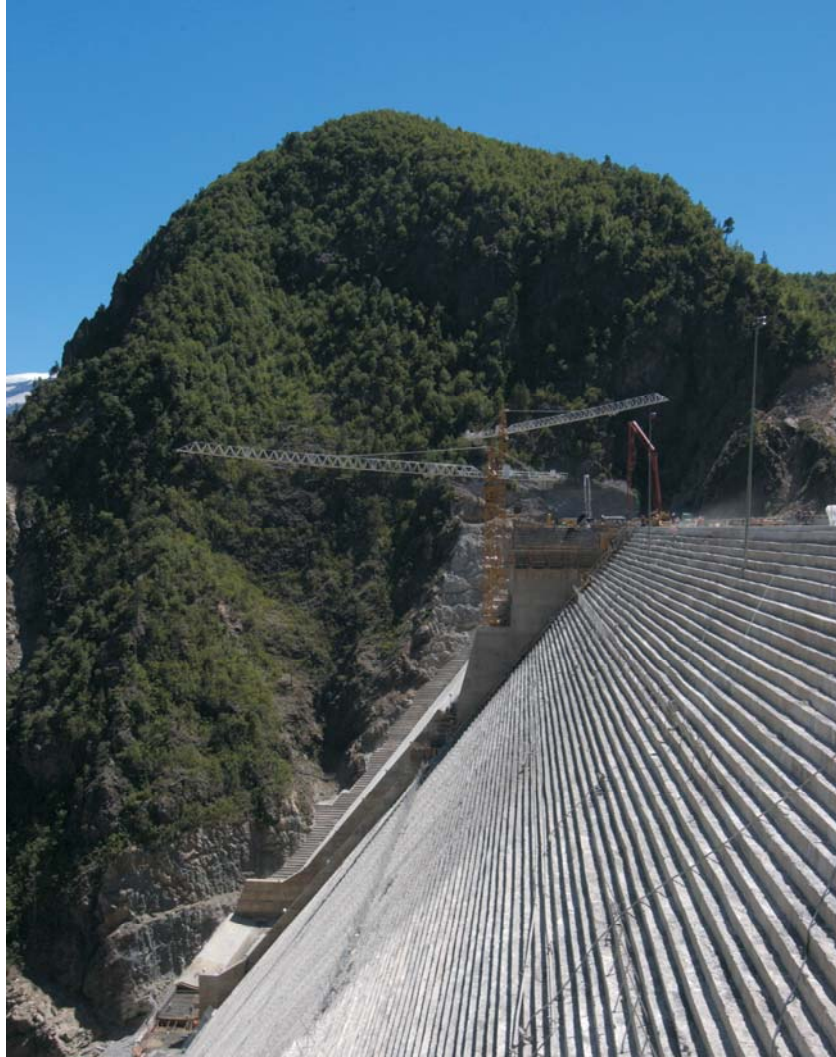


RALCO: UNA PRESA CONSTRUIDA BAJO CONDICIONES DIFICILES



Luis A. URIBE Crisóstomo
Ingeniero Civil, Ms. Scs.

Orlando A. HOFER Pineda
Ingeniero Civil.



RESUMEN

El HCR de la presa Ralco fue producido con cemento Portland puzolánico y filler constituido por arena fina molida a 3000 cm²/g Blaine. En este artículo, se analizan los resultados obtenidos para las diferentes dosificaciones de HCR consideradas en la zonificación de la presa y que fueron definidas utilizando el método de Faury modificado. Los datos estadísticos obtenidos de las muestras de laboratorio muestran resultados satisfactorios que cumplen a cabalidad las resistencias a la compresión y al hendimiento del diseño. Los controles de densidad en terreno proporcionan resultados satisfactorios para las condiciones especificadas. Las resistencias del hormigón enriquecido con lechada (HCR-EL) fueron inferiores a las mostradas por el HCR, pero igualmente satisfactorias. Los testigos extraídos desde el cuerpo de la presa, ensayados a la tracción directa y al hendimiento, indican que la primera es un 50% de la segunda.

La construcción de la presa Ralco fue construida rápida y exitosamente a pesar de las condiciones adversas que la aquejaron. Se ejecutó con óptimos niveles de calidad y altos rendimientos de colocación, usando un sistema pionero y completo de cintas transportadoras de hormigón. Las obras presentaron varias situaciones únicas cuya solución será de gran utilidad en la construcción de futuros proyectos de presas de HCR ubicados en condiciones difíciles.

