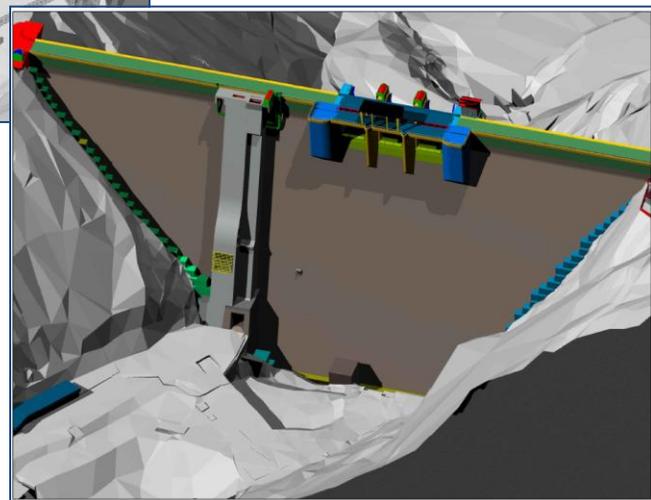
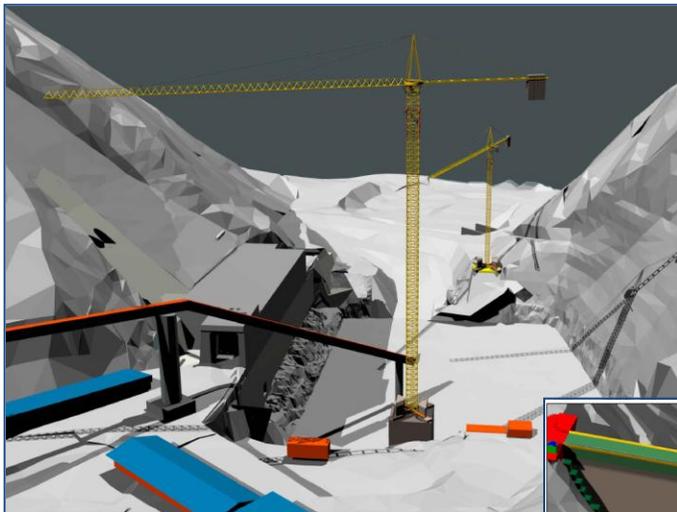


Análisis de los procesos de planeación y ejecución de la construcción de la presa en RCC del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís como experiencia para proyectos similares



Abstract

This document seeks to identify the processes leading to consider in the initial planning for the placement of the RCC in the construction of a dam, so as to ensure the coordination and control of production plants, transport of materials, installation of temporary works and implementation of major civil works that complement the construction of a dam RCC (roller compacted concrete).

To meet this objective, analyzed and made photographic records, programs work and shop drawings that support the explanation of the processes that have been established, based on experience (in advance) and during construction of the dam the "Pirrís Hydroelectric Project" (PH PIRRÍS) conducted by the Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

We identified the main processes and sub processes during the execution of an RCC dam, basic work schemes in the implementation of production processes, procedures and working models of the major works that make the dam, and finally the mitigation actions by consider a work of this kind, with the involvement of adverse weather events like floods.

It concludes with a series of recommendations to serve as reference for future projects that the Instituto Costarricense de Electricidad develop under construction and design features similar to those developed here.

(keywords: RCC, dam, hydroelectric, processes)

Resumen

En este documento se busca identificar los procesos previos por considerar en la planificación inicial, para la colocación del RCC en la construcción de una presa, de manera que se asegure la coordinación y el control de las plantas de producción, el transporte de materiales, la instalación de las obras provisionales y la ejecución de las principales obras civiles, que complementan la construcción de una presa de RCC (concreto compactado con rodillo).

Para cumplir con este objetivo, se analizan y elaboran registros fotográficos, programas de obra y planos de taller, que sustenten la explicación de los procesos que han sido establecidos, con base en la experiencia (en el antes) y durante la construcción de la presa del "Proyecto Hidroeléctrico Pirrís" (PH PIRRÍS), realizada por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

Se identificaron los principales procesos y sub procesos durante la ejecución de una presa de RCC, esquemas de trabajo básicos en la ejecución de los procesos de producción, procedimientos y modelos de trabajo de las principales obras que componen la presa; y por último las acciones de mitigación por considerar en una obra de este tipo, ante la afectación de eventos atmosféricos adversos, como inundaciones.

Se concluye con una serie de recomendaciones, que sirvan de referencia para futuros proyectos que el Instituto Costarricense de Electricidad desarrolle, bajo características de construcción y diseño similares a las que acá se desarrollaron.

(palabras clave: RCC, presa, hidroeléctrico, procesos)

Análisis de los procesos de planeación y ejecución de la construcción de la presa en RCC del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís como experiencia para proyectos similares

ING. ARTURO JOSÉ GAMBOA SOLÍS

Proyecto final de graduación para optar al grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Enero del 2011

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Prefacio.....	1
Resumen ejecutivo.....	2
Introducción.....	4
Marco teórico.....	6
Metodología.....	9
Resultados.....	10
Análisis de resultados.....	62
Conclusiones.....	77
Recomendaciones.....	78
Apéndices.....	80
Anexos.....	81
Referencias.....	82

Prefacio

El Proyecto Hidroeléctrico Pirrís representa para Costa Rica uno de los proyectos más importantes en cuanto al suministro de electricidad, para satisfacer la demanda del servicio que está solicitando el país, a corto y largo plazo, así como por ser la primera presa de gran magnitud en cuanto a altura y volumen de concreto, que el ICE construye con personal propio de la Institución, tanto en labores de diseño como en ejecución de obra.

La construcción exitosa de todas las obras que comprende una mega estructura de este tipo, significa conjuntar procesos de construcción óptimos y funcionales. Por ello la definición y evaluación de procesos previos a la construcción de la presa del PH PIRRÍS, implica un proceso complejo de análisis que involucra un sinfín de factores y problemas, los cuales con una guía básica de trabajo y fuentes bibliográficas aplicadas efectivamente, permiten a futuros proyectos, con características similares en su construcción, prevenir y avanzar satisfactoriamente en el programa de trabajo de construcción; a su vez al ganar tiempo en sus actividades previas permitirá, por su posición en el programa de trabajo, adelantar tareas que permitan mayores holguras en la entrega final de obra, dentro de la programación de una estructura tan compleja como lo es un proyecto hidroeléctrico como el Pirrís.

Este documento, entonces, resulta de suma importancia para registrar los procesos de trabajo que se aplicaron en la construcción de la presa del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís, cuyo análisis por medio de fotografías, esquemas y planos de taller, son experiencia clara para la adecuada planificación de futuras obras, pues los resultados acá mostrados pueden servir de punto de partida, para la visualización de procedimientos de construcción aplicables en obras futuras que el ICE construya, ya sea por administración, o por contrato.

Mi agradecimiento a los pilares de mi vida; la base de mis logros y de mi carrera. A Dios, principalmente por las bendiciones y la fortaleza que me ha dado para alcanzar mis metas. A mis padres Ana Rosa y José Arturo, ejemplo de esfuerzo, dedicación y honestidad a la hora de hacer mi trabajo; así como por su amor y apoyo incondicional. A Dannia y a Melissa (fuente de amor), por ser mis mejores amigas y mi inspiración en cada paso que doy. A mis amigos y compañeros de trabajo del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís, los cuales no menciono en detalle, porque ellos saben quienes son, sin cuyos consejos y sabias observaciones, no habría podido realizar este documento. Al equipo de trabajo de la Oficina Técnica de "Sitio Presa", parte importante en cada uno de los trazos y planos aquí presentados. A la empresa Astaldi S. p. A. Sucursal Costa Rica, por los dos años en que laboré allí, donde pude aprender y extraer muchas enseñanzas para este proyecto. Al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) base fundamental para mi desarrollo profesional y para la culminación de toda la información aquí presentada.

Finalmente, un especial agradecimiento a mi profesor lector Ing. Marco Tapia y a mi profesor tutor Ing. Juan Carlos Coghi, por sus valiosos consejos y aportes durante el proceso de redacción de este proyecto, y sin cuyo respaldo todo este trabajo no hubiera tenido un punto final.

Resumen ejecutivo

En este trabajo, se planteó la importancia de definir la ejecución de los procesos previos al arranque de la construcción de una presa, como base de trabajo para los ingenieros en construcción que participen, con el Instituto Costarricense de Electricidad, en los procesos de planificación de una presa, similar a la que se describe en este documento, a partir de los problemas y aciertos, ocurridos durante la construcción de la presa en RCC del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís.

El concreto compactado con rodillo (RCC) se refiere al concreto utilizado en un proceso constructivo que combina técnicas económicas y rápidas de colocación utilizadas para las presas de materiales sueltos. Las propiedades del RCC en estado endurecido son similares a las de los concretos convencionales. Su fabricación se realiza en una planta industrial y el transporte, colocación y compactación se realiza con equipos para movimiento de tierras.

Con el avance en el desarrollo de los diferentes procesos, que anteceden la construcción de una presa, se pudo establecer que el RCC marca los principales procesos de producción, control y coordinación, como lo son la explotación del tajo y la producción de los agregados y los concretos.

Al establecer los principales medios de transporte de materiales hasta el sitio de la presa, que para el caso fueron el transporte de concreto en banda y el acarreo de cemento en camiones, se logró determinar cómo un transporte debidamente coordinado con los procesos de producción (plantas de concretos y agregados) y ejecución de obras, perfila un panorama más claro durante la etapa de planificación de la colocación de RCC en la presa.

El control de consumo de los materiales se basó principalmente en la formaleta prefabricada de paramentos y el acero de refuerzo, que junto con los concretos (cemento y agregados), conforman los principales insumos dentro de los cálculos teóricos de cantidades de obra y en el seguimiento de ingreso y despacho

de esos materiales, para asegurar la continuidad de la construcción de la presa.

Aunado a lo anterior, el establecimiento e instalación de las obras provisionales, que complementan la ejecución de los procesos en la obra, determinaron las consideraciones básicas a la hora de establecer y proteger un proceso de construcción, en donde no sólo se asegure el buen apoyo a la ejecución de las estructuras civiles, sino que también considere su entorno, como un medio propenso a fallas producto de inundaciones, deslizamientos, u otros agentes externos.

Para finalizar con la definición de los procesos previos, la última parte, corresponde a la ejecución de las obras civiles, que incorpora las principales actividades complementarias para el arranque de la construcción. La ubicación de las grúas torre implica el establecimiento de las premisas para su colocación en la presa, y la determinación de los principales factores en su selección, pues de esto depende la optimización del número de grúas torre necesarias, durante la ejecución de todas las obras civiles que componen la presa.

El proceso de colocación de RCC se determinó a partir de los modelos desarrollados en planos de taller, en donde la ubicación de los equipos y maquinaria, así como la secuencia del proceso, permite establecer, previo al arranque, el buen desarrollo del colocado de RCC. Además, la presentación de alternativas al procedimiento de colocado de RCC en la presa, permite definir planes de apoyo, en caso de que el proceso de colocación con banda falle o entre en averías prolongadas.

Para terminar con la ejecución de obras civiles, se presentaron los modelos previos del arranque de obras, como la "Toma de Aguas", "Torre Compuertas", "Contra presa", "Vertedor de Excedencias" y "Descarga de Fondo". En donde cada una de ellas, en determinadas etapas de la presa, interactúan con el proceso de colocación de RCC, cuya definición anticipada permite coordinar la logística durante la ejecución.

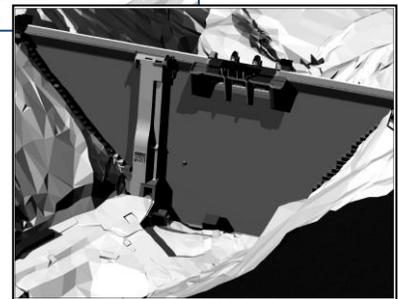
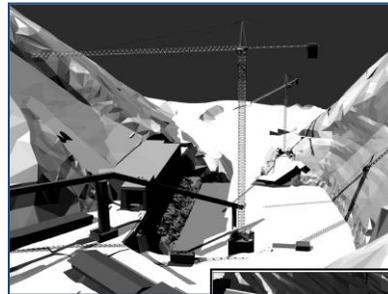
Para el análisis de los procesos mencionados, se recurrió a fotografías que documentaron el avance de las obras en la presa, así como a los planos de taller elaborados y diseñados para explicar gráficamente cada una de las ideas desarrolladas durante la redacción de este documento y cuyo registro además es parte fundamental para la aplicación de procedimientos similares en proyectos futuros.

Se realizó la comparación de los programas de trabajo en obra, para determinar los principales factores causantes de cambios durante la ejecución. Para ello se utilizó el programa original de la obra y se comparó con un programa actualizado, generado para la incorporación de tiempos y actividades, que se ajustaron más a las condiciones reales de avance en el programa de la presa, para analizar los principales cambios experimentados.

En un análisis de riesgos en el sitio de la construcción, se consideró las lluvias abundantes producto de la afectación indirecta de la tormenta tropical Alma, a las obras del PH PIRRÍS, para analizar como tales acontecimientos pueden ser prevenidos y mitigados, durante la ejecución tanto de las obras provisionales como civiles en la zona de la presa.

En este documento se dejan plasmadas tales acciones de afectación y mitigación, en forma de texto e imágenes para dar una idea más completa del tema.

El trabajo finalizó con la redacción de las conclusiones y recomendaciones, que sirven como aportes prácticos para la definición de los procesos previos de futuras obras por desarrollar en el Instituto Costarricense de Electricidad, de modo que la experiencia adquirida en la presa del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís, sea un importante insumo para la selección de los recursos que se implementarán.



Introducción

El problema y su importancia

La carencia de información integral en procesos tan variados de construcción, que implican muchos subprocesos de análisis, diagnóstico y construcción, crea atrasos en los trabajos en obra y problemas que afectan la calidad de las estructuras, debido a la ejecución de procesos que han sido vistos solo de forma empírica, por lo que no se cuenta con una guía para ordenar los procesos de trabajo.

En la construcción de una presa de un proyecto hidroeléctrico, las variables de trabajo son muy numerosas, por lo que documentar cada una de ellas servirá de base para futuras estructuras similares o con características afines no solo en el cuerpo presa, sino en estructuras comunes como “Toma de Aguas”, “Vertedor”, “Descarga de Fondo” y “Contra presa”, de manera que se cuente con antecedentes de trabajo, que permitan ordenar y solucionar con un alto grado de eficiencia, las actividades que una estructura de este tipo implica, de manera que se logren crear procesos y subprocesos de construcción que formen una línea fija de trabajo y estudio a la hora de iniciar una construcción tan importante como lo es una presa, dentro de la funcionalidad de un proyecto hidroeléctrico.

Debido a que el inicio de la presa del PH PIRRÍS por parte del ICE, se debió hacer con premura (ver foto 1), producto de los problemas con el rompimiento del contrato con Astaldi S. p. A. (contratista seleccionado originalmente para construir la presa), la planificación de la construcción de la presa se fue desarrollando paralelo a la ejecución de la obra, ya que la figura del ICE era de inspección, por lo que durante la construcción se tuvieron que ir solventando una gran cantidad de problemas.

El análisis de esas acciones previas al inicio de la presa, es lo que marca la principal línea

que se desarrolla y que se establece como una experiencia para futuras obras del ICE, que consiste en recopilar y analizar, para definir los procedimientos más adecuados para tales obras, máxime cuando el ICE ya tiene tres presas planeadas a futuro (Reventazón, El Diquís y Savegre, como proyectos cercanos).

Es la primera vez que el ICE se hace cargo de la construcción de una presa de esta magnitud, por lo que documentar y analizar la información técnica es de suma importancia para la buena ejecución de futuros proyectos, no sólo para los que construya el ICE, sino también para supervisar las presas que otorgue por contrato.

Es importante subrayar que en el marco teórico se mencionan aspectos generales de las presas de RCC y las principales definiciones que complementan el desarrollo de este trabajo.

Antecedentes prácticos del problema

El ICE cuenta con muy poca información que presente problemas típicos en obra y, guías de trabajo con esquemas básicos y planos de taller de construcción de presas de RCC en Costa Rica, donde se dimensione y registre las experiencias con personal y equipos propios de la institución.

Objetivos

Analizar los procesos previos al inicio de la construcción de la presa en RCC del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís, para que sirva de base para futuras obras desarrolladas por el ICE.

Para lograr este objetivo general, también se formulan los siguientes objetivos específicos:

- Identificar los procesos y subprocesos de trabajo en la construcción de una presa en RCC.
- Desarrollar un programa de trabajo general para la ejecución de las actividades y sub actividades.
- Elaborar planos de taller que sirvan de referencia en la aplicación de los procesos previos a la construcción de la presa.
- Identificar las prioridades y problemas asociados al procedimiento de construcción de la presa y sus estructuras principales.
- Documentar los problemas prácticos de construcción, con fotografías y esquemas, para referencia de futuros proyectos.
- Realizar una síntesis general de la afectación de la tormenta tropical Alma al Proyecto Hidroeléctrico Pirrís, en mayo del 2008.



Foto 1. Condición inicial previa a la construcción de la presa, por parte del ICE, abril 2009

Marco Teórico

Aspectos generales de presas en RCC

Definición de RCC

Es un combinado de agregados finos y gruesos con materiales cementantes, que mezclados con agua y aditivos (retardadores de fraguado y reductores de agua), produce una consistencia tal que permite ser manipulado y colocado con equipos propios de trabajos en movimientos de tierras (vagonetas, tractores, etc.) y la consolidación mediante compactación con rodillos vibratorios.

Historia del RCC

El uso del RCC en la construcción de presas inició con el uso del concreto compactado con rodillo en carreteras y su desarrollo ha ido evolucionando con la aplicación de nuevas tecnologías.

El RCC fue utilizado por primera vez en la construcción de presas en 1970-1971, en la ataguía de la presa de Shimen (China – Taiwán).

La primera presa de RCC de gran magnitud que se construyó fue Willow Creek (Estados Unidos) con una altura de 52 m, la cual fue terminada en 1982.

“Con mayor experiencia y un aumento de confianza en el material, el siguiente paso para el RCC fue la extensión de su uso a presas de arco de gravedad y con el tiempo a presas de bóveda. Esencialmente en todos los casos, excluyendo aquellos pocos en los que hay un número significativo de elementos insertados en la presa,

el RCC ha sustituido con eficacia el concreto tradicional para la construcción de presas”¹

Ventajas de la construcción de presas en RCC comparándolas con presas de concreto convencional:

- Mayor rapidez de construcción (2.5 m a 3 m verticales por semana).
- Utilización efectiva de maquinaria convencional (vagonetas, tractores, rodillos vibratorios, etc.).
- Menor dependencia de encofrados.

Ventajas de la construcción de presas en RCC comparándolas con presas de materiales sueltos:

- Incorporación del vertedor y la toma de aguas en el cuerpo de la presa, disminuyendo volúmenes de excavación y mejorando el comportamiento sísmico de esas estructuras.
- La presa puede verter por encima en caso de avenidas durante su construcción, sin sufrir daños.
- Desvíos más cortos del río (tanto en longitud como en tiempo), así como reducción de los requisitos de la ataguía (menor tamaño).

¹ CNE, Estado del arte de las presas de hormigón compactado con rodillo

Clasificación de las presas de RCC según su diseño de mezcla:

1. **Presas de RCC de baja pasta:** bajo contenido cementante (menor a 100 kg/m³) y adiciones puzolánicas entre 0 a 30%.
2. **Presas de RCC de media pasta:** contenido cementante medio (entre 100 – 149 kg/m³) y adiciones puzolánicas entre 31 a 60%.
3. **Presas de RCC de alta pasta:** alto contenido cementante (mayor a 150 kg/m³) y adiciones puzolánicas entre 61-80%.
4. **Presas de RCC (técnica japonesa):** contenido cementante entre 120 a 130 kg/m³ y contenido de puzolana de 30%.

En los últimos años ha sucedido un cambio en la tendencia de construir presas de RCC con contenido cementante bajo, en la década de los 80 comenzó esa transición hacia presas con contenido de cemento medio y alto, principalmente debido a las siguientes razones:

- Las presas han ido aumentando en tamaño.
- Las presas se están utilizando más en proyectos hidroeléctricos.
- Para reducir la sección transversal de la presa, lo que implica una economía en su construcción.

Definiciones

RCC A: es un RCC colocado en la zona aguas arriba (con un ancho mínimo de 15m de la cara aguas arriba); este concreto tuvo un contenido de cemento entre 200 kg/m³ y 220 kg/m³. Su resistencia a la tensión es de 12 kg/cm² a los 365 días.

RCC B: es un RCC colocado en la zona aguas abajo (continuo al RCC A); este concreto tuvo un contenido de cemento de 160 kg/m³. Su resistencia a la tensión es de 6 kg/cm² a los 365 días.

Tajo: sitio de explotación de la materia prima (extracción de roca) para la producción de agregados. El tajo se trabaja en terrazas a diferentes elevaciones, con diferentes procesos como voladuras, perforación, colocación de concreto lanzado, compactación, etc. En otros países es conocido también como cantera.

Escombrera: lugar destinado a la colocación del material desechado de la explotación del tajo. Por lo general es en un sitio retirado de la obra principal. Allí es ubicado el material que no cumple con las características necesarias para la producción de agregados; en la escombrera el material es colocado, distribuido y compactado en terrazas, para su consolidación.

Ruta de acarreo: es la ruta principal designada por un proyecto hidroeléctrico, para el trasiego de materiales a los diferentes frentes de obra, y cuyo objetivo es el paso de la maquinaria pesada encargada del trasiego de equipos, cemento, madera, acero de refuerzo, instalaciones provisionales y otros.

Chute: es una canoa metálica de sección semicircular, utilizada para la colocación de concreto por gravedad. Esta estructura se compone de una tolva receptora del material (RCC), seguido de un sistema que regula el flujo de descarga (compuerta manual o automática), luego continúa la canoa mencionada anteriormente y finaliza con un elemento de descarga (trompa de elefante), el cual posee una rotación para la distribución del material. Toda la estructura es fijada con apoyos rígidos unidos al paramento donde es colocado.

Crawler: es un equipo fabricado por la empresa ROTEC (EEUU); este equipo es instalado al final de la banda transportadora para la distribución de concreto; es un modelo CAT 235D, con un brazo telescópico como se muestra en la figura 1. La descarga del concreto la puede realizar directamente sobre la superficie, o sobre vagonetas para distribuir en zonas donde el quipo no llegue directamente.

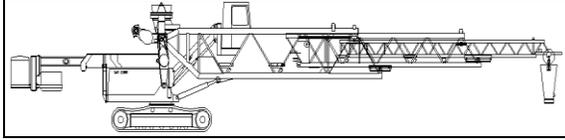


Figura 1. Detalle del *Crawler Placer* de la compañía ROTEC, utilizado en la presa del PH PIRRÍS para la distribución de RCC

Swinger: es una estructura metálica giratoria ubicada al final del sistema de banda transportadora (ver figura 2), para distribuir RCC sobre las vagonetas en la presa.

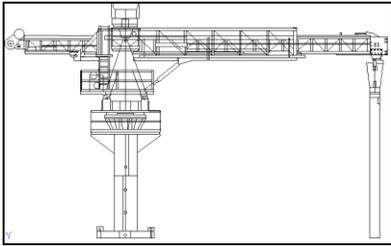


Figura 2. Detalle del *Swinger* ROTEC, para la distribución de RCC

Arena Seca: su principal uso es en la producción de RCC, ya que aporta gran cantidad de finos para poder satisfacer las necesidades de un RCC de alta pasta; además se utiliza en combinación con arena húmeda para la fabricación de concreto convencional para las demás obras de la presa. Este agregado conlleva un mayor proceso de trituración, debido a su granulometría cargada de finos, los cuales se pueden obtener sólo con equipos de trituración muy específicos.

Arena Húmeda: es el agregado que aporta los finos a la producción de los concretos convencionales. Solamente se hace un lavado en las cribas húmedas y por medio de un tornillo sin fin, instalado en lavadoras, se separa de la grava de mayor tamaño y así sale a una banda para ser transportado a los acopios.

Grava 5-25: este agregado es llamado así en las obras presa del PH PIRRÍS por tener gravas en el rango entre 5 y 25 mm; estas tienen formas angulosas y su comportamiento en la mezcla es ganar resistencia a los esfuerzos.

Grava 25-50: este agregado es llamado así en las obras presa del PH PIRRÍS por tener gravas en el rango entre 25 y 50 mm; estas tienen formas angulosas y su comportamiento en la mezcla es ganar resistencia a los esfuerzos.

Grava 5-12: este agregado es llamado así en las obras presa del PH PIRRÍS por tener gravas en el rango entre 5 y 12 mm; su principal uso fue para la producción de mezcla de los concretos lanzados para estabilización de excavaciones.

Híper bloque: método de construcción de presas en RCC, donde se parte el cuerpo de la presa en dos grandes bloques (cuyo máximo desnivel entre ambos es de 20m), de manera que se construye un lado y después el otro, colocando formaleta en una de las juntas de contracción ya definidas por diseño.

Pre llenado: es la situación que sucede, cuando producto del rebalse del río sobre la ataguía (producto de una avenida), o ante el cierre del túnel de desvío del río (etapa previa al inicio del embalse), el agua comienza a fluir a través de la descarga de fondo, y al sobrepasar la capacidad de la estructura, se crea un pequeño embalse contra la presa, que en ese momento, se encuentra a una altura superior a la entrada de la descarga de fondo.

Relleno de prueba: construcción de pequeños bloques en RCC, para ensayar las características de la mezcla, método de colocación (equipo, formaleta y maquinaria) y tratamiento de juntas por implementar en la presa. El relleno de prueba, permite además ensayar la inducción de juntas de contracción y la colocación de los tapajuntas.

Perfil tipo creager: *“en los vertederos de pared gruesa, es aquel cuyo perfil coincide con la forma del perfil inferior de la lámina vertiente, perfectamente ventilada, sobre un vertedero hipotético de pared delgada. A este tipo se le conoce también con el nombre de cimacio y fue W.P. Creager el primero en idearlo.”*²

² http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/medidores/ver_pareddelq/vertpareddelq.html

Metodología

Este documento se realizó en las obras de “Sitio Presa” del PH PIRRÍS, durante el segundo semestre del 2010. La construcción de la presa, en el momento de la elaboración de este trabajo, presentaba más de un 70% de avance en el programa de obra.

La recopilación de los datos fue el primer paso para redactar este documento; las etapas para la redacción de los datos recolectados, se detallan a continuación:

- Se analizó información bibliográfica existente, acerca de la construcción de estructuras similares a la presa del PH PIRRÍS, construido en otros países.
- Se analizó y recopiló la información generada en el Proyecto Hidroeléctrico Pirrís, tanto la suministrada por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), como la del subcontratista en ese momento de las obras del “Sitio Presa”, la empresa italiana Astaldi S. p. A.
- Se analizó y recopiló la información generada (informes, planes, procedimientos, etc.) de los procesos ejecutados durante la construcción de la presa.

Se procedió a la clasificación de los procesos previos al inicio de la construcción de la presa del PH PIRRÍS, con base en lo observado antes y durante la ejecución de las obras, así como por los problemas enfrentados en cada etapa de la construcción.

Se obtuvo y organizó toda la información fotográfica y esquemática generada en el Proyecto Hidroeléctrico Pirrís, durante la ejecución de trabajos previos al inicio de la construcción de la presa y luego durante su ejecución desde el 23 de marzo del 2009 (fecha de inicio de la colocación del RCC en la presa).

Se elaboraron los planos de taller, a partir de la información recopilada y procesada, antes y después del inicio de la construcción de la presa, y con base en la experiencia de los ingenieros y técnicos de obra, encargados de los diferentes

procesos que la integran. Los planos fueron dibujados, con el programa Autocad 2010.

Se identificaron los procesos y subprocesos básicos de la construcción de una presa en RCC, mediante el desglose de los programas desarrollados durante la ejecución de las principales actividades en la presa, así como de acuerdo con los procesos que representaron mayores tiempos de ejecución. Los organigramas y estructuras de trabajo se realizaron con el programa WBS Chart Pro 4.5.

El siguiente paso fue la elaboración de un programa actualizado de los trabajos de construcción de la presa, para realizar una comparación con el programa original (elaborado en el 2008), para analizar los factores que incidieron en los cambios de plazos y secuencia de actividades. El programa de obra actualizado, se realizó utilizando Microsoft Project 2007.

Como penúltimo paso, se recopiló y analizó la información generada durante la tormenta tropical Alma, en mayo del 2008, que afectó las obras de la presa del PH PIRRÍS, así como los planes de evacuación desarrollados posteriormente a la afectación de esa tormenta.

Para finalizar con el trabajo se analizó, en conjunto, la información evaluada, y se clasificaron los resultados en cuatro grandes temas:

- I. Descripción del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís.
- II. Procesos previos al inicio de la construcción de la presa del PH PIRRÍS.
- III. Programa general de trabajo original versus programa actualizado.
- IV. Gestión de riesgos del sitio de construcción de la presa, ante un fenómeno atmosférico.

Resultados

Descripción del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís (PH PIRRÍS)

Localización: el PH PIRRÍS se encuentra localizado en la vertiente del Pacífico Central de Costa Rica (ver figura 3), aproximadamente a unos 30 km al sur, de la ciudad capital de San José.

