

LOS PRODUCTOS QUIMICOS DE ADICION EN HORMIGONES DE PRESAS DE EMBALSE

Por JOSE MARTINEZ RAYON,
Ingeniero de Caminos
y WILLY PAUL HINNEN,
Ingeniero diplomado de la Escuela Politécnica
Federal de Zurich.

En el presente artículo desarrollan los autores su opinión favorable al empleo de agentes plastificadores-aireadores de adición al hormigón para conseguir la impermeabilidad, incluso con economía de cemento.

Por ser las presas de embalse, en general, las obras que mayores volúmenes de hormigón requieren, es en ellas particularmente interesante estudiar con todo esmero el tipo y características de los hormigones a utilizar, buscando siempre, a la par que la mejor calidad de los mismos, la máxima economía.

La condición primordial a que han de satisfacer los hormigones de las presas de embalse es la *impermeabilidad*, por las siguientes razones:

1.ª Para evitar las pérdidas por filtración del agua embalsada.

2.ª Para evitar los fenómenos de las subpresiones en el cuerpo de la obra.

3.ª Para evitar los efectos de las heladas en los paramentos.

4.ª Para evitar el mal efecto de un paramento aguas abajo con manchas de humedad y escurriduras de agua filtrada.

La impermeabilidad del hormigón ha de ser tanto mayor cuanto mayor sea la altura de la presa y, consiguientemente, la presión hidráulica que ha de soportar.

Otra condición fundamental de tales hormigones es la *densidad*; cualquiera que sea el tipo de presa que se proyecte de acuerdo con las características topográficas y geológicas de la cerrada de ubicación, la estabilidad estática y elástica de la obra está íntimamente ligada a la densidad de la fábrica, y cuanto mayor sea tal densidad, en mejores condiciones estará la estructura para soportar los empujes a que está sometida, con secciones mínimas.

Las altas *resistencias mecánicas* no tienen mucha importancia en las presas de tipo de gravedad, puesto que, al fijar la sección transversal del muro, manda tanto como la carga límite de trabajo a compresión (habida cuenta del coeficiente de seguridad admitido) la condición de ausencia de tracciones en los paramentos, en particular en el pie del de aguas arriba a embalse lleno; sin embargo, siempre se puede reducir la sección transversal aumentando la carga límite de trabajo a compresión, en tanto que el terreno de cimentación sea capaz de soportarlo, cosa que ocurre en la mayor parte de los casos.

En los restantes tipos de presa — bóveda, bóvedas múltiples, contrafuertes, etc. —, en los que los hormigones han de soportar cargas de trabajo más fuertes, las altas resistencias mecánicas tienen el carácter de condición fundamental.

Finalmente, para todos los tipos en presa vertedero, cada día más generalizados, tanto en la zona vertiente como en el cuenco amortiguador, se requieren hormigones de gran dureza superficial que puedan soportar los efectos de erosión de la lámina vertiente con grandes velocidades de circulación, remolinos, etc.

Para el más claro estudio del problema general, vamos a distinguir las presas de *tipo gravedad*, de todos los restantes tipos, que consideraremos agrupados bajo la denominación de *presas estructurales*.

Presas de gravedad.

Los hormigones de las presas de gravedad han de cumplir las condiciones de impermeabilidad, máxima densidad y resistencias mecánicas normales. Si se trata de presa vertedero, en la zona vertiente y cuenco amortiguador han de ser, además, de mucha dureza superficial.

