

GUÍAS TÉCNICAS DE SEGURIDAD DE PRESAS 2

**CRITERIOS PARA PROYECTOS
DE PRESAS Y SUS OBRAS
ANEJAS**

Tomo I

Actualización en lo referente a HCR

- **Actualización del Capítulo 4.3**
- **Introducción del Capítulo 4.7**
- **Introducción del Capítulo 4.8**
- **Actualización del Capítulo 5.2**
- **Actualización de la Bibliografía**

...

4. CRITERIOS DE DISEÑO

...

4.3. PRESAS DE GRAVEDAD DE HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO

Se considera de forma separada la *presa de gravedad de hormigón compactado*, o de *HCR (Hormigón Compactado con Rodillo)*, porque las diferencias en el material y, sobre todo, el diferente procedimiento de puesta en obra, imponen unos condicionantes de diseño específicos, por lo que el proyecto de una presa de gravedad deberá ser sustancialmente distinto en función de la tecnología con que se ha previsto construir, de hormigón vibrado o compactado.

Los ingenieros se plantearon la posibilidad de utilizar la tecnología de puesta en obra de las presas de materiales sueltos para construir presas de hormigón. Para ello es preciso que el hormigón sea muy seco, lo necesario para permitir el trabajo de la maquinaria de compactación sobre su superficie. Además se necesita que el tajo de compactación tenga unas dimensiones suficientes para que el rendimiento sea adecuado, dimensiones que exceden en mucho los aproximadamente 15 m de separación entre juntas de bloque que son habituales en las presas de hormigón vibrado. Esta distancia viene limitada esencialmente por la retracción que se produce durante el proceso de endurecimiento del hormigón, debido a la eliminación del agua libre y al descenso térmico que sigue al fraguado. Mediante una disminución de la cantidad de agua, que reduce al mínimo el agua libre, y mediante la sustitución de una parte importante del cemento por material puzolánico, que libera una cantidad muy moderada de calor durante el fraguado, es posible incrementar notablemente la separación entre juntas, disponiendo de un tajo adecuado para el proceso de compactación. Además, la tecnología del HCR permite la creación de juntas entre bloques no encofradas, realizadas a posteriori, lo que facilita la creación de una superficie de compactación de tamaño adecuado con independencia de la limitación impuesta por la sollicitación térmica.

Debe tenerse en cuenta que el hormigón vibrado que habitualmente se utiliza en la construcción de presas es bastante seco y el conglomerante empleado también es una mezcla de cemento y material puzolánico, habiéndose incrementado progresivamente el porcentaje de éste último. Como consecuencia de todo ello, las diferencias entre los materiales empleados en las tecnologías del hormigón vibrado y del hormigón compactado se han reducido paulatinamente, resultando en la actualidad evidente que lo esencial de la tecnología del HCR es el procedimiento de puesta en obra.

La economía de la tecnología del HCR se deriva principalmente de la posibilidad de poner en obra grandes cantidades de hormigón en cortos períodos de tiempo, lo que reduce sensiblemente el plazo de ejecución respecto al necesario para la construcción de la misma presa mediante la tecnología del hormigón vibrado. Por eso el diseño de una presa de HCR debe estar enfocado a la reducción al mínimo de todos aquellos aspectos que interrumpen el proceso de hormigonado, que ha de ser lo más continuo posible, ya que en caso contrario se pierde la ventaja esencial de esta tecnología. En el proyecto se deben limitar al máximo las interferencias en la superficie a compactar y la situación y número de elementos funcionales debe supeditarse al objetivo de que el hormigonado pueda ser continuo. La economía que se deriva del menor contenido de cemento, por ser mayor la proporción de cenizas, se añade a la conseguida por acortamiento del plazo, pero generalmente no justificarían de forma aislada el empleo de la tecnología de HCR.

Las instalaciones y tipo de encofrados necesarios para mantener un ritmo de hormigonado adecuado y lo más continuo posible son costosos, por lo que en muchos casos la tecnología del HCR requiere, para resultar económicamente ventajosa, un volumen significativo de hormigón a colocar. Existen no obstante presas de HCR relativamente pequeñas que también son muy económicas. Las topografías suaves son las más adecuadas para esta tecnología, ya que facilitan el acomodo de las instalaciones de transporte del hormigón al tajo, que generalmente son cintas transportadoras que han de variar su situación varias veces a lo largo de la ejecución de las obras. No obstante también se han realizado presas de HCR en cerradas muy angostas, siendo para estos casos muy apropiados los equipos de cintas transportadoras con sistemas autotrepantes, como el empleado en la presa de La Breña II (Fig.2.22A), que permiten con una única implantación del equipo el hormigonado de toda la presa (con la excepción, en algunos casos, de uno de los castilletes de coronación de los estribos, que puede requerir un

alargamiento del equipo, o bien realizarlo con transporte integral mediante camión desde la planta de hormigón). Como alternativa a las cintas se viene empleando recientemente un sistema tan simple como es el “vacuum chute” (canaleta por vacío) que es adecuado si la mezcla es rica en pasta, cohesiva y no se segrega. Este sistema se ha usado en numerosas ocasiones en presas de HCR en China y posteriormente también en otros países como Bolivia (Presa de La Cañada), Irán (Presa de Jahgin), Birmania (Presa de Yeywa), Costa Rica (Presa de Pirrís), etc.. En España, se ha empleado en la presa del Puente de Santolea (Fig.2.22B).

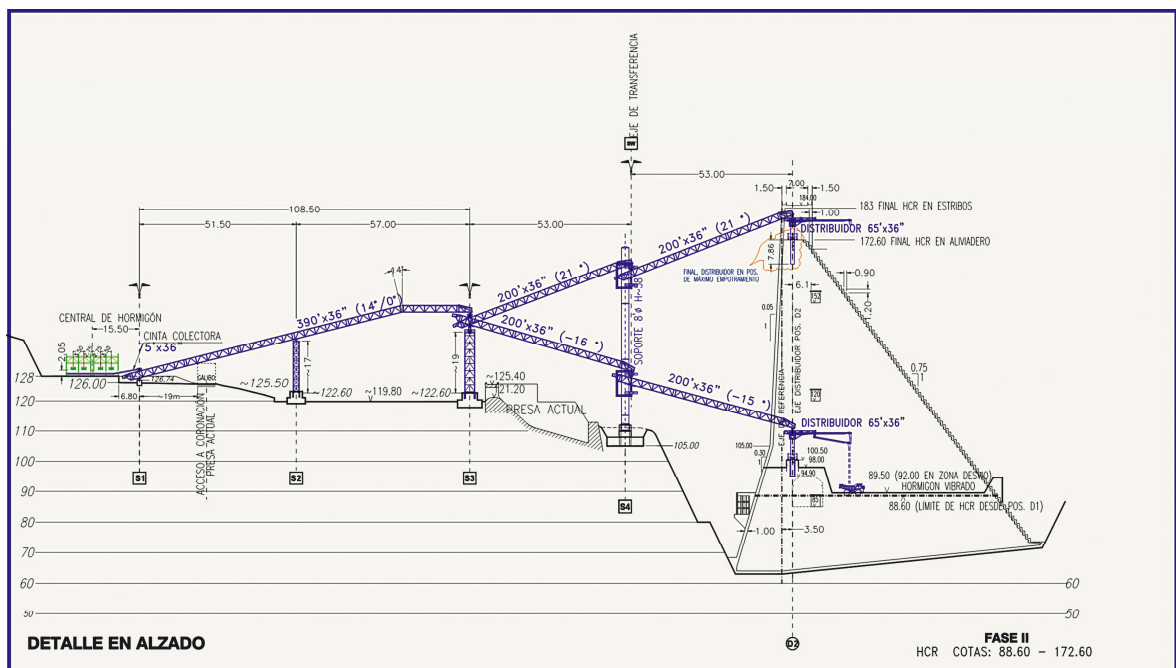


Fig. 2.22A – Esquema de cintas de alta velocidad de transporte de hormigón empleadas en la presa de La Breña II (Acuasur)

A diferencia de la tecnología del hormigón vibrado, cuya práctica está ya muy normalizada como consecuencia de la larga experiencia acumulada, la del HCR es relativamente reciente, por lo que bajo la denominación común de HCR se engloban tecnologías relativamente diversas con el factor común de que la consolidación del hormigón se obtiene mediante la compactación con rodillos vibratorios.

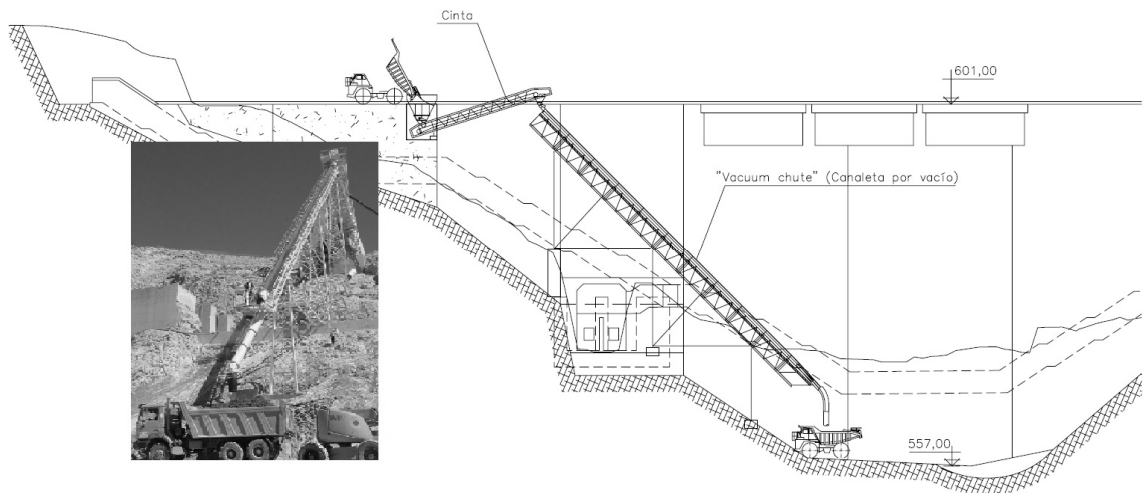


Fig. 2.22B – Presa del Puente de Santolea de gravedad HCR (AcuaEbro - Confederación Hidrográfica del Ebro) de 44 m de altura. Esquema del sistema de transporte de HCR tipo “vacuum chute” (canaleta por vacío) empleado para la construcción de la presa

4.3.1 Encaje de la presa en la cerrada

Los criterios para realizar el encaje de la presa son análogos a los de una presa de gravedad de hormigón vibrado, con algunas particularidades como las siguientes:

- Conviene disponer los órganos de desagüe (desagües de fondo, medio fondo y tomas) fuera del tajo de hormigón compactado para favorecer la posibilidad del hormigonado continuo, tanto en una sección longitudinal de la presa como en cualquier sección transversal:
 - En el caso de los conductos que atraviesan la presa, empotrándolos o adosándolos a la roca de cimentación y alojándolos en una estructura de hormigón vibrado, en un mismo conjunto con la cámara de control.
 - En el caso de las torres de toma, adosándolas al paramento aguas arriba, construyéndolas con antelación o con posterioridad al cuerpo de presa de HCR, o totalmente exentas.
 - En el caso de centrales hidroeléctricas, es preferible colocar el edificio de la central en caverna subterránea en uno de los estribos, o bien adosarlo al pie

de aguas abajo de la presa. En algún caso se ha situado bajo el trampolín del aliviadero (presa de Platanovryssi, en Grecia).