El Sitio Presa está ubicado en San Carlos de Tarrazú. Este proyecto aprovechará las aguas del río Pirrís, a una elevación de 1100 msnm, en un punto localizado aproximadamente 30 km aguas arriba de la confluencia con el río Candelaria.

Características generales:

- Área de la cuenca = 250 km²
- Caudal medio del río Pirrís = 9.84 m³/s
- Volumen promedio anual del embalse= 310 x 10⁶ m³.
- Volumen total de embalse = 36.4 x 10⁶ m³. (Ver figura 4)
- El volumen útil de aprovechamiento de embalse = 30 x 10⁶ m³.



Figura 3. Ubicación del PH PIRRÍS (departamento de diseño, ICE)

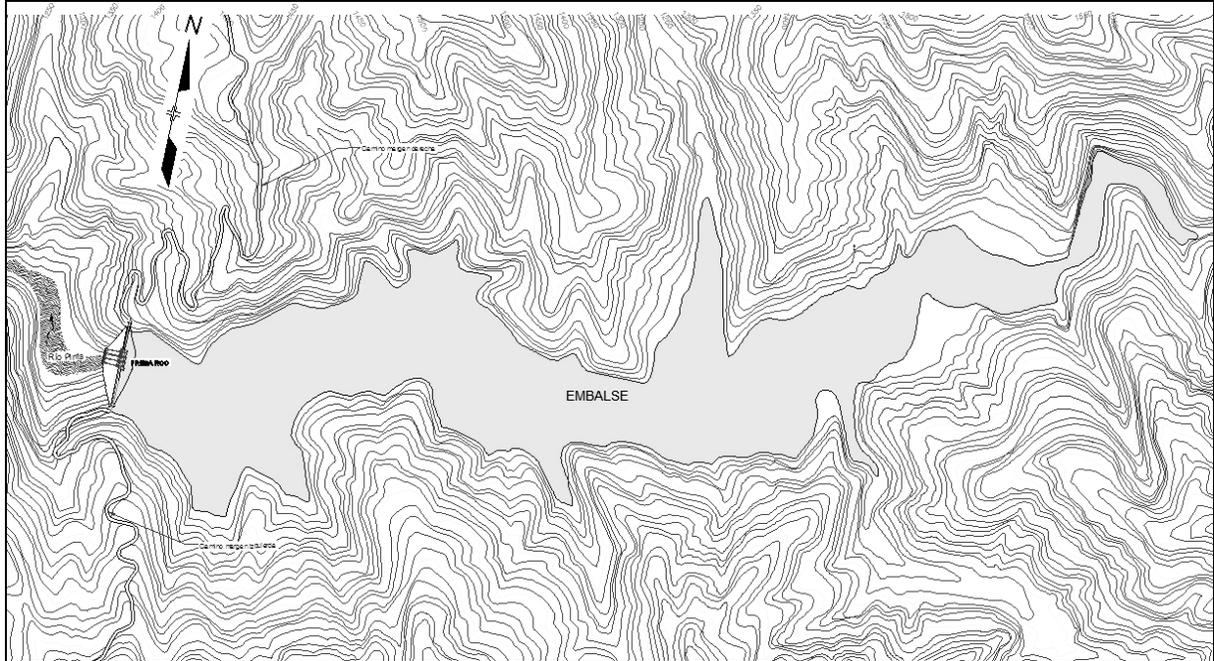


Figura 4. Zona de embalse del PH PIRRIS (departamento de diseño, ICE)

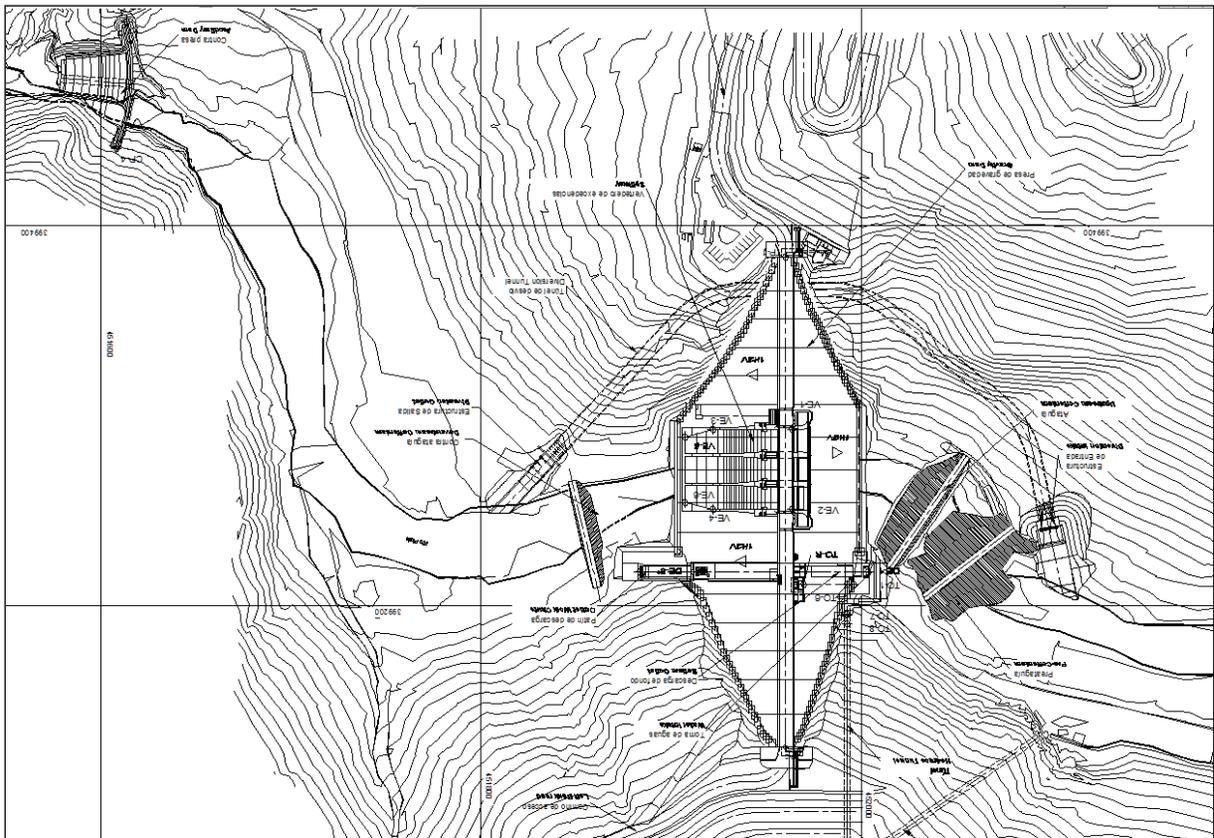


Figura 5. Planta general de obras, presa del PH PIRRIS (departamento de diseño, ICE)

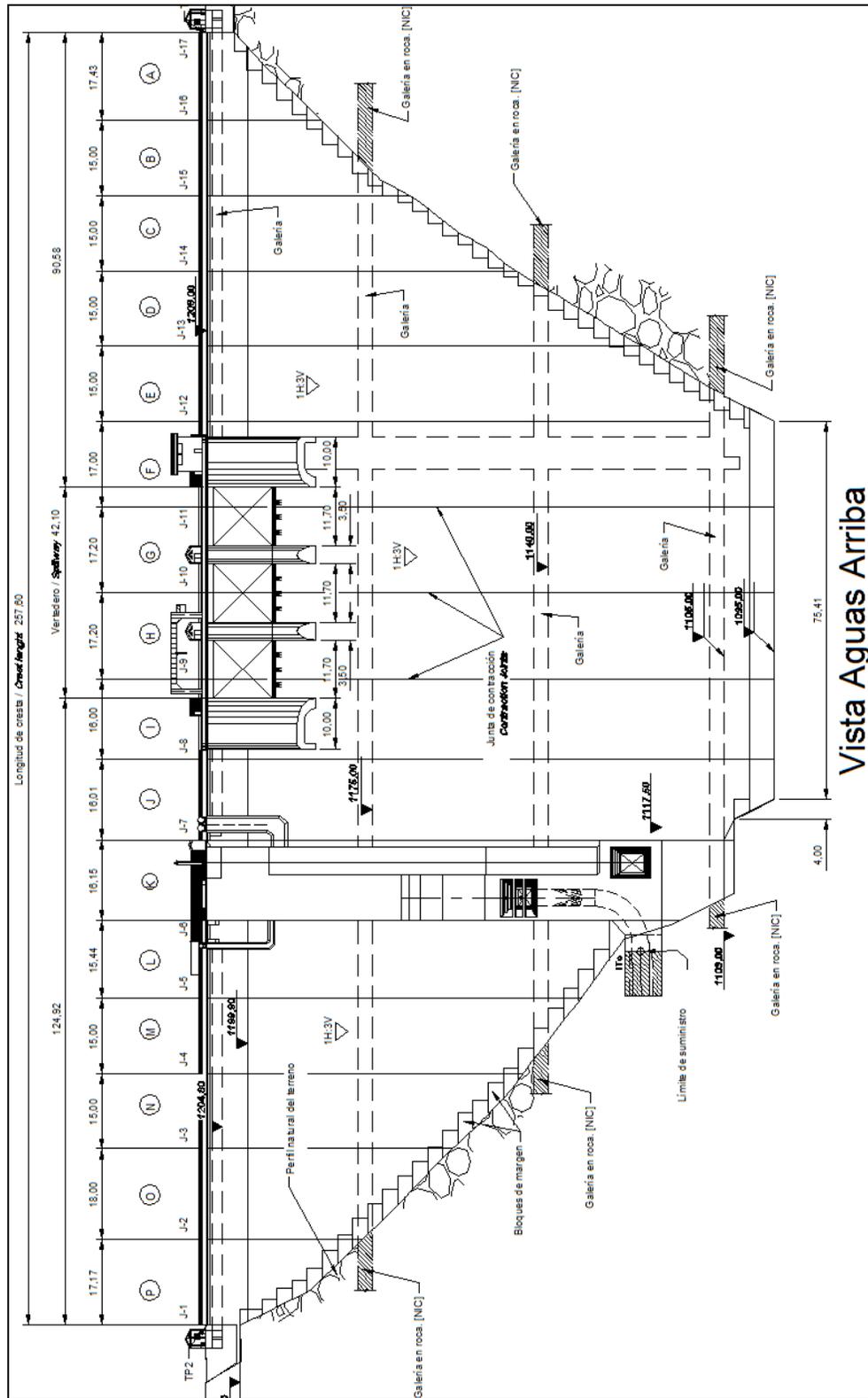
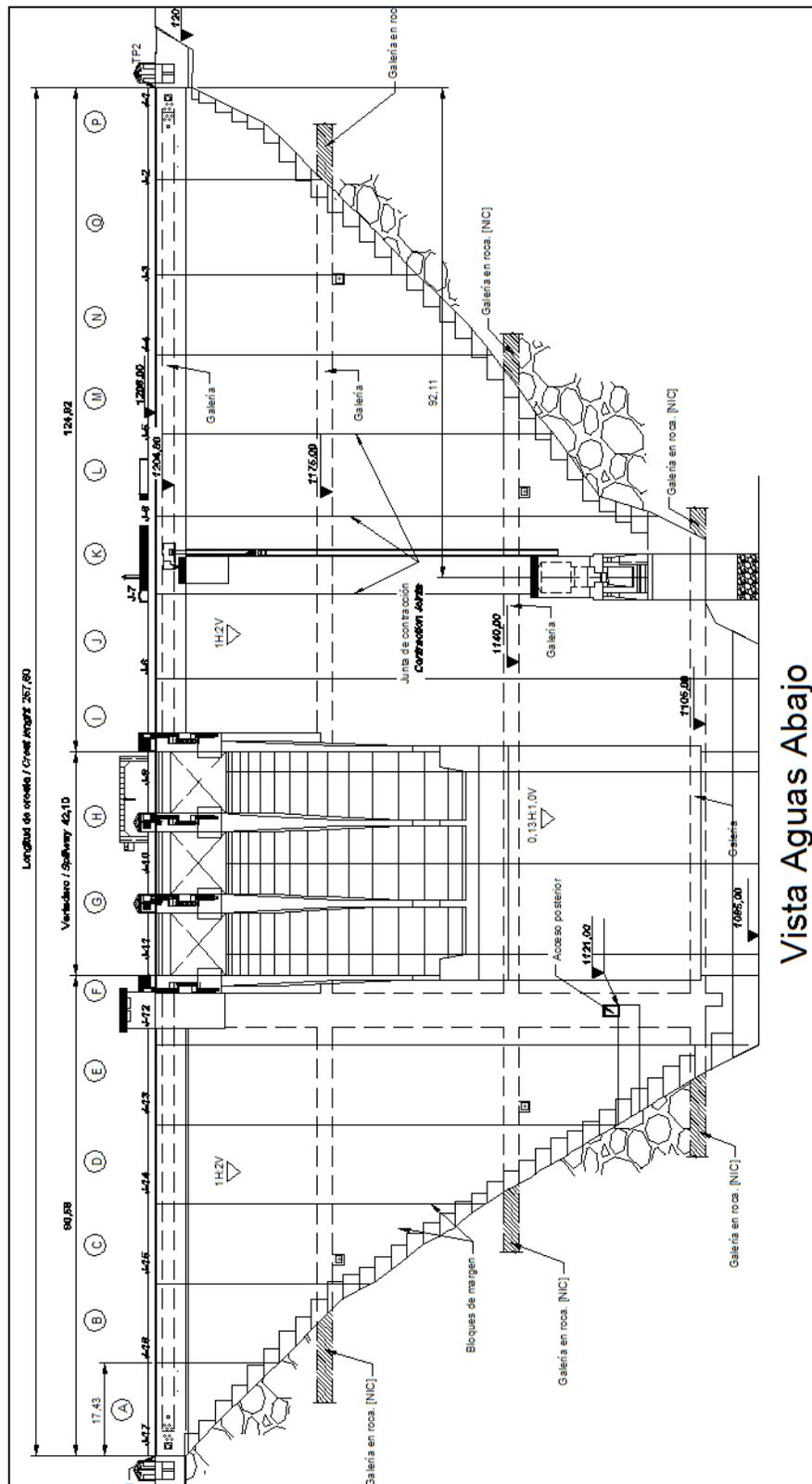


Figura 6. Descripción geométrica, vista aguas arriba de la presa (departamento de diseño, ICE)



Vista Aguas Abajo

Figura 7. Descripción geométrica, vista aguas abajo de la presa (departamento de diseño, ICE)

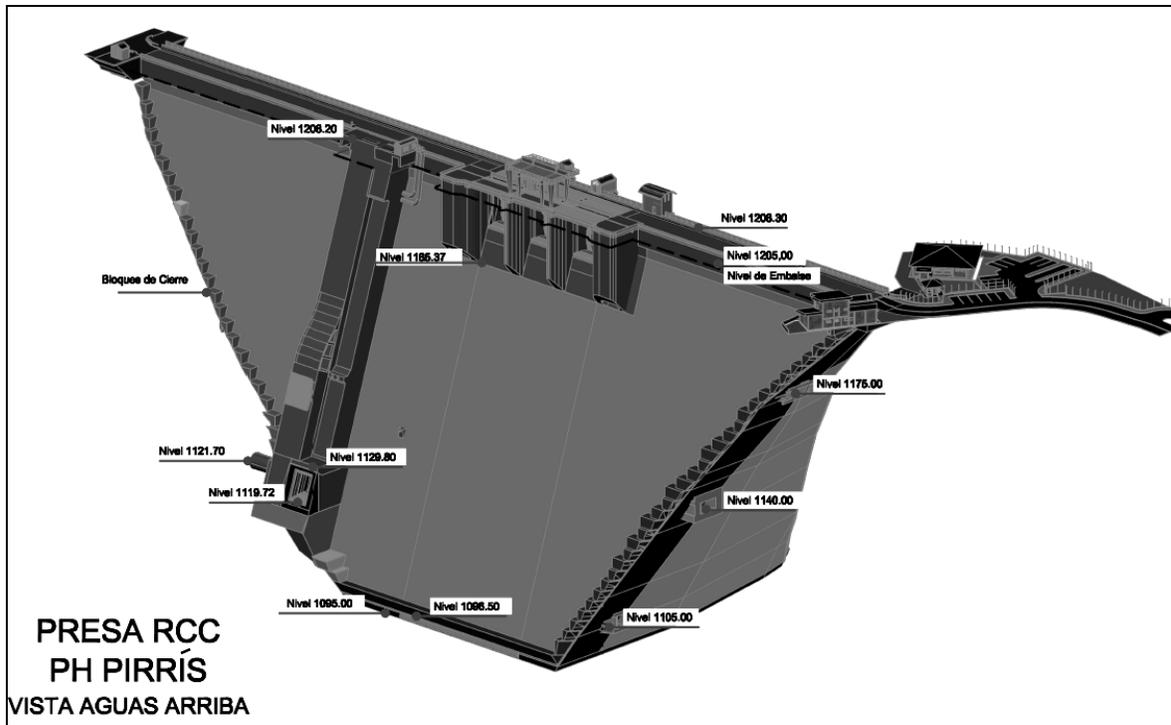


Figura 8. Modelo 3D de la presa del PH PIRRÍS, vista aguas arriba

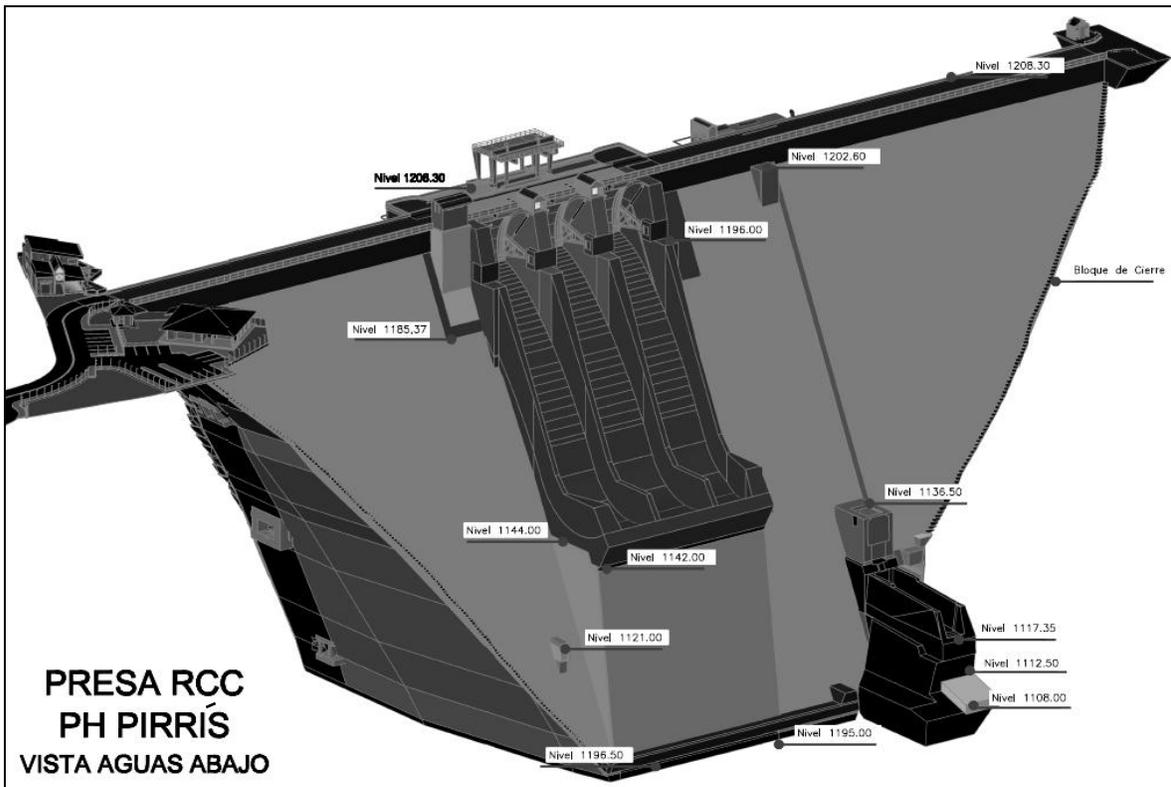


Figura 9. Modelo 3D de la presa del PH PIRRÍS, vista aguas abajo

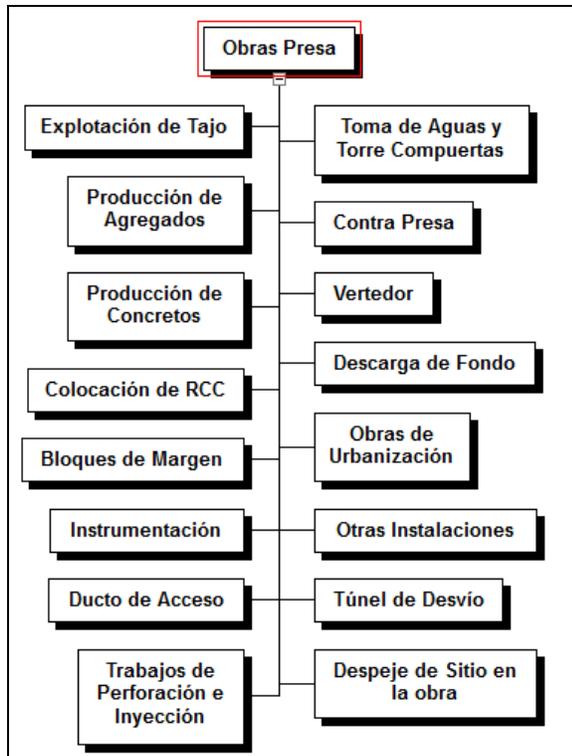


Figura 10. Estructura de trabajo general, obras de la presa del PH PIRRÍS

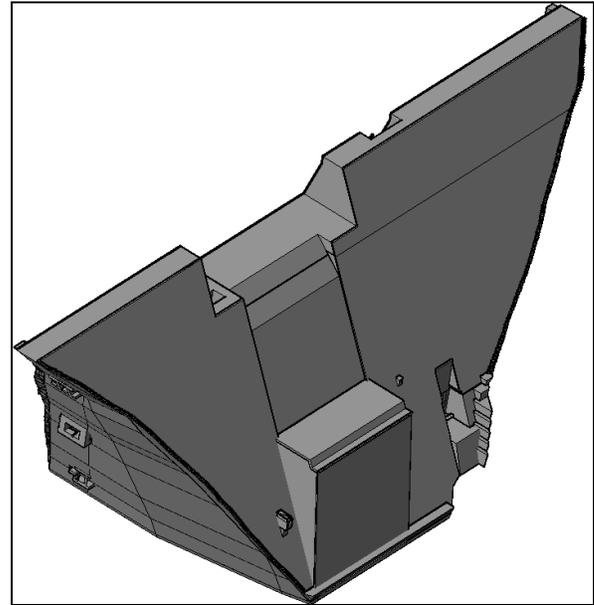


Figura 11. Modelo 3D, cuerpo de la presa en RCC

Presa de RCC

El cuerpo de la presa, es de “Concreto Compactado con Rodillo” (RCC), con las siguientes características:

- Altura = 113 m.
- Longitud de cresta = 266 m.
- Volumen de RCC = 730,000 m³.
- Nivel de fundación = 1095 msnm.
- Nivel máximo de operación normal = 1205 msnm.
- Oscilación de embalse = 45 m
- Nivel mínimo de operación = 1160 msnm.
- Paramento aguas arriba 1H: 3V.
- Paramento aguas abajo 1H: 2V.
- Ancho de cresta = 8.40 m.

Vertedor de Excedencias

El vertedor es una estructura apoyada sobre la presa, tiene un perfil tipo Creager (ver marco teórico, definiciones).

- Elevación de cresta = 1195 msnm.
- Tiene 3 compuertas radiales, tres bahías de 11.7 m de ancho, con capacidad de 2350 m³/s (correspondiente a una creciente de 5 000 años de periodo de retorno).
- Tiene una ataguía para mantenimiento, y una grúa pórtico para esta ataguía, con una capacidad de izar de 30 toneladas.
- Ancho total del vertedor = 42.10 m.
- El patín de esquí tiene un radio de 15 m y un ángulo de salida de 35°.

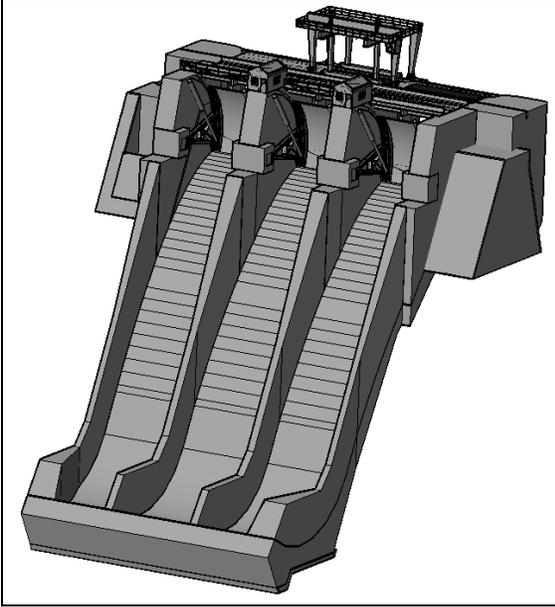


Figura 12. Modelo 3D, vertedor de excedencias

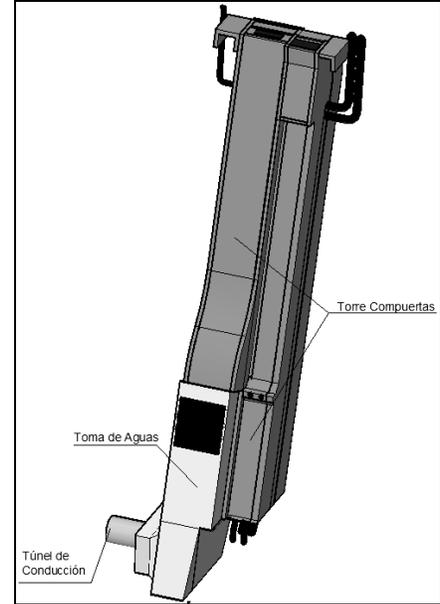


Figura 13. Modelo 3D, estructura de toma de aguas y torre compuertas

Toma de Aguas y Torre Compuertas

La toma de aguas y torre compuertas es una estructura adosada al paramento aguas arriba de la presa de RCC.

- La toma está diseñada para derivar un caudal = 18 m³/s.
- La elevación de la entrada de la toma = 1150.3 msnm.
- La entrada de la toma tiene una sección cuadrada = 7.5 m de lado.
- La velocidad a la entrada = 0.65 m/s.
- La entrada de la toma tiene un abocinamiento (embocadura blindada) para la eficiencia hidráulica, que permite una suave aceleración del flujo hacia la sección de 3.25x 3.25 m de la compuerta, donde la velocidad aumenta a 1.7 m/s.
- El conducto de la toma tiene un giro de 90 grados hacia abajo, y sufre una transición a una sección circular de 3.25 m de diámetro.
- La última etapa de esta estructura se encuentra en la elevación 1121.8 msnm, donde se da otro giro de 90 grados, hacia el talud de margen izquierda del embalse, donde se encontrará con el portal del túnel de conducción.

Descarga de Fondo

Esta estructura se ubica en el cuerpo de la presa, próxima a la margen izquierda. Dividida en tres tramos:

- Entrada con una compuerta vagón y un mecanismo de limpieza.
- Conducto a presión.
- Salida equipada con una compuerta radial, una rápida y un patín de esquí (canal de salida de 34 m).

La entrada está en la elevación 1121.15 msnm, sección rectangular y un abocinamiento en los cuatro costados. El conducto de la descarga de fondo será blindado en toda su longitud de 134 m.

Sección rectangular = 3.7 m de ancho por 4.8 m de alto, y una pendiente de 3% en toda su longitud.

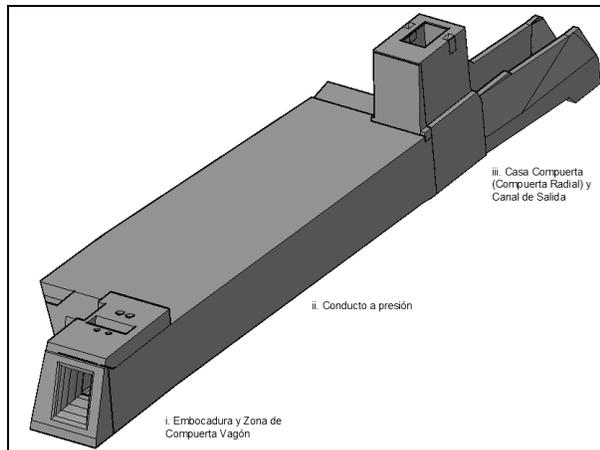


Figura 14. Modelo 3D, descarga de fondo

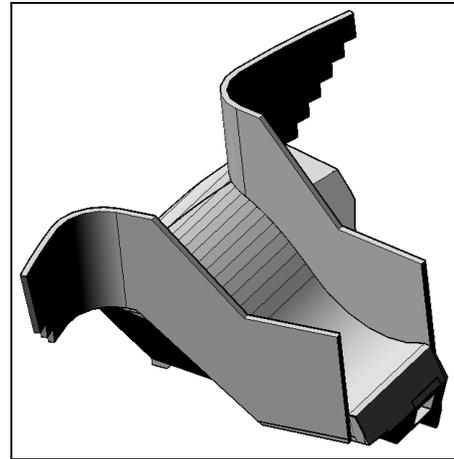


Figura 15. Modelo 3D, contra presa

Contra Presa

La contra presa es una presa auxiliar en concreto convencional, para el control de la erosión aguas abajo de la presa de RCC. Esta estructura crea un espejo de agua que se extiende hasta la zona de impacto, reduciendo el efecto de socavación:

- Altura de 27 m.
- Formará un embalse de unos 13 m de profundidad (para la avenida de 5 000 años de período de retorno).
- La longitud de cresta = 52 m.
- Tiene un patín de esquí como control de erosión.
- Tiene una descarga de fondo permanente sin control, para permitir el flujo de sedimentos y la inspección del lecho del río cuando no esté en operación.

