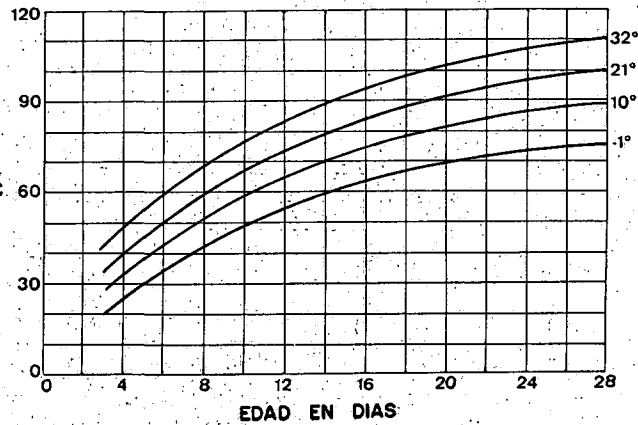


Gráfico 2.

En estructuras de poco espesor el calor de hidratación no tiene ninguna importancia, ya que es evacuado rápidamente y lo mismo ocurrirá cuando la construcción se ha realizado lentamente; sin embargo, en las grandes presas, con sus fuertes espesores y las grandes cantidades de hormigón que se colocan diariamente, ya no puede eliminarse fácilmente el calor de hidratación, con lo que en el interior de la masa la temperatura se llega a elevar unos 20 ó 30° C.

Cuanto mayor sea la distancia de un punto del interior de la presa al paramento, mayor será también la dificultad que tendrá para evacuar el calor de hidratación, con lo que se crean diferencias de temperatura entre los distintos puntos de la estructura, creando tensiones internas que pueden provocar la aparición de fisuras cuando las temperaturas de todos los puntos van igualándose.

El hormigonado de las presas por bloques o banquetas permite aminorar estos efectos en función del espesor de las tongadas y del tiempo que transcurra entre la colocación de aquellas que van a estar en contacto.

ADITIVOS UTILIZADOS. INFLUENCIA EN EL DESARROLLO DEL CALOR DE HIDRATACION

Los aditivos para el hormigón, es decir, aquellas sustancias que añadidas en pequeñas dosis en el momento de su amasado son capaces de variar algunas de sus propiedades, se nos presentan como uno de los recursos más importantes de que se dispone para hacer frente a los pro-

blemas que plantea la ejecución de una presa, principalmente porque los efectos producidos por la actuación de los aditivos son perfectamente previsibles y controlables. De varias formas puede influir un aditivo sobre el calor de hidratación:

En primer lugar, consiguiendo variar la cantidad total desprendida, por haber logrado con su empleo, bien redu-

cir la dosificación de cemento o bien el haber tenido que incrementarla para compensar su efecto desfavorable sobre otra propiedad distinta. También se puede disminuir la cantidad total de calor desprendido con la actuación de los aditivos llamados inhibidores, que impiden la hidratación del cemento.

En segundo lugar, otros aditivos pueden conseguir distinta distribución del desarrollo del calor de hidratación en el tiempo al variar la velocidad de disolución de los productos anhídros del cemento.

No todos los aditivos conocidos tienen aplicación en la construcción de presas; a continuación vamos a pasar revista a los normalmente empleados.

AIREANTES

Se denomina así a los aditivos cuya función es la de aumentar la cantidad de aire ocluido en el hormigón. Son sustancias tensoactivas que producen durante el amasado minúsculas burbujas de aire que quedan repartidas en toda la masa del hormigón.

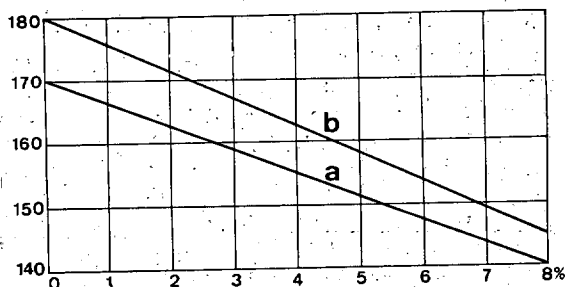
El diámetro de las burbujas oscila de 50 a 100 micras, y la distancia más conveniente entre ellas es de 200 a 250 micras.