La distinta concepción de los órganos de desagüe puede conducir a un encaje óptimo del conjunto, diferente del que se adoptaría si la presa fuera de hormigón vibrado,

- Cualquier otra estructura: pilas y puente sobre el aliviadero, cajeros del aliviadero, losa de revestimiento de la rápida del aliviadero (cuando sea necesaria), etc., debe diseñarse para poder ser construida sin afección a la colocación lo más continua posible del HCR.

4.3.2 Sección tipo

Toda presa de gravedad ha de cumplir las mismas condiciones de estabilidad estática y elástica, con independencia de que se haya ejecutado con hormigón vibrado o compactado con rodillo. Ambos hormigones tienen peso específico y comportamiento tenso-deformacional similar, con las diferencias que se indican en el apartado 5. En consecuencia, los taludes que han de tener las presas de gravedad de hormigón vibrado y de HCR son también similares. No obstante, las presas de HCR presentan algunas peculiaridades que deben tenerse en cuenta al definir la sección tipo y que implican variaciones respecto a la sección que se adoptaría para una presa de hormigón vibrado:

- El número de juntas de tongada, donde la resistencia a tracción es menor y variable dependiendo de la eficacia del proceso constructivo, es del orden de 6 ó 7 veces mayor que en la presa de hormigón vibrado. Por tanto, la probabilidad de que se supere la resistencia a tracción en una junta de tongada y se produzca la fisura correspondiente es mayor si la presa es de HCR, por lo que el cumplimiento de la condición de limitación de tracciones debe asegurarse de forma especial. En los casos en que se juzgue conveniente puede dimensionarse la presa para que no se produzcan tracciones incluso en las situaciones accidentales o hasta extremas, garantizando así una reserva de compresión en las situaciones normales. También puede fijarse una reserva mínima de compresión a mantener en las situaciones normales. Un estado de compresión en el

paramento de agua arriba reduce la filtración a través de las juntas de tongada, incluso en el caso de que la unión sea defectuosa,

- La disposición de paramento de aguas arriba quebrado puede implicar una reducción apreciable en el pie de aguas arriba de la tensión en la dirección del paramento respecto a la que se produce en dirección vertical, como se razona en el apartado 4.2.1. Ello debe tenerse en cuenta para evitar que aparezcan tensiones de tracción,
- El ancho de la coronación ha de ser suficiente para permitir la correcta realización de la compactación. En general las anchuras de más de 8 m (en grandes presas es habitual que sean de 10 m) facilitan la ejecución. (Fig. 2.22C)

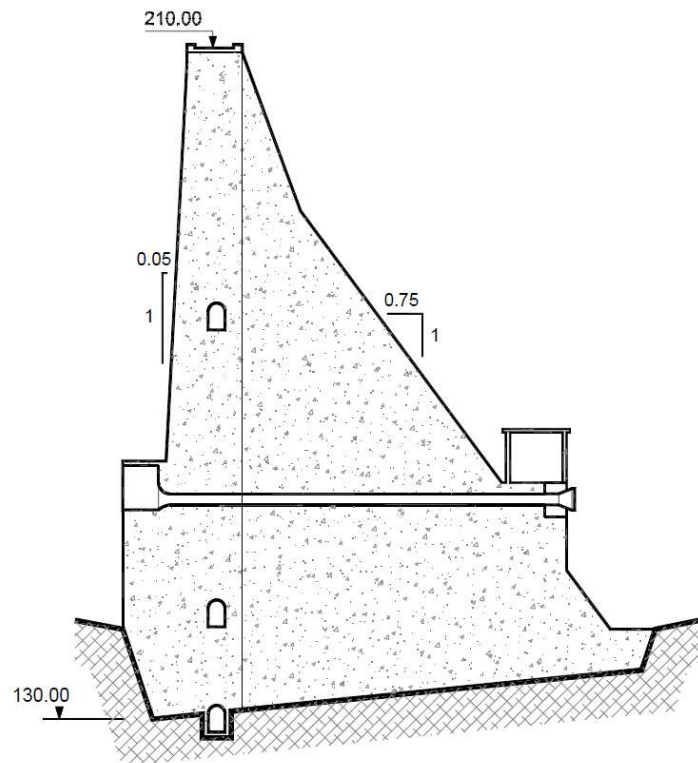


Fig. 2.22C - Presa de Santa Eugenia de gravedad HCR (Sociedad Española de Carburos Metálicos) de 87 m de altura. Obsérvese el quiebro aguas abajo para conseguir anchuras en coronación compatibles con la facilidad de movimiento de los compactadores.

- El paramento de aguas abajo, que en un principio, y por mimetismo con las presas de hormigón vibrado, se diseñaba plano, hoy día se proyecta escalonado, con altura de escalón múltiplo del espesor de tongada, lo cual es más acorde con el proceso

constructivo y facilita la labor de encofrado. Esto ha abierto la puerta a la solución de aliviaderos con rápida escalonada en muchas presas. De las ventajas y limitaciones de esta solución, se tratará posteriormente en 4.3.6,

- En algunas presas de HCR la impermeabilidad se encomienda a dispositivos adosados al paramento de agua arriba, como placas que sirven de encofrado perdido o revestimientos impermeables que se ejecutan a posteriori. Ello permite utilizar hormigones con un contenido mínimo de conglomerante. No obstante, la utilización de sistemas de impermeabilización en el paramento aguas arriba, si bien puede solucionar el problema de la permeabilidad, no resuelve el de la necesaria correcta soldadura entre tongadas, lo cual puede dejar en precario el monolitismo de la estructura, aspecto especialmente delicado en zonas sísmicas. Por ello en España ha sido frecuente la utilización de hormigones de alto contenido en pasta (cemento + cenizas + agua), garantizando por sí mismos la impermeabilidad y durabilidad del hormigón,
- La distribución de hormigones en la sección de la presa se encuentra en plena evolución, con tendencia hacia la máxima simplicidad y al mínimo de interferencias con el tajo de hormigón compactado. Las tensiones de trabajo de una presa de gravedad son generalmente reducidas, salvo en el pie de agua abajo en presas de gran altura, por lo que las condiciones de peso e impermeabilidad priman sobre las de resistencia. El problema se produce por la anisotropía que introducen las numerosas juntas de tongada, una cada 30 cm aproximadamente, en cuanto a su unión e impermeabilidad. La unión queda garantizada si la relación pasta/mortero es adecuada y el hormigonado de las tongadas sucesivas se lleva a cabo manteniendo un tiempo de maduración (ver apartado 4.3.3) suficientemente reducido. La otra condición, de impermeabilidad, ha marcado la evolución de los tipos de hormigón utilizados. Ciñéndonos a la experiencia española, podemos establecer los diferentes pasos en la evolución de la distribución de hormigones:
 - a) En un primer momento se utilizaron hormigones vibrados para formar el paramento de agua arriba, con espesores de 1 a 4 m, con la equivocada pretensión de que la zona de HV actuase a modo de pantalla impermeable para evitar la filtración a

través de las juntas entre capas del HCR, caso de que la unión entre las mismas fuera defectuosa, además de conferir un buen acabado estético al paramento.

Esta disposición crea inconvenientes funcionales y constructivos.

Inconvenientes funcionales: El alto tiempo de recubrimiento que admiten las juntas calientes entre capas de HCR, que puede variar (dependiendo de múltiples factores, entre los que prima la temperatura ambiente) entre 8 y 24 h, no es compatible con el bajo tiempo de recubrimiento de un HV, que normalmente es de 1 a 3 h. Por tanto, todas las juntas entre capas del HV son juntas frías, cuyo tratamiento es poco compatible con la velocidad de avance de las capas de HCR. A ello hay que añadir la contaminación que se genera sobre el HCR adyacente, por lo que potencialmente tienen una permeabilidad bastante superior a la de las juntas calientes de un HCR bien ejecutado. Adicionalmente, el mayor espaciamiento de juntas transversales que suele disponerse en las presas de HCR, típicamente entre 20 y 40 m, no es adecuado para la camisa de HV, y más dado su carácter bidimensional, por lo que no es infrecuente la aparición de fisuras verticales erráticas, con separaciones típicas entre 5 y 10 m (en función de su dosificación y la climatología). Ello hace que la pretendida pantalla impermeable se convierta en realidad en una camisa con una cuadrícula de vías preferenciales de filtración, de la que las fisuras verticales pueden llegar a transmitirse al HCR y generar juntas transversales espontáneas en medio de un bloque, alcanzando las galerías, e incluso atravesando todo un bloque de presa.

Esta solución presenta también varios inconvenientes constructivos:

- difícil adecuación entre tajos de hormigón vibrado y compactado con rodillo, supeditando uno a otro en perjuicio de la necesaria continuidad de la compactación
- al aumentar los tiempos de recubrimiento entre capas de HCR, la soldadura entre estas disminuye en calidad, y por tanto también disminuye el potencial de impermeabilidad de la presa (inconveniente funcional adicional)

- en algunos casos se requieren instalaciones independientes para fabricar los dos tipos de hormigones, con el correspondiente aumento de costes.

Los inconvenientes mencionados son extensivos al hormigón de contacto con las laderas.