Túnel de Desvío

Para restituir el agua al río Pirrís se usará un túnel de desvío:

- Caudal de diseño = 505 m³/s, que corresponde a un período de retorno de 5 años.
- Longitud túnel = 378 m.
- Sección transversal = herradura de 7 m de ancho 7.37 m de alto.
- El túnel de desvío tiene una estructura de entrada con compuerta vagón, y al final con un canal de salida.
- Dentro del túnel de desvío lleva un tapón de cierre (en concreto masivo) de 110 m de longitud.

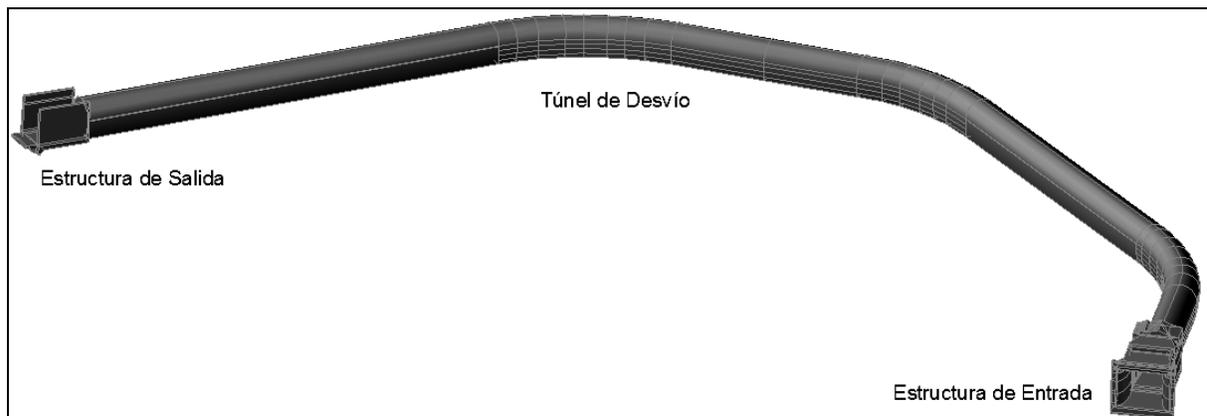


Figura 16. Modelo 3D, túnel de desvío

Ataguía

Es una estructura construida en RCC:

- Altura = 16.50 m de altura.
- Elevación de cresta = 1118.6 msnm.
- Talud aguas arriba = 1V:0.1H.
- Talud hacia aguas abajo = 1V:0.8H.
- Longitud de cresta = 68 m.

Contra Ataguía

Aguas abajo se ubica una presa de contra ataguía, cuya función es la de garantizar la superficie seca en la zona de la fundación de la presa principal:

- Altura = 7 m.
- Tiene taludes similares a la presa de ataguía, con el talud de menor pendiente con cara hacia la presa principal.
- La longitud de cresta = 40 m.
- Construida en material granular con una matriz arcillosa, y concreto ciclópeo en la cara aguas abajo.

Túnel de Conducción

- Longitud de túnel = 10.5 km.
- Tramo final en tubería forzada = 830 m.
- Diámetro interno del túnel oscila entre 3.2 m y 2.3 m.
- Los diámetros de la tubería de presión varían entre 2.2 m y 2.0 m.
- Al final de la tubería forzada un bifurcador, con ramas de 1.4 m de diámetro interno que llevan el agua a cada una de las dos turbinas.

Casa de Máquinas

Localización: se ubica en la margen izquierda del río Pírris, en una terraza de la ribera, a una elevación 325 msnm, en el cantón de Parrita.

Turbinas de generación: dos turbinas Pelton con eje vertical y seis chorros, y el correspondiente generador sincrónico trifásico de corriente alterna, para una capacidad total de 134 MW. Las turbinas estarán ubicadas a la elevación 304.5 msnm, para conseguir una carga bruta promedio de 874 m. La energía media anual producida por el PH PIRRÍS se estima en 615 GW-h

Subestación

Para transportar la energía del PH PIRRÍS se construyó una subestación con un área de 1 Ha y una línea de transmisión de 230 kV de voltaje, y con una longitud 44 km.

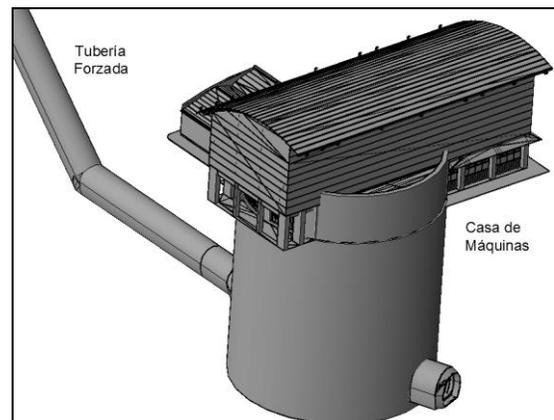


Figura 17. Modelo 3D, casa de máquinas

Procesos previos al inicio de la construcción de la presa del PH PIRRÍS

Para la ejecución de las obras en la presa, se realizaron los siguientes procesos previos de planificación detallada, para controlar la ejecución del proceso constructivo de la presa:

1. Procesos de producción.
 - 1.1. Explotación de tajo.
 - 1.2. Producción de agregados.
 - 1.3. Producción de concreto RCC.
2. Transporte y control de materiales.
 - 2.1. Acarreo de cemento.
 - 2.2. Banda transportadora de concreto.
 - 2.3. Control de consumo de materiales.
3. Instalaciones provisionales para obras civiles.
4. Ejecución de obras civiles.

- 4.1. Ubicación de grúas torre.
- 4.2. Colocación de RCC.
- 4.3. Toma de aguas y torre compuertas.
- 4.4. Contra presa.
- 4.5. Vertedero.
- 4.6. Descarga de fondo.

1. Procesos de producción

En las obras de la presa del PH PIRRÍS, los procesos de producción se establecieron de acuerdo con la ejecución, antes y durante la construcción de la presa.

Los resultados de cada proceso industrial se presentan de acuerdo con la planta general de trabajo, desarrollada en las obras de la presa, la cual se muestra en la figura 18.

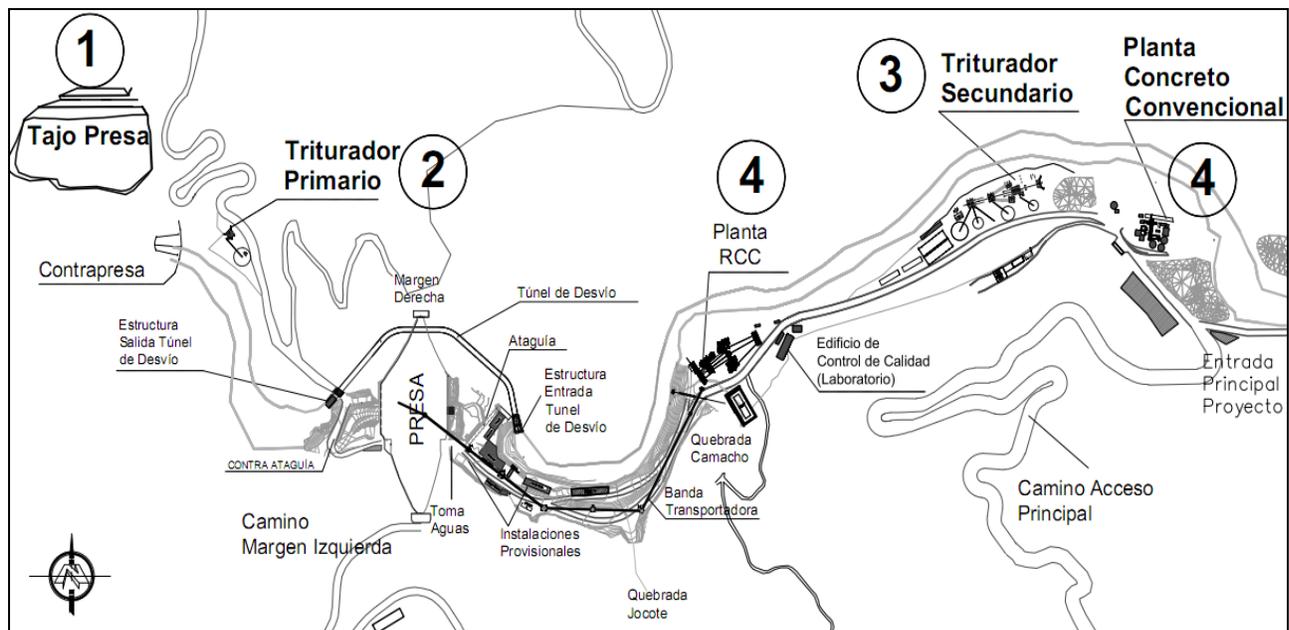


Figura 18. Planta general de "Sitio Presa", secuencia de producción: (1) Explotación de tajo – (2 y 3) Producción de agregados – (4) Producción de concretos – (5) Escombrera (no aparece en la figura)

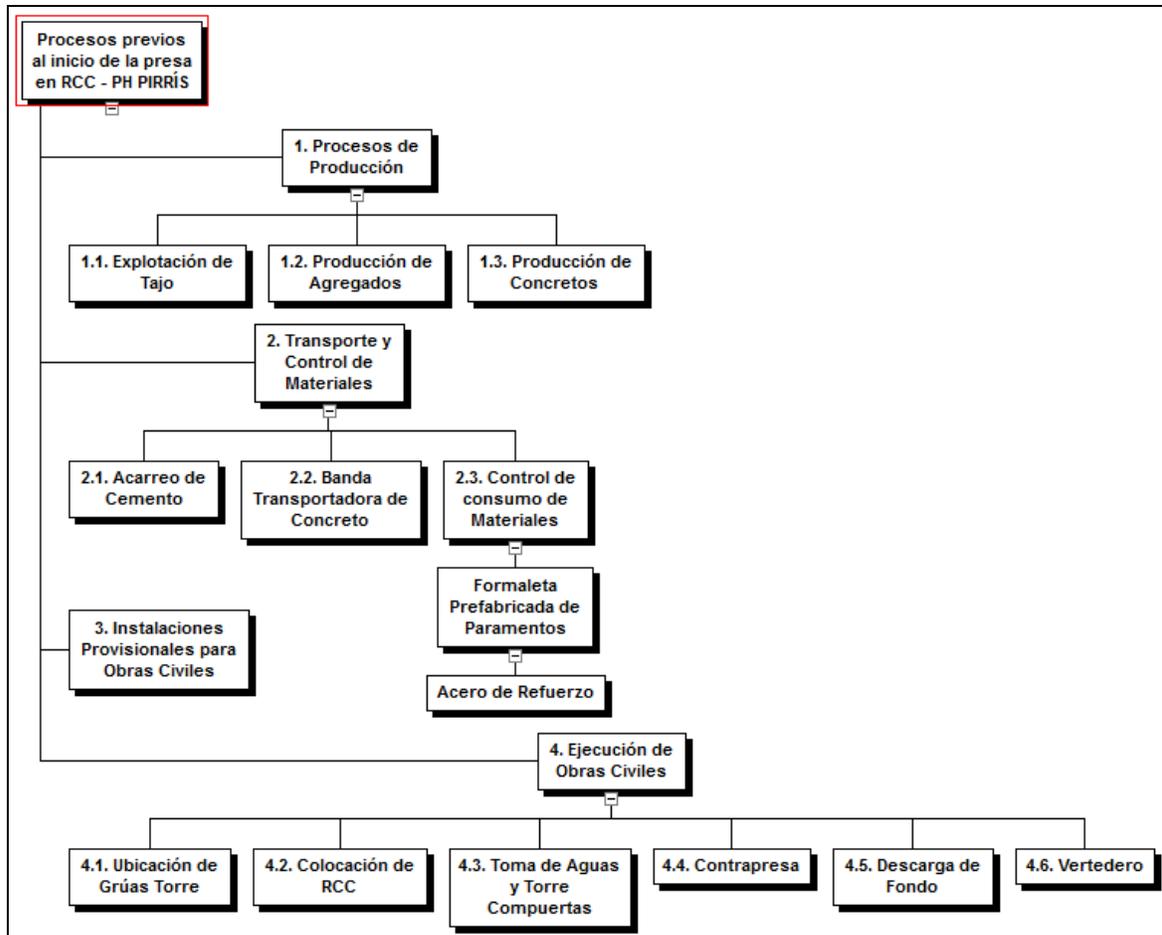


Figura 19. Esquema con los procesos previos, al inicio de la construcción de la presa del PH PIRRÍS

1.1. Explotación del tajo

Se obtuvo un esquema básico de trabajo por instalar, para el adecuado desarrollo de este proceso, de acuerdo con las siguientes premisas:

- Definir el tipo de material a explotar.
- Definir la proyección de volumen por explotar, y la capacidad del tajo (ver figuras 21, 22 y 23).
- Analizar las principales estructuras de la presa, para clasificar los concretos según su resistencia y método de colocación (ver cuadro 1).
- Con base en las premisas anteriores, establecer los rendimientos de producción de

las plantas con que se cuenta (triturador primario, secundario, etc.).

- Definir una línea actualizada de requerimientos de material por estructura, la cual sea canalizada a través del ingeniero encargado del tajo.
- Definir el diseño de la explotación del tajo (ver figura 23 y foto 10), selección de equipos y métodos de voladura.
- Definir los ciclos de trabajo y puntos de control del proceso.
- Establecer un organigrama de trabajo, por cada actividad principal del proceso y su estructura de desglose de trabajo.

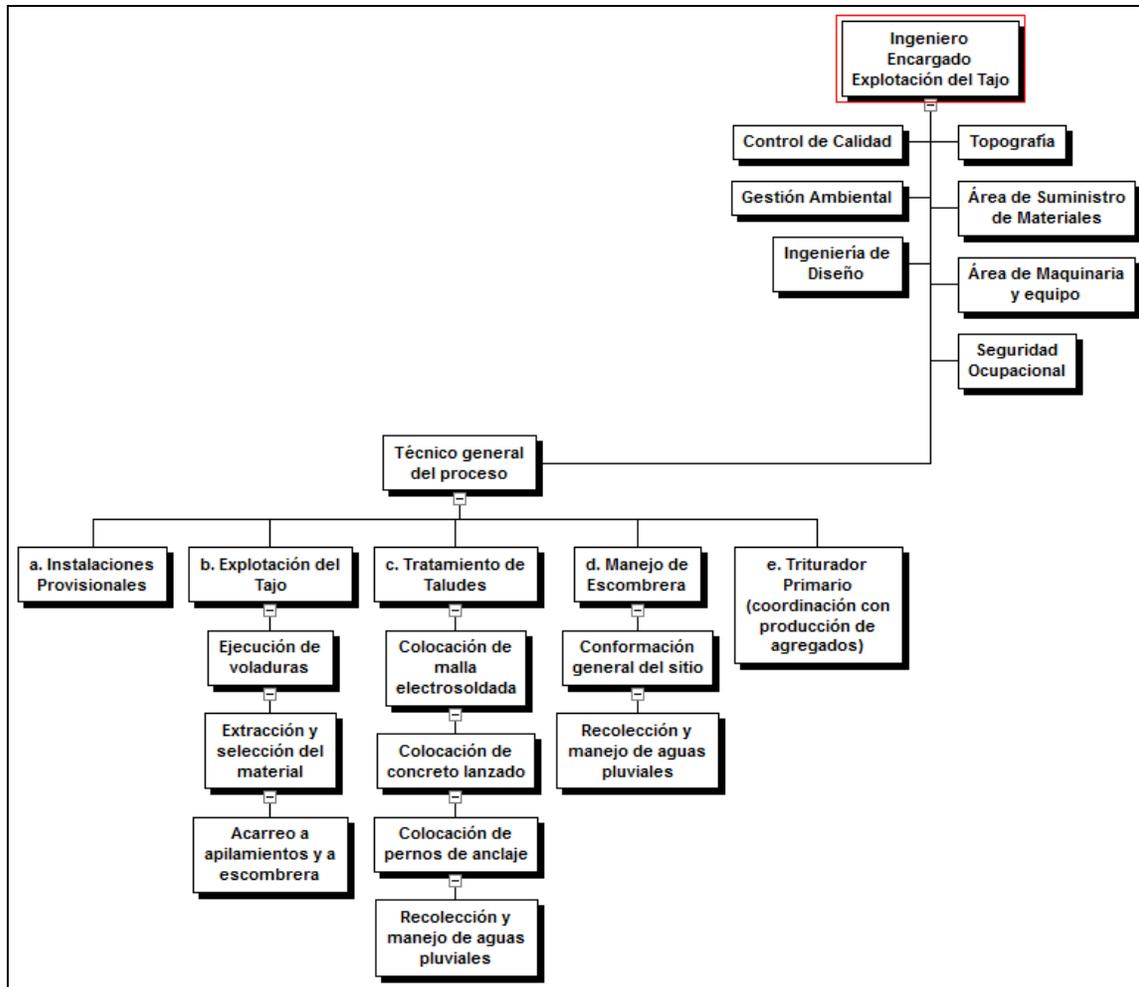


Figura 20. Organigrama general y EDT (estructura de desglose de trabajo) para el proceso de explotación del tajo

DESCRIPCIÓN	Tipo de Concretos (m3)							Agregados (m3)				
	RCC A	RCC B	RN180	RN 210	RN280	RN310	RN350	25-50	5-25	Arena Seca	Arena Lavada	5-12
Colocación de RCC	550,000.00	190,000.00						278,299.32	398,418.75	345,885.54		
Descarga de fondo			200.00	6,000.00					3,858.00	1,040.80	2,636.00	
Toma y torre compuertas				15,000.00					9,330.00	2,490.00	6,405.00	
Vertedor de excedencias y puente				17,500.00	850.00	15,500.00	1,200.00	4,913.50	21,016.75		21,407.75	
Galerías de drenaje de la presa				2,000.00					1,220.00		1,194.00	
Ascensor de la presa				2,000.00					1,220.00		1,194.00	
Galerías de servicio				10,000.00					6,220.00	1,660.00	4,270.00	
Tunel de desvío (tapón de cierre)				4,000.00					2,488.00	664.00	1,708.00	
Contra presa			7,500.00	2,000.00			2,500.00	2,542.50	5,777.50		7,080.00	
Obras de urbanización				1,800.00					1,098.00		1,074.60	
Losa al pie del vertedor				2,000.00					1,120.00		1,340.00	
Obras provisionales (cunetas, muros, losas, cimientos)				2,000.00					1,244.00	332.00	854.00	
Estabilización de taludes (concretos lanzados)				4,000.00						2,800.00		3,000.00
TOTAL POR CONSUMIR (m3)	550,000.00	190,000.00	7,700.00	68,300.00	850.00	15,500.00	3,700.00	285,755.32	453,011.00	354,872.34	49,163.35	3,000.00
TOTAL DE LOS CONCRETOS = 836,050.00m3							TOTAL DE LOS AGREGADOS = 1,145,802.00m3					

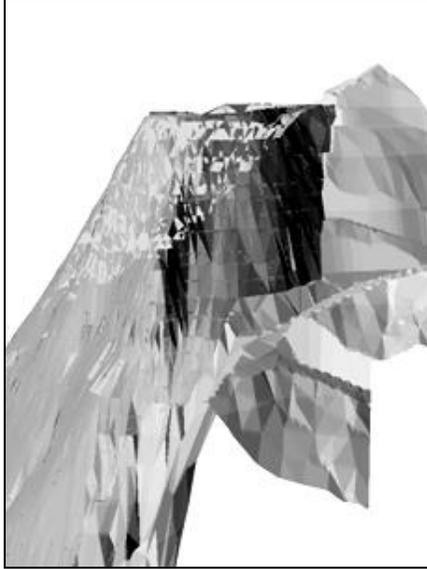


Figura 21. Condición inicial del "Tajo Presa"; modelo generado en Autocad 2008 – ARC GIS 9.3.1. Departamento de Ingeniería PH PIRRÍS (ver foto 2)

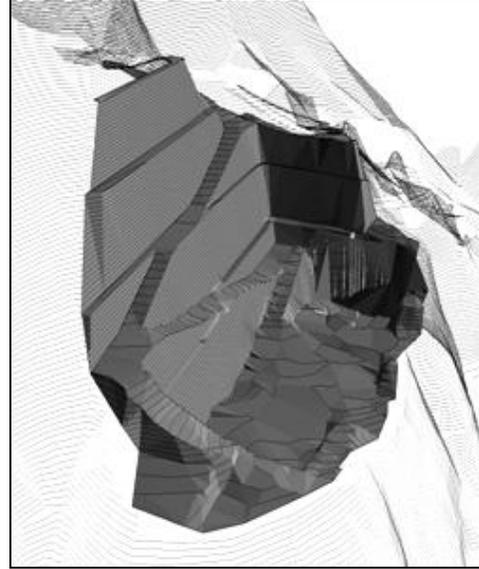


Figura 23. Condición final del "Tajo Presa" al terminar el proceso de explotación; modelo generado en Autocad 2008 – ARC GIS 9.3.1. Departamento de Ingeniería PH PIRRÍS (ver fotos 3, 7, 8, 9 y 10)

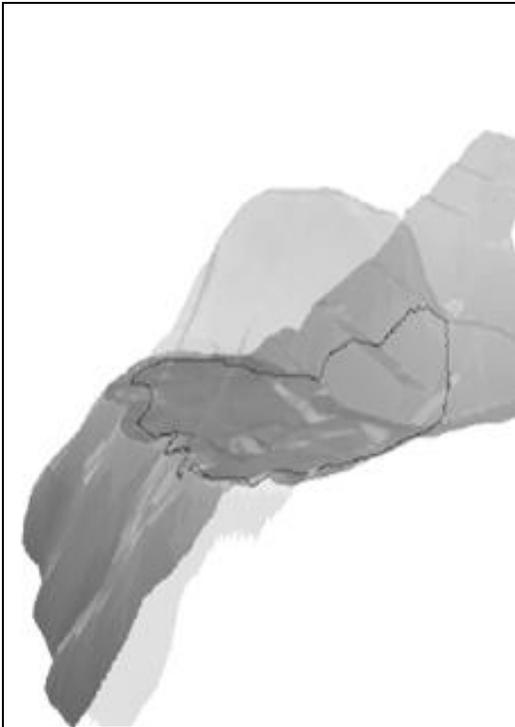


Figura 22. Modelo de proyección del volumen por explotar en el "Tajo Presa"; modelo generado en Autocad 2008 – ARC GIS 9.3.1. Departamento de Ingeniería PH PIRRÍS.

Clasificación de material para enviar a la escombrera

De previo y durante la explotación del tajo, se identificaron otros destinos aprovechables para el material no apto (lastre) para la producción de agregados adicionales a la escombrera. Ellos son:

- a) Mantenimiento de caminos primarios y secundarios dentro del proyecto.
- b) Rampas de acceso.
- c) Rellenos.
- d) Diques de protección.

Manejo final del tajo

Dentro del proceso de explotación del "Tajo Presa", se determinó la necesidad de tener presentes las proyecciones finales del material no apto para producción, para:

- Definir la capacidad de la escombrera frente a la explotación final de material (requerimientos).
- Utilizar el tajo como escombrera, para recepción de material de relleno (ver fotos 11 y 12).



Foto 2. Explotación "Tajo Presa", agosto 2007



Foto 5. Manejo de escombrera, junio 2009



Foto 3. Explotación "Tajo Presa", mayo 2009



Foto 6. Explotación "Tajo Presa", junio 2009



Foto 4. Manejo de escombrera, mayo 2009



Foto 7. Explotación "Tajo Presa", julio 2009



Foto 8. Explotación "Tajo Presa", agosto 2009



Foto 11. Aprovechamiento del tajo ya explotado, utilizado para colocar material de relleno (inicio), febrero 2010



Foto 9. Explotación "Tajo Presa", octubre 2009



Foto 12. Aprovechamiento del tajo ya explotado, para colocar material de relleno (final), marzo 2010



Foto 10. Explotación "Tajo Presa", febrero 2010

1.2. Producción de agregados

De acuerdo con lo observado, en el proceso de producción de agregados, se obtuvo las siguientes premisas para el control del proceso, previo al arranque de la construcción de la presa:

- La ubicación de los trituradores debe de contemplar obras de protección, ante posibles crecidas del río.
- Tal y como se presentó en la explotación del tajo, se debe definir la proyección de volúmenes de concreto por colocar en sitio (ver cuadro 1), definición de los materiales a producir.

- Se deben establecer los procedimientos para proceder a colocar el concreto en la obra (ver figura 24):
 - a) Colocación con balde y grúa torre.
 - b) Colocación de concreto con bomba estacionario o autobomba.
 - c) Colocación de concreto con canoa.
- Se debe definir una actualización periódica de los diseños de mezcla de los concretos que se van a utilizar en obra, para actualizar los flujos de producción.

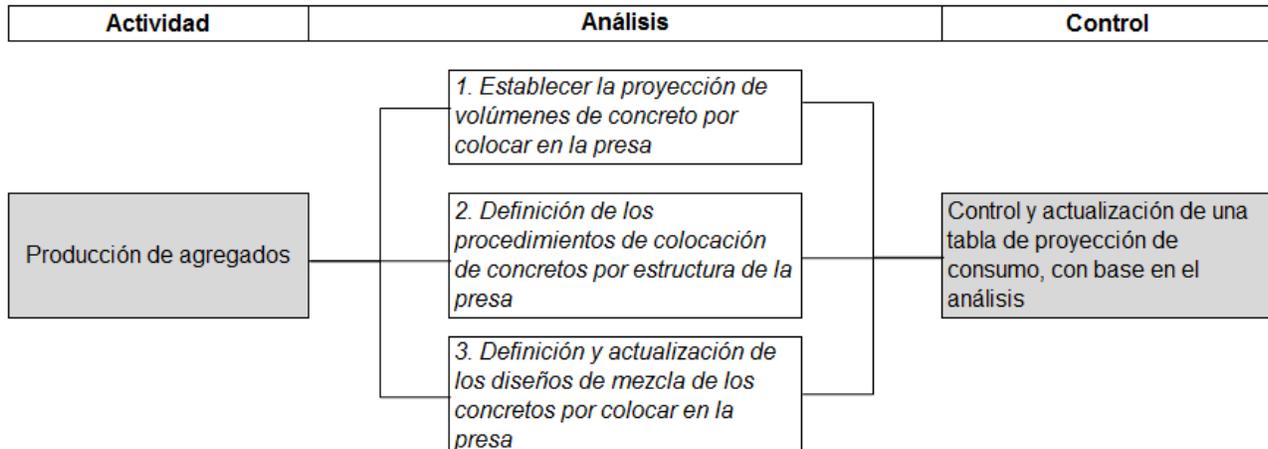


Figura 24. Esquema para el análisis y control de las proyecciones de agregados

- Definición de un organigrama de trabajo previo al inicio de la producción de agregados, así como una coordinación permanente entre los frentes de explotación de tajo y producción de agregados (ver figura 25).
- El establecimiento, con cada encargado de obra, las necesidades adicionales de trabajo.
- Producir entre el 30% y 50% de los agregados necesarios en la obra, previo al inicio de la construcción de la presa.
- Definición de los ciclos de trabajo (explotación del tajo – triturador primario – triturador secundario).
- Ubicación y mantenimiento de los sitios donde se controlarán los apilamientos (ver figura 26).
- Definir la necesidad de incorporar sistemas alternativos de trituración:
 - a) Complejo de finos.
 - b) Impactores de eje vertical (ver foto 20).
 - c) Trituradores móviles (ver foto 17).
- Definición de las posibles actividades adicionales a las establecidas en el programa oficial de obra:
 - a) Estabilización de taludes anexos a la presa.
 - b) Mantenimiento de caminos.
 - c) Obras provisionales.
 - d) Convenios con entrega de agregados a comunidades (obras sociales).
 - e) Desperdicios producto de lluvias y contaminación con materia vegetal (ver foto 19).