Los aireantes son productos orgánicos, resinas, aceites sulfonados, jabones de ácidos grasos, etc.

Las propiedades del hormigón que varía más notablemente la aireación son las siguientes:

Le hace más dócil y trabajable, pues las esferillas de aire actúan como un lubricante entre las partículas sólidas. Esta acción es de gran utilidad en los hormigones de grandes presas, pues los áridos provienen generalmente de machaqueo y presentan aristas vivas, además de contener bajos porcentajes de arena, lo que les hace ser poco dóciles. En el gráfico 3 se puede ver la correlación entre el agua de amasado y el aire ocluido a igualdad de asiento.

CONTENIDO DE AGUA (l/m³)



CONTENIDO DE AIRE OCLUIDO

- a: áridos naturales.
- b: áridos de machaqueo.

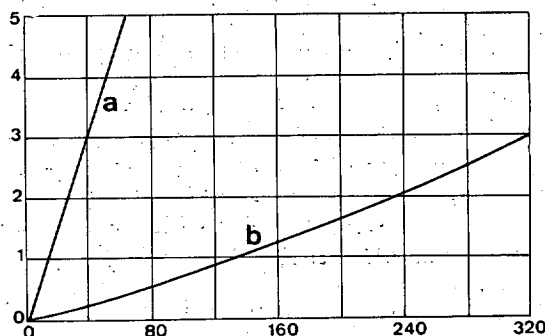
Gráfico 3.

Disminuye la permeabilidad capilar del hormigón al interrumpir, por medio de las burbujas de aire, las vías de circulación del agua, esta propiedad se ve incrementada por el carácter hidrófobo que confiere el aireante a los granos de arena y cemento, ya que les rodea de cadenas orgánicas hidrocarburadas.

En lo referente a la resistencia del hormigón a las heladas, la acción de estas burbujas de aire es la de un medio elástico capaz de absorber el incremento de volumen del agua al helarse, con lo que se evita la aparición

de presiones que actuarían contra el hormigón. En el gráfico 4 se indica cómo se incrementa esta resistencia a las heladas con la inclusión de aire.

DILATACION EN %



CICLOS DE HIELO Y DESHIELO

- a: Hormigón ordinario.
- b: Hormigón con 4 por 100 de aire ocluido.

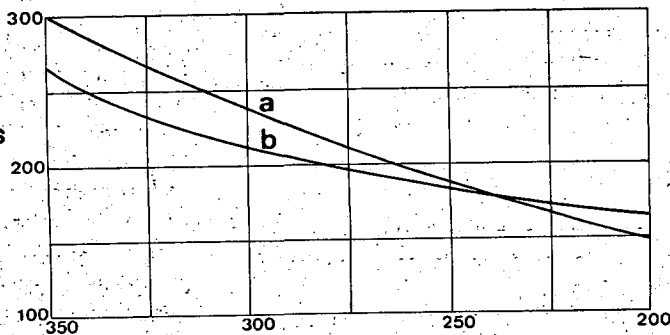
Gráfico 4.

También la inclusión de aire, al interrumpir la circulación capilar, permite alargar la vida del hormigón ante las aguas agresivas, pues esa es su vía de penetración.

Sin embargo, el carácter hidrófobo que confiere el aireante al grano de cemento dificulta la hidratación de éste, disminuyendo las resistencias del hormigón, aunque generalmente este inconveniente queda compensado y a veces superado por el aumento de resistencia que introduce el poder reducir la relación agua-cemento para una misma docilidad.

Este aumento de resistencia afecta solamente a los hormigones de baja dosificación de cemento, menores de 240 Kg/m³, como indica el gráfico 5.

RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 28 DIAS



KGS. DE CEMENTO POR m³

- a: Hormigón ordinario.
- b: Hormigón con 4 por 100 de aire ocluido.

Gráfico 5.

Lo mismo ocurre al estudiar la retracción del hormigón, la aireación hace que aumente, pero, al reducir la relación agua-cemento, el aumento queda compensado.