- b) Para paliar este inconveniente, una alternativa es prescindir del hormigón vibrado, salvo en el contacto con el cimiento, y utilizar dos hormigones compactados, con riqueza mayor el situado en la zona de aguas arriba. No obstante, la realidad ha confirmado que es más ventajoso en conjunto, en cuanto a rapidez y economía, construir toda la sección con el hormigón de mayor riqueza en pasta. (Fig.2.23)

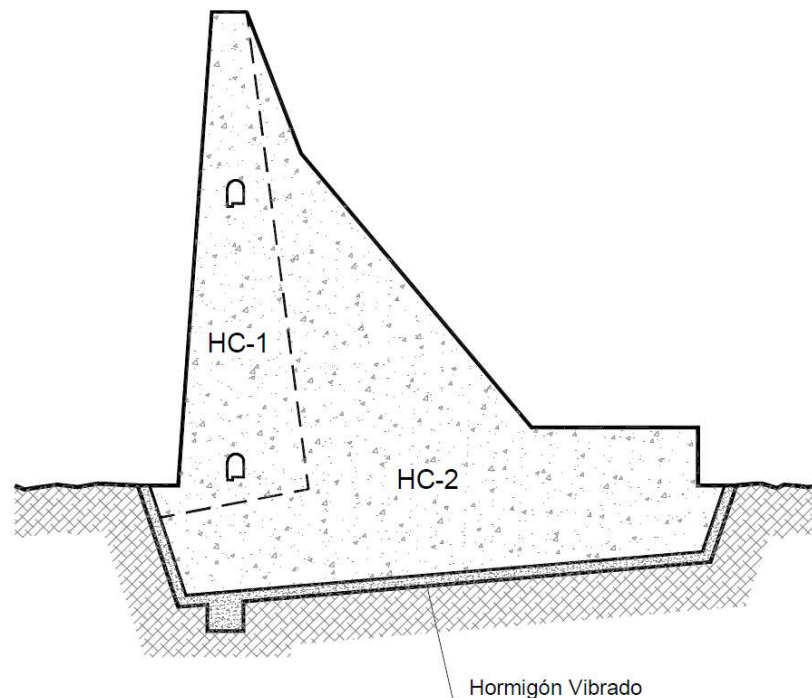


Fig. 2.23 - Presa de Santa Eugenia de gravedad HCR (Sociedad Española de Carburos Metálicos) de 87 m de altura. Zonificación de hormigones: HC1: 236 kg/m³ de conglomerante; HC2: 210 kg/m³ de conglomerante.

- c) Se han obtenido buenos resultados utilizando un único hormigón compactado, de riqueza intermedia en pasta (del orden de 180 kg de conglomerante por m³ de hormigón), complementando cada tongada con mortero de adición en una banda paralela al paramento de aguas arriba de unos 3 ó 4 m de anchura, en otra de

menor anchura (del orden de 1 m) paralela al paramento de agua abajo y en los laterales junto al cimientto. De esta manera la puesta en obra del hormigón compactado no sufre interferencias, y se cierran al paso del agua tanto la zona de aguas arriba adyacente al embalse como el contacto hormigón-roca. Además, la fluencia del mortero en el trasdós de los encofrados permite obtener un buen acabado de los paramentos vistos. La eficacia del proceso ha quedado demostrada mediante pruebas de permeabilidad Lugeon llevadas a cabo en el propio tajo.

En caso de adoptarse esta solución, conviene comprobar en la losa de ensayo la cuantía real de pasta en las zonas tratadas con el mortero, para evitar grietas de retracción locales. (Fig. 2.24)

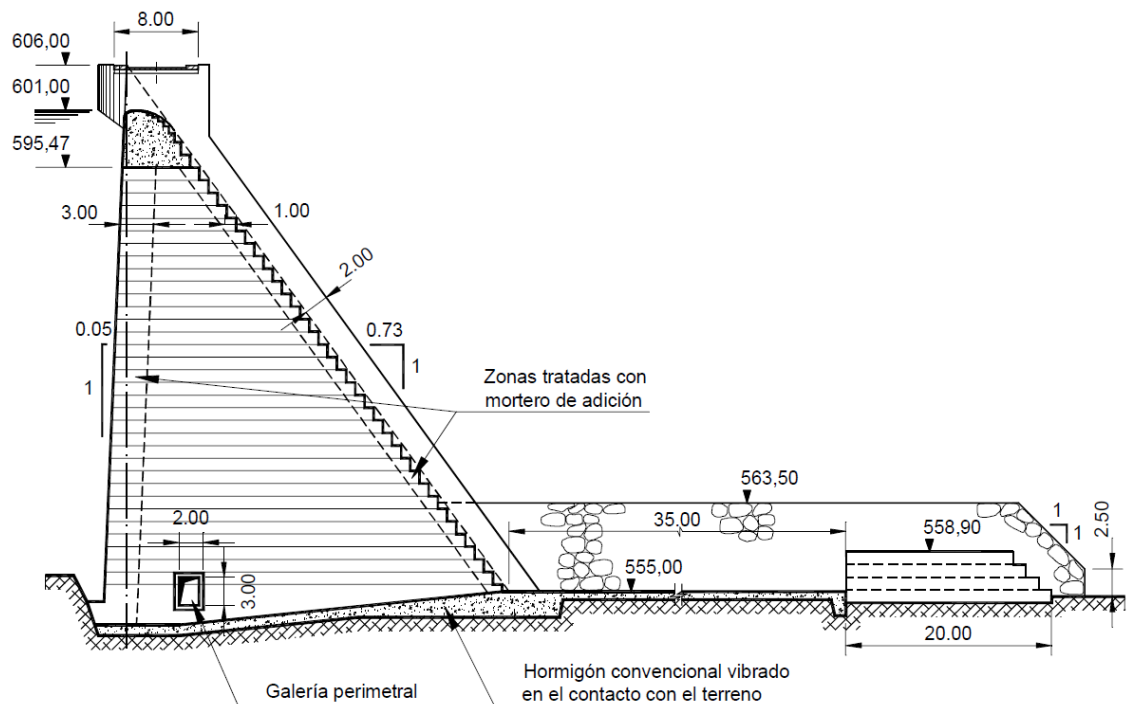


Fig. 2.24 - Presa de El Boquerón de gravedad HCR (Confederación Hidrográfica del Segura) de 50 m de altura. En esta presa se ha utilizado el proceso constructivo descrito. Como losa de ensayo se aprovechó el pequeño azud de cierre del cuenco de resalto del aliviadero.

- d) La tendencia en los últimos años (Presas de El Esparragal y La Breña II, entre otras), ha sido la de ir a presas con un único HCR, como se comentaba en b) anteriormente. Esta técnica se denomina en inglés "All RCC Dam" (Fig. 2.25A).

Para obtener un buen acabado estético en el paramento, y para resolver el contacto del HCR con la roca en las laderas, se emplea el método denominado en inglés GEVR ó GERCC (Grout-enriched vibratable RCC) que en español podría traducirse como HEL (HCR enriquecido con lechada). Consiste en aportar junto al encofrado en los paramentos, y junto a la roca en las laderas, una cierta cantidad de lechada que permite hacer “vibrable” el HCR. Hay dos métodos posibles para aportar la lechada: previamente al extendido del HCR que se va a vibrar, o posteriormente al mismo. El primer caso es más adecuado para hormigones compactados húmedos, mientras el segundo lo es para hormigones compactados secos. En vez de lechada, en algunos casos se ha empleado mortero, que en este caso se extiende siempre previamente al HCR que se va a vibrar. Con altas temperaturas, es conveniente añadir un aditivo retardador al mortero.

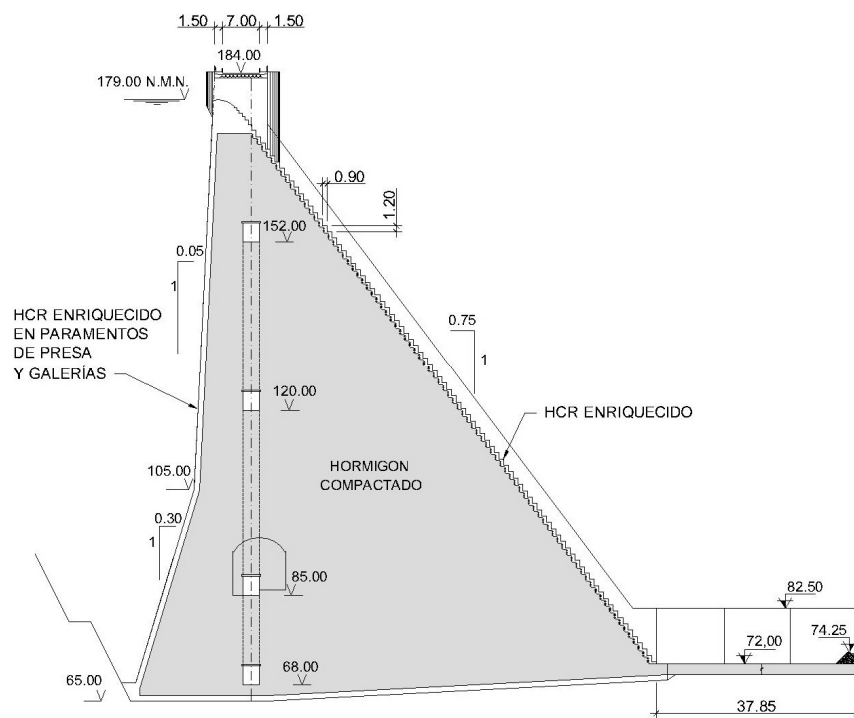


Fig. 2.25A - Presa de La Breña II de gravedad HCR (Acuasur), de 119 m de altura. Sección tipo de la presa, en la que se ha empleado HCR enriquecido en los paramentos

Un cuerpo de presa exclusivamente de HCR (“All RCC Dam”), con una mezcla bien diseñada, y construido correctamente, con tiempos de recubrimiento en juntas

calientes adecuados a las condiciones climatológicas de cada momento, es una estructura monolítica (entre juntas transversales entre bloques) e impermeable por sí misma.

Los morteros entre capas, citados anteriormente en c), pueden mejorar la resistencia a cortante y a tracción en la junta para unas condiciones dadas. Pero con un HCR trabajable, bien diseñado, con un contenido de pasta adecuado, se puede alcanzar un comportamiento equivalente. De hecho, las juntas que han presentado un mejor comportamiento al ensayar testigos, han sido todas en presas de HCR de alto contenido en pasta y sin mortero entre capas, pues se ha comprobado que el mortero hace de amortiguador durante la compactación, dificultando la interpenetración de la capa en proceso de compactación con la inferior. Sin embargo, en las presas de HCR con bajo contenido de conglomerante, así como en la mayoría de contenido medio de pasta, el mortero entre capas es un factor esencial para la mejora de las propiedades de la junta. En presas en las que se trabaja con dosificaciones de HCR con bajo volumen de pasta se ha observado también una tendencia a la segregación de la mezcla que afecta negativamente a la unión entre capas y al monolitismo de la estructura en sentido vertical, y este efecto no se consigue controlar con el empleo de mortero entre capas.

- e) Finalmente hay que mencionar que en las pruebas previas realizadas para la construcción de la presa de Enciso se ha conseguido vibrar directamente por inmersión el HCR (HCRV) sin necesidad de enriquecimiento alguno (Fig. 2.25B), como ya se ha hecho recientemente en otras presas (en Sudáfrica, por ejemplo). Esto ha sido posible gracias al empleo de una mezcla de HCR muy trabajable con una consistencia de entre 8 y 12 segundos VeBe, la incorporación a la mezcla de un aditivo retardador y plastificante, y el empleo de una arena que cumple con las recomendaciones indicadas en el apartado 5.2 de esta Guía. La práctica de vibrado de este HCR es ligeramente diferente a la empleada con HV, por lo que es recomendable un entrenamiento previo y el uso de equipos de vibración montados sobre el brazo de retroexcavadoras pequeñas, complementados con vibradores manuales para las zonas de difícil acceso, como por ejemplo alrededor de las juntas.