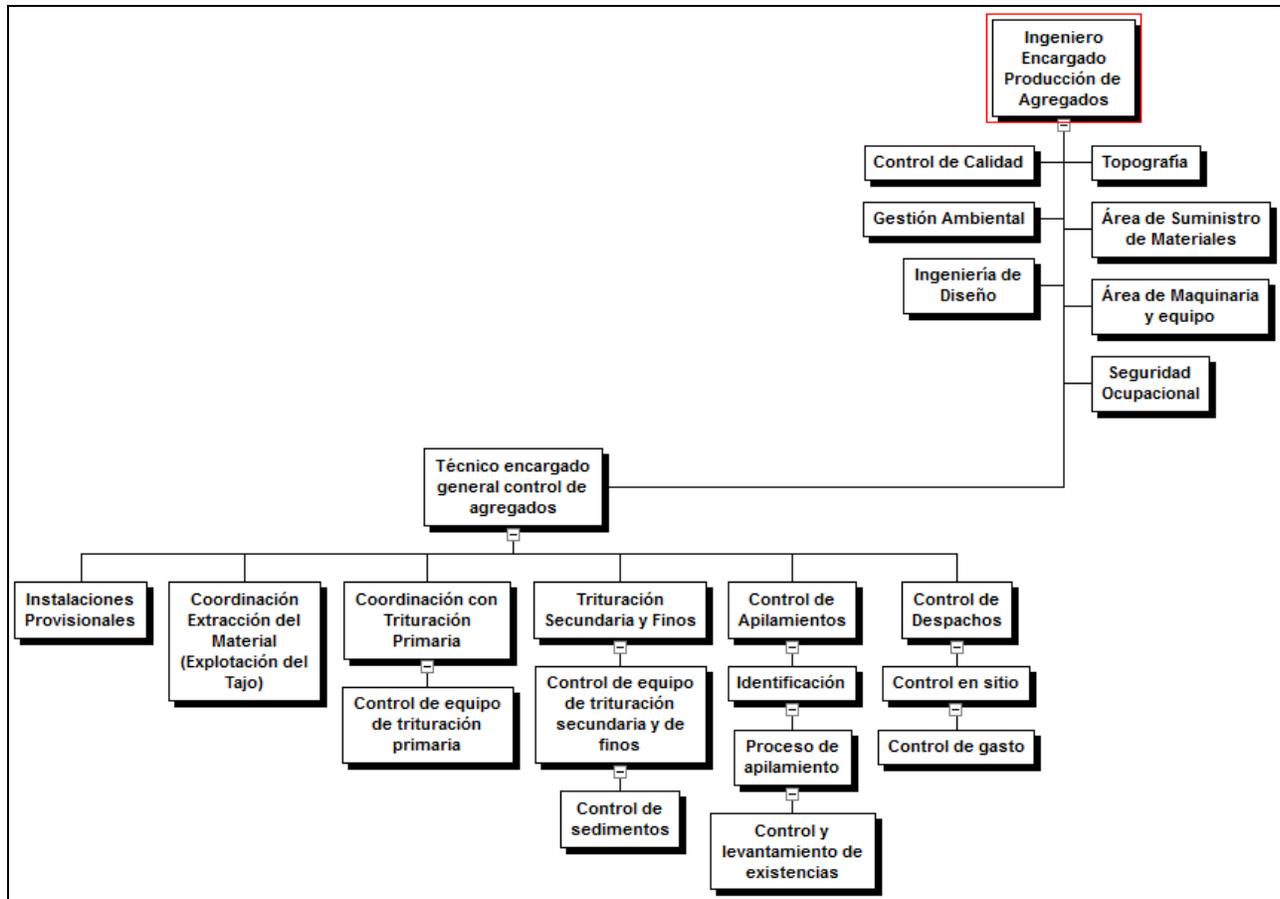


Figura 25. Organigrama general y EDT (estructura de desglose de trabajo), para el proceso de producción de agregados



Foto 13. Triturador primario al pie del tajo, aguas abajo de la presa



Foto 14. Triturador secundario, aguas arriba de la presa



Foto 15. Galerones para la protección de la arena contra la lluvia, ubicado al lado del triturador secundario



Foto 18. Acopio de agregados (arena), ubicado a la orilla del río Pirrís



Foto 16. Triturador secundario en funcionamiento (etapa final de trabajo, 31 de marzo 2010)



Foto 19. Acopio de agregados (arena) dañado por la lluvia y las condiciones de la zona del apilamiento



Foto 17. Triturador móvil, ubicado en la zona del triturador primario



Foto 20. Impactor de eje vertical VSI (Vertical Shaft Impactor)

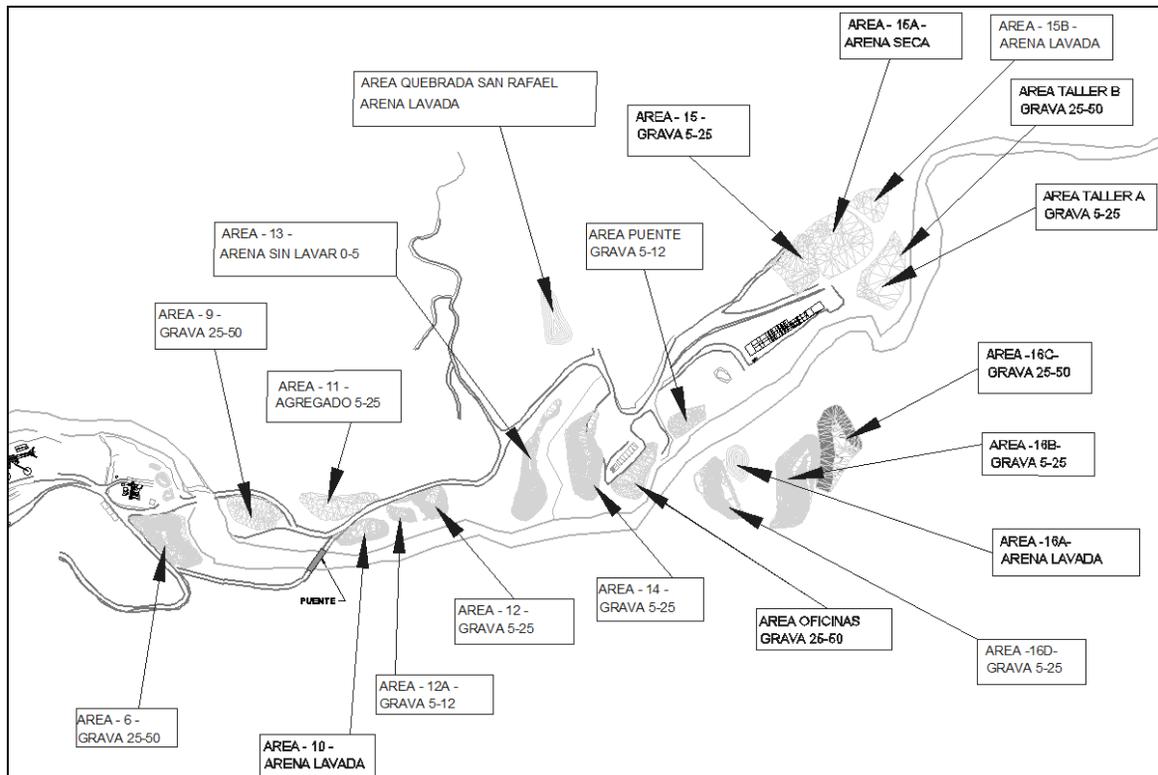


Figura 26. Ubicación de los acopios por tipo de agregado, para actualizar con topografía periódicamente, zona aguas arriba de la presa

1.3. Producción de concreto (RCC)

Durante el proceso de producción de concreto de RCC, desarrollado en el PH PIRRIS, se obtuvieron los siguientes resultados, como premisas para delimitar un control y una definición del proceso:

- La ubicación de la planta deberá estar en una zona con obras de protección, ante una eventual crecida del río (ver foto 21).
 - Definir un organigrama de trabajo, de acuerdo con los principales componentes, del proceso de producción de agregados (ver figura 27).
 - La capacidad de almacenamiento de la planta, debe de contemplar las colocaciones máximas semanales de RCC en la presa (ver anexo 04 y figura 29).
 - Definición de la logística de ingreso de materiales y despacho del RCC.
- Definición de una línea (banda transportadora) de transporte de agregados, que no implique el transporte con vagonetas.
 - Definir un programa de mantenimiento de la planta, programado con los ciclos de colocación de concreto en la presa.
 - Establecer las actividades, para el desarrollo de las calibraciones y ajustes de la planta, tales como:
 - a) Rellenos de prueba.
 - b) Construcción de la ataguía.
 - Establecimiento de la ubicación de los sitios para el concreto desechado que en el caso del PH PIRRÍS, fueron los siguientes:
 - a) Mantenimiento de caminos.
 - b) Zona de lavado de vagonetas y maquinaria, sobre la rampa de acceso a la presa, aguas abajo (ver apéndice, plano de taller 004).
 - c) Estabilización de caminos.
 - d) Construcción de muros de encauce en las quebradas.



Foto 21. Planta de RCC, aguas arriba de la presa

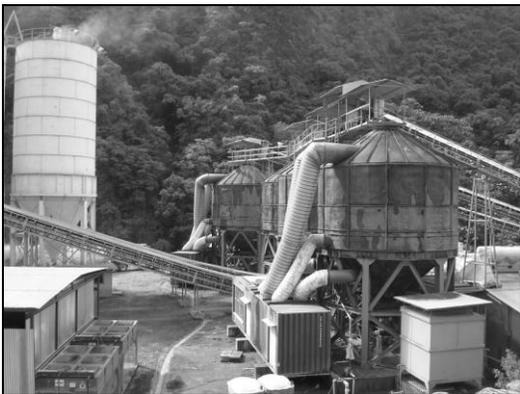


Foto 22. Silos de agregados en la planta de RCC



Foto 23. Piscina de almacenamiento de agua y silos de cemento, planta de RCC

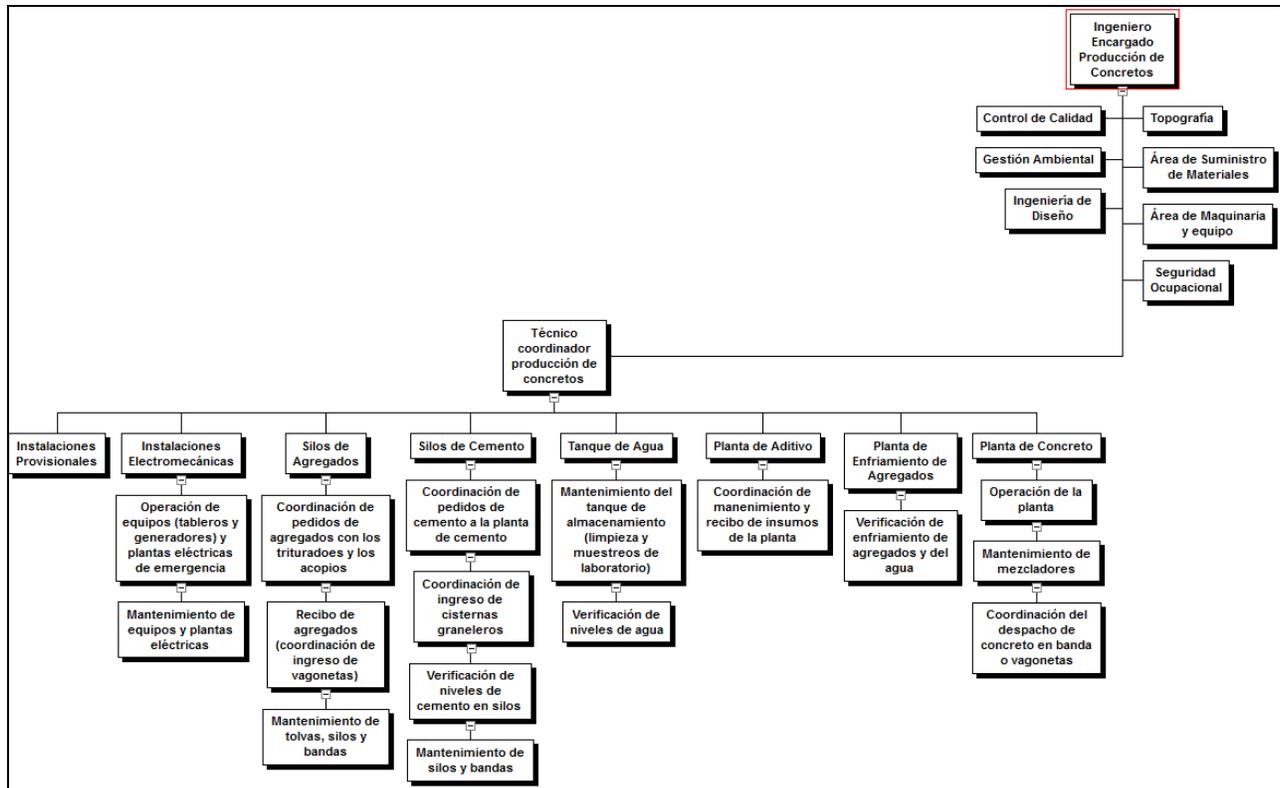


Figura 27. Organigrama general y EDT (estructura de desglose de trabajo), para el proceso de producción de concreto (RCC)

2. Transporte de materiales a Sitio Presa

Los procesos críticos de transporte de materiales, por definir, previo al inicio de la construcción de la presa en RCC, fueron:

- 2.1. Acarreo de cemento.
- 2.2. Banda transportadora de concreto.

2.1. Acarreo de cemento

Después del análisis del proceso de acarreo de cemento, se obtuvieron las siguientes premisas para este proceso:

- a) Horario de transporte (ver foto 24).
- b) Flujo de consumo de la presa.
- c) Ruta de acarreo (ver foto 26).
- d) Capacidad de almacenamiento de silos (ver foto 23).

Los otros resultados obtenidos, con base en lo analizado del acarreo de cemento, durante la colocación de RCC en la presa, fueron los siguientes:

- El consumo promedio por hora, obtenido en los meses más críticos fue de 70 toneladas.
- Se dispuso una flotilla de 52 camiones graneleros, con una capacidad promedio de 16.5 toneladas (ver foto 25).
- Se estableció un orden y control de carga, con horas específicas para cada camión.
- Se obtuvo que se transportaron 132000 toneladas de cemento para RCC, y para los concretos convencionales 35000 toneladas de cemento (ver consumo de concreto, figura 28).
- Los problemas más frecuentes que afectaron directamente el proceso, fueron los siguientes:
 - a) Averías en la planta de cemento.
 - b) Mantenimientos programados en la planta de cemento.

Se practicaron las siguientes acciones de mitigación, para los problemas asociados al acarreo de cemento desde la planta:

- Se realizaron proyecciones de consumo y se revisaron los inventarios, tanto en la planta de cemento, como en los silos de la planta de RCC, en “Sitio Presa”.
- Se coordinaron diariamente con el personal del colocado de RCC en la presa, las proyecciones de colocación de concreto.
- Se practicó un monitoreo y control permanentes de los puntos críticos en la ruta de acarreo (ver foto 24).



Foto 26. Traslado de camiones graneleros en la *ruta de acarreo*

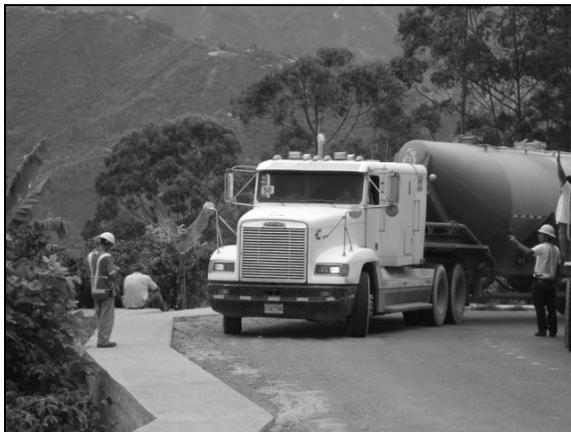


Foto 24. Coordinación por medio de “vistas” (personas encargadas de sincronizar el tránsito), a través de la *ruta de acarreo*



Foto 25. Camiones graneleros para el transporte del cemento en la planta de RCC

2.2. Banda transportadora de concreto

Se analizó el funcionamiento de la banda transportadora en “Sitio Presa” del PH PIRRÍS, y se obtuvo que su ubicación debe contemplar las siguientes características básicas de trabajo:

- Zonas de fácil acceso para el mantenimiento.
- Definición de la trayectoria de la banda transportadora, contemplando los siguientes factores de construcción, ante eventuales crecidas del río:
 - a) Ubicación de los postes de soporte en espacios, donde resulten inalcanzables ante el impacto directo de una crecida del río.
 - b) Diseño y construcción de fundaciones, que contemplen su emplazamiento sobre roca sana, y con dimensiones adecuadas, ante un posible impacto del agua.
 - c) Construcción de obras de protección como diques, muros de contención y otros.
- Alcance del concreto a diferentes elevaciones dentro de la presa (ver fotos 29 y 30).
- Definición de un programa de mantenimiento periódico de la banda.
- Identificación de las zonas críticas de trabajo (cuellos de botella) de la banda (ver foto 28).
- Definición de un proceso ágil, para el levantamiento de los postes que soportan la banda, conforme la presa vaya creciendo en elevación.



Foto 27. Salida de la banda transportadora de concreto en la planta de RCC, así como de las vagonetas que lo transportan



Foto 30. Inclinación de la banda transportadora, 11 de febrero, 2010



Foto 28. Punto de salida de la banda en la planta de RCC (zona de difícil mantenimiento)

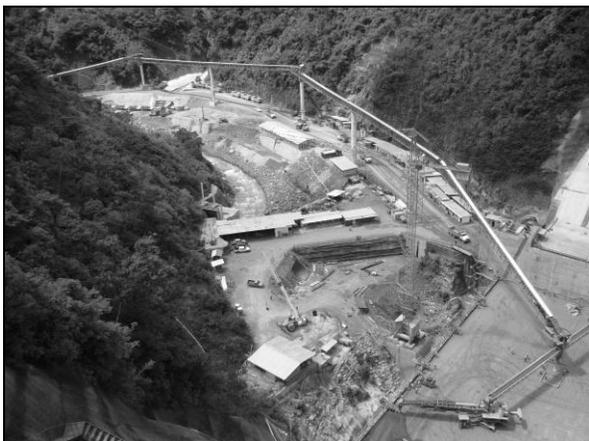


Foto 29. Llegada de la banda transportadora a la presa e instalaciones provisionales aguas arriba, 7 de julio 2009

2.3. Control de consumo de materiales

A continuación se describen los materiales y los procedimientos obtenidos, durante el control previo y la ejecución de las obras, tanto de la formaleta prefabricada de paramentos, como del acero de refuerzo.

2.3.1. Formaleta prefabricada de paramentos

Para los paramentos de la presa del PH PIRRÍS, se empleó la formaleta DOKA, para lo cual se procedió a modularla en los paramentos, según se muestra en el apéndice plano de taller 005, para realizar la proyección teórica de consumo de la formaleta (ver figuras 29 y 30), proceder a comparar y controlar con el consumo real que se esté realizando en obra. Los elementos que realmente se utilizaron en obra (no se incluyen los anclajes, ya que estos quedaron embebidos en el RCC), se detallan en los cuadros 2 y 3.

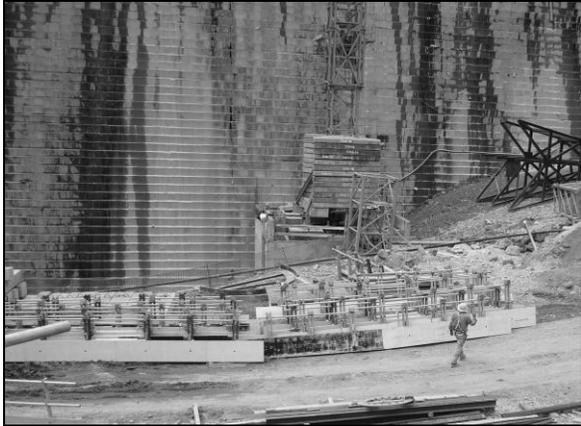


Foto 31. Formaleta ensamblada lista para ser colocada en la presa, zona aguas arriba



Foto 32. Plataforma de trabajo, aguas arriba, para la organización y preparación de la formaleta por colocar en la presa



Foto 33. Formaleta instalada aguas abajo de la presa, así como formaleta ensamblada pendiente de colocar

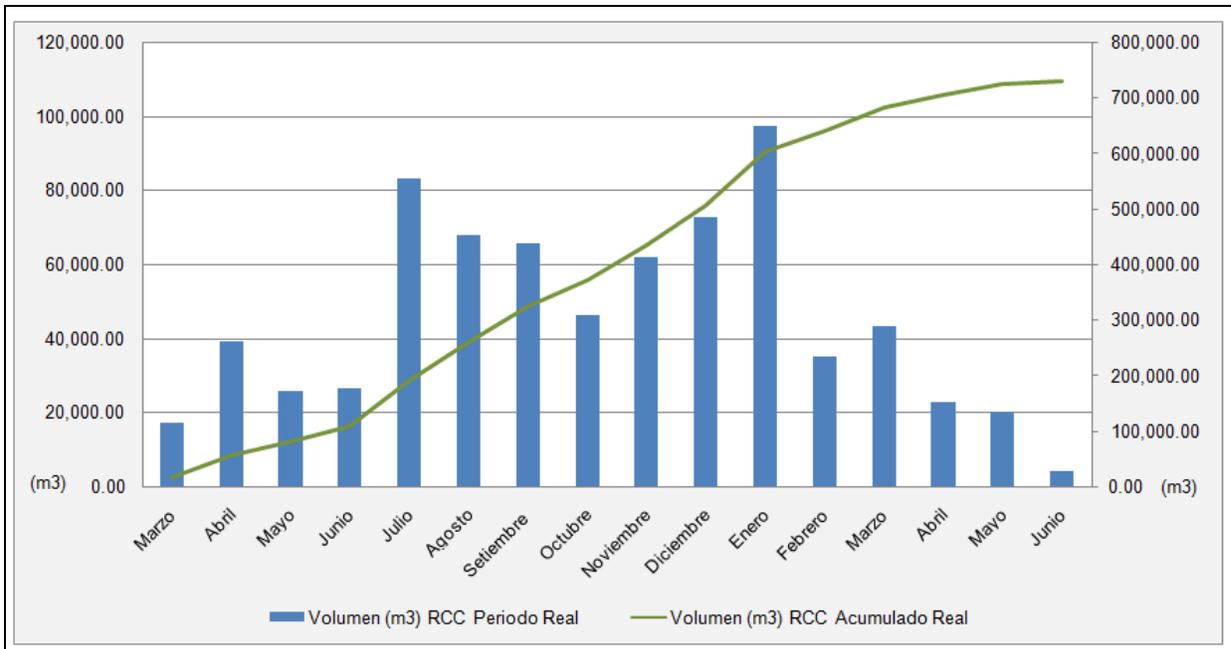


Figura 28. Gráfica de consumo mensual de concreto RCC, en la presa del PH PIRRÍS

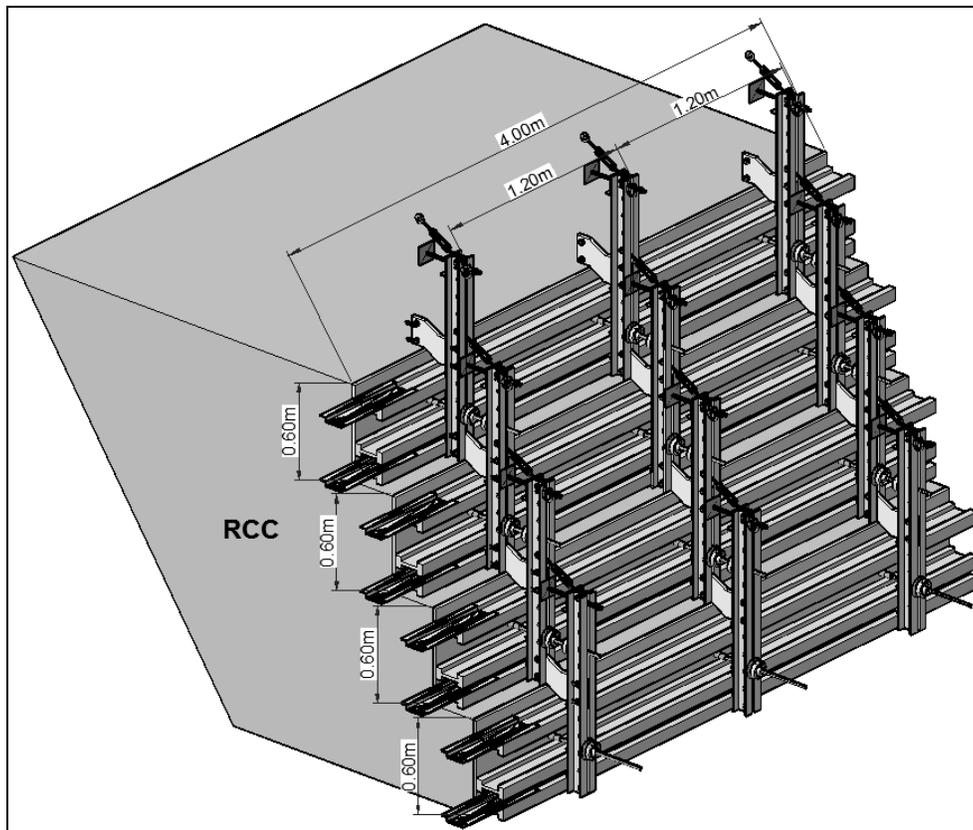


Figura 29. Modelo 3D de la formaleta prefabricada, de los paramentos de la presa. (Vista de 1 módulo, con 4 paneles ensamblados)

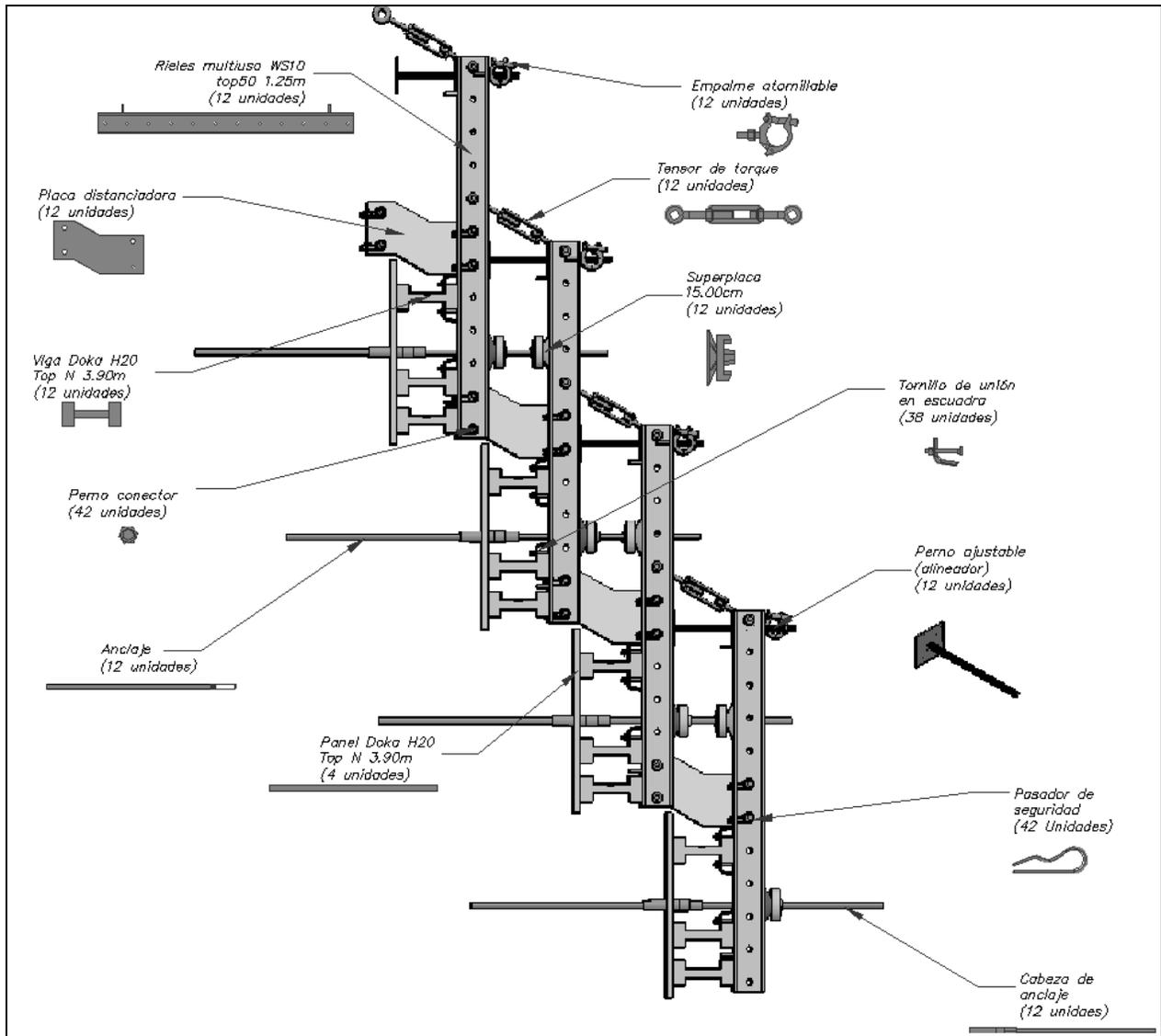
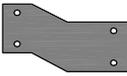
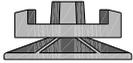
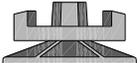


Figura 30. Sección de la formaleta prefabricada de los paramentos, con sus respectivos elementos por módulo

CUADRO 2 - CONTROL DE CONSUMO FORMAleta PARAMENTO AGUAS ARRIBA (HUELLA 20cm)					
Esquema	Nombre del elemento	Cantidad por módulo (un)	Colocado Cálculo Teórico (un)	Colocados Control Real (un)	Usos
	Placa distanciador 20cm	12	20,796	3,016	7
	Empalme atornillable	12	20,796	8,027	3
	Riel multiuso WS10 top 50 1.25m	12	20,796	8,422	2
	Viga H20 top N 3.90m	12	20,796	8,635	2
	Tensor de torque	12	20,796	3,096	7
	Super placa 15cm	12	20,796	3,432	6
	Perno conector	42	72,786	53,398	1
	Pasador de seguridad	42	72,786	8,622	8
	Tornillo de unión en escuadra H20	36	62,388	24,666	3
	Cabeza de anclaje	12	20,796	2,976	7
	Panel 0.60x4.0m	4	6,932	2,966	2
	Elemento de apoyo (perno con placa) en compresión entre rieles	12	20,796	3,294	6
	Elemento de unión entre paneles (para la unión de 2 módulos)	8	13,864	4,809	3

CUADRO 3 - CONTROL DE CONSUMO FORMAleta PARAMENTO AGUAS ABAJO PRESA (HUELLA 30cm)					
Esquema	Nombre del elemento	Cantidad por módulo (un)	Colocado Cálculo Teórico (un)	Colocados Control Real (un)	Usos
	Placa distanciador 20cm	12	17,040	2,559	7
	Empalme atornillable	12	17,040	6,810	3
	Riel multiuso WS10 top 50 1.25m	12	17,040	7,145	2
	Viga H20 top N 3.90m	12	17,040	7,326	2
	Tensor de torque	12	17,040	2,626	6
	Super placa 15cm	12	17,040	2,912	6
	Perno conector	42	59,640	45,304	1
	Pasador de seguridad	42	59,640	7,315	8
	Tornillo de unión en escuadra H20	36	51,120	20,927	2
	Cabeza de anclaje	12	17,040	2,525	7
	Panel 0.60x4.0m	4	5,680	2,517	2
	Elemento de apoyo (perno con placa) en compresión entre rieles	12	17,040	2,794	6
	Elemento de unión entre paneles (para la unión de 2 módulos)	8	11,360	4,080	3

En el registro de elementos colocados en obra, cabe destacar las siguientes premisas que se obtuvieron a la hora de establecer el control en el campo:

a) Tener en cuenta la gran cantidad de formaleta para paramentos, que puede ser utilizada en otras actividades diferentes, a las registradas a la salida del taller.

b) La pérdida de elementos a la hora del transporte y montaje de la formaleta en el paramento (ver fotos 31, 32 y 33).

c) La gran cantidad de formaleta que queda instalada, sin desencofrar, en los paramentos (ver foto 34).