Para tratar de conseguir estas condiciones del hormigón se hace un estudio muy detallado de la granulometría de los áridos, con objeto de producir hormigones compactos (mínimo de huecos) y densos (admitiendo tamaño máximo del árido de hasta 15 y 18 cm.), y, a falta de otro elemento, se fuerza la dosificación de cemento en los paramentos; en el de aguas arriba, para tratar de constituir una pantalla de impermeabilidad contra las filtraciones del embalse, y en el de aguas abajo, pensando que el hormigón impermeable resiste mejor a los efectos de las heladas. En resumen, puede decirse que el perfil de una presa de embalse de tipo gravedad es el indicado en el gráfico número 1. Con gran frecuencia, no confiando en la impermeabilidad de la pantalla del paramento de aguas arriba, se establece tras ella un plano de drenaje con objeto de recoger las posibles filtra-

ciones que se puedan producir y evitar que los efectos de subpresión avancen hacia el paramento de aguas abajo; en este plano de drenaje se establecen galerías visitables de inspección, colectoras de la filtración, y dispuestas para desde ellas hacer, si fuese necesario, trabajos de inyección para impermeabilizar la pantalla en la forma que indicamos en el gráfico número 1.

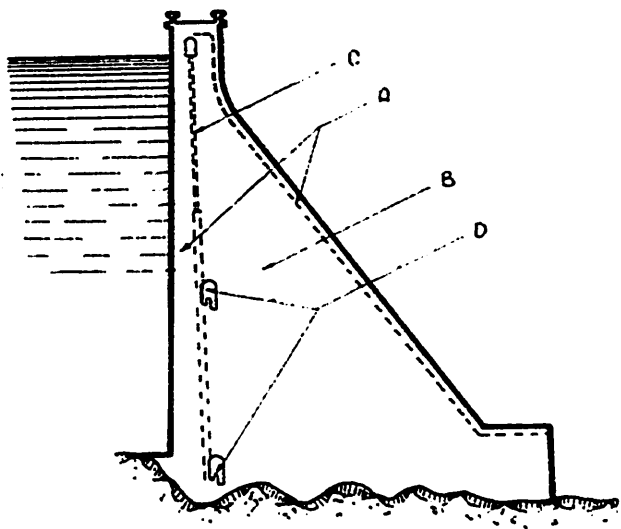


Gráfico núm. 1.

- A = hormigón dosificado a razón de 220 a 250 Kg./m.³.
 B = hormigón dosificado a razón de 150 a 200 Kg./m.³.
 C = plano de drenaje.
 D = galerías de drenaje.

Dentro de estas consideraciones de tipo general, el perfil se calcula, siendo los datos fundamentales:

- 1.º La altura de la presa y, por tanto, la presión hidráulica máxima.
- 2.º La densidad prevista para la fábrica.
- 3.º Las cargas máximas de trabajo en los puntos de máxima sollicitación, que son los pies de paramentos a embalse vacío y embalse lleno. Eventualmente puede ser condición limitativa la carga máxima sobre el terreno.

Con tales datos se fijan los taludes de los paramentos de aguas arriba y aguas abajo del perfil triangular teórico, y se completa la sección definitiva con la berma de coronación y camino sobre la presa.

Fijada así en el proyecto la sección transversal de la obra, la ejecución de la misma, aparte los problemas constructivos, ha de asegurar que se cumplen las hipótesis de cálculo previstas; es decir, que se consigue un hormigón cuya densidad real sea, por lo menos, igual a la que se tomó como base para el cálculo y que tenga la máxima impermeabilidad para que las subpresiones no sobrepasen la hipótesis del proyecto.

Tal es el esquema del proceso clásico de la construcción de una presa de embalse de tipo gravedad.

Agentes aireadores puros.

La aparición de los agentes aireadores, cuya utilización adecuada permite la ejecución de los hormigones totalmente impermeables, ha liberado a la técnica de tratar de conseguir la impermeabilidad a base de forzar las dosificaciones de cemento en los hormigones de paramento y de establecer pantallas de drenaje, galerías de visita y otras precauciones que resultan caras y entorpecen extraordinariamente la ejecución de las presas de que estamos ocupándonos. Con el uso adecuado de los aireadores se puede ir al perfil homogéneo seguros de que el muro es impermeable en toda su masa, lo que simplifica la ejecución de la obra haciendo para toda la presa un hormigón único y suprimiendo drenajes, galerías, etc., con la consiguiente economía.

Ahora bien, es preciso proyectar la obra de acuerdo con los datos propios de los hormigones aireados, o, si estaba proyectada pensando en hormigones corrientes, reajustar el cálculo antes de la construcción, de acuerdo con las características de los hormigones a utilizar.

