

# **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA PRESA EN CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO (RCC) DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO PIRRÍS**

***Ing. Juan Arias Formoso***

*Instituto Costarricense de Electricidad, Responsable Ingeniería P.H.Pirrís, [jarias@ice.go.cr](mailto:jarias@ice.go.cr)*

***Ing. Ignacio Arguedas G***

*Instituto Costarricense de Electricidad Responsable Ejecución de la presa P.H. Pirrís, [iarguedas@ice.go.cr](mailto:iarguedas@ice.go.cr)*

## **RESUMEN:**

Además de una breve referencia a los antecedentes de la ejecución de la presa del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís y a la tecnología del Concreto Compactado con Rodillo (RCC), para el diseño de la presa este artículo reseña los elementos principales que condujeron a la optimización de la estructura para el cumplimiento de los requerimientos de calidad y seguridad. Como temas relevantes se tratan la escogencia del tipo de presa, la fundación, el diseño hidráulico, el uso de un concreto compactado con rodillo de alta pasta, la optimización de la sección transversal, el diseño térmico y la instrumentación. Para su construcción se abordan temas como la organización para su ejecución, los requerimientos constructivos del RCC, la producción, transporte y colocación del RCC, el programa de trabajo, el control de calidad, y los principales costos y rendimientos.

## **ABSTRACT:**

Besides providing a brief reference to the background of the dam execution works for the Pirrís Hydroelectric Project and to the Roller Compacted Concrete (RCC) technology for the design of the dam, this article describes the main elements that led to the optimization of the structure in order to meet the quality and safety requirements. Some important issues include the selection of the type of dam, the foundation, the hydraulic design, the use of high-paste RCC, the optimization of the cross section, the thermal design, and the instrumentation. Regarding the construction of the dam, the article refers to the organization required for its execution, the RCC constructive requirements, the RCC production, transportation and placement works, the work program, quality control, and the main costs and performance rates.

**PALABRAS CLAVES:** concreto compactado con rodillo, presa, Proyecto Hidroeléctrico Pirrís, RCC

## INTRODUCCIÓN

La presa del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís (P.H. Pirrís) constituye una de las obras de mayor magnitud de Costa Rica y de América Central. Junto a la Carretera San José-Caldera y al nuevo Estadio Nacional, representan las obras de infraestructura más complejas y cuantiosas desarrolladas en el país en los últimos cinco años.

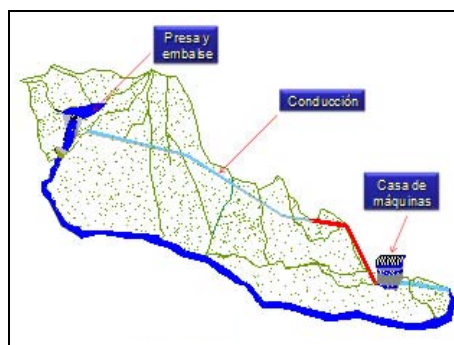
Por su magnitud, así como por la utilización de la tecnología de Concreto Compactado con Rodillo, la ejecución de la presa representó un reto para el país y para el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Desde su concepción y diseño, hasta su construcción, el ICE debió avocarse a un trabajo intenso de adquisición de conocimientos y de planificación.

Dada su importancia hemos querido mediante este artículo permitir a los profesionales de Ingeniería y Arquitectura del país, y en general a la comunidad profesional, conocer aunque sea de manera muy resumida los diferentes elementos y actividades que permitieron llevar a buen término esta obra. Con este mismo objetivo, en el mes de marzo del año en curso, el ICE y el Colegio de Ingenieros Civiles (CIC) organizaron un Seminario específico sobre la presa. Dado que las actividades relacionadas con la presa son muchas y complejas, y que este artículo debe restringirse a muy pocas de ellas, referimos a la hoja Web del CIC donde se puede tener acceso a las más de 20 conferencias especializadas que se presentaron durante el Seminario.

## DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y DE LAS OBRAS DE PRESA

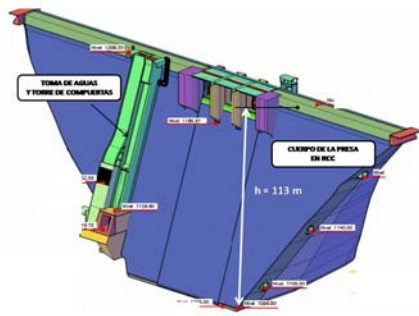
El P.H. Pirrís, desarrollado por el ICE, está localizado en el Pacífico Central de nuestro país en la cuenca media del río Pirrís y entrará en operación en el segundo semestre del año 2011.

Tendrá una capacidad instalada de 134 MW y una generación de energía anual promedio de 600 GWh. La planta hidroeléctrica estará conformada por el embalse y las obras de presa, una conducción compuesta por un túnel de 10 500 m y una tubería forzada de 350 m. La casa de máquinas contiene dos turbinas Pelton para una caída neta de 970 m.

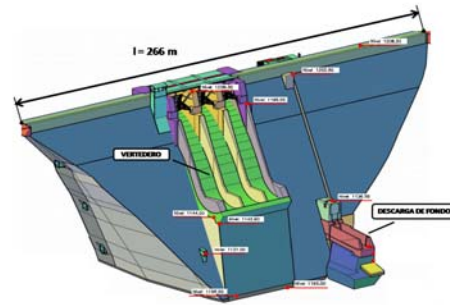


**Figura 1-** Esquema del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís

En las obras de presa su cuerpo principal tiene un volumen de 730 000 m<sup>3</sup> de RCC, una altura de 113 m y 266 m de longitud en la cresta. La elevación de la cresta de la presa es la 1 208,3 m.s.n.m. y la fundación es la 1 095,0 m.s.n.m.



**Figura 2-** Vista aguas arriba de la presa



**Figura 3-** Vista aguas abajo de la presa

Estas obras de presa también comprenden estructuras de concreto convencional como el vertedor de excedencias colocado directamente sobre la presa. La derivación del agua se realiza mediante una torre toma inclinada adosada al paramento de aguas arriba de la presa, así como la descarga de fondo y la contrapresa, que en conjunto suman 90 000 m<sup>3</sup> de concreto convencional. Todas las obras tienen un monto aproximado de 140 millones USD.



**Figura 3-** Vistas de la presa iniciando el llenado del embalse

## ANTECEDENTES PARA LA EJECUCIÓN DE LA PRESA

Inicialmente la construcción de las obras de presa fue objeto de un concurso de contratación pública internacional cuyo contrato dio inicio en el año 2006 con la empresa italiana Astaldi S.p.A. En mayo del 2008 se presentó un evento de Fuerza Mayor con la tormenta tropical Alma, lo cual originó una negociación y modificación al contrato, que dio como resultado que el ICE quedase como responsable de la ejecución de las obras bajo la modalidad de administración directa, y Astaldi como proveedor de algunos materiales y elementos electromecánicos, y alquilando cierta maquinaria estratégica.

## TECNOLOGÍA DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO (RCC)

El RCC es un concreto con características muy similares al concreto convencional en cuanto a su comportamiento estructural y apariencia, pero con diferencias importantes en las características de la mezcla y en su proceso de fabricación y colocación. En el proceso constructivo se busca altos rendimientos, similares a los obtenidos en los movimientos masivos de materiales sueltos. Dado que se trata de una estructura muy masiva y de alto volumen, se requiere diseñar una mezcla de concreto con bajos calores de hidratación y en la que sea controlado el fisuramiento por su enfriamiento posterior.