La dosificación de un aireante varía con la finura y composición química del cemento, tiempo de amasado, temperatura ambiente, tamaño del árido, etc., que hacen que sea diferente el porcentaje de aire que se consigue con una determinada cantidad de aireante.

Durante el transporte y vibrado normal del hormigón se produce una pérdida de aire oculto, pero las burbujas que así se desprenden son las de tamaños grandes, y esto no afecta a la misión que se le encomienda. Naturalmente, cuanto mayores sean la frecuencia, amplitud y tiempo de la vibración, mayor será la cantidad de aire desprendido.

Generalmente, la cantidad de aire que debe quedar en el hormigón con áridos entre 120 y 150 mm es del 3 al 4 por 100.

Pero ello acarrearía un gran descenso en las resistencias mecánicas, como indica el gráfico 7.

La misión primordial de los plastificantes es, pues, facilitar la puesta en obra del hormigón sin provocar descensos en sus resistencias, aunque también algunos productos pueden ejercer acciones a largo plazo.

Según el modo de actuar podemos distinguir dos grupos de plastificantes:

a) Productos que actúan mediante procesos físicos o mecánicos, es decir, como una materia lubricante entre los componentes del hormigón, facilitando el deslizamiento entre ellos.

Entre los aditivos que actúan de este modo se hallan varias sustancias naturales, tales como: talco, bentonita, cuarzo molido, caliza, etc.

La finura de molido de estos aditivos debe ser semejante a la del cemento utilizado.

DESPARRAMADO DEL CONO EN CM.

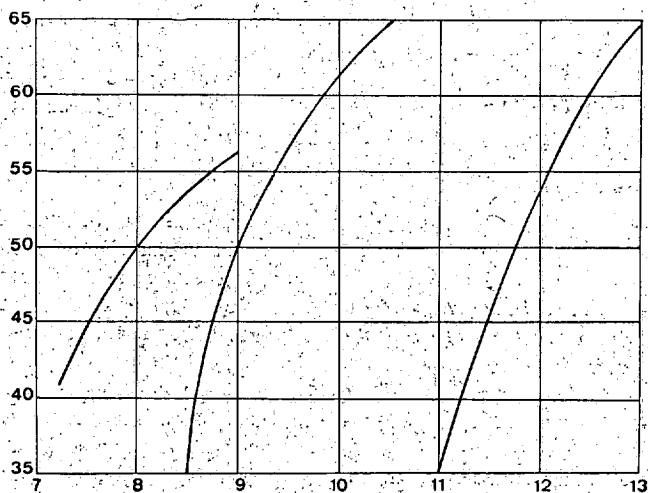


Gráfico 6.

ADICION DE AGUA EN % DEL PESO

Los aireantes comenzaron a utilizarse hace treinta años en Estados Unidos. En España la primera gran presa en la que se emplearon fue la de San Juan.

PLASTIFICANTES

Son productos, generalmente pulvulentos, que por mecanismo físico-químico de retención de agua modifican la reología del hormigón fresco.

La docilidad o trabajabilidad del hormigón, es decir, las facilidades que presenta para ser colocado en obra, repercutirán directamente sobre los medios a utilizar y sobre el plazo de ejecución.

Esta docilidad puede aumentarse y de la manera más económica, haciendo crecer la relación agua-cemento, como puede verse en el gráfico 6.

b) Otras sustancias añaden a la mejora de la trabajabilidad una acción química que consiste en la fijación de la cal libre, formando silicatos que contribuyen a la resistencia del hormigón. Entre estos aditivos se encuentran también algunas sustancias naturales: puzolanas, escorias, cenizas volcánicas, etc., y algunas artificiales, como las cenizas volantes.

Especialmente para hormigones en masa, se va extendiendo en España el uso de estas últimas, que son un residuo de las centrales térmicas que consumen carbón pulverizado, y son pequeñas esferillas constituidas por sílice amorfa, carbón, óxido férrico, óxido de aluminio y óxido de cal. Las partículas de mayor tamaño se encargan de la función lubricante y las más finas, por su mayor actividad, fijan la cal libre del cemento, con el consiguiente aumento de resistencias, o bien ahorro de cemento.