Los hormigones aireados son impermeables, es verdad, pero en cambio son más ligeros que los corrientes y sus resistencias mecánicas más bajas, y como la densidad de la fábrica y sus cargas de trabajo son, como hemos dicho, datos fundamentales del cálculo de la sección transversal, es preciso fijar el perfil definitivo de la obra con tales datos.

Que nosotros sepamos, en Europa no existen especificaciones oficiales referentes a los productos químicos de adición a hormigones. En Norteamérica están normalizados oficialmente los ensayos de hormigones con aireadores; las condiciones que se establecen en relación con los hormigones normales son las siguientes:

La reducción de las resistencias mecánicas, tanto a flexión como a compresión, no debe ser superior a 15 %.

La adherencia a las armaduras tampoco experimentará reducción superior al 15 %.

El volumen del hormigón aireado no sobrepasará en más del 10 % al del hormigón normal.

Podemos, pues, admitir como cosa experimentada y comprobada que el uso de aireadores reduce en un 10 % las resistencias mecánicas y también del orden del 10 % las densidades de los hormigones.

Vamos a hacer un cálculo del orden de magnitud del encarecimiento que produce el uso correcto del aireador puro, refiriéndonos al caso de una presa de perfil triangular con paramento aguas arriba vertical, coeficiente de subpresión $\theta = 0,25$ y altura $h = 50$ metros. Utilizando la tabla 54-I, pág. 1747, del libro de Gómez Navarro y Aracil *Salto de agua y presas de embalse*, tomo II, y admitiendo como densidad del hormigón normal (dosificando a razón de 200 Kg. por metro cúbico de hormigón en obra, con granulome-

tria continua bien estudiada) $p = 2350$, la indicada tabla nos da un ancho en la base $b = 34,50$ m. y carga máxima de trabajo a compresión a embalse lleno, en el pie del paramento de aguas abajo, $A_1 = 15,50$ Kg./cm.².

El volumen de hormigón por metro lineal será $\frac{1}{2} \times 50 \times 34,50 = 862,500$ m.³, y si asignamos a este hormigón un precio por metro cúbico de 400 pesetas, el coste de la presa por metro de longitud será de 345.000 pesetas.

Al utilizar en tal presa un aireador puro, la densidad del hormigón será del orden de $0,90 \times 2350 = 2115$; tomaremos $p = 2150$; la carga máxima de trabajo admisible se habrá reducido también a $0,90 \times 15,50 = 13,95$ Kg./cm.² (suponiendo que con el coeficiente de seguridad adoptado y la dosificación fijada había coincidencia entre la resistencia teórica del hormigón y la carga máxima de trabajo). Con tales nuevos datos y el mismo coeficiente de subpresión la citada tabla nos da para ancho en base $b = 36,28$ m. y $A_1 = 14,50$ Kg./cm.². La carga de trabajo sobrepasa ligeramente la admisible, pero como estamos en valores que corrientemente son sobrepasados por las resistencias de los hormigones con coeficientes de seguridad normal, no vemos inconveniente en admitirlo.

El volumen de la presa a ejecutar con el hormigón aireado sería $\frac{1}{2} \times 36,28 \times 50,00 = 907,00$ m.³ por metro lineal, y su coste total, el valor de este volumen de hormigón al precio de 400.00 pesetas metro cuadrado, más el valor del producto aireador adicional. El primer sumando es 362.800 pesetas; el segundo sumando, suponiendo se adiciona el aireador a razón de tres por mil del peso de cemento y que su valor en mercado sea de 22 pesetas kilogramo, $0,003 \times 200 \times 907 \times 22 = 11972,40$ pesetas.

El coste total de la presa sería, por metro lineal, de 374 472,40 pesetas, es decir, 29 772,40 pesetas más caro que la presa con hormigón corriente, lo cual representa un aumento de 8,63 %. Claro está que este incremento de coste pueda estar en parte compensado al conseguirse un hormigón enteramente impermeable, y con ventajas en la ejecución por la mayor trabajabilidad de los hormigones aireados.