Para lograr el objetivo anterior, el diseño de mezcla del RCC debe tener el menor contenido de cemento posible que se cumpla con el requerimiento estructural y una consistencia seca. Se emplean materiales cementantes de lenta generación de resistencia y calor, principalmente las puzolanas. En su fabricación es usual el enfriamiento previo del agua y de los agregados. Su

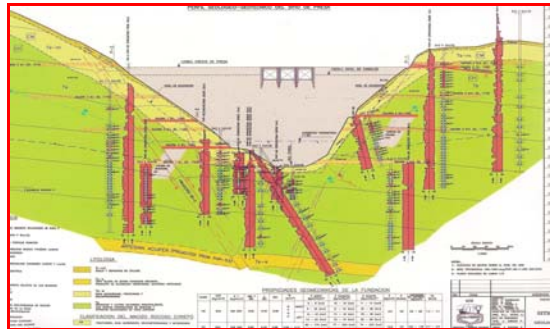
transporte y colocación se hace con los equipos convencionales para los movimientos de tierra. Existen varias modalidades dentro de esta tecnología, siendo la mezcla objeto de esta presa de “alta pasta” (contenido de cementante mayor a  $150 \text{ kg/m}^3$ ), que permite un proceso continuo de colocación de las diferentes capas consecutivas de concreto, en general sin tratamiento entre ellas, lo que favorece la homogeneidad de la presa y los altos rendimientos.

## DISEÑO DE LA PRESA

### Modelo Geomecánico

El diseño de la presa principal inicia con la selección del tipo de presa. En el caso de Pirrís, dada la forma del valle, se compara una presa de enrocado con una presa de concreto compactado con rodillo (RCC). Se decide usar la técnica del RCC porque el sitio cuenta con una fundación de buenas características en cuanto a deformabilidad y dado que se tiene identificado un sitio de préstamo para la extracción de los agregados de material ígneo, el cual se encuentra muy cerca de la presa. Todos los agregados de la presa fueron producidos en cantera. Se desarrolla un modelo geomecánico del sitio para definir los parámetros de diseño final de la presa. El macizo está formado por rocas sedimentarias de origen marino, es una secuencia de lutitas y areniscas estratificadas con intercalación de areniscas brechosas.

Para alcanzar el nivel de fundación se ha debido remover una capa superficial de 7 m de espesor promedio, con excavaciones adicionales en ciertas zonas. Se identifica la presencia de planos de estratificación buzando hacia aguas abajo y con rellenos blandos, los cuales comprometen la estabilidad al deslizamiento de la presa en la margen izquierda y obligan a la ejecución de un muro de cortante subterráneo o llave de cortante. Para garantizar la estanqueidad requerida del embalse se diseña una cortina de inyecciones, la cual es ejecutada a través de cuatro galerías en cada margen, dentro de ellas y en el cauce se perfora un total cercano a los 41 000 m y se inyecta lechada de agua/cemento para un total superior a los cuatro millones de kilogramos de cemento. Como parte del sistema de garantía de estabilidad, se cuenta con galerías para recoger mediante perforaciones de drenaje las posibles filtraciones que sobrepasen la cortina de inyección.



**Figura 4-** Modelo Geomecánico Sitio de Presa

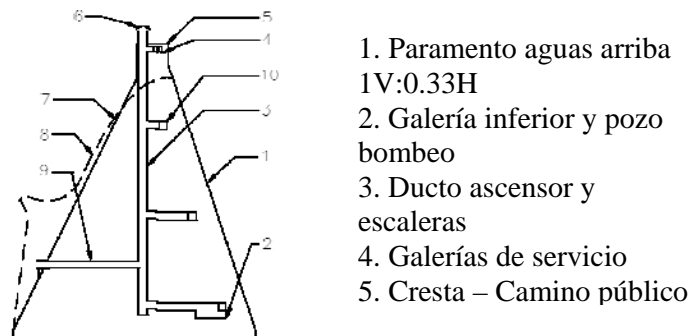
### Diseño del cuerpo de presa

Para lograr una estructura que sea exitosa desde el punto de vista de calidad y costo, la ejecución del RCC debe ser tan rápida como posible, se establece que el cuerpo principal de la presa debe estar libre de obstáculos, razón por la cual las estructuras de la toma, descarga de fondo y desvío se sacan del monolito y sólo se conserva en su interior los ductos para un pozo central con ascensor y tres niveles de galerías que comunican las galerías de inyección. El RCC de la presa se zonificó en dos niveles de requerimiento estructural a la tracción entre capas de colocación, el tipo A con una resistencia de 1.2 MPa y el tipo B de 0.6 MPa, lográndose de esta manera optimizar costos y favorecer el comportamiento térmico. A efectos de lograr tanto las velocidades de