Este ahorro de cemento permitirá, pues, obtener un hormigón con un calor de hidratación menor para una misma resistencia, y llegar a utilizarse estas cenizas en un porcentaje del 25 por 100.

MODIFICADORES DE FRAGUADO Y ENDURECIMIENTO

El fraguado se caracteriza por el paso del estado fluido al estado sólido, al comenzar en la superficie de los granos de cemento las reacciones de hidratación, provocándose precipitaciones que reducen la movilidad de los granos, aumentándose la viscosidad de la pasta.

Primeramente reaccionan con el agua los aluminatos y a continuación los silicatos.

El $\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, al reaccionar con los aluminatos para formar sulfoaluminatos, impide que aquéllos se hidraten rápidamente y fragüen instantáneamente.

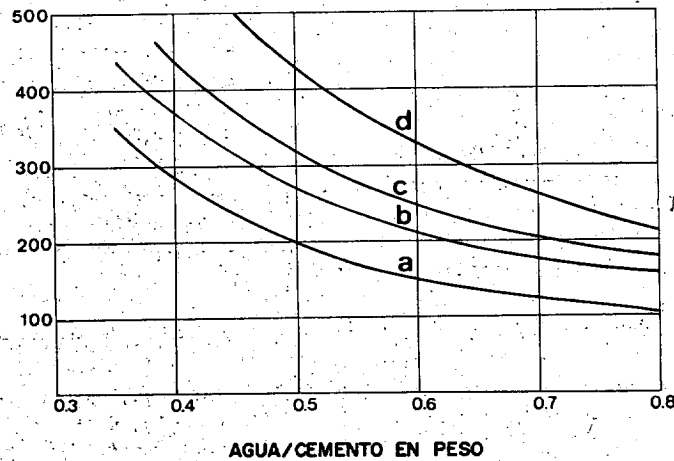
El fraguado continúa al hidratarse el AC_3 y más lentamente por hidratación del SC_3 , que determina el final del fraguado.

La influencia de la cantidad de agua de amasado sobre el tiempo de fraguado del cemento puede verse en el gráfico 8, en el caso de un cemento pórtland normal.

El endurecimiento es un proceso, continuación de las reacciones de hidratación anteriores, separado convencionalmente del de fraguado y caracterizado físicamente por el paulatino desarrollo de las propiedades resistentes.

Los aditivos modificadores de estos procesos serán aquellas sustancias que varíen la velocidad normal de pro-

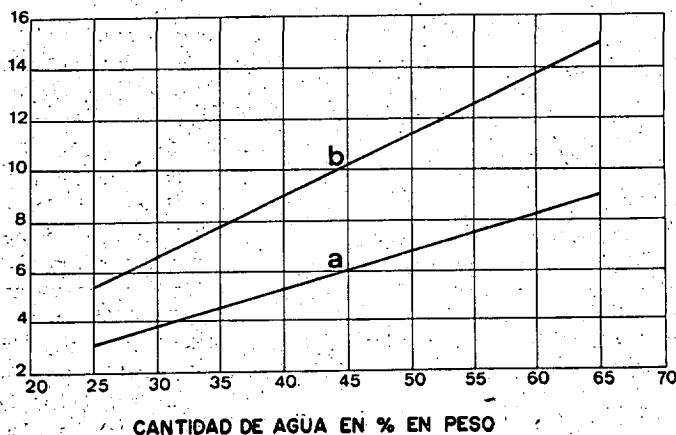
RESISTENCIA A LA
COMPRESION A LOS
28 DIAS
(Kg/cm²)



- a: áridos rodados (P-250). c: áridos machacados (P-250).
b: áridos rodados (P-350). d: áridos machacados (P-350).

Gráfico 7.

HORAS A PARTIR
DEL AMASADO



- a: principio del fraguado.
b: fin del fraguado.

Gráfico 8.

ducirse la hidratación, llamándose aceleradores los que la aumentan, retardadores los que la disminuyen e inhibidores los que impiden de manera total o prácticamente total el fraguado y, por consiguiente, el endurecimiento del hormigón.