Podemos, pues, asegurar que la utilización de aireadores puros con la debida corrección del perfil para mantener las hipótesis del cálculo representa un incremento del coste de la obra de un 8 %, contra las ventajas de manejabilidad del hormigón e impermeabilidad de la presa.

Agentes plastificadores-aireadores.

El uso de los plastificadores-aireadores permite, por el contrario, ejecutar las presas de embalse de tipo gravedad sin aumento de coste de la obra, y aun, en la mayor parte de los casos, con economía respecto

a la obra ejecutada con hormigones normales sin productos de adición.

Los plastificadores-aireadores, como se demostraba en nuestro artículo anterior (núm. 2.881 de 1955), no sólo no motivan disminución de densidad de los hormigones, sino que en casos la aumentan ligeramente; en cuanto a las resistencias mecánicas a compresión, el aumento conseguido con el plastificador-aireador era, como mínimo, del 20 %.

Utilizando, por tanto, los referidos productos, al no reducirse la densidad del hormigón se puede mantener sin variación el perfil proyectado, y al tener hormigones de más altas resistencias a la compresión, se puede, manteniendo las cargas de trabajo, reducir la dosificación de cemento. La economía que representa esta reducción de dosificaciones de aglomerante, según el coste a pie de obra del cemento y los volúmenes a realizar de cada tipo de hormigones, en general compensa sobradamente el coste del producto utilizado, ya que se emplea en proporciones que oscilan entre 0,7 y 1,0 % del peso del cemento.

Con los cementos portland normales españoles y adecuada granulometría de áridos se pueden admitir como valores medios de la resistencia a compresión a los veintiocho días los siguientes:

Hormigones normales.

Dosificaciones de	150	200	250	300
Cargas unitarias, Kg.-cm. ² ...	110	145	175	200

Con la adición de 1 % de producto plastificador-aireador en relación con el peso de cemento las cargas unitarias serían del siguiente orden:

Hormigones con 1 % de producto.

Dosificaciones de	150	200	250	300
Cargas unitarias, Kg.-cm. ² ...	132	174	210	360

En términos generales, podemos decir que la utilización del plastificador-aireador permite reducir en 50 Kg. la dosificación de cemento de los hormigones corrientes; admitiendo un coste a pie de obra del cemento de 650 pesetas/tonelada, la reducción indicada de dosificación representa una economía mínima por este concepto de 32,50 pesetas, y como para un hormigón medio de 200 Kg. de cemento el consumo de producto es de 2 Kg. y el precio en mercado de unas 15 pesetas/kilogramo, la economía de cemento compensa con creces el coste del producto, como antes decíamos, aun en los casos más desfavorables.

La impermeabilidad del hormigón también queda asegurada, no solamente por el aire que el aireador aporta al hormigón, sino por la compacidad que comunica el plastificador, superior a la del hormigón normal, que compensa el volumen ocupado por el aire ocluido; en cuanto a la manejabilidad y facilidad de

puesta en obra, también se consiguen, como con el aireador puro, por sumarse los efectos de la aireación y la plastificación, como exponíamos en nuestro anterior artículo citado.

Es decir, que con los agentes plastificadores-aireadores se pueden conseguir los mismos efectos que con los aireadores puros, pero sin aumento del coste real de las obras, o más bien con economía sobre lo previsto con hormigones normales sin producto de adición.

Presas estructurales.

En las presas de embalse de tipos que hemos llamado estructurales (bóveda, bóvedas múltiples, contrafuertes, etc.), bien sean de hormigón en masa o armado, a más de la impermeabilidad del hormigón se requieren altas resistencias mecánicas.

Esta circunstancia fundamental hace que no sean en ellas utilizables los agentes aireadores puros, porque la pérdida de resistencia mecánica que origina, tanto mayor cuanto más ricos en aglomerante son los hormigones, obligaría a dosificaciones muy fuertes que encarecerían extraordinariamente las obras.