Fig. 2.25B – Losa de ensayo previa de la presa de Enciso (CH Ebro) de 100 m de altura. Ejecución y acabado del paramento empleando HCR vibrado por inmersión sin añadir lechada (HCRV). Comparativamente se ensayó el HEL, es decir añadiendo lechada

Respecto a la utilización de hormigón vibrado en contacto con la roca de apoyo, resulta necesaria únicamente para crear una superficie regular adecuada para la compactación. Si la superficie del cimienta permitiese el inicio de la compactación sin necesidad de hormigón vibrado de regularización, la unión presa-cimiento será al menos tan buena, y posiblemente mejor, que si se incluye una capa de hormigón vibrado. En algunos casos el tratamiento del contacto hormigón-roca en estribos, cuya pendiente dificulta el empleo de hormigón vibrado, se ha resuelto mediante la adición de mortero en una banda de 1 ó 2 m sobre la tongada anterior a partir del contacto hormigón – roca, de forma similar a lo indicado en c).

No obstante, la tendencia en los últimos años es la de utilizar HEL como interfaz en el contacto del HCR con la roca, o incluso HCRV, como se ha mencionado anteriormente.

4.3.3 Juntas

El procedimiento de compactación con rodillo implica diferencias sustanciales respecto al hormigón vibrado en relación con las juntas que han de preverse en el Proyecto.

JUNTAS VERTICALES DE BLOQUE

Como se dijo en 4.3, en las presas de HCR las juntas transversales pueden separarse en general más que en una presa de hormigón vibrado, como consecuencia de la menor retracción. Son habituales distancias de 20 a 40 m. Además, la puesta en obra del hormigón mediante compactación con rodillo permite la creación de juntas transversales a posteriori, dividiendo el bloque definido por consideraciones de capacidad de puesta en obra en varios subbloques de longitud adecuada para que no se produzcan fisuras por retracción. Las juntas que separan subbloques de un mismo bloque constructivo se van formando a medida que se compacta cada tongada. Existen varios procedimientos para ello, dándose nombre a la junta en función del procedimiento utilizado para su formación:

- a) las juntas hincadas se forman mediante hincas de chapas metálicas en cada tongada, o bien formando una ranura mediante hincas e introduciendo a continuación (o en el mismo momento) una lámina de plástico
- b) las juntas cortadas se forman cortando mediante radial cada una de las tongadas e introduciendo a continuación, por ejemplo, emulsión asfáltica en la entalladura creada. En España este sistema solamente se empleó en la Presa de Maroño y ha caído en desuso.

Tanto por uno como por otro procedimiento, a medida que progresa la compactación van quedando materializadas las juntas entre subbloques. De este modo, las presas de HCR quedan divididas en 1 ó varios bloques de longitudes definidas en función de la capacidad de puesta en obra y separados por juntas encofradas, alcanzándose en ocasiones longitudes de más de 500 m. Los bloques que sean de longitud excesiva en relación a la retracción esperable en el hormigón habrán de quedar a su vez divididos en varios subbloques mediante juntas hincadas, cortadas o materializadas por cualquier otro procedimiento. (Fig. 2.26). Lo ideal es construir la presa de ladera a ladera en un único bloque de trabajo, evitando las juntas encofradas y realizando todas las juntas transversales mediante hincado, pero para ello hacen falta unos medios potentes de fabricación, transporte y colocación del HCR, adecuados al tamaño de la presa.

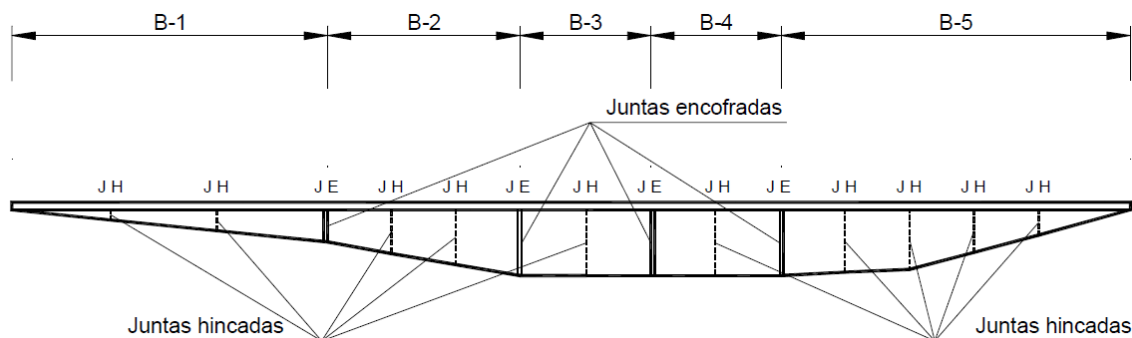


Fig. 2.26 - Presa Sierra Brava de gravedad HCR (Confederación Hidrográfica del Guadiana) de 54 m de altura. Distribución en alzado de juntas encofradas e hincadas.

La impermeabilización de las juntas transversales puede resolverse mediante cubrejuntas de material plástico, como las utilizadas en las presas de hormigón vibrado, debiendo evitarse la creación de recintos encofrados alrededor de las mismas para utilizar un hormigón vibrado tradicional. Se interfiere menos el proceso constructivo si se hace “vibrable” el HCR recurriendo al empleo de las técnicas citadas anteriormente en el subcapítulo dedicado a la sección tipo.

La interferencia mínima con el tajo de compactación se obtiene utilizando dispositivos de impermeabilización adosados al paramento que se instalan a posteriori, aunque su costo y complejidad son mayores. (Fig 2.27)

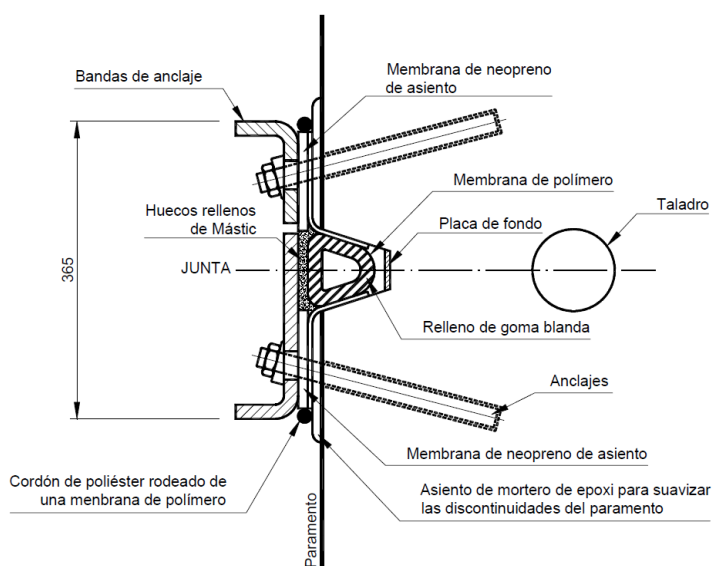


Fig. 2.27 - Cubrejuntas adosado al paramento de aguas arriba, estudiado para la presa australiana de New Victoria.

JUNTAS HORIZONTALES DE TONGADA

La altura de las tongadas se define buscando el óptimo técnico y económico en función del tipo y peso de los equipos de compactación elegidos, generalmente compactadores de rodillo vibrante, y de la capacidad de puesta en obra. La altura de tongada suele ser del orden de los 30 cm. Por tanto, en una presa de HCR el número de juntas de tongada es unas 7 veces mayor que en una presa de hormigón vibrado.

Para evitar la aparición de juntas frías, que deben tratarse mediante limpieza con chorro de agua y aire y extensión de un mortero de retoma, hay que garantizar la fluencia de pasta a la superficie y limitar el tiempo que puede transcurrir entre la colocación de cada tongada y la siguiente.

La adecuada continuidad vertical de la estructura exige la unión entre tongadas sin separación entre las mismas. Para ello es necesario que fluya pasta tras la compactación. Esto se consigue si la relación pasta/mortero (en volumen) es superior en un 5% al índice de huecos de la arena compactada. No obstante, cuando la resistencia e impermeabilidad exigida en las juntas es elevada, la relación pasta/mortero llega incluso a ser un 15% superior al índice de huecos de la arena compactada, o incluso más. El valor de dicho índice de huecos está comprendido en general entre el 26% y el 33% (es recomendable no superar el 30%), por lo que es frecuente diseñar las mezclas de HCR con relaciones pasta/mortero entre 0,36 a 0,44, o en algunos casos particulares incluso hasta 0,46. La importancia del concepto de pasta en el HCR se define posteriormente en el apartado 5.2. Con la relación pasta/mortero indicada existe suficiente cantidad de pasta para que se rellenen los huecos entre granos de arena y sobre algo de la misma para que, por efecto de la compactación, fluya tanto a la superficie de la tongada, como a su zona inferior, haciendo la función de un mortero de retoma que facilita la unión entre tongadas. En cada caso será necesario analizar en la losa de ensayo correspondiente los parámetros propios de la relación pasta-mortero y su efecto en la impermeabilidad de la junta.

Si el tiempo transcurrido desde la finalización de la tongada supera un determinado umbral, que depende de la temperatura, la junta deberá ser tratada para conseguir una adecuada unión entre tongadas. Entonces se dice que la junta es fría. En caso contrario, se trata de una junta caliente y se puede proceder al hormigonado de una nueva tongada sin

necesidad de tratamiento alguno para garantizar la unión. En el proyecto, para definir si una junta es fría o caliente se puede emplear el denominado *factor de maduración*:

$$t_m(\text{horas} \times ^\circ\text{C}) = t(\text{horas}) \times T(^{\circ}\text{C})^1$$

siendo:

- t_m : factor de maduración
- t : tiempo transcurrido desde la finalización de la tongada
- T : temperatura ambiente media diaria en la superficie de la tongada

No se pueden establecer unos valores absolutos para el factor de maduración límite, pues dependerá en cada caso de una gran cantidad de variables como son: la dosificación (contenido de agua, cantidad de pasta, tipos de materiales cementicios, empleo o no de retardador, etc.), la trabajabilidad, la tendencia a la segregación, los métodos y la maquinaria de compactación, la efectividad del curado, el empleo o no de sistemas de preenfriamiento en épocas calurosas, y en general de todo lo que afecte al principio y fin de fraguado. Lo recomendable es obtener el factor de maduración, para cada presa a construir, de una losa de ensayo bien planificada. Pero resulta mucho más operativo para el control en obra el establecer un tiempo límite de recubrimiento para cada mes del año, deducidos estos tiempos del anterior factor de maduración, que emplear este último capa a capa.