Estos últimos, los inhibidores, no encuentran aplicación en la construcción de grandes presas, ni tampoco es corriente el uso de aditivos aceleradores, a no ser en tiempo frío para compensar los efectos de las bajas temperaturas sobre las resistencias, ya que, al acelerar la disolución de los productos anhidros del cemento, también se acelerará la velocidad de producción del calor de hidratación, al ser éste una consecuencia de aquéllas.

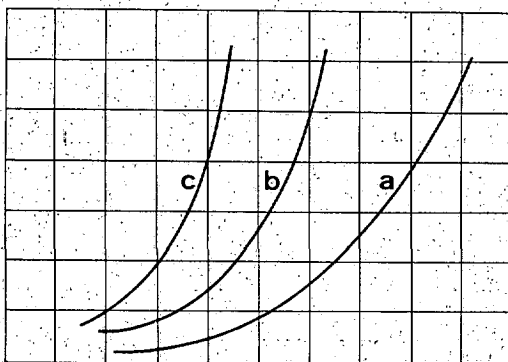
Por tanto, se evita el peligro de deterioro del hormigón fresco, en el caso de hormigonar a bajas temperaturas, variando la cantidad del aditivo acelerador, consiguiéndose así que la temperatura de la masa se mantenga por encima de los 0° C, pero bien entendido que la cantidad de calor desprendido por la hidratación del cemento no aumenta, es constante, lo que sí sucede es que se desprende con mayor velocidad.

A estos aditivos también se les suele llamar anticongelantes, pues aunque el efecto primero que consiguen es el de aumentar la velocidad de hidratación del cemento, lo que se espera de su adición es que el agua contenida en la masa del hormigón fresco no alcance su temperatura de congelación.

Un aditivo acelerador del fraguado muy utilizado es el cloruro cálcico, bien directamente o como ingrediente en diversos productos; en el gráfico 9 se ve cómo aumenta la velocidad de endurecimiento con la adición de cloruro cálcico.

Según ensayos realizados por Mironov utilizando ca-

ENDURECIMIENTO



TIEMPO A PARTIR DEL AMASADO

- a: hormigón testigo.
- b: 1 por 100 Cl_2Ca .
- c: 2 por 100 Cl_2Ca .

Gráfico 9.

bonato potásico, con dosificaciones del 15 por 100 en peso del cemento se podría llegar a hormigonar hasta a -25° C.

Los aditivos retardadores, sin embargo, pueden conseguir su fin de dos maneras: reduciendo la velocidad de hidratación del cemento o bien impermeabilizando la superficie de los granos al precipitarse sobre ella.

Entre los primeros, el más importante es el yeso, también produce el mismo efecto la cal grasa, y entre los segundos están la glicerina, la glucosa, el azúcar y los fluoruros, fosfatos y tetraboratos alcalinos.

Se utilizan retardadores de fraguado para llevar a cabo la revibración, es decir, una nueva vibración del hormigón cuando haya transcurrido un determinado espacio de tiempo desde que se efectuó la primera y mientras el hormigón conserva la suficiente plasticidad como para que se le puedan introducir los vibradores sin que se produzcan grietas.

La revibración de una capa se lleva a cabo al tiempo que se efectúa la vibración de la que tiene encima, consiguiéndose así una perfecta unión entre ellas.

Hay algunas sales que actúan como aditivos retardadores cuando se utilizan en dosis muy pequeñas, y que, en cambio, aceleran el fraguado en dosis mayores. A este grupo pertenecen el cloruro cálcico, el sulfato cálcico, el sulfato potásico, el carbonato potásico, el cloruro sódico, el sulfato sódico, el sulfur sódico y el nitrato sódico.

IMPERMEABILIZANTES

El agua pasa a través del hormigón por dos procesos diferentes: en primer lugar, debido a la diferencia de presión existente entre los dos paramentos, el agua es forzada a circular a través de los conductos que encuentra en el interior de la masa de hormigón. En segundo lugar, el paso del agua es consecuencia de la acción de las fuerzas capilares, y no es necesaria la existencia de presión externa.

Los canales que presenta el hormigón en su interior y por los que puede circular el agua son originados por la evaporación del agua de amasado, que es añadida en mayor cantidad que la estrictamente necesaria para el fraguado del cemento, con el fin de tener una mayor facilidad en la colocación del hormigón.