1 INTRODUCCION

La presa Ralco está localizada en el río Biobío en la zona central de Chile y forma parte del complejo hidroeléctrico Ralco que aporta con 690 MW al parque energético del país. El proyecto pertenece a Endesa Chile, empresa perteneciente al Grupo Endesa España. El muro corresponde a una presa gravitacional de hormigón compactado con rodillo (HCR) con una altura de 155 metros, una longitud de 360 metros en su coronamiento y un volumen total de 1,5 millones de metros cúbicos.

La presa Ralco es la tercera más alta del mundo y la quinta en volumen del tipo gravitacional en HCR de las construidas hasta la fecha. La presa fue construida en 20 meses, alcanzando rendimientos de colocación mensuales que son los más elevados si se comparan con presas construidas en similares condiciones.

El presente artículo incluye una descripción del diseño de la presa, el análisis del control de calidad efectuado durante su ejecución y una revisión de aquellos aspectos constructivos de mayor interés, muchos de los cuales debieron ser implementados para hacer frente a las condiciones climáticas extremas, a las crecidas importantes del río y a las dificultades de acceso que presentaba el lugar de emplazamiento de la presa, un cajón muy estrecho y profundo del río Biobío.

Durante las diferentes fases de construcción de la presa, cinco grandes crecidas del río Biobío pusieron a prueba el diseño de las obras de desvío del río y el comportamiento de la obra en su etapa de ejecución. Por otra parte, la lluvia y las bajas temperaturas reinantes en la zona hicieron necesario tener presente varias metodologías pioneras en su tipo que permitieron asegurar la calidad del hormigón colocado en la presa.

2 ESTUDIO DEL HCR

El estudio del HCR incluyó una parte realizada en el Laboratorio, complementada por la ejecución de un terraplén de prueba, en el que se probó la compactabilidad de las mezclas estudiadas, asumiendo un nivel de confianza de 80%, un coeficiente de variación de 15% y que las resistencias del HCR se especifican a 365 días de edad.

Para estos estudios se partió de la base de que tenía que lograrse un buen ajuste en la zona de los finos bajo la malla # 50 ASTM a una curva granulométrica definida por el método de dosificación de Faury modificado para el HCR con un valor del coeficiente $M = 22$, curva que había sido seleccionada como la más adecuada para lograr una trabajabilidad de 15 segundos en el equipo Vebe con sobrecarga de 12,5 kg según la norma EM 1110-2-2006 del U.S. Army Corps of Engineers.

Ello podía obtenerse utilizando un cemento con un contenido de agregado puzolánico o de escoria más alto que de los existentes en el mercado o bien con la adición de un material fino bajo el tamiz # 100 ASTM molido a 3000 cm²/g Blaine.

El Contratista eligió la segunda de estas alternativas, utilizando como base un cemento Portland puzolánico corriente (30% de puzolana), para lo cual instaló una planta para la molienda de arena fina a la finura indicada proveniente de un yacimiento de la zona, con lo que se obtuvo la solución más económica para lograr la condición de ajuste antes señalada.

En los estudios del HCR se eligieron dosificaciones para su empleo en la obra tomando en cuenta los distintos requerimientos de resistencias a la tracción directa de 1,2; 1,65 y 1,85 MPa, establecidos por la zonificación estructural de la presa, además de la del mortero para utilizar en las juntas entre capas y el HCR – EL para su empleo en el paramentos de aguas arriba, aguas abajo y encuentro con los estribos de la presa. Las dosis de cemento, obtenidas para cumplir con los requerimientos de resistencias de zonificación fueron de 135(145), 165(175), 205(190), siendo los valores indicados entre paréntesis las dosis iniciales.

Las dosificaciones (finales) utilizadas se resumen en la tabla N°1.