La tendencia es a definir tres clases de tratamiento de juntas, para los que se indican unos valores orientativos (con todas las salvedades antes indicadas) del factor de madurez límite para el caso de mezclas de HCR ricas en pasta (para las mezclas pobres y de contenido medio en pasta habría que reducir notablemente los factores de maduración límite que se indican a continuación):

- Junta caliente o fresca. Factor de maduración < 300 °C x h. Tratamiento: solamente buen curado y limpieza de la superficie de la capa. Este límite puede llegar a 400 ó 500 °C x h cuando se emplean aditivos retardadores que elevan el inicio de fraguado por encima de las 20 horas (presas de Yeywa en Birmania, Ghatghar en India, Jahgin en

¹ La relación entre las temperaturas en °C y °F no es estrictamente proporcional (de hecho $T(^{\circ}\text{C}) = (T(^{\circ}\text{F}) - 32) / 1,8$), por lo que tampoco lo es la relación entre $t_m(\text{horas} \times ^\circ\text{C})$ y $t_m(\text{horas} \times ^\circ\text{F})$.

Irán, Pirrís en Costa Rica, Changuinola en Panamá y, recientemente, Puente de Santolea en España). De hecho en estas presas se sustituye el criterio de factor de madurez por el de inicio de fraguado. En este caso, más conservador, el tiempo entre capas con junta caliente entre ellas se limita al momento en el que se inicia el fraguado del HCR de la capa inferior, medido según norma UNE 83311.

- Junta templada o preparada. Intermedia entre una junta caliente y una junta verdaderamente fría. Factor de maduración 300 a 800 °C x h. Tratamiento: cepillado de la superficie de la capa y/o extendido de mortero de retoma previo a la siguiente capa.
- Junta fría. Factor de maduración > 800 °C x h. Tratamiento: descarnado de la superficie de la capa, hasta dejar el árido visto, y extendido de mortero de retoma previo a la siguiente capa. Algunos expertos prefieren prescindir del mortero de retoma y enriquecer (o no) más en pasta la primera capa de HCR sobre la junta fría. Otros prefieren lechada en vez de mortero como interfaz en la retoma.

Si se consideran dos tongadas sucesivas, para conseguir una adecuada unión entre ambas es preciso comenzar la ejecución de la tongada superior en toda la superficie de junta antes de que se supere el factor de maduración límite o el inicio de fraguado según el criterio que se adopte. A efectos de control de la obra, debe fijarse un valor límite próximo a aquél con el que en la práctica deja de producirse una unión entre tongadas adecuada. La fijación en proyecto de tiempos de maduración demasiado estrictos, con la intención de disponer de un margen de seguridad, va en detrimento de la continuidad del hormigonado, y por tanto de la economía de la obra y también de su calidad, ya que la unión que se produce en una junta caliente es mejor que la que puede obtenerse tratando la junta. Se reitera aquí la necesidad de concebir la presa de HCR facilitando el hormigonado continuo, con el menor número posible de juntas frías que sea. Deben evitarse los procedimientos de encofrado que impliquen la formación de juntas frías, como sucede con la bordilladora cuando no se ajusta su ejecución al proceso de hormigonado cuasi-continuo, pues ello da lugar a la aparición sistemática de juntas frías separadas una distancia igual a la altura del bordillo, ya que es preciso parar la compactación para ejecutar el bordillo que queda como encofrado perdido.

No obstante, en cerradas amplias, y cuando tanto los bordillos como su secuencia de ejecución con las capas de HCR han sido correctamente diseñados (ver ejemplo en Fig. 2.27A), el encofrado de la presa con bordilladora ha resultado una solución, muy adecuada, que no provoca ninguna junta fría, ni retrasa el ritmo de colocación del HCR (salvo en zonas de la presa con capas de muy poco volumen, como ocurre en la coronación de los estribos, pero en ellas también se produce una inevitable ralentización en la colocación del HCR cuando se emplean encofrados en vez de bordilladora). Como ejemplos pueden citarse las presas de Upper Stillwater (EEUU), Platanovryssi (Grecia) y Porce II (Colombia), entre otras.

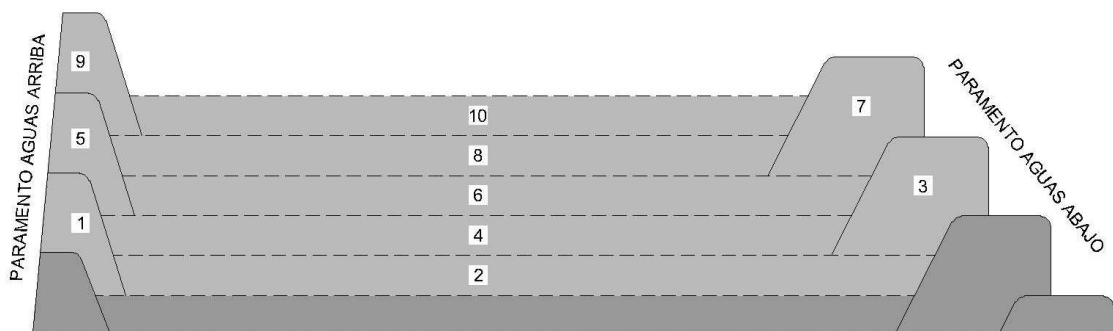


Fig. 2.27A – Esquema de la secuencia de ejecución de bordillos y HCR empleada en la ejecución de la presa de Porce II (Colombia)

JUNTAS LONGITUDINALES

No suelen ser precisas, pero su formación es sencilla creando juntas encofradas, hincadas o cortadas. Estas dos últimas tienen el inconveniente de dificultar la inyección posterior al tener que dejar los conductos moldeados.

4.3.4 Galerías

En relación con las galerías en presas de HCR se hacen las siguientes recomendaciones:

- El número de galerías debe limitarse al mínimo imprescindible. Si los órganos de desagüe se disponen fuera del cuerpo de la presa no serán necesarias cámaras de válvulas ni galerías de acceso a las mismas. En presas de escasa altura y categoría B ó C puede incluso resultar adecuada la supresión de todo tipo de galerías. En general, la galería fundamental para el drenaje es la inferior, a la que van a parar los drenes de la presa.
- La galería inferior, próxima al cimiento, puede incorporarse en un zócalo amplio de hormigón vibrado a ejecutar antes de iniciar la compactación para facilitar su continuidad. (Fig. 2.28)

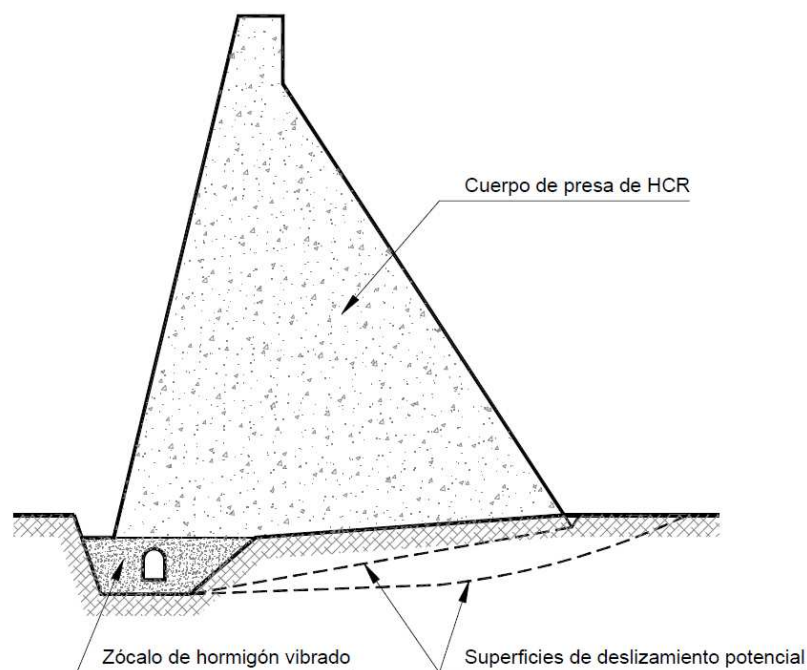


Fig. 2.28 - Galería incorporada a la base en semitacón situado al pie aguas-arriba de una presa de gravedad de HCR.

- Las galerías deben situarse a una distancia del paramento de agua arriba que permita un adecuado extendido y compactación del hormigón a colocar entre la galería y el paramento. Conviene que la separación sea de unos 6 a 8 m al menos, evitando separaciones excesivas que dificulten el drenaje del cimiento.

- El procedimiento de formación de las galerías debe elegirse buscando una interferencia mínima con el tajo de HCR, por lo que interesa que la ejecución sea lo más rápida posible. Algunos de los procedimientos que se han utilizado con tal fin son:
 - a) Paneles prefabricados utilizados como encofrado perdido. Con ellos se consigue un buen acabado. Tienen el inconveniente de reducir la eficacia de las galerías en la disipación del calor de fraguado, que es apreciable, y el de enmascarar posibles defectos del hormigón de la presa. Este procedimiento apenas se ha utilizado en España.
 - b) Tubo metálico utilizado como encofrado perdido, con los mismos inconvenientes descritos en a). Este sistema está en desuso.
 - c) En alguna ocasión se ha sustituido en la zona de galería el hormigón por arena para permitir el progreso de la compactación, retirando a posteriori la arena. El acabado de las galerías es muy deficiente. Este sistema está en desuso.
 - d) Encofrado en hastiales y losa prefabricada en clave, autorresistente frente a la compactación. A diferencia de como se suele colocar en las presas de hormigón vibrado, en las presas de HCR el encofrado se debe instalar horizontal sobre una capa. Para dar la necesaria pendiente longitudinal a las cunetas de las galerías, se materializan estas, junto con la solera de la galería, con un hormigón convencional en 2ª fase (Fig. 2.29).