En el gráfico 10 se indica el modo en que la relación agua-cemento influye en la permeabilidad.

Como los plastificantes, para una misma trabajabilidad del hormigón, logran reducir la relación agua-cemento y, como consecuencia, la permeabilidad, se les puede considerar como un grupo dentro de los impermeabilizantes.

También pueden presentarse pequeñas fisuras en el hormigón, producidas por retracciones de fraguado o térmicas o bien por someterle a cargas en edades tempranas.

El incremento de la dosificación de cemento es, generalmente, el método más efectivo para disminuir la permeabilidad del hormigón, pero ello lleva consigo el aumento del calor de hidratación, y su control es fundamental en la construcción de grandes presas, como ya antes se ha indicado.

Este aumento del calor de hidratación no es proporcional a la sobredosificación de cemento, pues se ha comprobado que parte de él quedará sin hidratar. En el gráfico 11 se indica cómo varía el calor de hidratación de

Se distinguen dos clases de impermeabilizantes: los de masa y los de superficie.

Los primeros reducen la circulación capilar del agua, pero no son efectivos ante la presencia de presiones, sien-

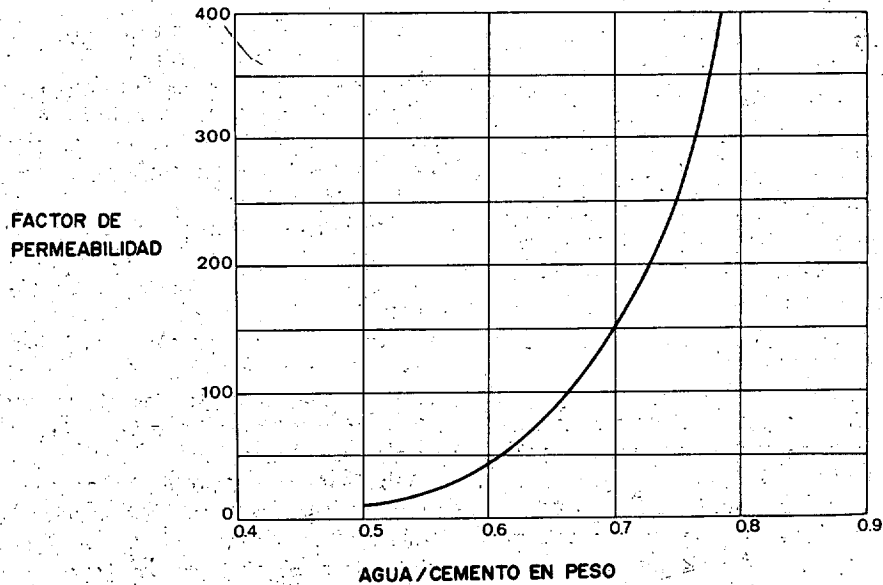


Gráfico 10.

un gramo de cemento en función de la relación agua-cemento.

La resistencia del hormigón al paso del agua puede mejorarse mediante el empleo de aditivos impermeabilizantes.

do, además, demasiado costosos para poder ser utilizados en todo el volumen de la presa, por ello encuentran mayor aplicación los de superficie, que actúan como una película protectora, penetrando en los poros del hormigón, colmátandolos.

Estos impermeabilizantes deben resistir la acción química de las aguas a las que han de cerrar el paso, resistir la abrasión y no atacar químicamente ni ser tampoco atacados por los componentes del hormigón.

Se utilizan como tales aditivos los fluosilicatos de cinc o magnesio, que forman con la cal liberada fluosilicatos insolubles, también las siliconas y las pinturas bituminosas.

No deben utilizarse pinturas grasas, pues la cal liberada puede saponificar los aceites grasos.

También se utilizan los silicatos de potasio y sodio. El inconveniente del empleo del segundo es que produce un carbonato cristalizado con diez moléculas de agua, con incremento de volumen; sin embargo, es más barato que el primero. Tienen el inconveniente de la poca duración, por lo que hay que renovarlo pasado algún tiempo.