TABLA N°1: DOSIFICACIONES DEL HCR, MORTERO Y HCR-EL.
(áridos secos) en kg/m³

| Materiales | HCR | Mortero Junta | HCR-EL |
|-----------------------------------|--------------|---------------|---------|
| Grava (1 1/2") | 629-649-634 | - | - |
| Gravilla (3/4") | 548-527-619 | - | - |
| Arena Gruesa (< #4 | 479-548-312 | 1.062 | - |
| Arena Fina (< # 30 | 276-231-370 | 453 | - |
| Filler (3000 cm ² /g) | 85-85-45 | - | - |
| Cemento Portland | 95-116-144 | 280 | 557 |
| Puzolana | 40-49-61 | 120 | 239 |
| Agua libre | 145 | 320 | 621 |
| Superplastificante | - | - | 16 |
| Densidad | 2.413-2.408- | 2.335 | 1.433 |
| Trabajabilidad * | 15 s | 26-28 cm | 34-36 s |

**Tiempo Vebe, asentamiento de cono y viscosidad en cono de Marsh Ø 4,76 mm.*

2.1 CONTROL DE CALIDAD DEL HCR Y HCR-EL

La calidad del HCR se controló en dos lugares:

- La Planta de Hormigón.
- La Presa

En la Planta de Hormigón se tomaron muestras del HCR para controlar:

- La granulometría de los áridos
- La trabajabilidad Vebe

La granulometría de los áridos se verificó mediante muestras tomadas diariamente en los buzones de áridos de la Planta de Hormigón y mediante ella se mantenía la granulometría total del hormigón lo más constante posible.

La trabajabilidad Vebe se controlaba constantemente, de manera de mantenerla dentro de ± 2 segundos respecto del tiempo teórico previsto a través de la corrección de la dosis de agua del HCR. Esta determinación permitía conocer la densidad probable del hormigón al compactarlo.

Por su parte, en la Presa se controló:

- La densidad del HCR.
- La resistencia del HCR.

La densidad del HCR se controló mediante el densímetro nuclear, de manera de tener cuatro mediciones repartidas en la superficie de la capa en colocación. La densidad media obtenida tenía que exceder el 99% de la densidad sin aire del HCR y ningún punto ser inferior al 98,5%. En caso contrario se recompactaba la capa completa o el sector donde la densidad era inferior al límite mínimo. Estos valores se obtuvieron normalmente con cuatro pasadas del rodillo de doble tambor utilizado.

La resistencia del HCR se controlaba con una muestra diaria de cilindros de 15 x 30 cm moldeados utilizando un martillo Kango, los que se ensayaban a compresión y hendimiento (tracción indirecta) a edades de 7, 28, 56, 90, 180 y 365 días.

En la tabla N°2 adjunta se incluyen los resultados de los ensayos de compresión y hendimiento de las muestras extraídas, obteniéndose valores del coeficiente de variación de 15 y 16% respectivamente, lo que indicaría un buen control del HCR, siendo los valores de resistencias obtenidos satisfactorios para las distintas zonas estructurales definidas en la presa.

En cambio, en el HCR-EL los resultados de resistencias fueron inferiores a los obtenidos en el HCR, siendo los coeficientes de variación obtenidos similares, por lo que se obtuvo también un buen control en este hormigón. Los resultados de estos ensayos se indican en la tabla N°3 adjunta.

También se extrajeron testigos de 150 mm de diámetro en la matriz del cuerpo de la Presa para su ensayo a tracción directa y hendimiento. El ensayo de estos testigos condujo como resultado global a una resistencia a tracción directa que fue el 50% de la resistencia a hendimiento de los mismos.

TABLA N°2: RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y HENDIMIENTO DEL HCR.
Resistencias promedio (MPa)(*)

| Cantidad cemento (kg/m ³) | Edad (días) | | | | | |
|---------------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 7 | 28 | 56 | 90 | 180 | 365 |
| 135 | 7.7/1.08 (45) | 10.9/1.58 (45) | 12.7/1.82 (30) | 14.3/2.09 (45) | 18.2/2.58 (44) | 20.8/2.64 (13) |
| 145 | 9.2/1.33 (36) | 13.0/1.78 (36) | 15.5/2.16 (10) | 16.8/2.21 (36) | 21.2/2.72 (36) | 22.8/3.00 (26) |
| 165 | 11.0/1.55 (168) | 15.5/2.06 (168) | 16.3/2.23 (31) | 18.6/2.51 (168) | 23.2/3.01 (165) | 27.8/3.36 (115) |
| 175 | 12.8/1.86 (33) | 17.3/2.34 (33) | 20.1/2.72 (10) | 21.5/2.78 (33) | 25.9/3.44 (33) | 28.8/3.77 (23) |
| 190 | 12.8/1.70 (36) | 16.7/2.24 (36) | - - | 20.6/2.51 (36) | 23.7/2.89 (36) | 31.2/3.72 (30) |
| 205 | 13.1/1.82 (20) | 17.0/2.30 (20) | - - | 20.2/2.57 (20) | 25.0/3.16 (19) | 33.6/4.03 (20) |

(*) El número de ensayos ejecutados corresponde al mostrado entre paréntesis.