Foto 34. Paramento aguas abajo de la presa, con más de ocho gradas de 60 cm, encofradas

2.3.2. Acero de refuerzo

Para el seguimiento de las proyecciones previas al inicio de la presa y, durante el consumo de acero en la construcción de las estructuras en concreto reforzado, se obtuvieron los siguientes procedimientos, después de lo observado y desarrollado en las obras:

- Se definió que el cálculo de acero teórico sea de forma detallada, por número de varilla y no global. Esto para cada estructura que compone la presa.
- Se determinó que las siguientes clasificaciones de acero, deben definirse en el cálculo inicial de requerimiento, para futuros controles, durante el consumo de acero en la obra:
 - a) Acero estructural (ver fotos 35 y 38).
 - b) Acero no estructural, para arriostres, soportes, barandas, escaleras, guías y otros elementos (ver fotos 36 y 37).
 - c) Acero producto del gasto en empalmes.
 - d) Acero producto de los desperdicios.
- Modelar en 3D el acero de refuerzo por colocar en las estructuras, con el programa Autocad 2008 (ver apéndices, planos de taller 019, 022, 025 y 027), para la generación de las cartillas de despiece y cálculo del acero estructural (ver figuras 32, 33 y 34).



Foto 35. Despiece de acero estructural (etiquetado según nomenclatura de la cartilla de despiece), en el taller de doblado



Foto 36. Clasificación de acero no estructural



Foto 37. Clasificación por estructura de los sobranes, generados del corte y doblado de las piezas que aparecen en las cartillas de despiece



Foto 38. Entrega de acero doblado y etiquetado en la obra

- Para el control de ingreso, despiece, fabricación y colocación de acero en obra, se obtuvo el siguiente esquema de trabajo:

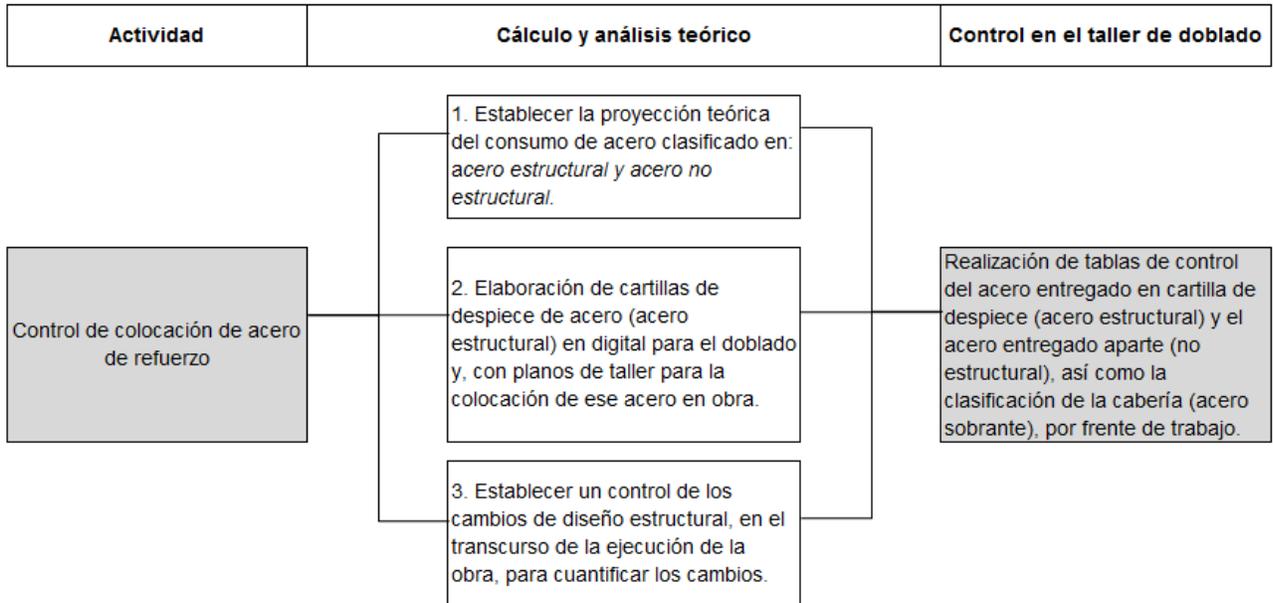


Figura 31. Esquema de cálculo y control de acero de refuerzo en obra

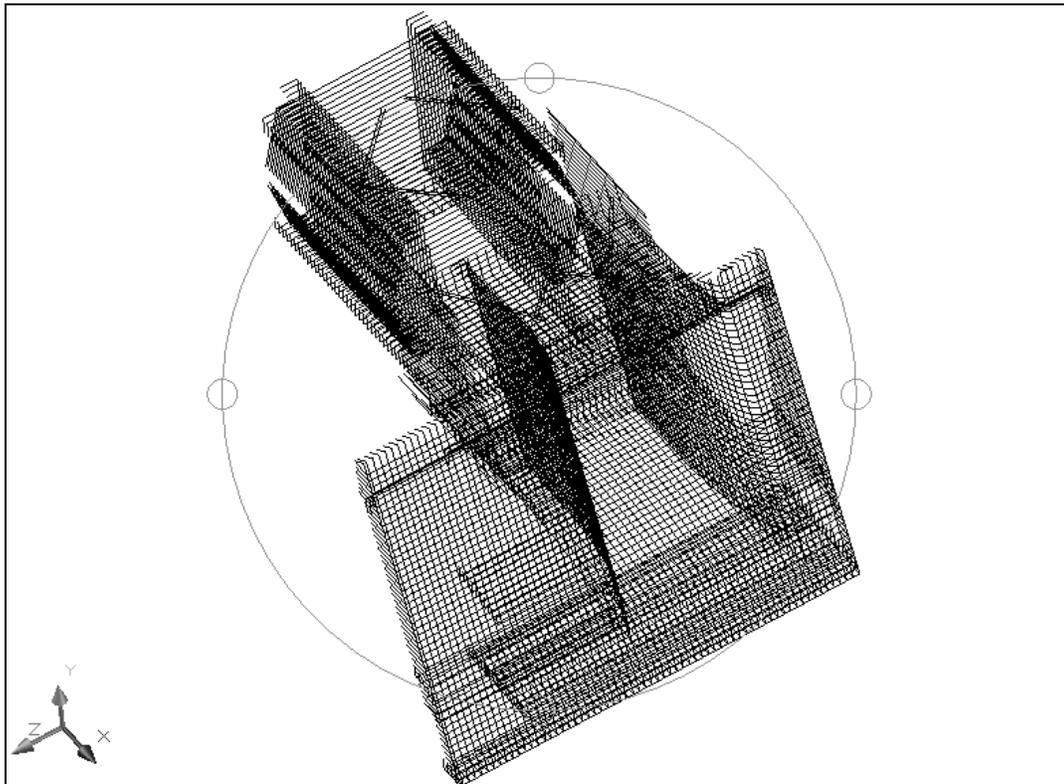


Figura 32. Modelado en 3D del acero de refuerzo estructural, por colocar en la embocadura de la descarga de fondo, para luego elaborar los planos de taller y la cartilla de despiece

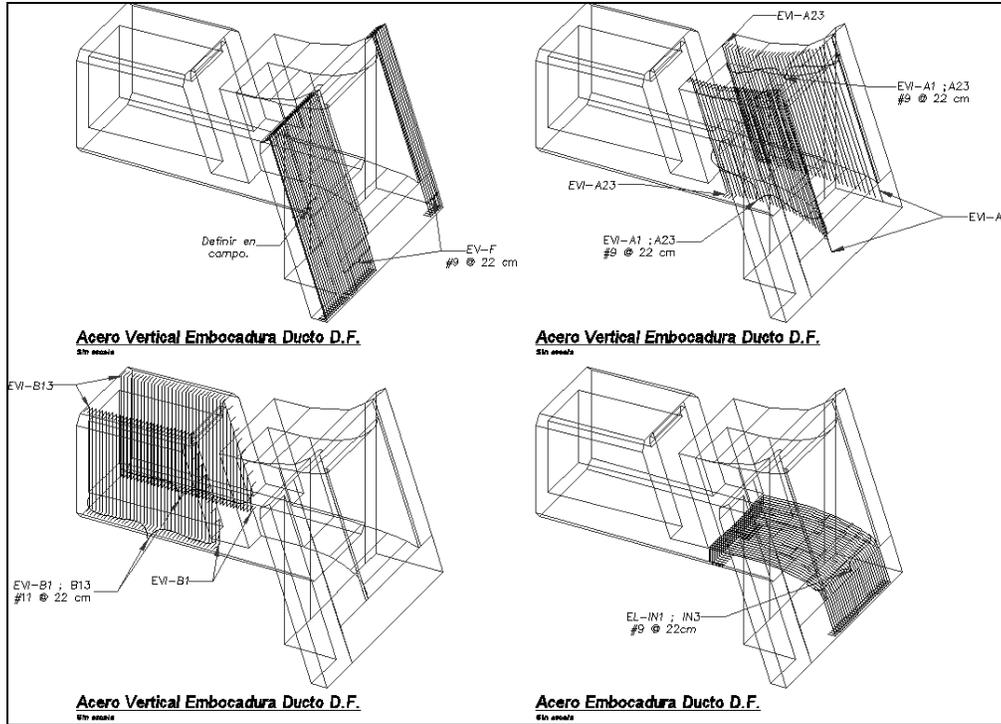


Figura 33. Esquemas incluidos en los planos de taller, para la colocación de acero en obra

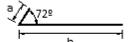
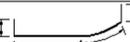
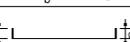
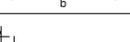
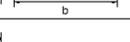
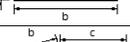
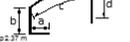
 PROYECTO HIDROELÉCTRICO PIRRÍS OFICINA TÉCNICA, SITIO PRESA		PLANOS DE TALLER REFERENCIA : DF - RF - 005											
ESTRUCTURA: EMBOCADURA DUCTO D.F.		DESPIECE DE ACERO CARTILLA DE REFUERZO					REVISIÓN : R2						
		FECHA : Octubre/ 2010					HOJA: 5 / 17						
Nomenclatura	DETALLE	LOCALIZACIÓN	Cant.	Var. N°	DIMENSIONES (m)								
					a	b	c	d	e	f	g	Trasp.	Long.
EL-B		Embocadura Ducto D.F. Malla Inferior. #9 @ 22cm(Horizontal)	50	9	0.48	4.24	-	-	-	-	-	-	4.72
EL-S1 <i>Ver detalle hoja 14</i>		Embocadura Ducto D.F. Malla Superior. #9 @ 22cm	23	6	0.92	1.64	5.39	1.00	-	-	-	-	8.95
EL-S3		Embocadura Ducto D.F. Malla Superior. #5 @ 30cm	13	6	0.30	0.98	0.30	-	-	-	-	-	1.58
ELA-A1		Embocadura Ducto D.F. Malla Lateral Izq. #9 @ 22cm (Horizontal)	16	9	0.86	3.86	-	-	-	-	-	-	4.72
ELA-A2		Embocadura Ducto D.F. Malla Lateral Izq. #9 @ 22cm (Horizontal)	16	9	0.86	6.23	-	-	-	-	-	-	7.09
ELA-B1		Embocadura Ducto D.F. Malla Lateral Izq. #9 @ 22cm (Horizontal)	16	9	4.76	5.03	2.21	-	-	-	-	-	12.00
ELA-B2 <i>Ver detalle hoja 15</i>		Embocadura Ducto D.F. Malla Lateral Izq. #9 @ 22cm (Horizontal)	16	9	2.39	5.03	2.21	-	-	-	-	-	9.63
ELA-BV1 <i>Ver detalle hoja 15</i>		Embocadura Ducto D.F. Malla Lateral Izq. #9 @ 22cm (Horizontal)	1	9	0.86	6.25	4.90	0.48	-	-	-	2.37	14.86
ELA-BV2 <i>Ver detalle hojas 16 y 17</i>		Embocadura Ducto D.F. Malla Lateral Izq. #9 @ 22cm (Horizontal)	1	9	0.86	6.25	3.87	0.48	-	-	-	-	11.46
ELA-BV3 <i>Ver detalle hojas 16 y 17</i>		Embocadura Ducto D.F. Malla Lateral Izq. #9 @ 22cm (Horizontal)	1	9	0.86	6.25	2.83	0.48	-	-	-	-	10.42

Figura 34. Imagen de la cartilla de despiece para el doblado de acero en taller

3. Sitios de obras provisionales

Después de analizados los procesos de trabajo interactuando con las obras provisionales construidas en las obras presa, se obtuvieron las siguientes premisas, a la hora de definir su ubicación:

- Definición del modelado de avance de los diferentes suministros básicos en la presa, como electricidad, agua, aire, etc., (ver apéndices, planos de taller 002 y 003).
- Definición de las obras provisionales, según la secuencia de trabajo de las diferentes estructuras de la presa (ver fotos 39 y 40).
- Definición de caminos secundarios y accesos a diferentes alturas de la presa.
- Modelado de las propuestas de accesos provisionales a la presa (ver apéndice, plano de taller 009):
 - a) Ascensores.
 - b) Escaleras (ver fotos 41 y 42).
 - c) Plataformas (ver foto 43).
 - d) Andamios (ver foto 44).



Foto 39. Instalaciones provisionales (oficinas y bodegas), aguas arriba de la presa



Foto 40. Instalaciones provisionales (comedor, dispensario y bodega de materiales), aguas arriba de la presa



Foto 41. Escaleras de acceso, sobre el paramento de la presa



Foto 42. Escaleras de acceso a la margen izquierda de la presa, sobre los bloques de cierre



Foto 43. Escaleras de acceso a los concretos de cresta.
Ver apéndice, plano de taller 009



Foto 44. Plataformas de acceso a los pilares del vertedor.
Ver apéndice, plano de taller 009

4. Ejecución de obras civiles

Procesos y subprocesos en la ejecución de la presa

Los resultados de la ejecución de las principales actividades en la construcción de la presa del PH PIRRÍS, permitió obtener y definir un esquema básico de los principales procesos y subprocesos, que representan una afectación importante en el programa general de trabajo, respecto a plazos, costos y complejidad (ver figura 35).

4.1. Ubicación de grúas torre

Se obtuvieron los siguientes resultados de la ubicación de grúas torre, en los diferentes frentes de trabajo, en el "Sitio Presa". Las observaciones obtenidas a la hora de tomar en cuenta la ubicación de grúas torre, son:

- Definir si la grúa torre puede quedar inmersa en el cuerpo presa (ver fotos 50 y 52).
- Establecer los rangos de trabajo de la grúa, así como los sitios específicos por cubrir por la grúa (ver apéndices, planos de taller 011 y 012):
 - a) Altura.
 - b) Alcance.
 - c) Capacidad de trabajo por obra.

- Dibujar los esquemas de trabajo de las grúas por zona, en la presa (ver apéndices, planos de taller 011, 012 y 013).
- Definir previamente el sistema de construcción por obra.
- Definir el proceso de colocación de concreto, por obra.
- Establecer y construir en sitio, plataformas auxiliares para el montaje y desmontajes de las grúas (ver foto 51).
- Tener en cuenta la interacción de las grúas instaladas dentro del mismo proyecto (ver apéndice, plano de taller 012).
- Relacionar la visibilidad del operador, con la comunicación del operario en tierra.
- Determinar la longitud de la pluma requerida.
- Considerar la complejidad del montaje y desmontaje de la grúa torre (ver foto 49).



Foto 45. Grúa torre Comedil, aguas abajo de la presa, abril 2009

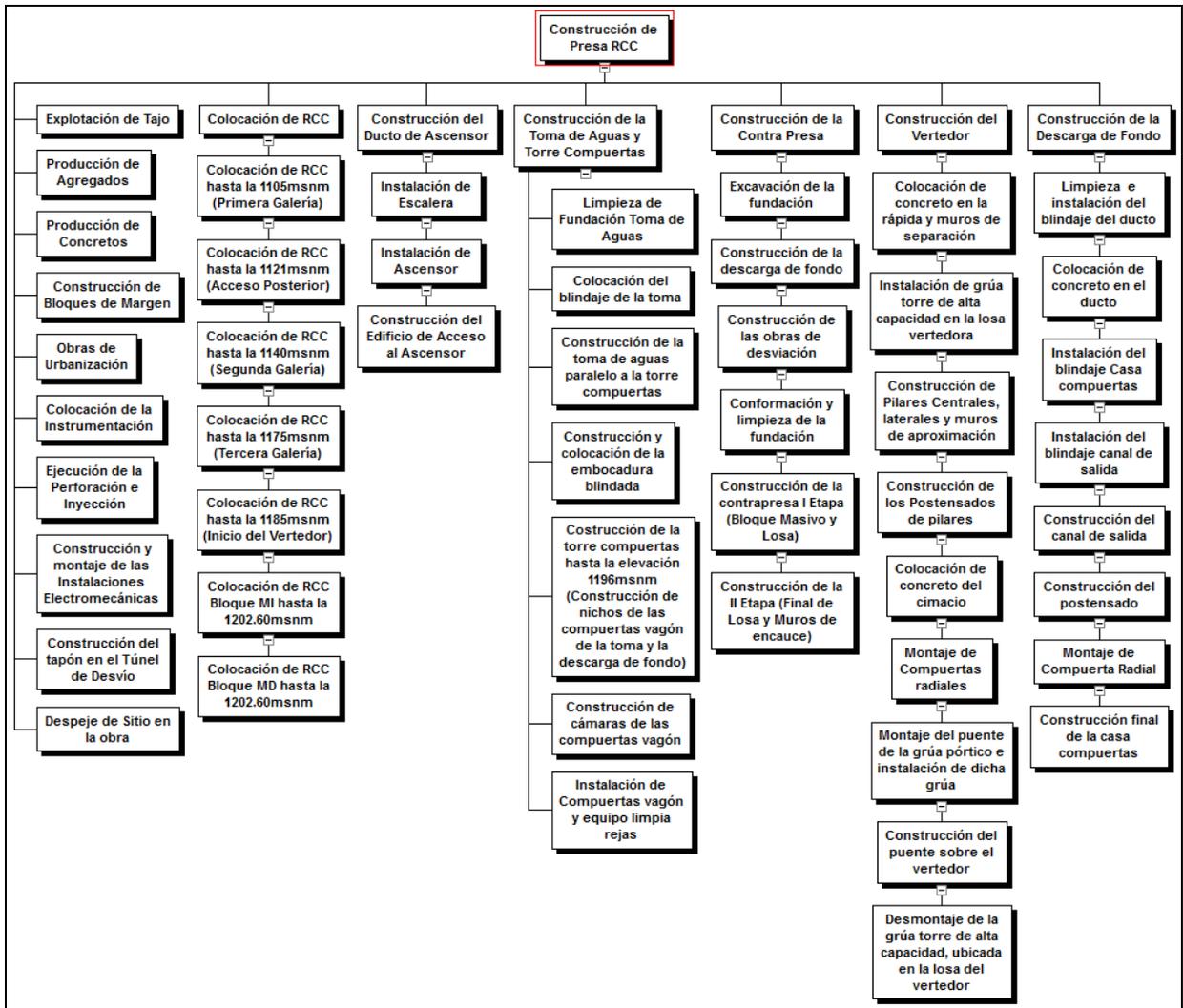


Figura 35. Procesos y subprocesos, en la construcción de la presa del PH PIRRIS



Foto 46. Instalación grúa torre FM, aguas arriba de la presa, mayo 2009

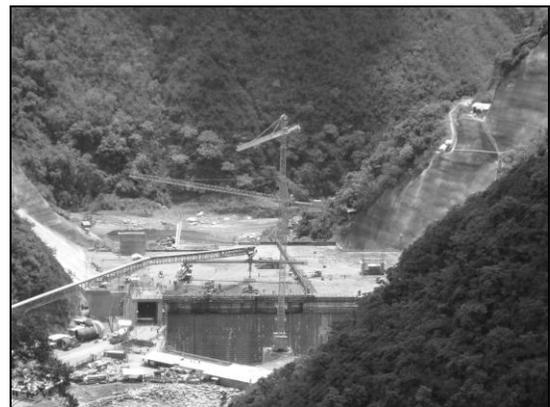


Foto 47. Grúas torre Comedil y FM, ubicadas aguas arriba y aguas abajo de la presa, agosto 2009



Foto 48. Reubicación de grúas torre Comedil y FM, vista margen derecha de la presa, febrero 2010



Foto 51. Plataforma de trabajo para pre armado de grúa torre POTAIN MD 1100



Foto 49. Instalación de grúa torre POTAIN MD1100 en la rápida del vertedor, febrero 2010



Foto 52. Interacción de grúas torre, zona de concretos de cresta de la presa, setiembre 2010

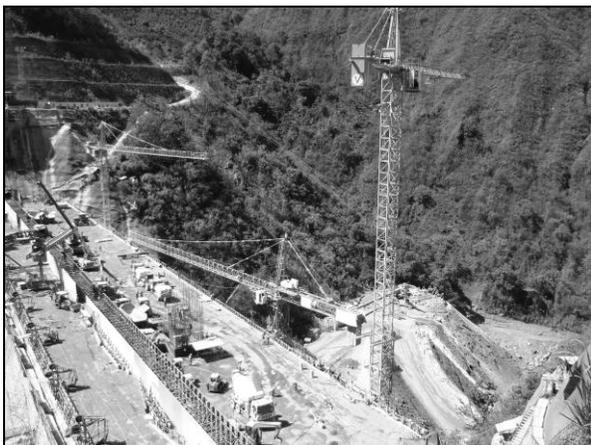


Foto 50. Funcionamiento de las tres grúas torre, vista margen derecha de la presa, febrero 2010

4.2. Colocación de RCC

Después de haber analizado el proceso de colocación de RCC, antes y durante la ejecución (inició el 23 de marzo del 2009 y finalizó el 9 de junio del 2010), se definieron las siguientes actividades, antes de proceder al inicio de las obras:

- Levantamiento de los niveles finales del concreto de fundación en la presa (ver apéndice, plano de taller 001).
- Levantamiento y evaluación de las condiciones de los concretos colocados en los estribos de la presa (ver fotos 54 y 55).

- Definición del modelo de colocación de RCC dentro de la presa (ver apéndices, planos de taller 007 y 008).
- Definición de un organigrama de trabajo general.
- Evaluación de la maquinaria a través de un simulacro de trabajo (ver apéndice, plano de taller 004 y foto 54).
- Definición de los sitios para la colocación de los suministros básicos en la presa (ver foto 53 y apéndices, planos de taller 002, 003 y 008):
 - a) Agua.
 - b) Aire.
 - c) Lechada.
 - d) Electricidad.
 - e) Mortero.
 - f) Iluminación.
- Definición de accesos al sitio de colocación de RCC.
- Definición del diseño de anclaje, para la formaleta prefabricada de los paramentos.
- Definición de alternativas de sistemas internos, para la distribución de RCC en la presa, como el *Crawler* o el *Swinger*, a diferentes elevaciones de la presa (ver apéndice, plano de taller 006 y foto 60).
- Definición de varias alternativas, para el proceso de colocado de RCC dentro de la presa:
 - a) Banda transportadora (ver foto 60).
 - b) Vagonetas y rampa de acceso (ver fotos 61 y 65, y apéndice, plano de taller 015).
 - c) Vagonetas y chute (ver foto 66, y figuras 36 y 37).
 - d) Sistema de colocación mediante hiper bloques (ver foto 57 y apéndice, plano de taller 014).
 - e) Los porcentajes de uso de esos sistemas en la colocación del RCC, en la presa del PH PIRRIS, fueron: 62% banda, 29% vagonetas – rampa de acceso y 9% vagonetas – *chute* (ver anexo 03).
 - f) Las producciones de RCC transportado fueron: 2,073 m³/día banda, 1,223 m³/día vagonetas – rampa de acceso y 609 m³/día vagonetas – *chute*.
- Definición de los sitios para evacuar los materiales de desecho.
- Definir y diseñar las plataformas para el sacado de equipo y maquinaria de la presa

(ver fotos 55 y 56, y apéndice, plano de taller 016).

- Definición del procedimiento básico de construcción, de las galerías de drenaje que atraviesan transversalmente la presa (ver fotos 61, 62 y 63, y apéndice, plano de taller 010).
- Definición del procedimiento de protección del área de colocación de RCC ante lluvias (ver foto 67).