Por el contrario, el uso de los agentes plastificadores-aireadores está indicadísimo, puesto que el aumentar las resistencias mecánicas — tanto más cuanto más ricos son los hormigones — permite reducir las dosificaciones de cemento previstas para hormigones sin producto químico de adición; con lo cual, como hemos demostrado para las presas de tipo gravedad, se puede conseguir no encarecer la ejecución de la obra y en muchos casos tener una economía directa, a más de las ventajas de impermeabilidad, trabajabilidad y alta calidad de los hormigones fabricados.

En el extranjero hace ya muchos años que no se utilizan prácticamente en las presas de embalse los hormigones clásicos de cemento, agua y áridos; primeramente se utilizaron, tanto en Europa como en América, los plastificadores puros, y a esta época corresponden, entre otras muchas, las siguientes obras:

Presas de aprovechamiento hidroeléctrico de *Verbois*, sobre el *Ródano*, en las cercanías de Ginebra (Suiza).

Presas de *Val Gallina*, en Longerone (Italia).

Presas de *Piave*, sobre el río *Piave*, en Sotocastello (Italia).

Presas del aprovechamiento hidroeléctrico de *Tauern-Kaprun*, en Carintia (Austria).

Presas de *Lucendro-San Gotardo*, en Airolo (Suiza).

Presas de *Beni-Bahdel*, en Orán (Argelia).

Al hacer su aparición los agentes aireadores pu-

ros, los técnicos y constructores, sugestionados por las características de impermeabilidad y trabajabilidad que tales productos comunicaban a los hormigones, y también por la novedad, comenzaron en algunos casos a utilizarlos en las presas de embalse, principalmente por las ventajas que encontraban en las facilidades de la colocación de los hormigones en obra gracias a su mayor docilidad, y pensando que la reducción del agua de amasado podría compensar la reducción de densidad y de resistencias.

Al comprobarse que esta compensación no se conseguía, se comenzó a estudiar la asociación de los plastificadores con los aireadores, y al conseguirse prácticamente esta feliz combinación, se abandonó el uso de los aireadores puros y se admitió, como solución óptima, el empleo de los plastificadores-aireadores; a este periodo, que es el actual, corresponden, entre otras, las siguientes obras:

Presas de *Forte Buzo*, sobre el *Travignolo*, en Bellamonte (Italia).

Aprovechamiento hidroeléctrico de *Thurn-Wegscheid*, sobre el *Kamp* (Austria).

Presas de *Dobra-Kruman*, sobre el *Kamp* (Austria).

Presas de *Coucsque* y de *Goul* (Francia).

Presas de *Publino*, en Milán (Italia).

Aprovechamiento hidroeléctrico de *Birsfelden*, Basilea (Suiza).

Como obra característica de esta época citaremos la presa del pantano de *Sambuco*, junto a Locarno (Suiza), del aprovechamiento hidroeléctrico de *Maggia Kraftwerke A. G.*, en la cual se empezó a fabricar el hormigón con un aireador puro ("Barra-55" Vinsol), y se abandonó el sistema, continuando los trabajos con un plastificador-aireador moderno.

En el estado actual de la técnica de fabricación de hormigones, y en tanto que no aparezca algún nuevo producto que obligue a hacer un reajuste de ideas y conceptos, podemos asegurar que ha pasado ya la época de los aireadores puros en la construcción de las presas de embalse y estamos en la época de los plastificadores-aireadores; al decir esto nos referimos a la situación fuera de España, pues dentro de nuestro país, por el retraso en los avances de la técnica, consecuencia del aislamiento comercial internacional que hemos padecido en los últimos años, puede decirse que estamos ahora en los balbuceos de los aireadores puros.

Merece la pena ocuparse de la cuestión para cuanto antes encajar nuestra técnica de construcción de las presas de embalse en el momento internacional, utilizando los agentes plastificadores-aireadores cuyas ventajas hemos enumerado, las que justifican la aceptación unánime de tales productos en todo el mundo.