construcción buscadas, cómo la buena adherencia entre capas, se diseñó la mezcla de manera que en condiciones normales (madurez menor a 400 °C/h) simplemente se colocara una capa de concreto sobre la otra, sin uso de mortero o lechada de pega, lo que condujo a su vez a establecer una mezcla de alta pasta así como a dosificar un aditivo retardante para contar con un inicio de fragua del concreto entre las 18 y 26 horas.

Para optimizar el volumen de la presa y cumplir con los requerimientos sísmicos (aceleraciones pico de diseño OBE=0.43 m/s y MCE=0.76 m/s) se realizó un proceso de optimización de la sección transversal. A fin de reducir al máximo los esfuerzos de tensión para la presa producto de las sollicitaciones sísmicas, se realizó un análisis de sensibilidad de diferentes secciones transversales, todas de área equivalente.

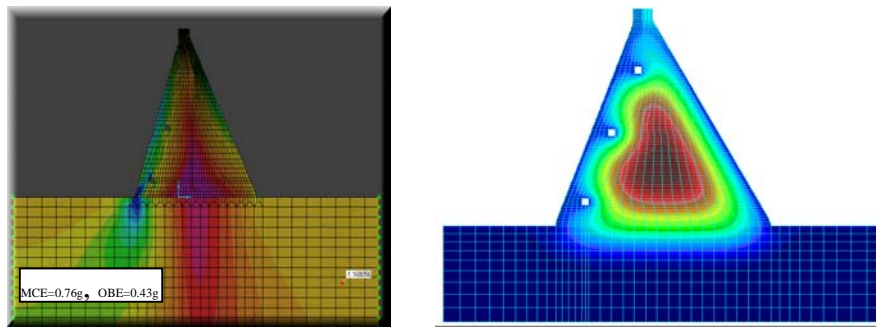
La escogencia de la sección óptima se realiza en dos etapas. La primera consiste en el análisis de estabilidad, donde se garantice que la presa es estable ante volcamiento, deslizamiento, flotación y excentricidad de la carga. La segunda es el análisis de esfuerzos. La sección óptima será la que produzca menores esfuerzos de tensión en zonas críticas y con condiciones de estabilidad adecuadas.



**Figura 5-** Sección Transversal Presa

### Diseño térmico

La hidratación del cemento al ser exotérmica, hace que para un volumen tan grande como en nuestro caso se genere una temperatura de hasta 54 °C en el corazón de la presa en edades tempranas (200 días), el posterior enfriamiento provocará contracción lo que hará que se generen esfuerzos de tracción, estos no deben sobrepasar la capacidad del RCC de 1.2 MPa. Para cumplir esta restricción de esfuerzos, la presa cuenta con juntas de contracción perpendiculares a su eje que están espaciadas entre los 15 m y 17 m, así mismo se limitó la temperatura máxima de colocación del RCC a los 23 °C. En el modelo de diseño térmico se ha considerado la velocidad de colocación, los contenidos de cemento del RCC-A y RCC-B, así como las propiedades térmicas del cemento empleado que es con 50% de puzolana, y las condiciones climáticas del sitio. Para validar las predicciones modeladas se colocan en la presa 188 termómetros, los cuales están siendo leídos y analizados desde que se instalaron durante el proceso constructivo. La cara externa de la junta entre cada uno de los monolitos reviste una especial importancia y está constituida por dos bandas impermeabilizantes tras las cuales se cuenta con un ducto de drenaje que conecta con las galerías de la presa.