Foto 53. Ubicación de suministros de agua, aire y electricidad, vista aguas arriba de la presa



Foto 54. Simulacro de colocación de RCC con vagonetas cargadas con agregados, 19 de marzo del 2009 (4 días antes de iniciar el proceso de colocación de RCC)



Foto 55. Plataforma de izaje para sacar maquinaria de la presa, manejada con la grúa de alta capacidad



Foto 58. Levantamiento de zonas dañadas, en la margen izquierda de la presa, julio 2009



Foto 56. Proceso de levantamiento y extracción de maquinaria de la presa, con la grúa de alta capacidad



Foto 59. Reparación de de zonas dañadas, en la margen izquierda de la presa, junio 2009



Foto 57. Colocación de RCC, mediante el sistema de construcción en híper bloque



Foto 60. Planta de colocación de RCC, elevación 1101 msnm, abril 2009

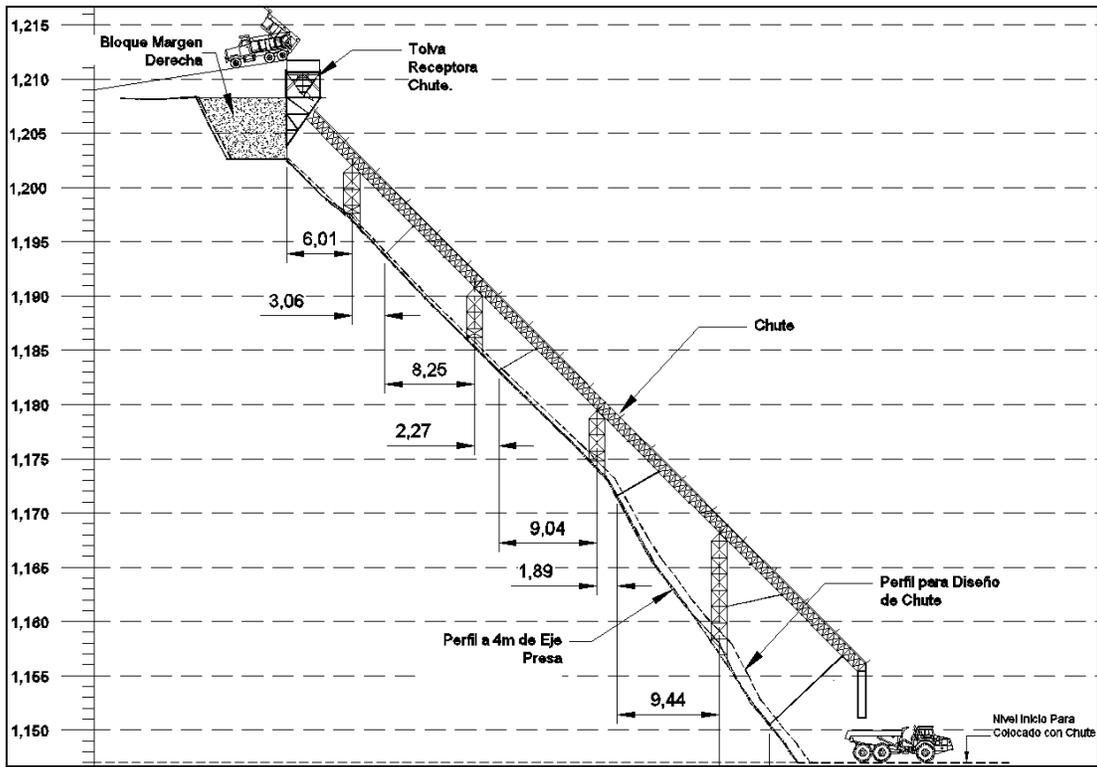


Figura 36. Esquema de trabajo del Chute de margen derecha de la presa

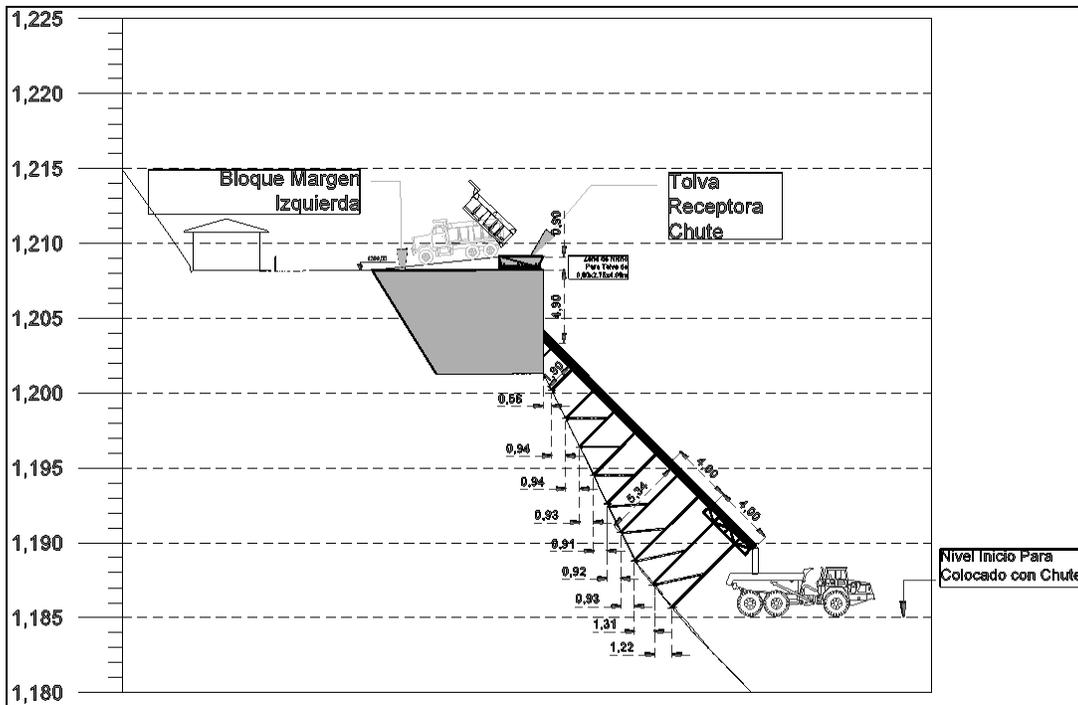


Figura 37. Esquema de trabajo del Chute de margen izquierda de la presa



Foto 61. Construcción de galería de drenaje en la elevación 1105 msnm, mayo 2009



Foto 64. Cargado de RCC en las vagonetas articuladas, con el sistema banda transportadora - *Crawler*



Foto 62. Construcción de galería de drenaje en la elevación 1140 msnm y sistema de *híper bloques*, octubre 2009



Foto 65. Conformación de la rampa de acceso aguas abajo de la presa, agosto 2009



Foto 63. Construcción de galería de drenaje en la elevación 1175 msnm, febrero 2010



Foto 66. *Chute* margen derecha, diciembre 2009



Foto 67. Protección de la capa de RCC, con plástico negro ante la caída de lluvia



Foto 68. Vista aguas arriba de la presa, finalizado el proceso de colocación del RCC, 9 de junio 2010

4.3. Toma de aguas y torre compuertas

Para la toma de aguas y torre compuertas se obtuvieron, las siguientes premisas, previo al arranque del RCC:

- Modelo (sólido en 3D) con los volúmenes fragmentados por la resistencia de los concretos (ver figuras 38 y 39).
- Modelo de colocación del blindaje, de la embocadura y tubería de conducción de la toma de agua (ver apéndice, plano de taller 017).
- Definición del modelo de coladas, de acuerdo con las variantes de construcción de la estructura (ver apéndice, plano de taller 018).
- Modelo del acero estructural (ver apéndice, plano de taller 019).

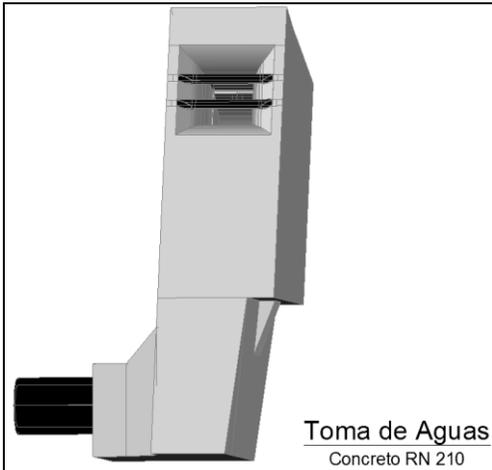


Figura 38. Toma de aguas



Foto 69. Toma de aguas, setiembre 2009

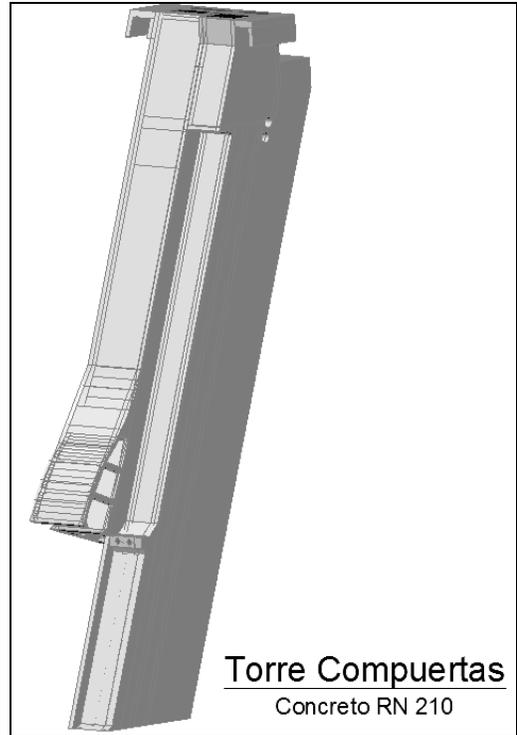


Figura 39. Torre compuertas

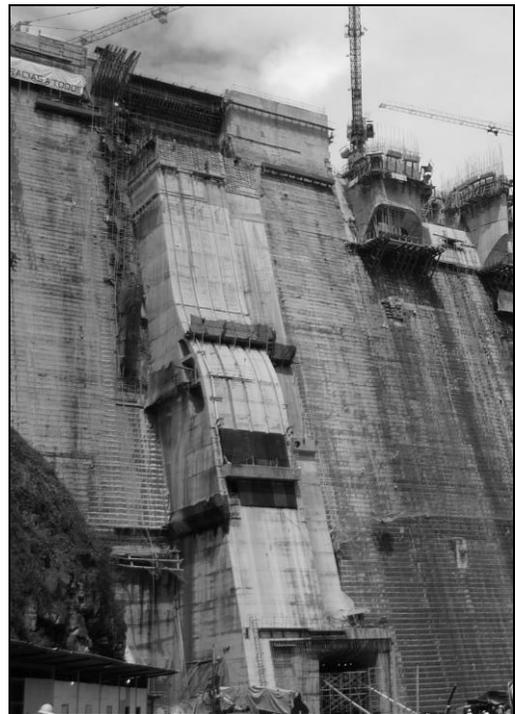


Foto 70. Estructura de toma de aguas y torre compuertas, setiembre 2010

4.4. Contra presa

Para la contra presa se obtuvo que, previo al arranque del RCC, se deben definir las siguientes premisas:

- Modelo (sólido en 3D) con los volúmenes fragmentados por la resistencia de los concretos (ver figuras 40, 41, 42 y 43).
- Modelo de coladas, de acuerdo con las variantes de construcción de la estructura (ver apéndice, plano de taller 021).
- Modelado de la construcción de las obras de desviación y ubicación de grúa torre de trabajo (ver apéndices, planos de taller 013 y 020).
- Modelo del acero estructural por colocar (ver apéndice, plano de taller 022).



Foto 71. Zona donde se va a ubicar la contra presa, aguas abajo de la presa, octubre 2009



Foto 73. Desvío del río, a través de la descarga de fondo de la contra presa, febrero 2010



Foto 74. Bloque de fundación de la contra presa, setiembre 2010



Foto 72. Construcción de la descarga de fondo de la contra presa, enero 2010

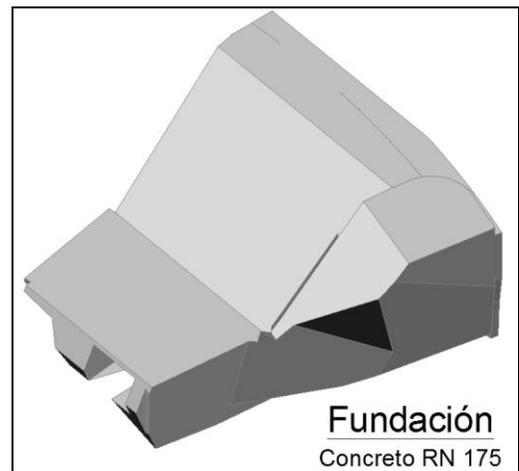


Figura 40. Fundación de la contra presa

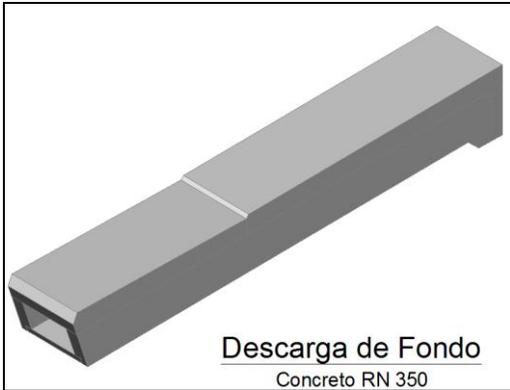


Figura 41. Descarga de fondo de la contra presa



Figura 42. Losa vertedora de la contra presa

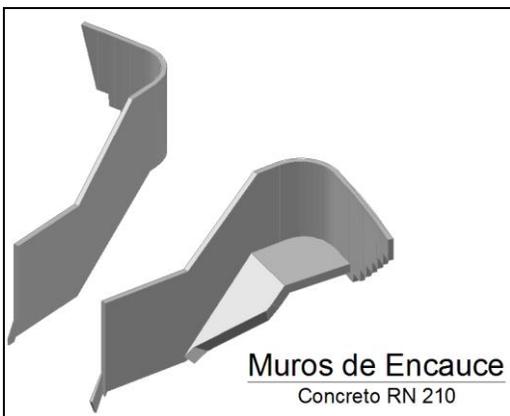


Figura 43. Muros de encauce de la contra presa

4.5. Vertedero

Para el vertedor se obtuvo que, previo al arranque del RCC, se deben definir las siguientes premisas:

- Un modelo (sólido en 3D) con los volúmenes fragmentados por la resistencia de los concretos (ver figuras 44, 45, 46, 47 y 48).
- Modelo de la instalación de la grúa de alta capacidad, cuando se coloca en la losa del vertedor (ver apéndice, plano de taller 024).
- Modelo de coladas, de acuerdo a las variantes de construcción de la estructura (ver apéndice, plano de taller 023).
- Modelado del acero estructural (ver apéndice, plano de taller 025).



Figura 44. Losa del vertedor

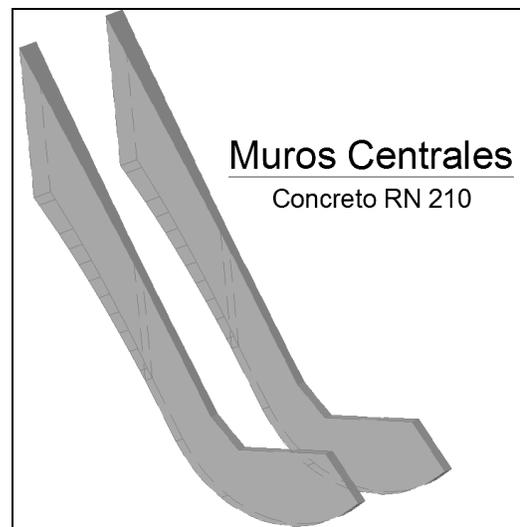


Figura 45. Muros centrales del vertedor

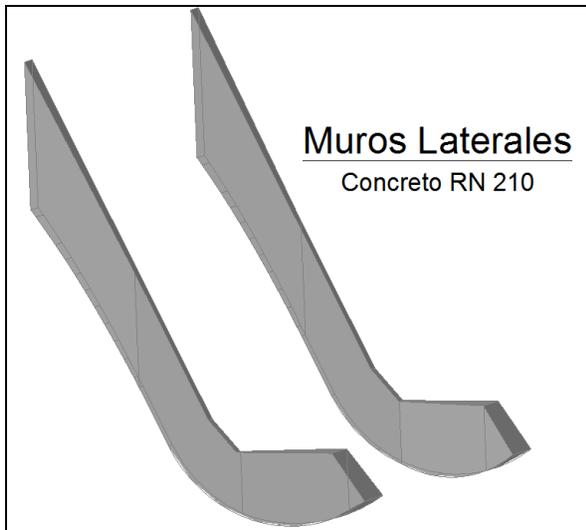


Figura 46. Muros laterales del vertedor

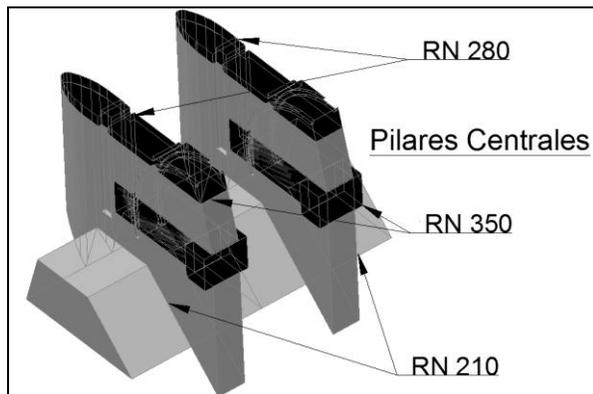


Figura 47. Pilares centrales del vertedor

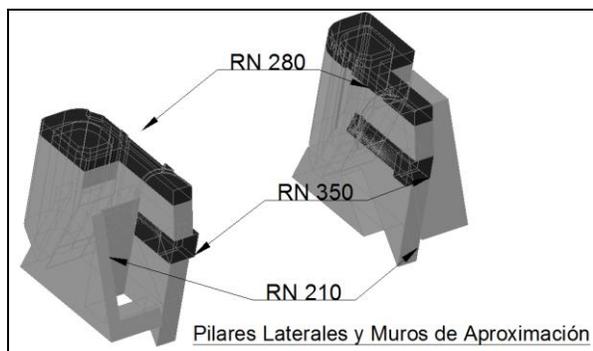


Figura 48. Pilares laterales y muros de aproximación del vertedor



Foto 75. Losa y pilares del vertedor, aguas abajo de la presa, octubre 2010



Foto 76. Construcción de la losa del vertedor, aguas abajo de la presa, octubre 2010



Foto 77. Pilares del vertedor, aguas arriba de la presa, octubre 2010

4.6. Descarga de fondo

Para la descarga de fondo se obtuvo que, previo al arranque del RCC, se deben definir las siguientes premisas:

- Un modelo (sólido en 3D) con los volúmenes fragmentados por la resistencia de los concretos (ver figuras 49, 50 y 51).
- Un modelo de coladas, de acuerdo con las variantes de construcción de la estructura (ver apéndice, plano de taller 026).
- Un modelo del acero de refuerzo a colocar en toda la estructura (ver apéndice, plano de taller 027).

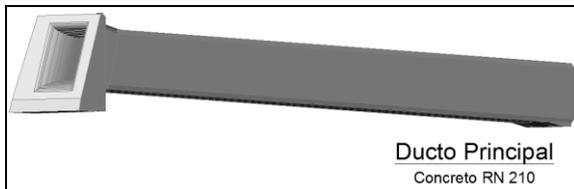


Figura 49. Ducto principal de la descarga de fondo

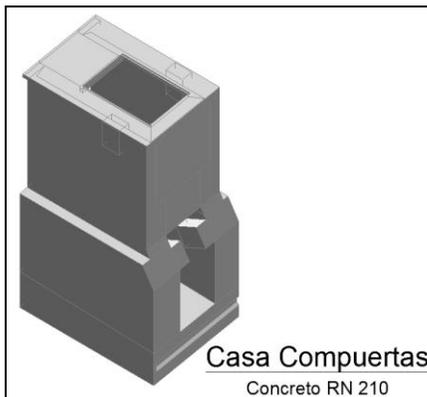


Figura 50. Casa compuertas de la descarga de fondo

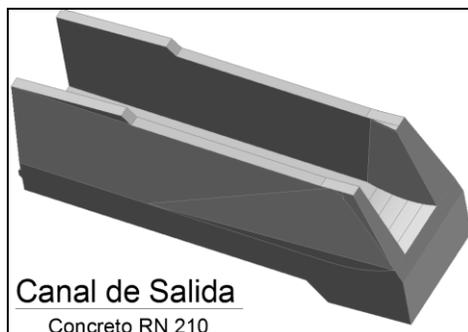


Figura 51. Canal de salida de la descarga de fondo



Foto 78. Embocadura de la descarga de fondo, aguas arriba de la presa, octubre 2010



Foto 79. Entrada del ducto de la descarga de fondo, aguas arriba de la presa, octubre 2010



Foto 80. Canal de salida de la descarga de fondo, aguas abajo de la presa, octubre 2010

Programa general de trabajo original versus programa actualizado

Una vez analizados los procesos de trabajo previos al arranque de la presa del PH PIRRÍS, se obtuvieron los siguientes resultados de la comparación del programa original de trabajo (Versión 1 – realizado el 1 marzo 2009), con el actualizado (Versión 2 – realizado el 2 setiembre 2010):

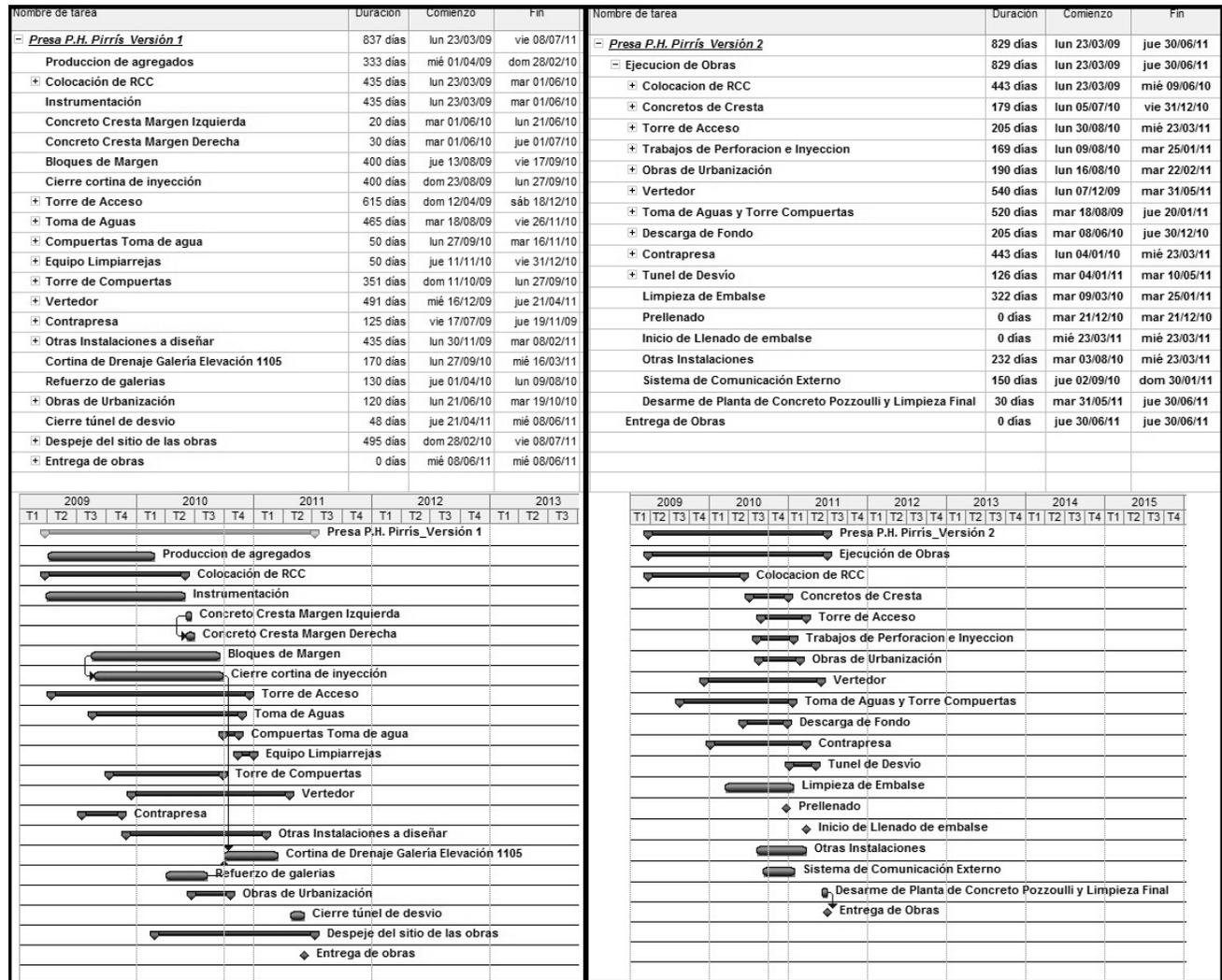


Figura 52. Comparación de programas de trabajo, de las obras de la presa del PH PIRRÍS, original (V1) versus actualizado (V2)

Programa original: Versión 1

En este programa los trabajos de colocación de RCC inician el 23 de marzo del 2009, el cual debía terminar el 1 de junio del 2010.

Una vez terminado el RCC, la ruta crítica se trasladaba a la construcción del “Vertedor de Excedencias” (incluye la construcción de pilares, losa, muros de separación y puente); esta actividad fue programada para ser terminada el 21 de abril del 2010. En el “Vertedor”, se incorporaba la construcción “Descarga de Fondo”, como una sub actividad, la cual por ende también se encontraba en ruta crítica; luego las tareas con holgura cero, continuaban con los trabajos en el tapón de cierre del túnel, despeje del sitio de las obras, para concluir con la entrega de obras, programada originalmente para julio del 2011.

Programa actualizado: Versión 2

La actualización del programa original se realizó debido a los tiempos de avance, que se estaban dando tanto en las obras de “Toma de Aguas” como en el “Vertedor”, donde los procesos de colocación de concretos, según los modelos de trabajo previstos, estaban aumentando considerablemente con respecto a los programados.

Este programa actualizado: “Versión 2”, al igual que el programa original, comenzaba el 23 de marzo del 2009, y acá se incorporó la fecha real de terminación del RCC, que fue el 9 de junio del 2009, ocho días posteriores a la fecha programada.

Dentro del análisis, cabe destacar la inclusión de actividades de trabajo, en el programa actualizado (versión 2); tales actividades fueron incorporadas como hitos importantes en la etapa final de la presa:

- **Inicio de pre llenado:** esta actividad se completa una vez que la construcción de la descarga de fondo y torre compuertas haya terminado, y se haya cerrado el paso del río por el túnel de desvío.
- **Inicio del llenado de embalse:** esta actividad se completa una vez que, la toma de aguas, torre compuertas, descarga de fondo, tapón del túnel de desvío y al menos

dos de los tres canales del “Vertedor” puedan operar completamente, ya que como se tiene previsto en la presa (el inicio del embalse en el 2011), se puede comenzar a llenar el embalse, y todavía tener pendiente el desarme de la grúa POTAIN MD100 ubicada en el canal central del “Vertedor” (ver apéndice, plano de taller 012).

Con ello se marcaron las rutas de trabajo críticas, para completar el cumplimiento tanto del pre llenado como del llenado del embalse, las cuales se separaron de la siguiente forma:

- a) Descarga de fondo, toma de aguas y torre compuertas y tapón del túnel de desvío.
- b) Pilares del vertedor, losa cimacio del vertedor y puente sobre el vertedor.
- c) Losa y muros de separación del vertedor y desarme de la grúa de alta capacidad POTAIN MD100 instalada en la losa del “Vertedor”.

En este programa actualizado, además se separa la “Descarga de Fondo” en una sola actividad, ya no dentro del “Vertedor”, como en el programa original, ya que en el programa “Versión 1”, debido a que la “Descarga de Fondo” era el único paso de aguas arriba hacia aguas abajo, la actividad estaba ligada a la construcción del puente sobre el “Vertedor”; con el programa actualizado, el panorama cambió y la “Descarga de Fondo” iniciaba, sin que la construcción del puente hubiera finalizado; esto permitió abrir dos frentes paralelos de trabajo, los cuales fueron la construcción final de la “Descarga de Fondo” y la construcción de los pilares del “Vertedor”.

Gestión de riesgos del sitio de construcción de la presa, ante un fenómeno atmosférico

Tormenta Tropical Alma

La tormenta tropical Alma tuvo su origen en la costa pacífica de Costa Rica (un fenómeno meteorológico así no sucedía hace más de cien años, según el Instituto Meteorológico Nacional), debido a una depresión tropical en las cercanías de la costa de Guanacaste. Este fenómeno atmosférico se dirigió de la zona mencionada rumbo al noreste y siguió por Centro América hacia al norte.

Fue declarada como la primera tormenta tropical del 2008, por el Centro Nacional de Huracanes, el 29 de mayo en horas de la mañana (ver figura 53).

En el “Sitio Presa” del PH PIRRÍS, aparecieron altas precipitaciones, debido al desarrollo de esta onda tropical que fue evolucionando a depresión tropical y, finalmente a tormenta tropical, el 29 de mayo del 2008, provocando condiciones lluviosas que duraron más de 60 horas.

Las consecuencias de esa tormenta en el “Sitio Presa” del PH PIRRÍS, fueron muy graves, ya que provocó deslizamientos y el desbordamiento del río Pirrís y de las quebradas cercanas al proyecto, provocando cuantiosos daños físicos de las plantas industriales y de las instalaciones provisionales.

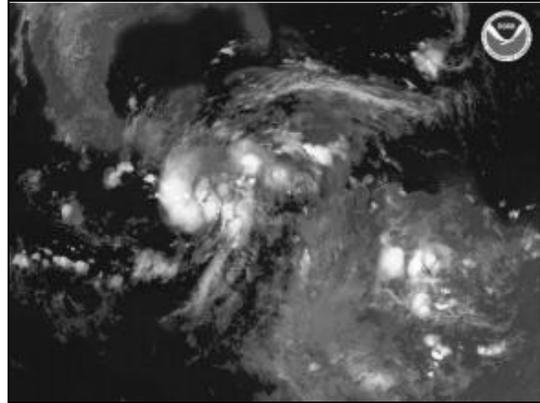


Figura 53. Tormenta tropical Alma, 29 de mayo 2008 (Imagen satelital del Centro Nacional de Huracanes)



Foto 81. Afectación de una quebrada a la planta de RCC, “Sitio Presa”, 29 de mayo 2008

Acciones de mitigación después de la tormenta Alma

Para la definición de las acciones de mitigación, se tomaron como resultado las generadas después de la afectación indirecta, de la tormenta tropical Alma en las obras de “Sitio Presa” del PH PIRRÍS, las cuales se detallan a continuación:

- Definición de los sitios vulnerables ante avenidas, o por afectación directa de quebradas y deslizamientos:
 - a) Plantas industriales (ver fotos 81 y 89).
 - b) Acopios.
 - c) Instalaciones provisionales (ver foto 86).
- Definición de obras de protección del cauce del río principal:
 - a) Muros de protección.
 - b) Diques.
- Modelado de las zonas de afectación ante un rebalse del río sobre la ataguía de protección (ver fotos 82, 87 y apéndice, plano de taller 028).

- Definición de las obras de protección de las quebradas (ver foto 88).
- Definición de planes de evacuación por zonas, en el proyecto, los cuales deben de irse actualizando, de acuerdo con el avance de la presa (ver anexos 01 y 02).
- Definición de la ruta de la banda transportadora de concreto, contemplando los puntos de afectación directa del río (ver foto 84).
- Monitoreo previo de las zonas vulnerables, ante una emergencia producto de las avenidas del río (ver fotos 91 y 92).