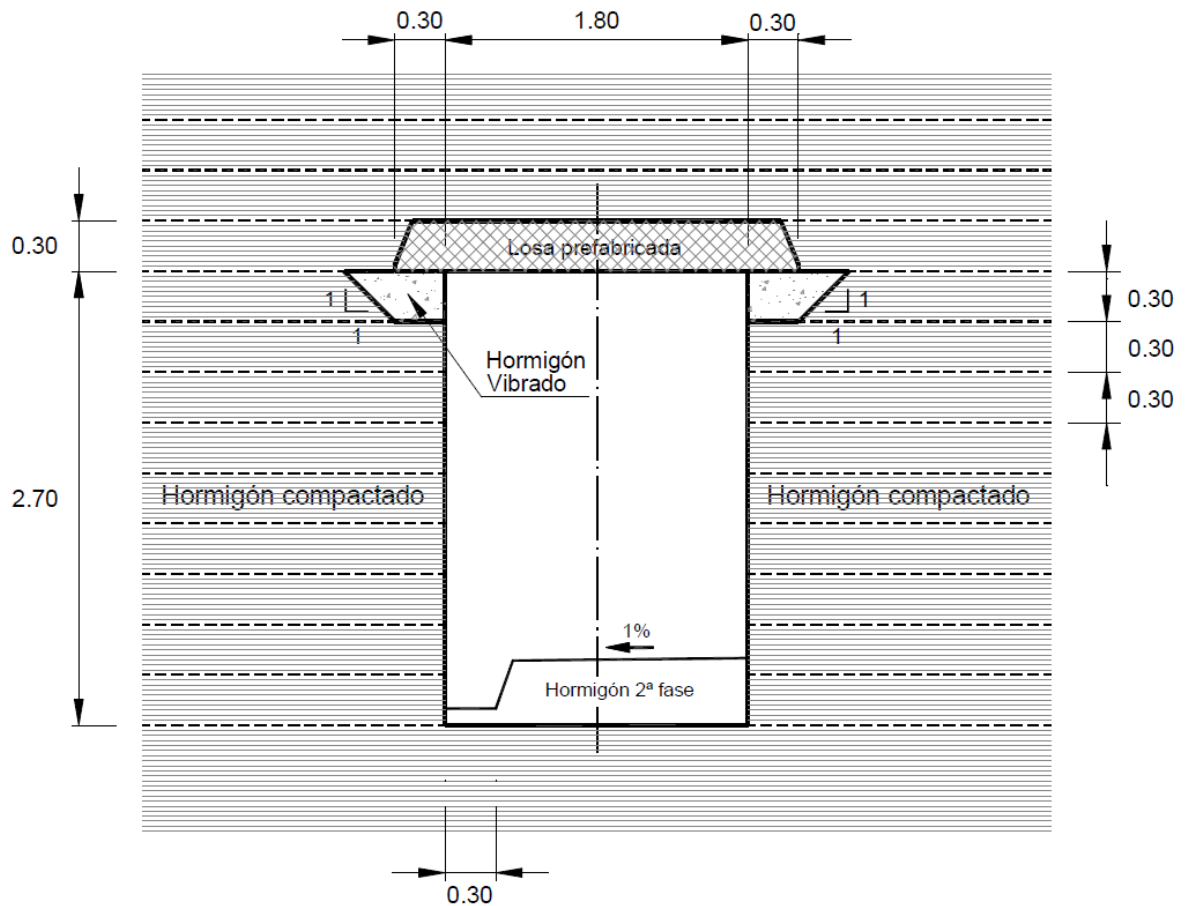


Fig. 2.29 - Sección tipo de galería con losa prefabricada en clave.

Los métodos de construcción de galerías deben ser consistentes con el propósito de las mismas. Una galería cuya única misión es proporcionar acceso al interior de la presa puede construirse con cualquier método. Por el contrario, en galerías que tengan como una de sus misiones principales inspeccionar el comportamiento del HCR (detección de eventuales grietas y filtraciones), deben evitarse los procedimientos que enmascaren el HCR, p. ej. paneles prefabricados, tubos metálicos si se dejan perdidos, etc.

La forma de las galerías depende en cierta medida del procedimiento utilizado para su formación, existiendo bastante libertad al respecto, como ya se comentó al hablar de las presas de gravedad de hormigón vibrado.

En cuanto a los procedimientos para la construcción de los tramos inclinados de las galerías perimetrales, o bien de tramos de conexión entre diferentes niveles de galerías horizontales, los más utilizados son los siguientes:

- a) Realizándolos en una trinchera excavada en la roca de las laderas, con hormigón vibrado. Solución en general más cara, pero que evita la interferencia con la posterior colocación del HCR (análogo a lo comentado para el tramo inferior de la galería perimetral, Fig. 2.28).
- b) Realizándolos simultáneamente con el HCR. En este caso deben alejarse suficientemente de las laderas, para poder extender y compactar con comodidad el HCR entre la galería y la roca. Conviene uniformizar lo más posible las pendientes de los diferentes tramos. Los complicados entronques entre los tramos inclinados y los horizontales se pueden resolver mediante piezas prefabricadas especialmente diseñadas. En algunas presas se han situado las galerías horizontales e inclinadas en el mismo plano, facilitando mucho la construcción simultánea del entronque con el HCR, y resolviendo la comunicación entre aquellas mediante escaleras y pasarelas metálicas inoxidables (presa de La Breña II).
- c) Algunos proyectistas son partidarios de disponer en las presas de HCR solamente galerías horizontales comunicadas por pozos verticales. En estos últimos se colocan escaleras de caracol, bien a base de prefabricados, bien metálicas inoxidables. Se deja siempre algún pozo libre por el que poder trasladar maquinaria y equipos, o bien se diseñan las escaleras de caracol metálicas de manera que se pueden desmontar y montar fácilmente desde el nivel superior (presa de Platanovryssi en Grecia).

4.3.5 Drenaje del cuerpo de la presa

En las presas de HCR la pantalla de drenaje debe realizarse mediante perforación, evitando así la interferencia con el tajo de compactación. El drenaje de la presa tiene una importancia mayor que en las presas de hormigón vibrado, pues el número de planos de discontinuidad definidos por las juntas de tongada, por los que se pueden producir filtraciones, es sensiblemente mayor. La distancia de la pantalla de drenaje al paramento

de aguas arriba depende de la distancia de las galerías, desde las que han de realizarse las perforaciones, a dicho paramento.

4.3.6. Aliviaderos

Los diseños de aliviadero utilizados para presas de hormigón vibrado son también válidos para las de HCR. En estas últimas la forma más común de aliviadero es un perfil de labio fijo, por la economía del mismo y su facilidad de construcción. Sin embargo, también se han construido presas de HCR con aliviaderos con compuertas de más de 20 m de altura.

En cuanto a la rápida, la forma escalonada del paramento de aguas abajo típica de las presas de HCR es muy adecuada para darle este uso, con la ventaja de que la gran disipación de energía que se obtiene con ello conduce a cuencos amortiguadores de muy poca longitud, además del ahorro en el revestimiento del escalonado con una losa de hormigón armado anclada al paramento de aguas abajo. Si bien hay un límite razonable para este tipo de aliviaderos con rápida escalonada, que es el de que el caudal unitario no supere los $20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, en algún caso han sido diseñados para caudales unitarios de hasta $30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. Más de un 30% de las presas de HCR construidas en el mundo han adoptado la solución de aliviadero escalonado, entre ellas varias de las ejecutadas en España.

...

...

4.7. PRESAS ARCO DE HCR

La tipología de presa arco construida con HCR se ha venido desarrollando de manera creciente, principalmente en China, y con secciones tanto de simple como de doble curvatura. Los aspectos específicos del diseño estructural y las consideraciones respecto a la cimentación de este tipo de presas son similares a los que se han mencionado en los apartados correspondientes a las de hormigón convencional.

No obstante existen algunos elementos característicos en el diseño de las presas arco de HCR que se derivan precisamente de la velocidad con la que se construyen. En particular, los esfuerzos de origen térmico llegan a ser más acusados que en las presas arco convencionales, pues el calor generado en los procesos de hidratación del conglomerante no se disipa tan fácilmente como en aquellas. Este hecho es aún más crítico cuando se considera además la necesidad de puesta en carga antes de que se haya conseguido descender la temperatura interna hasta niveles próximos a la temperatura final de estabilidad de la presa. Este ha sido el caso mas frecuente de las presas arco de HCR construidas hasta la fecha en China, y que han alcanzado alturas por encima de los 100 metros.

Ello ha generado un nuevo campo de investigación y desarrollo de las presas de HCR que se centra principalmente en cuatro aspectos:

- profundización en los estudios térmico-tensionales tridimensionales, determinación de la distancia óptima entre juntas y apertura previsible de las mismas que permita su inyección en tiempo oportuno para conferir el efecto arco a la estructura,
- diseño de sistemas de post-enfriamiento específicos y compatibles con los sistemas de construcción de las presas de HCR,
- diseño y construcción de sistemas de inyección de juntas transversales que permitan una posible re-inyección posterior durante etapas de enfriamiento o ciclos carga/descarga posteriores al primer llenado. Dichos sistemas deben ser además

compatibles con el proceso de puesta en obra del HCR, sin limitar la colocación del mismo de una ladera a la otra, en un solo bloque, que es la práctica habitual en las geometrías de las cerradas donde se construyen este tipo de presas, y

- empleo de mezclas de HCR de altas prestaciones, con alto contenido de pasta y con altos porcentajes de sustitución del cemento por materiales puzolánicos/cenizas volantes.

Respecto al control térmico y al análisis térmico-tensional es necesario que se disponga no solo de potentes instrumentos de cálculo numérico sino también del adecuado conocimiento de la variación con el tiempo de las propiedades tensionales del HCR y del entorno en el que se construye la presa. Los modelos tridimensionales de elementos finitos son obligados para el cálculo de este tipo de presas. La experiencia del equipo de diseño es también un aspecto importante.

Para la fabricación del HCR en estas presas es habitual el empleo de instalaciones de pre-enfriamiento con las que sea posible refrigerar los áridos, enfriar el agua fría de amasado o utilizar escamas de hielo. El coste de estas instalaciones se ve habitualmente compensado de sobra por los beneficios derivados de la entrada anticipada en operación de la presa. Hasta el momento los sistemas de post-enfriamiento en presas arco de HCR, cuando se han empleado, han sido similares a los utilizados en presas tradicionales, como son los serpentines embebidos en el hormigón por los que se hace circular agua fría. No obstante es preciso seguir investigando en sistemas que interfieran menos en la colocación del HCR. En estas presas es muy beneficiosa la aportación de las galerías de inspección y drenaje como elemento refrigerador.

Las juntas transversales se crean mediante la inserción de elementos inductores de junta (chapas, plástico, etc.) tras la compactación de la capa. Los sistemas de inyección de estas juntas y de creación de los compartimentos de inyección compatibles con la puesta en obra del HCR es un capítulo que se encuentra aún en desarrollo. En Sudáfrica y en China se han investigado diferentes métodos con éxito desigual. La introducción del HCR enriquecido con lechada está permitiendo embeber con relativa facilidad estos elementos junto a los paramentos y en los planos horizontales de separación de compartimentos. Las experiencias mas recientes en China muestran no obstante que es preciso seguir

profundizando en el diseño, fabricación y colocación de los conductos de inyección y de las válvulas re-inyectables, para que se garantice su funcionamiento y no queden dañados por los equipos de puesta en obra.

En alguna realización reciente de presa arco-gravedad de HCR (Changuinola, Panamá y Portugués, Puerto Rico) se ha obviado tanto la post-refrigeración como la inyección de las juntas transversales. En esta presa el propio estado térmico del núcleo de la misma mantiene las juntas cerradas, dando suficiente continuidad al esfuerzo de compresión en los arcos horizontales.

Dada la alta calidad que se le exige al material, las dosificaciones utilizadas en las presas arco de HCR se centran exclusivamente en mezclas con alto contenido de material puzolánico y dosis de conglomerante por encima de los 200 kg/m³. Dependiendo de la calidad de las cenizas volantes o puzolanas naturales su porcentaje puede llegar hasta el 70%. El tamaño máximo del árido, preferiblemente procedente de machaqueo, no debe ser superior a los 40-50 mm para controlar cualquier posible indicio de segregación. Se debe trabajar con hormigones con una consistencia muy trabajable y cohesiva, con tiempos VeBe del orden de los 10 segundos. Además se deben emplear aditivos retardadores de fraguado que permitan prolongar el tiempo de actividad (inicio de fraguado) de la capa inferior compactada hasta que se cubra con la siguiente capa. Solo de esta manera se puede garantizar el monolitismo de las ménsulas verticales de la estructura. La relación agua/conglomerante de las mezclas de HCR empleadas en las presas arco se encuentra normalmente entre 0,50 y 0,65. El porcentaje de arena (tamaños inferiores a 5 mm) respecto al total de árido debe ser del orden del 35%. En estas mezclas es de gran importancia la calidad y cantidad de los finos pasantes por el tamiz 0,080 mm UNE, que pueden llegar a superar el 5% en la curva combinada de áridos.