**Figura 6-** Curvas isobaras (esfuerzos verticales con sismo) e isotermas de la presa (temperaturas máximas)

### Consideraciones Hidráulicas

El vertedero de excedencias se diseñó para una avenida de 1:5000 años de  $2350 \text{ m}^3/\text{s}$ , teniendo capacidad para la avenida máxima probable de la cuenca de  $3300 \text{ m}^3/\text{s}$ . Tiene un esquema de disipación con salto de esquí y cuenco disipador formado por una contrapresa que se ubica a 500 m aguas abajo aprovechando un estrechamiento del cauce; para conseguir el menor volumen, aunque conlleva una altura de 27 m. Con esto se forma durante las avenidas del río un embalse importante, el cual en la zona de impacto tiene una profundidad inicial de 18 m, consiguiéndose así amortiguar el impacto y limitar la profundidad de la erosión, de 47 m a 25 m. El vertedor es controlado por tres compuertas radiales de 10.5 m de alto y 11.70 m de ancho, respaldadas por ataguías. Durante la operación de la rápida se alcanzará una velocidad de 33 m/s, lo cual obliga a bajas tolerancias en el acabado de su losa.

La descarga de fondo se ubica cerca de la toma de aguas. Tiene funciones de limpieza de sedimentos, maniobras de operación y mantenimiento y como vertedor auxiliar en el caso de fallo de alguna compuerta, tiene capacidad de descarga de  $600 \text{ m}^3/\text{s}$ . Para su operación se cuenta con un sistema de dos elementos; una compuerta vagón aguas arriba y una compuerta radial con capacidad de regulación aguas abajo.

Está proyectado como elementos complementarios, la limpieza de sedimentos por sifonamiento o por medio de una draga profunda. El volumen muerto del embalse es de seis millones de  $\text{m}^3$  y se espera una tasa anual de sedimentación de 450 mil  $\text{m}^3$  en el escenario más crítico, de ahí la necesidad de hacer limpiezas periódicas para evitar que los sedimentos lleguen al nivel de toma en un plazo cercano a los 7 años.

La toma de aguas tiene abocinamiento en las cuatro caras y una sumergencia de 12 m, ha sido diseñada y revisada con un modelo hidráulico para no presentar vorticidad en los niveles extremos de operación, para un rango de elevaciones de 40 m. Se tiene una compuerta plana de control cuadrada de 3.25 m de lado. El embalse de 30 millones de  $\text{m}^3$ , presenta una regulación estacional, lo cual es de mucho interés para el Sistema Nacional Interconectado. La planta está concebida para cubrir los picos de la demanda.

El desvío para la excavación y tratamiento de fundaciones así como la construcción de la presa se ejecutó mediante un túnel de 360 m de largo y una capacidad de  $525 \text{ m}^3/\text{s}$ , para un período de retorno de 1:5 años.

## CONSTRUCCIÓN DE LA PRESA

### Organización para la ejecución de la presa

La organización para la ejecución de la obra implicó coordinar diferentes dependencias y empresas tales como los diseñadores, el control de calidad, los consultores, los constructores, los administradores de contratos, dependencias de servicio, proveedores y subcontratistas. En total se

involucraron directamente en la ejecución de la presa un grupo de aproximadamente 20 profesionales y 1800 trabajadores.

### Producción del concreto

La planta para producción del concreto, alquilada a Astaldi S.p.A., consistió en una planta nueva de marca Betonmac de Argentina con una capacidad nominal de 540 m<sup>3</sup>/hr, con dos líneas de mezclado independientes para completar un total de 4 mezcladores de doble eje horizontal. Dispuso de cuatro silos pequeños para cemento encargados de su dosificación para cada mezclador y 3 silos para almacenar cemento con capacidad de 700 ton cada uno, los cuales recibían el cemento de camiones graneleros. El ICE aportó un silo adicional.

A fin de lograr que en el sitio de colocación la temperatura del RCC fuese inferior a los 23° C, de la planta debía salir a 17° C, por lo que debían enfriarse el agua y la piedra.

La planta tuvo un comportamiento irregular debido a un mantenimiento deficiente, esto sobretodo en el segundo tercio del tiempo total operado, pues con frecuencia estaban disponibles solo uno o dos de los cuatro mezcladores existentes.