- Definición de una comisión de emergencia que lidere, dentro de la presa, los protocolos de evacuación.
- Mantenimiento e identificación de las rutas alternas de evacuación (ver fotos 85 y 90).
- Definición de la maquinaria y equipo, dispuesta por zona de trabajo, en “Sitio Presa”, para mantenerse en caso de habilitar caminos, dragar el río, limpiar quebradas o remover deslizamientos.

Fotos durante la tormenta Alma en “Sitio Presa”



Foto 82. Ingreso del río Pirrís a la fundación de la presa (sobrepasó la ataguía), “Sitio Presa”, 29 de mayo 2008



Foto 83. Estructura de entrada del túnel de desvío, a punto de llegar a su máxima capacidad, “Sitio Presa”, 29 de mayo 2008

Fotos después de la tormenta Alma en “Sitio Presa”

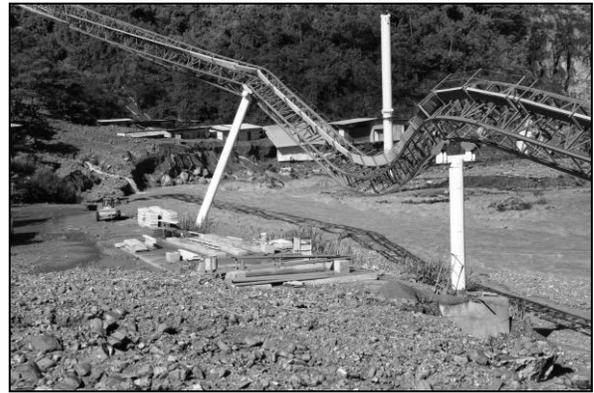


Foto 84. Daños causados a la banda transportadora de concreto, “Sitio Presa”, 30 de mayo 2008



Foto 85. Colapso del puente principal en “Sitio Presa”, 30 de mayo 2008



Foto 86. Instalaciones provisionales destruidas por deslizamientos, "Sitio Presa", 30 de mayo 2008



Foto 87. Fundación de la presa inundada, 30 de mayo 2008



Foto 89. Daños ocasionados en la planta de RCC, "Sitio Presa", 30 de mayo 2008



Foto 88. Vado colapsado por la salida de una quebrada, "Sitio Presa", 30 de mayo 2008



Foto 90. Tramos de carretera colapsada en la ruta de acarreo, San Carlos de Tarrazú, 30 de mayo 2008



Foto 91. Dañados ocasionados por la tormenta Alma: recorrido aéreo realizado por Astaldi S. p. A. (Vista de la planta de RCC, "Sitio Presa", 8 de junio 2008)



Foto 92. Dañados ocasionados por la tormenta Alma: recorrido aéreo realizado por Astaldi S. p. A. (Vista de la fundación de la presa, 8 de junio 2008)

Análisis de resultados

Procesos de producción

La identificación de los procesos de producción previos al inicio de la construcción de la presa de RCC del PH PIRRÍS, se obtuvo con base en las líneas de trabajo críticas, durante la producción del concreto y sus agregados. Esto permitió observar la ruta de producción del RCC, la cual se inició en la explotación del tajo, pasando por el triturador primario, después al triturador secundario y por último a la planta de producción de concreto, para culminar con la colocación en el cuerpo presa.

Explotación del tajo

Parte fundamental de la buena planificación, previa al desarrollo de un proceso de explotación de tajo, es la definición clara de las proyecciones de volumen por explotar, de manera que pueda clasificar las necesidades de concreto en obra, de acuerdo con las siguientes variantes:

- a) Volumen de concreto.
- b) Resistencia del concreto.
- c) Diseño de la mezcla del concreto.
- d) Método de colocación.

Este proceso de definir proyecciones de consumo de concreto en obra, debidamente actualizadas y clasificadas en un sólo cuadro de datos (cuadro 1), de forma periódica, permitirá balancear adecuadamente la explotación del material, y anticiparse ante cualquier incremento o cambio drástico en los requerimientos de la presa.⁶¹

Además, el manejo de un único cuadro de volúmenes, le permitirá al encargado del tajo establecer un punto de control junto a los encargados en la presa, y así manejar cualquier cambio en las variantes anteriormente mencionadas.

La definición de las proyecciones de consumo de concretos, permitirá establecer controles más estrictos sobre los ciclos de trabajo y rendimientos de explotación del tajo, para prever cualquier cambio en la planificación de los procesos de voladura, extracción y acarreo del material.

Por ello una parte importante del proceso de explotación del tajo, es la definición previa del organigrama de trabajo, para establecer claramente las dependencias de apoyo, así como la interacción con los otros frentes de producción, como lo son los trituradores y las plantas de concreto. Adicionalmente, para definir la secuencia del flujo de necesidades de información de esos frentes, y la definición clara de actividades, para que no se traslape o se duplique la generación de información.

En el proceso de acarreo de material a la escombrera, es importante definir con anticipación otros destinos para ese material (caminos, rampas de acceso, rellenos, diques), para evitar que en futuros procesos se tenga que extraer el material ya tratado y compactado, dentro de la escombrera, debido a que los volúmenes necesitados superan los que se tienen en los acopios de material clasificado en el tajo.

Para el manejo final del tajo, el definir previamente el modelo del tajo ya explotado, permitió en las obras de la presa del PH PIRRÍS, aprovechar esa zona para colocar materiales de relleno excavados, en vez de llevarlos hasta la escombrera que se ubicaba a una distancia mayor que la del tajo, lo que implicaba un mayor tiempo y costo en el acarreo.

Producción de agregados

De acuerdo con los resultados obtenidos, en las premisas de trabajo por considerar en el proceso de producción de agregados, se analizó como primer punto importante la ubicación de los trituradores principales en "Sitio Presa", como lo

son el triturador primario y secundario, y cuya ubicación debe de garantizarse en zonas que no se encuentren expuestas directamente a las avenidas del río, y que además contemple las obras de protección necesarias como diques y muros, para asegurarlas ante posibles avenidas. Además que esos trituradores se aseguren, en la medida de lo posible lejos de las zonas inundables, ante un *pre llenado* (ver marco teórico, definiciones).

La definición del organigrama de trabajo previo al proceso, permite establecer la guía de trabajo para los controles, tanto en el proceso de producción, como en la interacción tanto con el encargado del tajo como con los encargados de obra en la presa, para establecer las prioridades de consumo, y que estas sean integradas en presencia de los encargados de la línea de trabajo, que implica el material desde que se extrae hasta que se coloca en obra.

Al igual que lo es para la explotación del tajo, el definir las prioridades y la secuencia de consumo, dentro del programa de obra (cuadro 1), permite adelantarse ante cualquier incremento de volúmenes, producto de los cambios de diseño ya sea por cambios estructurales o de mezcla de los concretos.

La definición de las obras adicionales de consumo de agregados, como las que se obtuvieron de la presa, es importante para que sean contemplados y proyectados al inicio del proceso de trituración, ya que el mantenimiento de caminos, estabilización de taludes, pérdidas en los acopios producto de lluvias, etc., comprenden importantes volúmenes de afectación a las cantidades de agregado dispuesto para producir y entregar en los frentes de trabajo de la presa.

En las obras presa del PH PIRRÍS se obtuvo que la producción previa al arranque de la presa, de un 30% a un 50% del total de agregado, permitió mantener un flujo continuo de agregados de acuerdo con los requerimientos máximos de concreto RCC necesarios en la presa, y además mantener una holgura en la producción, debido a las paradas en los trituradores, producto de las averías y labores de mantenimiento de los equipos.

El establecimiento de las proyecciones de consumo con todas sus variantes y una estructura de trabajo previa, permitió en las obras de la presa del PH PIRRÍS, poder controlar los ciclos de trabajo y establecer los programas de acción,

para definir los tipos de agregados en los que se requieren incrementar las producciones, que en el caso de las obras de la presa del PH PIRRÍS, fueron los finos presentes en las arenas, por lo que se tuvo que implementar impactores de eje vertical, para compensar la cantidad de finos faltantes y como un reproceso, para aprovechar los excedentes de gravas en la producción de agregados, ya que pueden alimentarse hasta con gravas de 3 pulgadas.

Producción de concreto RCC

La ubicación de la planta deberá estar en una zona segura ante una crecida del río, ya que la planta, además de ser parte de la etapa crítica de producción, representa una instalación vital en el proceso de colocación de RCC de la presa; por ello es importante que, al igual que los trituradores, esté lejos de la zona de *pre llenado*, a diferencia como sucedió en las obras de la presa del PH PIRRÍS (ver apéndice, plano de taller 028).

Al igual que en la explotación del tajo y la producción de agregados, la definición de un organigrama previo, dentro del proceso de producción de concreto, es aún más importante debido a la mayor cantidad de actividades de trabajo y control, tanto en la planta de RCC como en la planta de concreto convencional. Al dividir el organigrama de trabajo, en las principales actividades y sub actividades de trabajo, permite desglosar mejor los controles y, además, crear los canales de comunicación que deben interactuar con los frentes de suministro, como lo son los de producción de agregado y cemento, así como los encargados de la colocación de los concretos en la obra.

La definición de la capacidad de almacenamiento de silos en la planta es fundamental, en el proceso previo de arranque de cualquier presa, ya que el RCC, al ser un proceso de trabajo continuo, debe de contemplar las colocaciones máximas semanales de RCC en la presa (ver anexo 04), por lo cual es importante definir con anterioridad un almacenamiento que sirva de holgura para las futuras producciones. Con ello se permite establecer las necesidades de más o menos silos para el proyecto y los factores que definieron esa capacidad de almacenamiento.

En las obras de la presa del PH PIRRÍS fueron: la cantidad de viajes con cemento por semana, las producciones máximas esperadas que puede dar la planta de RCC, y las tasas de colocación de RCC en la presa.

La definición de una línea (banda) de transporte de agregados, que no implique el transporte con vagonetas, desde el triturador secundario hasta la planta de producción de concreto, disminuye el ciclo de trabajo y el costo. Esto significa mantener una banda transportadora que lleve el agregado producido en el triturador, directamente a la planta de concreto, así como una alternativa de espacio, dentro de las tolvas de agregados en la planta de concreto, en caso de que una línea de transporte de agregados entre en avería, para que el proceso de traslado de agregados no se detenga.

El aprovechar la construcción de la ataguía y los rellenos de prueba, para calibrar y medir la producción de la planta de RCC, y con ello enumerar las causas más frecuentes de averías o equipos que se deben respaldar dentro de la planta, así como ensayar los sistemas de enfriamiento de agregados, los cuales si no se logran regular adecuadamente, pueden convertirse en puntos críticos en las condiciones de trabajo, tal y como sucedió en la construcción de la presa del PH PIRRÍS.

El programa de mantenimiento de la planta, programado con los ciclos de colocación de concreto, busca el poder establecer jornadas de trabajo que respeten los tiempos de reparación y ajustes dentro de la planta; esto para definirle previamente, a los encargados de colocar concreto en obra, los días correspondiente para mantener los equipos de la planta, ya que si no se respetan esas jornadas de mantenimiento, programadas, la planta, ante producciones máximas, podría caer inesperadamente en averías que se prolonguen por semanas, y afecten fuertemente el proceso continuo de colocación de RCC.

La definición de los sitios para aprovechar el concreto desechado, permitió en el PH PIRRÍS que se tuviera claro dónde colocar el concreto rechazado, durante los procesos de control de calidad en la presa.

Transporte de materiales al sitio presa

Una vez analizado el proceso de construcción de la presa, se obtuvo que teniendo en cuenta las condiciones de los accesos hacia la presa, el acarreo de cemento y transporte de concreto, corresponden a la etapa crítica del proceso, debido a que es el concreto, el que incorpora el mayor volumen de trabajo dentro de la obra.

Acarreo de cemento

La definición previa de los horarios de transporte de cemento, implica contemplar la hora final de despacho de cemento en la planta cementera, los horarios permitidos para el trasiego de camiones graneleros en las zonas residenciales de la ruta de acarreo, así como la definición de las zonas de parqueo para los camiones que no puedan llegar dentro del horario permitido en la ruta de acarreo.

El proyectar el flujo de consumo de cemento, es lo que permitió establecer en las obras de la presa del PH PIRRÍS, la definición de los programas semanales de transporte de cemento, contemplando aspectos importantes como el horario, mencionado anteriormente. Además permitió establecer el flujo de camiones graneleros, necesarios para el transporte de todo el cemento requerido, así como para el control de la salida de esos camiones de la planta cementera y el ingreso al proyecto.

Al control de la ruta de acarreo, correspondió ubicar personas (vistas), en los puntos más complicados de la ruta (curvas peligrosas, curvas con pendientes pronunciadas o zonas residenciales), para controlar y monitorear la adecuada circulación de hasta 45 viajes de camiones graneleros diarios, en una ruta que comprendía desde Cartago hasta el proyecto, en San Carlos de Tarrazú.

La capacidad de almacenamiento de silos fue fundamental en el proceso de acarreo, ya que el monitoreo permanente de la cantidad de cemento en silos con que se cuenta, permitió ir reduciendo o aumentando los viajes de cemento, de acuerdo a las exigencias en la obra.

El consumo promedio, en los meses más críticos fue de 70 toneladas, lo cual significaba estar descargando 4 camiones graneleros por

hora, para mantener el ritmo de colocación de RCC en la presa.

Contar con 52 camiones graneleros con una capacidad promedio de 16.5 toneladas, es el producto de un horario de carga en la planta cementera (Cartago) de 12 horas por día, con una tasa de despacho de 4 camiones por hora, debido a la necesidad de producción en el proceso de colocado de RCC, y mantener con ello los 45 viajes promedio diarios, de los camiones graneleros hacia la presa.

Se estableció un orden y control con horas específicas de carga de cada camión, mediante supervisión de un inspector del ICE destacado en la planta cementera, el cual informaba durante el día el desarrollo de la carga y su despacho.

Respecto a los problemas más frecuentes, presentados durante el proceso de acarreo de cemento, se consideró la importancia, en la producción de concreto, tener una holgura en el almacenamiento del cemento en silos, para atender el suministro de cemento cuando la planta cementera cae en avería, así como los mantenimientos programados que la planta tiene que hacer.

Para la mitigación de problemas asociados con el acarreo del cemento, el actualizar semanalmente las proyecciones de consumo respecto a la existencia en silos, permitió mantener un control programado del flujo de camiones, para evitar aglomeración de camiones graneleros en el proyecto, y a su vez mantener una comunicación directa con el proceso de colocado del RCC, para mantener una tasa de colocación que se encontrara dentro de las capacidades de suministro de cemento, y así se mantuviera el proceso de continuidad en la presa.

Banda transportadora de concreto

El establecimiento de zonas de fácil acceso, para el mantenimiento de la banda transportadora, es lo que permite en producciones altas de concreto, evitar detener el proceso, por la formación de "cuellos de botella" o sectores que por su difícil acceso complicaran la limpieza de la banda con equipo y maquinaria; estas son las zonas donde

el concreto generalmente se aglomera, o donde la cinta de la banda llega a romperse.

La definición de la trayectoria de la banda transportadora, contra avenidas del río, implica el marcar las zonas adecuadas, donde la banda no será vulnerable ante eventuales desbordamientos del río. En este caso, se analizan cada uno de los factores que deben tomarse en cuenta:

- a) **Ubicación de los postes:** se pudo observar antes y durante la construcción de la presa, que estas estructuras debían de contemplar: el estudio histórico del cauce del río, las zonas de impacto directo de su flujo, así como las zonas que debido a los procesos de trabajo, en el ingreso a la zona de la presa, se habían convertido en plataformas de relleno. El tener en cuenta el estudio histórico del cauce del río, permite observar los puntos y zonas que se verán afectados ante una crecida, debido a que el río buscará su cauce natural. De ahí se desprende la ubicación de las zonas de impacto directo del río (puntos sobre las márgenes del río), para ubicar los postes de la banda en la margen contraria de esas zonas que se verán afectadas.
- b) **Diseño y construcción de fundaciones:** son fundamentales a la hora del montaje de la banda transportadora, ya que la definición correcta de zonas, que contemplen sitios de roca sana de fundación, son procesos de prevención y mitigación de efectos, ante eventuales desbordamientos ocasionados por el río o quebradas que afecten a la zona donde se ubique la banda.
- c) **Obras de protección:** adicional a los dos factores anteriores, estas obras son parte importante en el montaje de la banda, ya que su función, además de contener y desviar al río de los postes, también es la de asegurar que el proceso de colocación de RCC no se detenga.

El alcance de la banda transportadora, para la colocación del RCC, debe de ir de la mano con la trayectoria que proteja a los postes y la banda del posible desbordamiento del río. Esto quiere decir que, además de asegurar su buen funcionamiento ante condiciones atmosféricas adversas, esta banda debe de garantizar el alcance a toda la presa, tanto en distancia vertical

como en horizontal. La revisión de las pendientes máximas de la banda, capacidad de altura de los postes de la banda, el punto de llegada de la banda dentro de la presa y el considerar los esquemas de trabajo de colocación de RCC (ver apéndice, plano de taller 008), en elevaciones superiores, donde ya interviene la construcción del vertedor, son factores que marcan el proceso de selección, para poder el sistema de trabajo en la construcción de la presa.

El programa de mantenimiento de la banda transportadora se analizó durante el proceso de funcionamiento; es importante que esta revisión vaya paralela al programa de mantenimiento de la planta de producción de concreto, el que a su vez debe ser coordinado con el proceso de colocación del RCC en la obra, para determinar las paradas estratégicas de reparación, sustitución y limpieza de la banda, de manera que este proceso afecte lo menos posible al colocado de RCC en la presa, así como tener que enfrentar contaminación o desperdicio del concreto en obra, producto de las fallas en la banda, lo que además acarrea, periodos extensos sin producción, debido a que el proceso se detiene, para diagnosticar alguna falla en el sistema.

La definición del proceso de trepado de los postes que sostienen la banda, se analizó contemplando el proceso de trabajo de la banda, en la presa del PIRRÍS, a alturas superiores a los 60 metros de altura, donde el proceso se vuelve complicado, y si los postes telescópicos con que cuenta la banda no tienen un adecuado esquema de trabajo, muchas veces se puede tener un trabajo costoso y que dura mucho tiempo, lo que provoca que el proceso de colocación de RCC, defina otras alternativas, mientras la banda no se pueda usar por motivos de alcance en elevación, y lo que puede ser peor, el no poder colocar más concreto, debido a que el punto donde llega la banda a la presa, aún no se puede subir, debido a que los postes no han podido llegar a su elevación de trabajo; en esta situación el proceso del RCC se paraliza completamente. Es importante también por esto, que dicho proceso de trepado de postes, se programe con paradas en el colocado de RCC, producto de la construcción de las galerías de drenaje, o por mantenimiento de la planta de concreto.

Control de consumo de materiales

El análisis para el control de consumo de materiales, se hizo con base en los materiales fundamentales, que se ensayaron y usaron, antes y durante el proceso de construcción de la presa: los agregados, el cemento y la producción de concreto (analizados anteriormente), junto a la formaleta prefabricada y el acero de refuerzo.

Formaleta prefabricada de paramentos

La modulación de la formaleta antes del arranque de la presa permitió, durante la colocación del RCC, llevar un control tanto del gasto como de las proyecciones de consumo de esa formaleta. La modulación de la formaleta prefabricada de los paramentos, tal y como se muestra en el plano de taller 005 (ver apéndice), consideró factores importantes como lo son las variables de construcción, en zonas como el vertedor de excedencias y, la toma de aguas y torre compuertas, las cuales son estructuras adosadas a la presa, que implican cambios en la inclinación del paramento y en el ritmo de montaje y desmontaje de la formaleta. Así también en las zonas cercanas a las márgenes, donde se forman irregularidades.

En el análisis previo al arranque de la presa, también es importante, aparte del ritmo de colocación de formaleta, tomar en cuenta las cuadrillas de trabajo destinadas a las labores de su montaje y desmontaje, para cumplir con las exigencias de avance, en el retiro de formaleta ubicada a más de 4 capas de 60 cm, abajo del nivel de colocado de RCC. Este análisis es para tomar en cuenta las zonas superiores de la presa, donde el volumen por cada capa de 30 cm de RCC disminuye (debido a la zona trapezoidal del cuerpo de la presa) y el área de formaleta se incrementa, provocando que la formaleta sin retirar llegara a más de 10 niveles de 60 cm por debajo del colocado de RCC, lo que genera consideraciones importantes en la disminución de los usos para todos los elementos que conforman la formaleta prefabricada, utilizada en la presa del PH PIRRÍS.

De acuerdo con los cuadros 2 y 3, mostrados en los resultados, los elementos que registraron una gran cantidad de desperdicio, fueron los *pasadores de seguridad* y los *pernos conectores*, debido a que una vez desencofrada la formaleta, el concreto, la corrosión y la humedad en la mayoría de las ocasiones, ocasionaba que hubiera que cortarlos para poder limpiar la formaleta y reutilizar los elementos que estuvieran en condiciones de uso. Luego, a la hora de intentar desmontar las formaletas de los paramentos, los pasadores y pernos saltaban, perdiéndose la mayoría de las veces, por lo que en muchas ocasiones, donde se colocaba pasadores, se tuvo que colocar tornillos, producto de la poca existencia de pasadores y la demanda de esta formaleta en los paramentos de la presa.

La *viga Doka H20* fue otra que presentó bastante desperdicio, debido a que en muchas ocasiones se tuvo la obligación de cortarlas, por la necesidad en obra para armar nuevas formaletas, con medidas distintas a la estándar (de 4 m a 8 m); además, a la hora de desencofrar se quebraban.

Los *rieles multiuso*, a pesar de ser de acero, en muchas ocasiones se tenían que cortar al igual que la *viga Doka H20*, por la misma necesidad de armar formaletas en un tamaño distinto.

Los *tornillos de unión* sufrían problemas a la hora del desencofrado, ocasionados por la cantidad de concreto que se acumulaba entre las *Vigas Doka H20*, y en la mayoría de casos, había que desecharlos.

En general, los usos para cada elemento estuvieron bajos; debido a que en el momento de hacer este análisis, faltaban por contar, gran parte de la formaleta que aún estaba pendiente de retirar del cuerpo de la presa. Por ello los datos obtenidos en el cuadro 2 y 3, son para considerar en casos críticos de colocación de formaleta, donde las áreas sin retirar son bastantes altas.

Acero de refuerzo

Para el esquema de cálculo y control de acero de refuerzo (ver figura 31), presentado en los resultados, se analizó cada uno de los puntos mencionados en ese esquema:

- a) **Cálculo de acero estructural y no estructural:** se analizó que el cálculo de los aceros de refuerzo de cada una de las estructuras que componen la presa, es importante hacerlo de manera separada: el acero estructural obtenido de los planos oficiales de diseño y el acero no estructural, el cual es definido por el tipo de estructura que se construye, así como el modelo de colocación de concretos, que define los tipos de soportes, guías, arriostres, barandas, escaleras, etc., y demás elementos para colocar y soportar el acero estructural. Posterior al cálculo, es importante clasificarlo por tipo de varilla, para llevar posteriormente el control detallado del consumo real frente a la proyección teórica de consumo programado. Para el cálculo de acero estructural se obtuvo que es importante delimitar y actualizar constantemente los porcentajes reales, producto de los desperdicios en el doblado de acero, así como la comparación de los porcentajes de acero no estructural que se está utilizando en obra, ya que de acuerdo con lo observado en las obras presa del PH PIRRÍS, estos porcentajes varían fuertemente según el tipo de estructura y el método utilizado para su construcción, y pueden incidir fuertemente en el gasto programado de acero, si no se establece un control estricto en la obra.
- b) **Elaboración de cartillas de despiece:** este proceso consiste en la elaboración de modelos en 3D, mediante el programa Autocad 2010 de las diferentes estructuras de la presa (ver apéndices, planos de taller 019, 022, 025 y 027), donde se dibuja cada uno de los aceros de refuerzo que la componen; esto para mantener un control y un cálculo más preciso del acero estructural durante la construcción de la obra. De esta forma, en el taller de doblado se puede controlar que todo acero que no sea solicitado a través de cartilla de despiece, es acero que será utilizado como no estructural. Los planos de taller para la colocación de acero (ver figura 33) son esquemas que, conjuntamente con la cartilla de despiece (ver figura 34), permitieron a los encargados en obra, la colocación correcta de las piezas requeridas en cada estructura, y con ello optimizar el gasto de acero.

- c) **Cuantificación de cambios:** con el análisis descrito de los dos apartados anteriores, se pudo observar, durante el control de gasto del acero, que haberlo tenido debidamente clasificado por estructura, permitió generar con más detalle la cuantificación de cambios que incrementarían el consumo de acero, producto de cambios en los diseños estructurales, y a su vez calcular el impacto de esos porcentajes adicionales de acero, con anticipación, y no cuando el acero se hubo gastado, y un proceso de fabricación de nuevas cantidades de varilla de refuerzo, pudiera generar atrasos o incrementos imprevistos en el costo de la estructura.

Sitios de obras provisionales

Con respecto a las obras provisionales se pudo analizar que, previo al inicio de la colocación del RCC, la delimitación y acondicionamiento de las plataformas de apoyo anexas a la presa, requirió de un análisis en conjunto tanto de los ingenieros como de los técnicos encargados de cada frente, para poder establecer las necesidades que deberían apoyar tales plataformas, como lo son: ubicación de materiales, montaje de estructuras metálicas, ubicación de grúas, montaje de las líneas de suministros básicos como lo son el agua, el aire, la electricidad, etc., además de la ubicación de los mismos, en planos de taller, para definir posteriormente al arranque del colocado de RCC, según esas obras provisionales iban a avanzar con respecto al adelanto de la presa.

Además esas obras provisionales, fueron coordinadas no sólo con la presa, sino con la construcción de las otras obras civiles, como la “Toma de Aguas”, “Descarga de Fondo”, “Vertedor”, etc., para optimizar y aprovechar cada instalación que fuera construida, como las oficinas del personal, las bodegas de almacenamiento de materiales, los talleres (carpintería, soldadura, metalmecánico, eléctrico), comedores, dispensarios, etc., donde el objetivo primordial, al ubicar cada una de esas instalaciones provisionales, fue el variar lo menos posible de posición, respecto al avance de obras, y que estas a su vez fueran de fácil acceso para todos los frentes de trabajo.

Los caminos de acceso fueron otro factor importante considerado en la construcción de las

obras provisionales, previo al inicio de la presa, ya que la definición de los accesos secundarios, tanto en las márgenes de la presa, como al proceso de colocado, permitieron acceder a diferentes alturas a la presa, lo que genera un panorama más amplio en los procesos de construcción, ya que con ello se permite mejorar los alcances de ingreso de equipos y maquinaria, así como de materiales como aceros de refuerzo, formaletas, tuberías metálicas, entre otros.

Por último, en las obras provisionales, otro de los elementos que conformaron parte importante del proceso de planificación, previo al inicio de la presa, fueron el modelado de las diferentes opciones que se deben de tener en cuenta, para acceder con el personal a los diferentes frentes de trabajo en la presa (ver apéndice, plano de taller 009), como lo son los ascensores provisionales, las escaleras verticales e inclinadas, las plataformas suspendidas y los andamios, pues la ubicación de esos elementos de acceso, fueron durante el proceso de construcción de la presa, vitales en la optimización de los procesos de construcción; por eso la ubicación previa en esquemas y planos de taller en la obra, fueron importante para descartar otras opciones de acceso que pudieron ser más costosas o poco funcionales, debido a sus procesos de fabricación y montaje, como lo son ascensores de alta capacidad para personal a través de los paramentos o las márgenes de la presa.

Ejecución de obras civiles

Los resultados de la ejecución de obras civiles, previas al proceso de arranque de la construcción de la presa, contempló la clasificación básica de los procesos y sub procesos presentados antes y durante la ejecución de las obras, así como los principales frentes de trabajo por definir, durante la planificación de inicio de una actividad como lo es la colocación del RCC.

Procesos y subprocesos en la ejecución de la presa

Los procesos y sub procesos, identificados y mostrados en la figura 35, de resultados, son producto de la definición de la estructura básica

que se dispuso previamente en la planificación (ver figura 10), y los procesos previos de producción, así como los sub procesos que definieron trabajos complejos, tanto en plazo como en logística de construcción, durante la ejecución de las obras en la presa.

En la figura 35 se puede apreciar, en la primera columna, los principales procesos de apoyo a la construcción de la presa, donde además de los procesos previos de producción (explotación del tajo, producción de agregados y concretos) intervienen procesos de construcción que forman parte de la etapa final de la obra de la presa, como lo son montaje de instalaciones electromecánicas, las obras de urbanización, construcción del tapón del túnel de desvío y el despeje del sitio en la obra. Los otros procesos como la construcción de bloques de margen, perforación e inyección, y colocación de instrumentación, se realizaron durante el proceso de construcción de la presa.

En las siguientes 6 columnas de la figura 35, se describen los procesos principales por definir previo al arranque de la construcción de la presa, y los sub procesos correspondientes a cada uno, definidos de acuerdo con las principales etapas que se desarrollaron durante la construcción de la presa y que representaron hitos importantes dentro del avance del programa general de trabajo.