4.8. OTROS USOS DEL HCR EN LA CONSTRUCCIÓN DE PRESAS

Las aplicaciones más importantes de la técnica del HCR en otras obras relacionadas con la construcción de presas, de una manera resumida, son las siguientes:

- Construcción de ataguías. Solución especialmente interesante cuando son de volumen importante y hay que disponer de las mismas en un breve plazo de tiempo, o bien cuando es alto el riesgo de sobrevertido durante su periodo de funcionamiento (p. ej. presa de Tres Gargantas, en China).
- Construcción de cuencos amortiguadores de aliviaderos y desagües de presas de materiales sueltos y de hormigón (p. ej. presas de El Atance y El Boquerón, donde parte de sus cuencos amortiguadores se ejecutaron en HCR y adicionalmente se utilizaron como losa de ensayo). Solución especialmente apropiada cuando hay que sustituir grandes volúmenes de terreno de mala calidad.
- Rehabilitación de cuencos amortiguadores de aliviaderos y desagües de presas de materiales sueltos y de hormigón erosionados por avenidas (p. ej. presa de Tarbela en Pakistán).
- Diques de protección de márgenes aguas abajo de aliviaderos (p. ej. presa de Platanovryssi en Grecia).
- Protección frente a sobrevertidos en presas de materiales sueltos, revistiendo con HCR el paramento aguas abajo (más de 50 actuaciones en pequeñas presas en EEUU, para adecuar las presas a una nueva normativa, más exigente, sobre avenidas).
- Protección frente a sobrevertidos durante la construcción en presas de materiales sueltos, en casos de gran riesgo de que se produzcan (p. ej. presa de Xingo en Brasil).
- Refuerzo de presas de hormigón y de mampostería, mediante la construcción de contrafuertes en el paramento aguas abajo (varias actuaciones en EEUU, para adecuar las presas a solicitaciones sísmicas superiores a aquellas para las que originalmente fueron diseñadas).

- Protección frente a la rotura de otra presa en servicio pero en condiciones precarias en cuanto a cumplimiento de nueva normativa más exigente (p. ej. presa de Saluda en EEUU).
- Revestimiento del paramento aguas abajo de presas de hormigón, para protegerlo, o reemplazar hormigón dañado por la acción hielo-deshielo (p. ej. presa de Santa Cruz en EEUU).
- Cimentación de grandes estructuras hidráulicas de hormigón convencional (p. ej. nueva presa de Tous).
- Recrecido de presas de hormigón (p. ej. presa de San Vicente en EEUU).

5. DEFINICIÓN DE LOS HORMIGONES EN EL PROYECTO

...

5.2. CONSIDERACIONES SOBRE LOS HORMIGONES COMPACTADOS CON RODILLO

Gran parte de lo indicado para el hormigón vibrado (HV) es válido también para el hormigón compactado con rodillo (HCR). Por ello, para evitar reiteraciones se harán aquí únicamente algunas consideraciones acerca de las particularidades de los HCR.

Cuando se consideran los materiales y dosificaciones para una presa de HCR, el Proyectista debe siempre tener en cuenta que son las propiedades in-situ, incluyendo muy especialmente aquellas en las juntas horizontales entre tongadas, las que son importantes, y no las que puedan alcanzarse en el laboratorio.

Tanto en la tecnología de HV como en la del HCR, una parte del agua que contiene el hormigón fresco no tiene otro objeto que facilitar su consolidación. La cantidad de agua exigida para realizarla mediante vibración es mucho mayor que si la misma se consigue por el procedimiento de compactación con rodillo. La característica esencial del HCR fresco es su relativa sequedad, con un contenido de humedad que permita su consolidación mediante rodillos vibratorios. La relación agua/conglomerante es del orden de 0,50 a 0,70 y la consistencia del HCR que se recibe en el tajo es del orden de 8 a 15 segundos VeBe. El aspecto del HCR fresco debe ser cohesivo y sin signos de segregación. El HCR endurecido es similar al HV, si bien su densidad, si la compactación se ha realizado adecuadamente, es superior para la misma procedencia de los materiales componentes.

El porcentaje que representan las cenizas, o en general el material puzolánico, en el total de conglomerante (cemento+cenizas) no puede considerarse característico del HCR, como demuestra el uso de porcentajes de sustitución de hasta el 70% en hormigones vibrados. Lo que sí puede decirse es que en las presas de HCR, en las que el ritmo de puesta en obra del hormigón es muy elevado, la adopción de relaciones elevadas entre el contenido de cenizas y el de cemento es obligatoria.

Por otra parte, la variedad que caracterizó la composición de los hormigones de las diversas presas de HCR construidas en los primeros años de su aplicación se ha ido reduciendo y concentrándose cada vez mas en dos tendencias bien diferenciadas. Por un lado se encuentran las mezclas que incorporan un alto contenido de material puzolánico, de entre 100 a 160 kg/m³ y por otro, aquellas mezclas que prescinden de él o cuyo empleo es mínimo, entre 0 a 30 kg/m³. De cada una de estas tendencias se derivan consecuencias que afectan al diseño de la presa. De manera genérica se puede afirmar que las primeras corresponden a las mezclas tradicionalmente denominadas ricas en pasta, y las segundas a las pobres o de baja pasta. La proporción entre unas y otras para las presas de HCR que se proyectan y construyen actualmente por todo el mundo es del orden del 80-20%. Dada la disponibilidad de cenizas volantes y los niveles de calidad requeridos, en España el 100% de nuestras presas de HCR tienen un contenido alto de material puzolánico, y por lo tanto se engloban en el primer grupo.

El hormigón está constituido por un esqueleto de áridos cuyos huecos quedan rellenos totalmente por la pasta. El volumen total de pasta en la mezcla debe ser tal que además aporte un exceso de pasta en superficie que permita la unión entre capas sucesivas.

ÁRIDOS

Se destacan los siguientes aspectos de los áridos en su uso para la fabricación de HCR:

- a) El objetivo de alcanzar una estructura de áridos que sea lo más cerrada posible es igual que en un hormigón para vibrar, por lo que la dosificación de los áridos puede realizarse a partir de los mismos procedimientos empleados en la tecnología de hormigón vibrado. También la división de los áridos en fracciones puede realizarse con el mismo criterio que en los HV.

No obstante, hay métodos específicos para determinar la dosificación del esqueleto de los áridos en un HCR. Asimismo, en las arenas empleadas en los HCR se suele admitir una mayor proporción de finos siempre que éstos sean no plásticos, lo cual permite aumentar la compacidad de la mezcla y reducir el contenido de conglomerante. El índice de huecos de la fracción de arena

compactada debe ser inferior al 30%. La granulometría de la arena para HCR se debe ajustar a los siguientes rangos:

	% en peso que pasa por cada tamiz						
Abertura de malla (mm.)	5,00	2,50	1,25	0,60	0,30	0,15	0,08
Límite superior	100	85	68	52	35	25	18
Límite inferior	90	65	42	25	15	10	5

- b) Las exigencias de calidad de los áridos (resistencia, durabilidad, densidad, forma, etc.) deber ser las mismas que para los empleados en presas de HV. Tan solo en presas de bajo contenido de material puzolánico, o en presas y azudes pequeños, se admite el empleo de materiales con peores características físico-químicas.
- c) El tamaño máximo del árido suele ser menor en el HCR que en el HV, como consecuencia principalmente de la mayor tendencia a la segregación, y de la pequeña altura de la tongada a compactar. En la práctica actual son frecuentes tamaños máximos del orden de 50-60 mm para áridos de machaqueo y de 40-50 mm para áridos rodados.
- d) Como se ha mencionado anteriormente, con carácter general debe limitarse el contenido de finos plásticos. La incorporación de finos no plásticos en una proporción de entre el 5% y el 18% de la arena tiene los efectos beneficiosos mencionados en el epígrafe a). En algunos casos la demanda de agua aumenta con el incremento de finos para alcanzar el grado de trabajabilidad y consistencia adecuados. Este aumento de agua está en muchos casos justificado por el incremento que se produce en el volumen de pasta disponible en la superficie de las capas, mejorando la resistencia e impermeabilidad en las mismas, en detrimento de la resistencia en la matriz.

CONGLOMERANTE

A diferencia de lo indicado para el hormigón vibrado, el fuerte ritmo de hormigonado exige que el contenido de adiciones minerales sea alto, del orden del 60%-70%.

Con el término de adiciones minerales se engloban diferentes clases de materiales que presentan actividad conglomerante y que actúan como sustituciones activas del cemento. Entre estas adiciones pueden destacarse las escorias de alto horno, las cenizas volantes con bajo y alto contenido de cal, la puzolana natural, algunos fillers calizos y la arcilla calcinada. Todas ellas y algunas más se han empleado en presas de HCR. El comportamiento depende en gran medida de la calidad y uniformidad de la fuente, así como del control del proceso de preparación hasta su incorporación a la mezcla.

Siempre que haya disponibilidad a un precio competitivo, el empleo de adiciones minerales que reemplacen parcialmente al cemento sin adiciones ofrece ventajas tanto técnicas como económicas en presas de HCR. En estos casos es habitual emplear proporciones de hasta un 70% de tales materiales conglomerantes.

Entre las principales ventajas de su empleo pueden destacarse las siguientes:

- reducen el calor de fraguado,
- dependiendo de su forma, pueden contribuir a mejorar la trabajabilidad de las mezclas (caso de muchas de las cenizas volantes de bajo contenido en cal),
- por lo general disminuyen la demanda de agua para una consistencia dada,
- rellenan huecos y aumentan la compacidad de la mezcla, reduciendo su porosidad y aumentando la densidad y la impermeabilidad de la matriz de HCR,
- al igual que en los HV, los hormigones con altos contenidos de adiciones minerales son normalmente menos susceptibles a la reacción álcali-árido,
- retardan el proceso de fraguado y mejoran la unión entre capas para un mismo tiempo de recubrimiento,

- con algunas de ellas (caso de las cenizas volantes en general) se obtienen mayores resistencias a largo plazo, y
- reducen costes, pues habitualmente son más económicas que el cemento sin adiciones.

PASTA

El diseño de la pasta es uno de los aspectos que mas influyen en la calidad final in-situ del HCR. El volumen de pasta de la mezcla define además directamente la orientación del diseño de la presa de HCR que se adopte, que se mueve entre los dos extremos de concepto: de alto o de bajo contenido en pasta.