TABLA N°3: RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESION Y AL HENDIMIENTOS DEL HCR-EL.

Resistencias promedio (MPa) (*)

| Cantidad Cemento (kg/m ³) | Edad (días) | | | | |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| | 7 | 28 | 90 | 180 | 365 |
| 135 | 8.1/1.00 (51) | 12.4/1.40 (51) | 15.3/1.80 (51) | 17.5/2.00 (51) | 21.0/2.30 (47) |
| 145 | 9.1/1.00 (55) | 13.6/1.50 (55) | 17.2/1.80 (55) | 20.4/2.10 (55) | 23.5/2.50 (55) |
| 165 | 10.6/1.20 (126) | 15.3/1.70 (126) | 18.3/2.00 (126) | 20.8/2.30 (126) | 26.6/2.80 (98/106) |
| 175 | 10.3/1.10 (14) | 16.4/1.60 (14) | 19.5/2.00 (14) | 21.7/2.30 (14) | 25.8/2.60 (14) |
| 190 | 10.8/1.20 (37) | 15.1/1.70 (37) | 18.2/1.90 (37) | 21.2/2.20 (27) | 28.1/3.00 (37) |
| 205 | 11.2/1.30 (10) | 15.9/1.70 (10) | 19.0/2.00 (10) | - - | 28.8/3.10 (10) |

() Los resultados a la compresión corresponden a cubos de 20 cm y los valores al hendimiento en cilindros normales de 15 x 30 cm. El número de ensayos ejecutados corresponde al mostrado entre paréntesis.*

3 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

3.1 DESVÍO DEL RÍO Y PROTECCIÓN DE LAS OBRAS

El proyecto Ralco aprovecha una parte importante de los recursos hidráulicos de la cuenca alta del río Biobío, cuyo caudal medio anual alcanza a 270 m³/s. El manejo del río para la protección y aislamiento del sector donde se emplazó la presa consideró la construcción de un túnel de desvío con un diámetro de 13,5 m y un largo de 500 m, complementado con ataguías aguas arriba y aguas abajo del muro. El diseño de la ataguía de aguas arriba consistió en una presa gravitacional de 50 m de alto, con un relleno impermeable y permeable, y con un enrocado de protección en el paramento de aguas abajo que permitía un caudal de vertimiento, por metro de longitud de su coronamiento, de 15 m³/s/m.

Mientras se ejecutaban los trabajos de construcción de la ataguía de aguas arriba, en mayo del 2001, una crecida del río Biobío cuyo caudal alcanzó a un período de retorno de 10 años considerando el mes de ocurrencia, sobrepasó el coronamiento y causó la destrucción parcial del sector sur de la ataguía de aguas arriba y la destrucción total de la ataguía de aguas abajo. El colapso de la ataguía originó la pérdida de los trabajos de excavación de la fundación en el lecho del río que se encontraban prácticamente terminados.

Con el objetivo de minimizar los atrasos, se determinó reducir la altura de la nueva ataguía y cubrir de esa forma un posible nuevo vertimiento durante el primer invierno (mayo - agosto 2002). Para la reconstrucción de la sección erosionada de la ataguía de aguas arriba se utilizó HCR con bajo contenido de cemento (84 kg/m³), fundándose sobre la estructura de la ataguía original, la que tuvo que ser reforzada en sus empotramientos y en su talud de aguas abajo. La utilización de HCR se vio facilitada debido a que en el intertanto el Contratista había implementado su planta de fabricación de HCR.

Superado el incidente de la ataguía y reexcavado el lecho del río en la zona de fundación del muro, en enero de 2002 se da inicio a la colocación de HCR en la presa. Debido a la alta probabilidad de una inundación de la presa

mientras su coronamiento no fuese lo suficientemente alto, se toma la decisión de priorizar la construcción del sector de aguas abajo de la presa para que actuara como una ataguía temporal por aguas abajo. Afortunadamente, durante esta fase de las faenas no se produjo ningún vertimiento y la construcción de la presa se normalizó para continuar creciendo en altura en forma uniforme en toda su extensión.