La silicatización tiene mayor efecto cuando se aplica entre dos capas de fluosilicatización.

Otra clasificación para estos aditivos, atendiendo al fin que consiguen y no a su forma de aplicación, es:

Impermeabilizantes: los que impiden la circulación del agua bajo presión.

Hidrófugos: los que reducen la absorción capilar.

CALORIAS
POR GR.

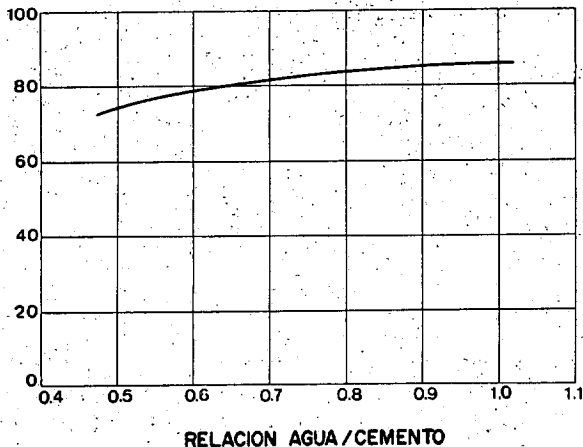


Gráfico 11.

Incrustantes: los que aplicados superficialmente colman los poros del hormigón en un cierto espesor.

Para la construcción y explotación de una gran presa son necesarias una serie de obras e instalaciones complementarias, tales como: inyecciones en el terreno, construcción de canales, revestimiento de túneles, etc., e incluso corrección de desperfectos originados en el hormigón, bien durante la construcción de la presa, por golpes o voladuras próximas, o bien, una vez que ha entrado en servicio, por excesiva velocidad del agua, cavitaciones, etc.

También en estos casos se puede estudiar el empleo de aditivos que permitan mejorar las propiedades del hormigón que va a utilizarse; sin embargo, los más importantes, dado el gran volumen de hormigón sobre el que actúan, son aquéllos que anteriormente hemos tratado.

LA ELECCION DE LOS ADITIVOS Y ENSAYOS A REALIZAR

Con el empleo de aditivos es posible obtener o mejorar en el hormigón una serie de características que con otros métodos no se podrían conseguir, o al menos no de una manera tan sencilla, barata y tan fácilmente controlable.

La elección del aditivo a emplear debe ser un problema del mismo alcance que el del tipo de cemento o el de

los áridos que se van a utilizar para la confección del hormigón.

La Instrucción para el Proyecto y Ejecución de Obras de hormigón admite el uso de aditivos siempre que, mediante ensayos, se demuestre que con la proporción prevista se obtiene la mejora deseada sin perturbar excesivamente las restantes características.

La realización de ensayos es obligada desde el momento en que no pueden darse *a priori* las cantidades necesarias a emplear de un aditivo, pues ya se ha visto que en su efecto influyen las características peculiares de cada obra, composición del cemento, forma y tamaño de los áridos, etc.

Una vez calculada la cantidad ideal de un aditivo para una determinada obra debe mantenerse constante, pues ya se ha indicado que de su dosis no sólo depende la magnitud de la variación, sino a veces también su signo, como sucede con algunos aceleradores, que en determinadas proporciones actúan como retardadores.

Si variase alguna de las circunstancias, deberá estudiarse cómo influye su cambio en las propiedades que modifica el aditivo.

Una vez ensayado el aditivo en las condiciones en que se va a utilizar y obtenidos resultados favorables, los restantes ensayos deben ir encaminados a vigilar la constancia en la composición del producto.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

F. ARREDONDO: "Estudio de materiales".

J. CALLEJA: "Estado actual de los estudios sobre aditivos para hormigón en España".

E. HERRERO: "Anticongelantes e hidrófugos".

J. L. GOMEZ NAVARRO y J. J. ARACIL: "Saltos de agua y presas de embalse".

A. HUMMEL: "Prontuario del hormigón".

A. KLEINLOGEL: "Influencias físico-químicas sobre los hormigones en masa y armados".

XVI JORNADAS TECNICAS ALEMAS: "Aditivos para hormigones y morteros".