Con objeto de unificar criterios, y de acuerdo con la práctica internacional, la pasta del HCR incluye el conglomerante, el agua y los aditivos. Por conglomerante se entiende el cemento y cualquier tipo de adición mineral activa como las mencionadas en el apartado anterior. En cualquier mezcla de HCR que se considere, la cantidad de pasta debe ser tal que al menos garantice el relleno de los huecos que deja la arena compactada, es decir, los de la fracción de áridos inferior a 5 mm incluyendo todos los finos que no sean conglomerantes.

No obstante, tal y como se ha indicado en el apartado 4.3.3, el diseño de la pasta que debe incorporar la mezcla de HCR es función del comportamiento requerido en las juntas entre capas que no lleven tratamiento ni mortero entre ellas. En estos casos, la cantidad y dosificación de la pasta depende del grado de impermeabilidad requerido en dichas juntas y de su resistencia al corte y a la tracción directa. Este criterio es siempre mas exigente y limitante para el diseño de mezclas de HCR que lo estrictamente necesario para el propio diseño de su matriz (interior de la capa).

El diseño de la pasta se rige por tres parámetros principales de la propia mezcla de HCR: su consistencia, su resistencia y el tiempo de fraguado. En la práctica, a efectos de diseño y control, lo que se hace es relacionar las propiedades tanto de la matriz de HCR como de las juntas entre capas con estos tres parámetros. Es decir, una mezcla de HCR está bien diseñada si permite un buen comportamiento de las juntas entre capas sin necesidad de

tratamiento ni morteros. Ello está directamente relacionado con el diseño de la pasta, ya que ésta influye directamente en las propiedades de la mezcla, tanto en estado fresco como endurecido. La pasta contribuye directamente a que el HCR en estado fresco no se segregue, que sea denso y cohesivo, y que su superficie compactada mantenga su actividad (capacidad de unión química y física) durante un tiempo prolongado hasta ser cubierta con el HCR de la siguiente capa. Igualmente la pasta influye en la evolución con el tiempo de las propiedades elásticas y térmicas del HCR y en su impermeabilidad y durabilidad.

El criterio final de optimización del diseño de la cantidad y dosificación de la pasta es el de mínimo coste dentro de las que cumplen los criterios más limitantes del proyecto, que como se ha dicho, suelen ser los de las juntas entre capas no tratadas y no los de la propia matriz del HCR.

Generalmente, los requerimientos de resistencia mecánica exigen contenidos de conglomerante también bajos, por lo que en caso de no disponer de una arena con suficientes finos adecuados, una cantidad apreciable de conglomerante (normalmente la adición mineral por razones de calor de hidratación y de coste) estará cumpliendo una función de relleno exclusivamente.

Al dosificar el hormigón debe buscarse la combinación técnica y económicamente óptima de los diversos componentes, considerando con carácter general preferibles las mezclas que tengan menor contenido de cemento y de agua, que dan lugar a hormigones con menor retracción y un calor de fraguado más reducido. Por otra parte, han tener una trabajabilidad adecuada para permitir una compactación efectiva.

ADITIVOS

Uno de los componentes habituales de la mezcla de HCR es el aditivo retardador de fraguado. Su misión es mantener el inicio de fraguado de la mezcla por debajo del tiempo de recubrimiento entre capas consecutivas para garantizar la unión entre ellas y como consecuencia, el monolitismo de la estructura en dirección vertical. En muchos casos los aditivos retardadores de fraguado tienen un efecto secundario muy positivo como

reductores de agua, y por consiguiente de aumento de resistencias, no solo a corto sino también a largo plazo.

Hoy en día los retardadores de fraguado son un componente habitual en las presas de HCR con alto contenido en pasta. Dependiendo del producto comercial, del resto de componentes y de las condiciones ambientales, las dosis empleadas varían en general entre el 0,6% y el 2,0% (en peso) del contenido de conglomerante, y se ha trabajado con mezclas con inicios de fraguado de hasta 20-24 horas.

Cuando se trabaja con estos niveles altos de retraso del fraguado es necesario emplear productos bien controlados y comprobar que no produzcan efectos secundarios negativos (influencia en resistencia y estabilidad de las mezclas, comportamiento de la mezcla durante la compactación, posible distorsión del ensayo VeBe, etc.). Algunos aditivos funcionan bien con ciertos materiales conglomerantes, y no tanto con otros. Por todo lo anterior, es imperativo ensayar los aditivos a emplear tanto en laboratorio como a escala real, en una losa de ensayo. Además, la menor resistencia inicial del HCR con retardador debe tenerse en cuenta en el diseño de los encofrados de paramentos.

En algunos países (EEUU principalmente) se emplean con frecuencia aireantes, pero más para mejorar la trabajabilidad del hormigón fresco que para aumentar la resistencia al hielo-deshielo.

CONSISTENCIA DEL HORMIGÓN FRESCO

La consistencia del HCR debe ser tal que permita su transporte, extendido y compactación mediante equipo clásico de movimiento de tierras sin que se produzcan segregaciones. Para una granulometría optimizada esto se consigue más fácilmente cuanto mas húmeda sea la mezcla, con la limitación de que ésta se pueda compactar uniformemente mediante rodillos vibratorios de 10 a 12 toneladas de peso estático. Estos condicionantes impiden la definición de su consistencia por el procedimiento tradicional del cono de Abrams. Existen diversos procedimientos de medida de la consistencia de los hormigones compactados, como el método Vebe o el método UC, desarrollado en la

Universidad de Cantabria. Cualquiera de ellos resulta válido siempre que se utilice adecuadamente teniendo en cuenta sus particularidades.

Cuando se emplea el ensayo VeBe, la consistencia del HCR medida mediante norma UNE-EN 12350-3, pero empleando una masa de 12,5 kg (en vez de los 2,75 kg que indica la norma), debe estar comprendida entre 8 y 15 segundos, para condiciones de temperatura de laboratorio (20 °C). Algunas normas frecuentemente utilizadas en otros países utilizan en el ensayo VeBe masas diferentes a los 12,5 kg antes mencionados, lo que hay que tener muy presente a la hora de comparar resultados.

ENSAYOS A ESCALA REAL

Los ensayos a escala real, comúnmente denominados “losas de ensayo”, son bloques que se construyen con antelación al inicio de la colocación del HCR en la presa. Se ejecutan con los materiales y medios que están previstos para la presa y en ellos se prueban a escala real dosificaciones que han sido previamente ensayadas y optimizadas en laboratorio. Dependiendo de las necesidades y el tamaño de cada proyecto, el volumen total de la losa o losas de ensayo puede variar entre unos pocos cientos de m³ a varios miles. Los principales objetivos para su construcción son:

- entrenamiento del personal del Contratista y del equipo de Control de Obra,
- prueba de los equipos y procedimientos de puesta en obra propuestos por el Contratista,
- confirmación de la no segregación de la mezcla cuando se fabrica y coloca con los medios de producción industrial, y
- confirmación de los parámetros de resistencia en las juntas entre capas para distintos tipos de tratamiento y grados de madurez de las mismas. Para obtener de forma consistente esta valiosa información, es recomendable ensayar previamente los tres objetivos anteriores en pequeñas losas de ensayo de no más de 2 capas de espesor.

Su necesidad es discutible para aquellos casos en los que el comportamiento de las mezclas se conozca bien por experiencias y estudios previos y en los que se cuenta con personal y equipo ya experimentado. En caso contrario, sobre todo en países o entornos donde el HCR es una novedad, su ejecución es muy recomendable, pues evita paradas y atrasos innecesarios en la fase inicial de la colocación del HCR en la presa.

En algunas presas de HCR, con objeto de ahorrar costes, se ha realizado la losa de ensayo en alguna estructura provisional o definitiva de la obra de dimensiones suficientes para el propósito buscado: ataguía, losa y azud de cierre del cuenco amortiguador, bloques de estribo de presa, etc.

PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO

Cuanto mayor es el contenido de cenizas en relación al de cemento, más lento es el desarrollo de las resistencias mecánicas. La resistencia característica del hormigón deberá establecerse de modo que el hormigón alcance la resistencia precisa antes de que pueda producirse la sollicitación correspondiente, manteniendo un adecuado margen de seguridad. Se deben tener en cuenta las sollicitaciones correspondientes a la fase de construcción y, si es posible, al llenado anticipado del embalse. Ha de evitarse la vinculación de las sollicitaciones máximas previsibles a la resistencia a 90 días, que es arbitraria y puede conducir a una exigencia de resistencia innecesaria o, en otros casos, a la aceptación de situaciones en que no se mantengan márgenes de seguridad adecuados. Hoy en día es frecuente emplear una edad de diseño de 180 a 365 días.

En muchos casos, el parámetro crítico de diseño suele ser la resistencia a tracción directa vertical in situ en juntas horizontales, especialmente en zonas sísmicas y/o en condiciones donde se producen cargas de origen térmico importantes. En estos casos, la resistencia de la matriz del HCR, que es el valor que se controla en probetas de laboratorio, es un aspecto secundario y lo realmente importante es asegurar la resistencia en las juntas de la presa. Existen procedimientos corroborados por la experiencia para correlacionar ambos parámetros, por lo que lo que se hace en la práctica es diseñar las mezclas de HCR para que alcancen una resistencia a compresión en laboratorio que garantice que se cumplirán in situ las resistencias requeridas en las juntas a la edad de diseño. Para ello es

imprescindible que la mezcla de HCR incorpore suficiente exceso de pasta que refluya a la superficie durante la compactación.

La resistencia a compresión del HCR se mide normalmente en probetas cilíndricas o cúbicas. Las probetas se preparan utilizando una mesa vibratoria, que es el método mas adecuado para mezclas de HCR de alto contenido en pasta. Para mezclas de bajo contenido en pasta se emplea también el martillo vibrante provisto de placa de apisonado, pero en algunos casos se ha comprobado que con ello se alcanzan resistencias elevadas a edades tempranas que son poco realistas.

Con los datos disponibles hasta el momento, se observa que en general el HCR alcanza a largo plazo resistencias mayores que el HV, su módulo de elasticidad es menor y su densidad ligeramente mayor.

...

BIBLIOGRAFÍA

...

**Capítulo 4: Criterios de diseño
y Capítulo 5: Definición de los hormigones en el proyecto**

...

PRESAS DE HORMIGÓN COMPACTADO

...

ICOLD- Boletín 126: Roller-Compacted Concrete Dams. State of the art and case histories.
- Ed. International Commission on Large Dams; París, Francia, 2003.

Proceedings of the IV International Symposium on Roller-Compacted Concrete Dams,
Madrid, España, 17-19 noviembre 2003. - Ed. Balkema, Holanda.

Proceedings of the V International Symposium on Roller-Compacted Concrete Dams,
Guiyang, China, 2-4 noviembre 2007. - Ed. China WaterPower Press, China.