3.2 VERTIMIENTOS SOBRE LA PRESA DURANTE SU CONSTRUCCIÓN

Las altas precipitaciones registradas durante el año 2002 produjeron que el río Biobío vertiera en dos ocasiones por sobre la presa en construcción, destruyendo nuevamente la ataguía de aguas abajo y los caminos de acceso a la presa. Debido a la alta probabilidad de ocurrencia de un vertimiento, previamente se adoptaron todas las acciones tendientes a evitar daños en equipos y maquinarias, protegiendo principalmente las estructuras que soportaban el sistema de cintas transportadoras a lo largo de la presa. El primer vertimiento ocurrió en el mes de agosto 2002 cuando la presa presentaba una altura de 43 m, y el caudal máximo que escurrió por sobre la presa alcanzó a 250 m³/s, aproximadamente. Los caminos de acceso fueron rápidamente recuperados permitiendo reanudar los trabajos en un plazo de aproximadamente una semana.

Ocurrido este primer evento, se reforzaron las medidas para mitigar sus efectos, reconstruyéndose los caminos de acceso a la presa con muros de contención y carpetas de rodado elaboradas con el mismo HCR de la presa. El segundo evento se produjo en octubre 2002, en esa oportunidad, la presa tenía 52 m de elevación, controlándose un caudal por sobre la presa cercano a 550 m³/s, equivalente a un nivel de agua cercano a un metro sobre la superficie en construcción. En esta ocasión, aunque el vertimiento fue doblemente importante, no destruyó los accesos debido a las acciones implementadas, permitiendo reanudar de inmediato los trabajos de construcción una vez disminuido el nivel del río Biobío.



Figura 1
Segundo vertimiento ocurrido en Octubre 2002.

En ambos eventos la presa no sufrió ningún tipo de daño estructural, ni se detectaron desgastes significativos en la última capa de HCR colocada. Los escalones del paramento de aguas abajo de la presa no presentaron daños a pesar de que trabajaron como elementos disipadores de energía del escurrimiento, lo que evidenció el buen comportamiento del HCR-EL frente a la acción erosiva del agua.

3.3 RENDIMIENTOS DE COLOCACIÓN DE HCR

En la fase inicial de la construcción de la presa Ralco, el proceso de colocación de HCR fue lento, principalmente por la utilización de camiones que debían recorrer varios kilómetros para transportar el hormigón. Las condiciones del terreno hicieron necesario localizar las plantas de hormigón sobre un relleno de tierra armada de 35 metros de altura, reforzado con geotextiles, colocado sobre una quebrada ubicada a la derecha del paramento de aguas arriba de la presa.

La producción de HCR se realizó a través de una planta equipada con 3 mezcladores de tambor de 9,5 m³ de capacidad y una caldera para calentar el agua de amasado. La capacidad máxima teórica de las plantas de HCR era de 600 m³ por hora. Se consideraron modificaciones a las paletas de los mezcladores con el fin de evitar la adherencia del hormigón en el interior y mejorar el vaciado del HCR, además de proteger los silos de cemento para minimizar los problemas de condensación en su interior.

El programa de construcción de la presa Ralco consideraba elevadas tasas de colocación de HCR, lo que hizo necesario implementar un sistema de transporte eficiente y confiable. El proyecto de este sistema fue ejecutado por la empresa Rotec Industries Inc, quién diseñó un sistema de cintas de alta velocidad, conformado principalmente por 3 tramos, cuya capacidad máxima registrada alcanzó a 550 m³ por hora.

El primer y segundo tramo de la cinta que permitían unir la planta de hormigón con el coronamiento de la presa estuvo compuesto por cintas transportadoras tradicionales que involucraron un largo total de 135 m. Debido a la topografía del sector, se hizo necesario excavar un túnel para albergar en su interior el tramo más prolongado de la cinta. Pero sin lugar a dudas, el mayor desafío del transporte del hormigón se concentró en solucionar el problema de hacer descender el material desde el coronamiento hasta el lecho de fundación, una altura total de 150 m y que presentaba una pendiente de 45 grados en el empotramiento derecho de la presa.

Debido a la pendiente fue necesario utilizar una segunda cinta montada sobre la cinta principal, cuyo objetivo era confinar el hormigón entre las 2 cintas y así evitar que deslizara o cayera fuera de la correa. Por tratarse de un sistema prototipo, en una primera etapa de operación la cinta "sándwich" presentó varios inconvenientes que impedían que el hormigón llegara en su totalidad y con la calidad adecuada al sitio de colocación. En vista de lo anterior, se estableció una serie de modificaciones asociadas a la inclinación de los rodillos, textura de la cinta principal e instalación de aletas en la cinta de cubierta para evitar el deslizamiento y caída del HCR.