Figura 7- Planta Betonmac para producción de RCC

### Transporte del concreto

La planificación de la presa consideró el transporte del concreto mediante una banda transportadora de 500 m de longitud, que es la distancia que separa la planta del sitio de colocación, y que a su vez permitía llegar a todos los niveles de la presa. Una disponibilidad insuficiente de la banda (en promedio del 65 %) obligó a disponer permanentemente de un mecanismo de transporte alternativo del RCC con vagonetas, las cuales en la mitad inferior de la presa accedían al área de colocación mediante una rampa de material suelto que alcanzó los 200 000 m<sup>3</sup>, y en la mitad superior lo descargaban mediante una tolva y canoas metálicas localizadas en la parte alta de ambos márgenes.



Figura 8- Transporte y descarga del RCC con banda y con canoa/vagoneta

### Colocación del concreto

El principal requisito para la colocación del concreto, aún en época lluviosa, es asegurar una excelente adherencia y continuidad entre las capas de RCC de 30 cm de espesor, para lo cual la superficie debe estar fresca o con una adecuada preparación de la junta, de manera que se eviten juntas frías entre capas y también cumplir el requerimiento de esfuerzo a la tensión de 1.2 MPa.

Una vez depositado el RCC en el sitio, se extiende con un tractor D5 y se compacta con un rodillo vibratorio liso de 10 ton. Entre los equipos involucrados en la colocación del RCC hay dos muy particulares cuales son el distribuidor de concreto compuesto por bandas transportadoras telescópicas, con alcance a casi toda el área de trabajo y capacidad de hasta 300 m<sup>3</sup>/hr (Crawler), así como una grúa torre Potain MD-1100 con capacidad de 40 ton que permite ingresar o retirar al área de trabajo equipo pesado debido a que en la mitad superior de la presa ya no hay accesos carreteros.



**Figura 9-** Utilización del Crawler y de la grúa Potain MD-1100

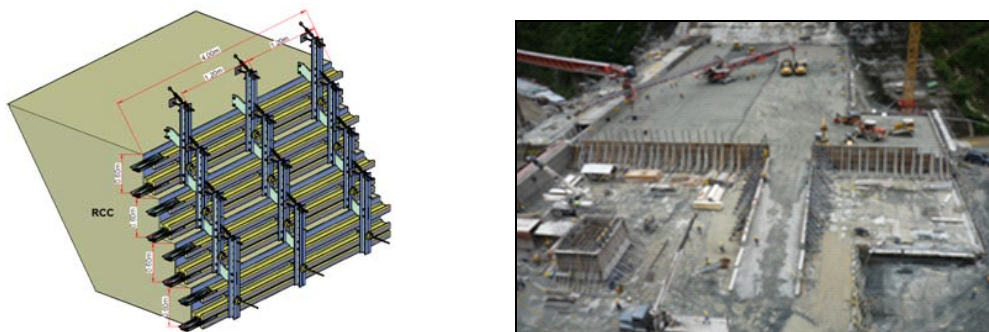
### Aspectos particulares en la colocación del RCC

Durante la colocación del RCC se debieron considerar muchos aspectos particulares muy determinantes en el diseño de la presa, el procedimiento constructivo, los costos y los rendimientos. Podemos citar entre los más importantes los siguientes:

- **Formaleta para los paramentos:** Se seleccionó una formaleta Doka en forma de gradas con alturas de 60 cm, debiéndose colocar entre 4 y 6 módulos unidos entre sí de manera que la presión del concreto sin fragua suficiente de las capas superiores, fuese soportada por los módulos inferiores adecuadamente sostenidos por el concreto ya fraguado.
- **Galerías de drenaje e inyección:** El cuerpo de la presa está atravesado por tres galerías longitudinales de drenaje e inyección unidas por un pozo con ascensor. Fueron un elemento muy influyente en el rendimiento de colocación del RCC.
- **Juntas de contracción longitudinales:** Estaban originadas por el diseño estructural de la presa en monolitos. Por medio de banda impermeable (wáter stop) debía asegurarse que no hubiese paso de agua proveniente del embalse. Por razones constructivas estas juntas debían inducirse mediante el hundimiento de una placa metálica posterior a la colocación de cada capa .
- **Curado de la superficie de concreto:** Se realizaba una aspersión permanente de agua y aire a presión de manera que toda la superficie expuesta del concreto siempre estuviese húmeda.
- **Otras estructuras adosadas:** El diseño y el sistema constructivo debieron considerar la interrelación del cuerpo de la presa con otras estructuras adosadas como la descarga de fondo, la toma de aguas y el vertedor de excedencias.
- **Sistema de hiperbloques:** Este sistema consiste en dividir el cuerpo de la presa en aproximadamente dos mitades por una de sus juntas longitudinales, colando entonces primero una mitad y luego la otra, con lo cual al tenerse solo una mitad del área de concreto expuesto se

dispone también, para iguales requerimientos de madurez, de la mitad del tiempo para concluir la capa y por consiguiente se mejora la calidad de la junta. Se utilizó para los meses de mayor intensidad de lluvia y debido principalmente a las insuficiencias en la disponibilidad de la banda y en la producción de la planta, entre las elevaciones 1126 m.s.n.m y 1140 m.s.n.m.

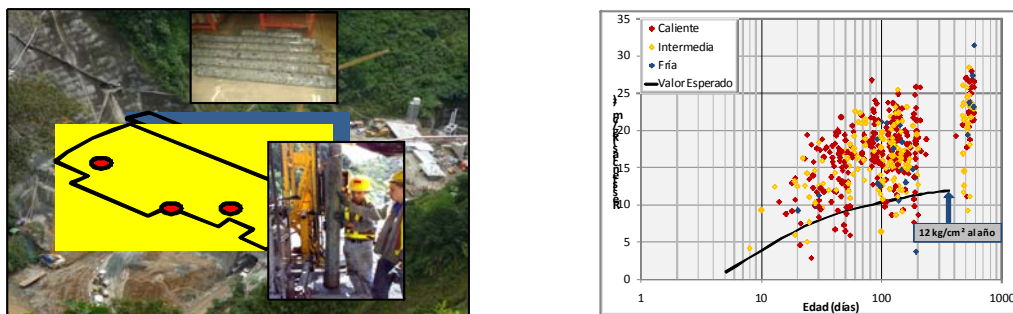
- Instrumentación: Todo el cuerpo de la presa quedó monitoreado por aproximadamente 500 instrumentos, principalmente termómetros y deformímetros
- Tratamiento de superficies: Según los valores del factor de madurez se debió en algunos casos aplicar tratamiento para junta intermedia o junta fría
- Concreto enriquecido con lechada: Ya sea por requerimientos de impermeabilidad o apariencia, se requiere de un concreto de mayor fluidez en las zonas donde el RCC está en contacto con la formaleta de los paramentos, con los taludes, con muros, galerías u otros elementos de estructuras de concreto convencional. En nuestro caso se utilizó la técnica de enriquecer con lechada el RCC a colocar en estas zonas especiales



**Figura 11-** Formaleta del paramento y sistema de hiperbloques

## Control de Calidad

Hay un proceso muy estricto de control de calidad que comprende el control del cemento y de los agregados, el batido de la mezcla en planta considerando los requisitos de temperatura y confección de cilindros de prueba, y en el sitio la verificación de consistencia, tiempos de fragua, instrumentación, segregación y compactación, así como un muestreo posterior con núcleos extraídos del cuerpo de la presa para verificar la homogeneidad del concreto y su resistencia a la tensión.



**Figura 10-** Extracción de núcleos y resultados de ensayos a tracción

Los resultados obtenidos respecto a cumplir el requerimiento de 1.2 MPa a la tensión, así como la impermeabilidad del concreto y las juntas una vez lleno el embalse, han sido muy satisfactorios.