Durante los primeros 6 meses del transporte de HCR con cinta, las tasas de colocación, alcanzaron rendimientos de colocación promedios de 50.000 m³/mes. A medida que las modificaciones de la cinta transportadora se iban perfeccionando, los rendimientos de colocación se incrementaron. Los rangos de producción de HCR se mantuvieron sobre 100.000 m³/mes durante 6 meses consecutivos (noviembre de 2002 a abril de 2003), alcanzando un rendimiento máximo de colocación de 7.793 m³/día y 149.215 m³/mes en enero 2003. Estas elevadas tasas de colocación de HCR requirieron de un suministro diario de 9.600 toneladas de áridos y de 760 ton de cemento, aproximadamente.

3.4 COLOCACIÓN DEL HCR EN ÉPOCA INVERNAL

La construcción de la presa Ralco consideró la colocación del HCR sin interrupción durante las épocas de invierno. El promedio anual de lluvia en el sitio del proyecto es aproximadamente de 3.000 mm, de los cuales cerca de un 80% ocurre durante el período invernal (abril a septiembre). Durante el invierno es común que se presenten temperaturas bajo cero (de hasta -12° C) y nieve. Asimismo durante el verano la temperatura ambiente puede alcanzar los 39° C.

Durante el primer año de colocación de HCR (2002), las lluvias fueron sustancialmente más altas que lo normal, alcanzando un total de 4.230 mm. El segundo año (2003) de construcción de la presa fue más seco que lo normal, con excepción del mes de junio cuando se registró un total de agua caída de 1.097 mm. Durante todo el período de construcción se registraron 140 días con lluvias de intensidad superior a 10 mm y con un máximo diario de 197 mm.

El rango de temperaturas durante la colocación de HCR fue de -5,9° C a 36,4° C, registrándose 116 días con temperaturas bajo cero y 130 días con temperaturas superiores a 25° C.

Se estableció la posibilidad de mantener la colocación de HCR con intensidades de lluvia de hasta 3 mm/hr y con temperaturas ambiente superior a -4,5° C, cumpliendo ciertas restricciones y requerimientos especiales.

Durante el tiempo frío se consideró el calentamiento del agua de amasado y protección de la superficie expuesta de HCR mediante el uso de mantas térmicas. Por otra parte, cuando la temperatura ambiente excedía los 25° C, se consideró la disminución de la temperatura a través de un riego permanente mediante aspersores y aumento de la trabajabilidad del HCR producido, de manera que, por la pérdida de humedad durante el transporte, se cumpliera con la trabajabilidad especificada para la colocación (15 segundos Vebe). Durante las condiciones climáticas más extremas se procedió a la detención de los trabajos de colocación de HCR, situación que se produjo aproximadamente en 40 días .



Figura 2

Uso de mantas térmicas para proteger la superficie del HCR expuesto.

Las precauciones para el hormigonado en tiempo lluvioso fueron: control continuo de la intensidad de la lluvia y detención cuando precipitaban más de 3 mm/hora; incremento de la trabajabilidad Vebe del HCR producido de 15 a 25 segundos y limitación del área de extensión del mortero de junta próximo al HCR que se estaba colocando para evitar su saturación.

REFERENCIAS

- ZABALETA, H. General concepts for a sistematizacion of study of RCC. Proceedings of the International Symposium Held. Santander, Spain. October 1995.
- FORBES, B.A. Construction of Ralco dam in Southern Chile. Conference on Roller Compacted Concrete for dams and rehabilitation. Portland Cement Association. San Diego, USA. September 2002.
- URIBE, L & BOSSHART, D. Challenging RCC dam construction on the Ralco project in Chile. The International Journal on Hydropower and Dams, Volume 9, Issue 4: pages 95-99. 2002.
- BOSSHART, D. RCC works reach completion at Ralco dam, Chile. The International Journal on Hydropower and Dams, Volume 10, Issue 5: pages 126-128. 2003.
- D. CROQUEVIELLE, L. URIBE, R. MUTIS & B.A. FORBES. Ralco Dam, Chile – features of its design and construction. Proceeding of the fourth international Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams. Madrid, Spain. November 2003.