## Programa de trabajo, producciones y costos

El programa previsto de colocación de RCC consideraba un plazo de 14 meses en total, y el plazo real fue de 14,5 meses. El promedio de colocación mensual fue de 50 023 m<sup>3</sup> con un máximo de 101 534 m<sup>3</sup>, lo que significa una relación de 2,03 entre los valores máximo y promedio, valor usual a nivel mundial en este tipo de presas. Semanalmente el promedio de colocación fue 12 348 m<sup>3</sup> con un máximo de 27 490 m<sup>3</sup>, diariamente el promedio fue 1650 m<sup>3</sup> con un máximo de 5120 m<sup>3</sup>, y horariamente se obtuvo un promedio de 155 m<sup>3</sup> y un máximo de 320 m<sup>3</sup>.

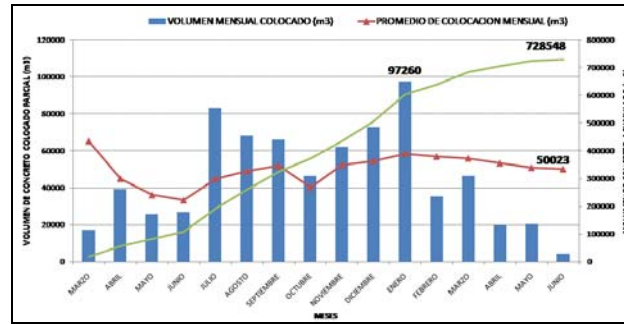


Figura 11- Colocación mensual real RCC

El costo directo ponderado total del CCR fue de \$80,2/ m<sup>3</sup> (tipo alta pasta), el costo del CCR-A y el del CCR-B fueron \$83,7/m<sup>3</sup> y \$78,6/m<sup>3</sup> respectivamente, versus valores planificados de \$93,5/m<sup>3</sup> para el CCR-A y \$75,1/m<sup>3</sup> para el CCR-B. El valor de producción en planta fue en promedio \$56,80/m<sup>3</sup> y el de transporte \$23,40/m<sup>3</sup>.

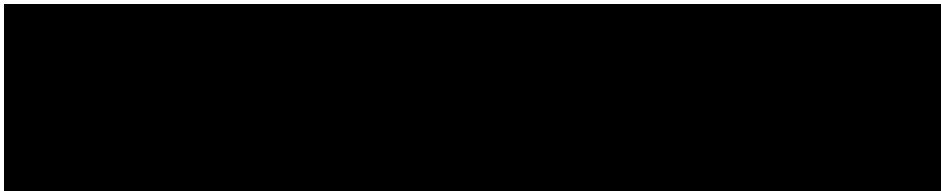


Figura 12- Costos directos del RCC

## CONCLUSIONES

El ICE, a través del diseño final de detalle y de la ejecución de la obra por administración directa, realizados ambos enteramente por profesionales y técnicos de la institución, marca un hito a nivel nacional e incursiona de manera exitosa en los grandes proyectos de presas, acercándose a los records mundiales en velocidad de ejecución.

Se cumplieron los estándares de calidad especificados. El elemento más crítico, cual es la calidad de las juntas entre capas, se satisfizo de manera excelente, cumpliéndose satisfactoriamente el requisito de la resistencia a la tensión a 1 año superior a 1.2 MPa. Así mismo, a la fecha de este artículo, el embalse lleva una elevación del 75% del total, y evidencia un comportamiento casi impermeable del concreto del cuerpo de la presa y de las juntas entre sus monolitos de concreto.

El plazo programado de 14 meses se cumplió, y los rendimientos y costos obtenidos están dentro de los estándares mundiales y de acuerdo a lo planificado.

Esta experiencia sirve a la institución y al país en general no sólo para conocer el estado del arte en estas tecnologías, sino para proyectarse a nivel nacional e internacional en la ejecución de obras de gran envergadura fortaleciendo el actual modelo de desarrollo y colaborando con Costa Rica hacia el objetivo de ser carbono neutral para el año 2021, mediante la explotación de energías renovables.