Ubicación de grúas torre

Una de las primeras acciones que se analizó, fue la definición previa, con los diseñadores de la presa, de las zonas estructuralmente permitidas, para la cimentación de grúas torre dentro del cuerpo de la presa, para poder modelar los procesos de construcción y la ejecución de cargas significativas. Esto debido a que la decisión entorno a una grúa torre, requiere analizar muchos factores de diseño, construcción, tiempo y costo los cuales, si no se desarrollan con el tiempo suficiente, en una etapa previa al arranque de las obras, se terminan realizando sobre la marcha y, por la necesidad de las mismas en la obra, se pueden omitir muchos de los factores mencionados.

El establecimiento de los rangos de trabajo de la grúa, así como de los sitios específicos que cubre la grúa, permitió, dentro de las obras de la presa del PH PIRRÍS, poder

modelar las posibles ubicaciones de cada una de las grúas utilizadas dentro de la obra, mediante el diseño de planos de taller, donde se incorporaran características físicas como la altura, el alcance horizontal y las capacidades de trabajo requeridas, y con ello definir claramente los procesos a los cuales las grúas seleccionadas, servirían de apoyo en las labores de construcción.

La realización de los planos de taller de las grúas por zona, permitió en las obras de la presa, definir previamente la tabla de equipos y maquinaria a izar, para medir las capacidades y las plataformas tanto de levantamiento (ver apéndice, plano de taller 016) y de recepción de cargas, para la optimización de los ciclos, dentro de los frentes de trabajo.

Se analizó que el movimiento de formaleta, debe de evaluar el apoyo con grúas móviles, lo cual libera a las grúas torre, para zonas donde se manipularán módulos de formaleta más pesados, como en el “Vertedor de Excedencias”.

La definición del proceso de colocación de concreto, así como el diseño de la mezcla por utilizar, fue importante en las obras de la presa, para definir la funcionalidad de colocar el concreto con balde, como se hizo en el bloque de fundación de la contra presa.

El establecimiento y construcción en sitio, de plataformas auxiliares para el montaje y desmontajes de las grúas, fue fundamental para poder seleccionar las grúas móviles para desarrollar el proceso de pre armado y montaje de la grúa torre.

Si se acepta que el factor crítico en una obra de este tipo, es el área de trabajo tan amplia, la definición de una grúa torre que apoye varias estructuras al mismo tiempo, permite definir un tiempo de ejecución más óptimo; es ahí donde está la importancia de la definición de los plazos por obra, para tener presente las etapas en donde dos o más estructuras se van construyendo paralelamente, y las mismas se puedan apoyar con la misma grúa torre (por ejemplo la colocación del RCC y la construcción del “Vertedor de Excedencias”).

La interacción de las grúas torre en las obras de la presa, fue un factor muy importante dentro del proceso, desarrollado mediante un modelaje de las grúas en esquemas de trabajo, complementado con un plan de trabajo y de seguridad en obra, para la adecuada

coordinación de las mismas. Esta interacción no sólo fue tomada con base en las otras grúas torre, sino también respecto a las grúas móviles, ya que al ser una presa que sube varios metros cada semana, la definición de las zonas de trabajo y utilización de las mismas, resulta importantísimo para evitar accidentes.

El aseguramiento de la visibilidad del operador, en conjunto con la comunicación del operario en tierra, va de la mano también con las consideraciones climáticas y de concentración de equipos, maquinaria e incluso trabajos en los paramentos contrarios a la ubicación de la grúa torre, donde no tiene visión el operador de la grúa.

La definición de la longitud de la pluma, permitió analizar, según lo observado en las⁹ obras, que la instalación de la pluma puede no hacerse en toda su longitud, ya que en el caso de una grúa torre, en el cuerpo presa su alcance estará limitado al apoyo que le pueda dar a los paramentos tanto aguas abajo como aguas arriba, por lo que haber combinado esa grúa, con grúas torre en las márgenes, le permite concentrarse en cargas específicas, donde al disminuir la longitud de pluma pueda colaborar al aumento de capacidad de la grúa, y a mejorar la maniobrabilidad de las cargas. En las obras de la presa, utilizar una pluma de 70 m en vez de una de 80 m, permitió aumentar la capacidad de la grúa POTAIN MD 1100 instalada, en casi 5 toneladas, lo que en este caso benefició para el proceso de instalación de elementos complejos, como las compuertas radiales y la ataguía del "Vertedor de Excedencias".

La definición de la complejidad del montaje y desmontaje de la grúa torre instalada, es muy importante previo al programa de trabajo, ya que en las obras de la presa del PH PIRRÍS, la grúa POTAIN MD1100 instalada en la losa del vertedor, agregó un proceso más por considerar dentro del programa de trabajo que se tiene al cierre de la obra, y cuyos plazos deben de ser tomados en cuenta respecto a las demás actividades de trabajo de la presa.

Colocación de RCC

El levantamiento con topografía de los niveles finales del concreto de fundación en la presa (ver apéndice, plano de taller 001), permitió definir, previo al arranque de la colocación de RCC

encima del concreto convencional de fundación, evaluar las condiciones finales de la elevación teórica de inicio de la presa en RCC, para definir la construcción de drenajes o los métodos de colocación del RCC, ya que al presentar irregularidades en las elevaciones, se debían de definir zonas donde las capas de 30 cm de RCC debían de ser mayores o menores, según las condiciones y tolerancias de colocación, encontradas en las diferentes zonas de la fundación.

El levantamiento y evaluación de las condiciones de los concretos colocados en los estribos de la presa, es una actividad que se debe de definir y realizar previo al inicio del RCC, para evitar la ejecución de esta actividad durante el proceso de colocado del RCC, ya que se expone el proceso a ser detenido por las reparaciones que se realizan en los taludes, que se encuentran sobre la actividad de colocación de RCC, dejando expuesta esta actividad, a la caída de escombros y herramientas, que aumentan los riesgos de accidentes y otras condiciones.

La definición de los sitios para la colocación de los suministros básicos en la presa, como: las redes de agua, aire, electricidad, lechada, iluminación, son instalaciones que tuvieron que quedar bien definidas, previo al arranque del proceso de colocación del RCC, ya que las mismas deberán de ir con el colocado hasta el final, y sus cambios de posición deben de ser lo más ágiles posible, para evitar detener el RCC por fallas en alguna de estas redes de suministro.

La definición previa del diseño de anclaje, para la formaleta prefabricada de los paramentos, es fundamental para que en la presa del PH PIRRÍS, se garantizara el adecuado alineamiento y fijación de la formaleta, que iba encofrando las gradas de los paramentos. Por ello, durante los relenos de prueba desarrollados previo al arranque de la presa, fue fundamental que los anclajes de formaleta, fueran ensayados bajo las condiciones reales de diseño de mezcla y en condiciones críticas de colocación, para asegurar el proceso de encofrado, que durante la colocación de RCC, requiere un alto porcentaje de trabajo.

El análisis de los diferentes sistemas internos para la distribución de concreto en la presa, como el *Crawler* o el *Swinger*, permitió en las obras de la presa del PH PIRRÍS, mediante planos de taller (ver apéndice, plano de taller

006), establecer los rangos de alcance para cada sistema, así como las limitaciones que podrían enfrentar en diferentes etapas de construcción en la presa, como la interferencia con la construcción de los pilares del “Vertedor”, o como en las elevaciones finales del RCC. Durante el proceso de colocado de RCC, se pudo observar que el *Crawler* estuvo limitado en gran parte del tiempo, en su alcance sobre las márgenes de la presa, cuando esta superó la elevación 1126 msnm, y además que en la etapa de construcción del “Vertedor”, el *Crawler* quedó dentro de la zona de pilares; de ahí que a partir de la elevación 1185 msnm no pudo seguir colocando el RCC. Respecto al *Swinger*, su implementación hubiera sido una buena alternativa, pero esta implicaba la colocación de bandas adicionales una vez que se llegara a la zona de los pilares del “Vertedor”, esto ya que su rango de acción (ver plano de taller 005), se veía limitado en el momento que la presa se partiera en dos bloques, una vez superada la elevación 1185 msnm.

La evaluación de la maquinaria a través de un simulacro de trabajo (ver apéndices, planos de taller 004, 007 y 008), permitió poder medir, a través de un simulacro con vagonetas cargadas de agregado, el proceso de colocación de RCC en ausencia de la banda transportadora de concreto, tomando en campo los ciclos de vagonetas desde la planta de RCC hasta la presa, así como la medición de los tiempos de espera de las vagonetas en la zona de carga en la planta de concreto, en la zona de paso a través de la “Descarga de Fondo”, en la zona de lavado de llantas, en la rampa de acceso y, por último el tiempo de descarga y salida de la vagoneta.

La definición del modelado de trabajo de la maquinaria dentro de la presa, para el proceso de colocado, fue lo que guió el arranque y secuencia de colocación de las calles de RCC. Los esquemas de trabajo desarrollados para este documento, muestran las plantas de trabajo básico y su avance (ver apéndice, plano de taller 008), la cual se mantendrá hasta el final del proceso de colocado de RCC, respecto a las dimensiones en ancho de calles y secuencia de avance. Lo único que varió durante el proceso fueron los métodos de descarga de RCC, que se analizarán más adelante, así como las longitudes de las calles, que fueron aumentando conforme iba subiendo la Presa, y por último la colocación de RCC en dos bloques, cuando interfiriera en el

proceso, la construcción de la zona de pilares del “Vertedor de Excedencias”.

La definición de los accesos al sitio de colocación de RCC, durante el proceso previo al arranque de la presa, permitió manejar diferentes opciones en los procedimientos de construcción, esto se basa en la posibilidad de contar con diferentes alternativas de ingreso al colocado de RCC, tal y como se dio en la presa del PH PIRRÍS, de manera que los accesos no se limiten solamente a las márgenes, sino que se desarrollen accesos tanto por aguas arriba como por aguas abajo de la presa.

En el proceso de planificación previo al inicio del RCC, se pudo observar, que la definición de varias alternativas de colocado de RCC dentro de la presa, son importantes para poder anticipar cualquier necesidad, de comenzar a implementarlas, ya sea al inicio, en medio o al final de la colocación del RCC. Por ello, aunque durante la planificación de la presa del PH PIRRÍS, se había considerado colocar todo el RCC con banda, se tuvo que considerar las siguientes alternativas:

- a) **Vagonetas y rampa de acceso:** en el PH PIRRÍS se tuvo que implementar al inicio del proceso de colocado de RCC, debido a que la instalación de la banda aún no estaba lista, ya por los problemas en cuanto a averías que presentó durante el proceso, ya por la necesidad de no detener el proceso de colocado de RCC, que provocara el tratamiento de numerosas juntas frías en la presa. Este sistema se utilizó hasta la elevación 1150 msnm, y la rampa alcanzó pendientes superiores al 20%.
- b) **Vagonetas y chute:** en las obras de la presa se comenzó a implementar este sistema, primero en la margen derecha cuando el RCC iba aproximadamente por la elevación 1150 msnm, debido a que la rampa de acceso aguas abajo, ya no daba en pendiente para ingresar con las vagonetas cargadas con concreto a la presa; luego se colocó el *Chute* de margen izquierda, que vino a atender la necesidad de colocar RCC en los dos bloques en que el “Vertedor” separó la presa, debido a que el *Crawler* con la banda transportadora ya no podía colocar RCC. Además estos sistemas fueron un respaldo, ante averías en la banda

transportadora o en el *Crawler*, para evitar la detención del proceso de colocado de RCC.

La ubicación de los sitios para evacuar los materiales de desecho, así como los procedimientos, permite evitar que se generen aglomerados de concreto en los estribos o en los paramentos de la presa, debido al material desechado. Este problema se tuvo en la presa del PH PIRRÍS, lo cual provocó que se invirtieran grandes cantidades de tiempo y recursos, en la limpieza de dichos desechos, que quedan adheridos a los paramentos de la presa.

Definir y diseñar las plataformas para el sacado de equipo y maquinaria de la presa, permitió durante la colocación del RCC, que no se tuviera que detener el proceso, producto de maquinaria pesada descompuesta dentro de la presa, ya que con la plataforma se pueden izar los equipos y maquinaria en avería, sacarlos y remplazarlos rápidamente (ver apéndice, plano de taller 016).

La definición del procedimiento básico de construcción de las galerías de drenaje, implicó en la presa del PH PIRRÍS ensayar varios sistemas de colocación, obteniéndose como un sistema óptimo, en cuanto a rendimiento de construcción, el presentado en el plano de taller 010 (ver apéndice), donde la formaleta se coloca directamente al RCC, por debajo del nivel final de la losa de la galería, para mantener la continuidad del RCC, y construir la losa interna de esa galería, una vez que se haya finalizado con la construcción de la galería.

La definición del procedimiento de protección del área de colocado de RCC ante lluvias, significó, en el caso de la presa del PH PIRRÍS, utilizar plástico negro para la cobertura de las capas de RCC, y así posteriormente tener una fácil remoción, para reanudar el proceso de trabajo ágilmente, una vez que la lluvia hubiera pasado.

Toma de aguas y torre compuertas; contra presa, vertedor y descarga de fondo

La generación de los modelos, con los volúmenes fragmentados, de acuerdo con la resistencia de los concretos, se realizó no sólo para las proyecciones de concretos y agregados,

que apoyan las tablas de requerimiento (ver cuadro 01), sino para definir los procedimientos de inicio del trabajo, en cada una de las etapas que componen la estructura (toma de aguas, torre compuertas, contra presa, vertedor y descarga de fondo), clasificando las actividades según la fragmentación, tanto en el programa de obra como en el avance, según el tipo de concreto por colocar.

En la “Toma de Aguas y Torre Compuertas”, el modelo de colocación del blindaje de la embocadura y tubería de conducción de agua, se desarrolló en el plano de taller 017, y esto permitió tener claro el proceso de arranque de esa estructura, que se iniciaba 5 meses después de haber iniciado el RCC, y cuyo desarrollo es importante tenerlo definido antes del arranque de la presa, no sólo para la definición de sitios de obras provisionales en común con el colocado de RCC, sino también con la logística de grúas y accesos.

En la “Contra presa”, la realización en planos de taller del proceso de construcción de las obras de desviación y ubicación de grúa torre de trabajo (ver apéndices, planos de taller 013 y 020), fue fundamental para el arranque del RCC, ya que aunque dicho proceso en el programa de trabajo estaba ubicado 8 meses después su inicio, la actividad era importante definirla por logística de accesos y grúas, para que durante el proceso de colocación del RCC, la asignación de recursos a la contra presa, no representara una limitación en los procesos del RCC, ya que con anticipación se tenían presente los procedimientos, y en cualquier momento el proceso se hubiera podido adelantar, ya que por estar retirado de la presa, dependía más de las condiciones climatológicas que del avance de la presa misma.

La definición del modelo de colocación de concretos, se desarrolló mediante el programa Autocad 2010, y de acuerdo con las alturas de colocación programadas, se generó el sólido en 3D para definir el avance basado en las etapas de construcción, y así se estableció un control más detallado en el programa de obra y consumo de materiales (agregados, cemento, etc.). Esto a su vez permitió establecer diferencias entre el avance de consumo en los concretos convencionales y el RCC por colocar en la presa.

La realización de los modelos de acero de refuerzo por colocar en cada estructura (toma de aguas y torre compuertas; contra presa,

vertedor y descarga de fondo), mediante el programa Autocad 2010 (ver apéndices, planos de taller 019,022, 025 y 027), no sólo fue importante para las proyecciones de consumo de acero estructural (cómo se detalló en el control de consumo de materiales), sino para el despacho de acero de refuerzo estructural, según el avance de las etapas de colocación de concreto, previamente modeladas. Con ello además se logró mantener en obra sólo las cantidades de acero necesarias por colada.

Programa general de trabajo original versus actualizado

El programa de trabajo original, de las obras de la presa, “Versión 1” (ver figura 52), tuvo muchos cambios producto de la ejecución de las obras; por ello se realizó una comparación del programa original “Versión 1”, con el programa de trabajo actualizado “Versión 2” (ver figura 52). Este último se desarrolló para plasmar los cambios más importantes en la presa, en el nivel general, que representaron cambios importantes en la secuencia de trabajo de las principales obras del proyecto, así como cambios en las fechas que se tenían originalmente.

En este análisis no se profundiza en los rendimientos programados originalmente y los rendimientos que en la realidad se obtuvieron, debido a que el enfoque se hizo de manera global, orientado principalmente a definir la incidencia de los procesos más importantes por destacar en el programa de trabajo, hitos y secuencia de las obras, todo ello previo al arranque del RCC.

Programa Versión 1, versus programa Versión 2

Uno de los principales cambios entre los dos programas, fue que originalmente los concretos de cresta se construirían en serie, y en el programa actualizado esta actividad se realizó en paralelo, y se cambió su duración de 1 mes a 6 meses, ya que inicialmente no se contempló que durante su construcción, también se tendría que

asignar recursos a otras actividades más críticas y complejas como el “Vertedor”, la “Descarga de Fondo” y la “Torre Compuertas”, todas dentro de la ruta crítica del programa. Esta asignación de recursos se debía de coordinar muy detalladamente, debido a que una de las principales limitantes con las que se contaba en las obras de la presa, era la poca mano de obra especializada en construcción que había en la zona, lo que provocaba que se tuvieran que dar prioridades a la hora de ejecutar obras con base en la ruta crítica del programa de trabajo, y con ello provocar que muchas actividades no se ejecutaran en forma paralela.

Otro de los cambios analizados, fue que en el programa original, la “Descarga de Fondo” se iniciaba el 23 de octubre del 2010, después de haber construido el puente sobre el “Vertedor”, por lo que se definió adelantar (en el programa actualizado) ese proceso, como medida de apoyo, al avance de los concretos convencionales en la zona del “Vertedor”, así como para adelantar el proceso de *pre llenado*.

Con esto se logra, en el programa actualizado, adelantar la fecha de los trabajos en la construcción del tapón de cierre del túnel de desvío.

Esto, ya que en el programa original, el inicio de los trabajos en el tapón de cierre del túnel de desvío, iniciaban en abril, lo que dejaba esta actividad tan crítica, muy cercana a la fecha de entrega de obras, lo que no daría holgura en caso de algún imprevisto.

Por esta razón en el programa actualizado, esta actividad se mueve a inicios de enero, y se programa un mayor plazo de trabajo, para la garantía de su finalización (asegurar la construcción e inyección completa del tapón, previo al proceso de llenado); esto como actividad sucesora del adelanto en la finalización de la “Descarga de Fondo”.

Aún con el adelanto de la “Descarga de Fondo”, en el programa actualizado, no se puede adelantar el proceso de llenado de embalse, debido a la revisión que se hizo, de la secuencia de coladas del “Vertedor” (ver plano de taller 023), donde estas generan plazos mayores a los que se tenían contemplados originalmente, por la intervención de actividades muy complicadas como la construcción de los pos tensados del “Vertedor” (zona de amarre de las compuertas radiales) y las exigencias en los acabados de la losa vertedora, lo que genera que ese proceso

sea realizado con mucho detalle durante la construcción. Con esto el “Vertedor” en el programa actualizado, “Versión 2”, termina el 31 de mayo del 2010, más de un mes después que la fecha definida en el programa original, “Versión 1”, producto de lo mencionado, y que no contemplado en el primer programa de obra.

Para finalizar con el análisis de los programas comparados, se puede extraer en resumen una secuencia óptima de las principales actividades que se incorporan en el programa de trabajo:

- a. **Colocación de RCC:** es la actividad principal de trabajo en la construcción de la presa, y la cual marca la secuencia de avance para las demás estructuras complementarias (vertedor, toma de aguas, etc.).
- b. **Torre de acceso:** su construcción debe de ir programada paralela a la colocación del RCC y su finalización con el inicio de los concretos de cresta.
- c. **Toma de aguas y torre compuertas:** esta estructura puede comenzar una vez que el RCC haya alcanzado la embocadura de la descarga de fondo y avanzar paralelamente a la colocación del RCC, dejando pendiente la construcción del bloque de unión entre la toma y el túnel de conducción, para cuando la presa haya alcanzado la elevación suficiente para que ocurra algún asentamiento (en el caso de la presa del PH PIRRÍS se proyectó en la elevación 1185 msnm, inicio de los pilares). Dejando pendiente esa unión entre el túnel y la toma se puede garantizar que el bloque de unión no sufra fracturas ante un posible asentamiento (ver figura 38).
- d. **Contra presa:** si durante la colocación del RCC se presentan dos periodos de verano, la construcción de la contra presa se puede programar en 2 etapas (la primera etapa el bloque de fundación y la segunda etapa los muros de encauce y la losa). Esta actividad puede iniciar con la construcción de la toma de aguas como primera etapa, y la segunda etapa finalizarse antes de iniciar el llenado del embalse.
- e. **Vertedor:** en esta actividad el programa de trabajo debe de contemplar actividades

como: ubicación de grúas torre dentro de la estructura, exigencias en los acabados de la losa vertedora, construcción de los pos tensados, construcción de las vigas y losas prefabricadas del puente, colocación de compuertas radiales y colocación de ataguías. El inicio del vertedor debe de programarse de modo que una vez alcanzado el nivel más bajo del vertedor (zona del patín), este se construya paralelo a la colocación del RCC, de manera que cuando se alcance la elevación en donde inician los pilares el vertedor haya podido alcanzar un importante avance en la construcción de la losa vertedora y muros de separación.

- f. **Obras de urbanización:** esta actividad debe de iniciarse paralelo a la construcción de los pilares del vertedor y con ello se pueda garantizar que los equipos y sistemas eléctricos estén instalados durante las pruebas de compuertas radiales del vertedor, compuertas vagón de la descarga de fondo y la toma, así como la compuerta radial de la descarga de fondo.
- g. **Descarga de fondo:** la construcción de esta estructura es importante iniciarla junto a la construcción de los pilares del vertedor, y que a diferencia del programa original de trabajo (V1), donde esta estructura esperaba la finalización del vertedor para iniciar, pueda terminar antes de finalizar el vertedor, ya que si la descarga de fondo depende de la finalización de una estructura tan compleja como el vertedor, se corre el riesgo de que la construcción de la presa se atrase el tiempo equivalente a la duración en construir toda la descarga de fondo.

Gestión de riesgos del sitio de construcción de la presa, ante un fenómeno atmosférico

El análisis de las acciones de mitigación que se redactaron como resultado de la incidencia de la tormenta tropical Alma en las obras de la presa del PH PIRRÍS, se basó en la experiencia que se obtuvo en el antes, durante y después de los acontecimientos, que ocasionaron el desbordamiento del río Pirrís, así como de las quebradas que aportan al caudal del río. Las afectaciones se dieron desde las rutas de acceso, hasta las obras provisionales y de construcción en el “Sitio Presa”.

Por esta razón se enlistan los principales problemas que se dieron a raíz del impacto indirecto de la tormenta Alma, en las obras de la presa del PH PIRRÍS.

Los principales problemas ocasionados por la tormenta Alma fueron los siguientes:

- a. Derrumbes, deslizamientos y daños en la carretera (hundimiento de la carpeta asfáltica) en las rutas de acceso a la presa.
- b. Colapso de puente provisional en la zona de la presa.
- c. Pérdida de agregados, que fueron lavados y arrastrados hasta el cauce del río.
- d. Derrumbes sobre las instalaciones provisionales (oficinas) en la zona de la presa.
- e. Daños a las plantas industriales (planta de RCC y quebrador primario), producto de la afectación de quebradas anexas.
- f. Colapso de la banda transportadora, debido a la socavación e impacto del río sobre los soportes de apoyo.
- g. Paso del río a través de la zona de fundación de la presa, ya que este sobrepasó la capacidad del túnel de desvío y la ataguía de protección (aguas arriba).

- h. Pérdida de equipo y maquinaria en las zonas cercanas a la fundación de la presa.
- i. Destrucción de la contra ataguía.
- j. Derrumbes y colapso de los caminos internos, en “Sitio Presa”.
- k. Daño de los pasos provisionales, a través de las quebradas internas del proyecto.

Una vez que se enumeraron los principales problemas ocasionados por la tormenta sobre las obras de “Sitio Presa”, se analiza cada uno de los riesgos, desde el punto de vista de la prevención y la mitigación de las acciones anteriormente enlistadas.

La definición de los sitios vulnerables ante avenidas, o por afectación directa de quebradas y deslizamientos, es producto de la evaluación que se debió haber realizado una vez que se escogieran los sitios de construcción de las principales plantas industriales, de manera que toda quebrada que pase cerca de esas plantas industriales, sea debidamente encauzada hacia el río, a través de tuberías de concreto que respondan a la capacidad de trabajo crítico, así como de las obras de protección, en caso de que tales obras de encauzamiento de aguas, lleguen a colapsar.

Luego, los sitios para colocar los acopios de agregados, según lo observado durante la tormenta Alma, debieron estar más alejados del cauce del río, o contar con obras de protección, como diques, que detuvieran el impacto directo del río. La pérdida de agregados tanto para el RCC como para los concretos convencionales fue enorme y esta actividad representó un riesgo muy alto en las producciones de las plantas a la hora de la construcción de la presa, que generó la implementación de sistemas alternativos de producción de agregados para compensar las pérdidas ocasionadas por las intensas lluvias.

La definición de los sitios para las instalaciones provisionales, como oficinas, requieren de un cuidado aún mayor, ya que ahí es donde se ubica el personal del proyecto, por lo que después de lo experimentado durante la tormenta Alma, esas instalaciones provisionales se deben de ubicar lo más lejos de las zonas cercanas a taludes, quebradas y el río principal. Además, la definición de esos sitios, debe venir acompañada de varias rutas de evacuación.

El levantamiento topográfico periódico de las zonas cercanas a la presa, es parte importante en la elaboración de los planes de evacuación, así como en las planes de evaluación, para la identificación de las zonas más vulnerables, que está teniendo el proyecto, debido a la concentración de personal, plantas industriales, equipo y maquinaria. Este levantamiento general se desarrolló en las obras de la presa del PH PIRRÍS como un plano general de trabajo, donde se representa cada una de las zonas que integran el proceso de construcción de la presa, y donde se identifican claramente los sitios de reunión y de evacuación, en caso de avenidas del río (ver anexos 01 y 02). Este plano es fundamental que se actualice, paralelo al crecimiento de la presa, ya que conforme la presa aumente en elevación, su entorno también va cambiando, y el riesgo de no hacerlo es muy alto, debido a que las condiciones de la presa van cambiando mucho conforme se va construyendo.

En cuanto a la definición de las obras hidráulicas de protección, se observó como un proceso que tiene que ir de la mano con el avance de las instalaciones provisionales construidas, cercanas al río, ya que parte importante en el desarrollo de los procesos de construcción, es el poder definir junto a los diseñadores de las principales obras hidráulicas de la presa, las obras de mitigación ante fenómenos atmosféricos adversos. Con ello se pretende proteger las zonas de alto riesgo y con mayor vulnerabilidad ante crecidas y que su afectación represente importantes atrasos en la ejecución de las obras.

La definición de un modelo de las zonas de afectación ante un rebalse del río sobre la ataguía de protección, consiste en simular los niveles de agua ante un posible *pre llenado*; esto para considerar los efectos en las posibles instalaciones colocadas aguas arriba de la presa, y que se puede apreciar en el plano de taller 028 (ver apéndice), si en la presa del PH PIRRÍS, se hubiera dado tal situación durante el proceso de colocado del RCC, tanto los postes de la banda transportadora como la planta de RCC, hubieran salido gravemente dañadas, producto de la invasión e impacto de las aguas del río Pirrís. Por lo que la elaboración de un modelo de *pre llenado* es muy importante para medir el riesgo de las zonas de trabajo ubicadas aguas arriba de la presa.

Con la afectación de la tormenta Alma, la entrada en operación del PH PIRRÍS se atrasó aproximadamente un año, y aunque el número final del costo que eso representa aún no se ha determinado exactamente, el dinero que se dejó de percibir por parte del proyecto durante ese año en producción eléctrica así como el costo de las reparaciones y rehabilitación de la obra, justifica completamente que durante la gestión de riesgos del sitio de la construcción de la presa, se contemplen todas las medidas necesarias que mitiguen y prevengan los acontecimientos expuestos y analizados.

Conclusiones

1. En la presa del PH PIRRÍS, la identificación de los procesos previos al inicio de la obra, giraron en torno a la línea de producción del RCC.
2. Los procesos y subprocesos de trabajo presentados en este documento, representan una estructura adecuada para la planificación de la construcción de una presa, con características similares a la del PH PIRRÍS.
3. El disponer de un 30% de la producción total de agregados antes del inicio de la construcción de la presa, permitió no detener el proceso de colocación de RCC por averías en las plantas de trituración o por volúmenes altos de colocación de concreto.
4. Con la elaboración de planos de taller tanto para la modulación de la formaleta de paramentos como para los despieces de acero de refuerzo, se logró un mayor control en los registros de gasto de esos materiales en la obra.
5. La elaboración del modelo de colocación de RCC, mediante planos de taller, permite no solo a los ingenieros visualizar el avance de obras, sino también comunicar a los técnicos de campo la metodología y secuencia de colocación mantenida de principio a fin en la presa. Y por último, poder registrar ese proceso para futuros proyectos.
6. La ejecución de un simulacro de colocación de RCC, permite ir depurando los ciclos de trabajo, así como detectar problemas que se puedan tener en cuanto a recursos, accesos, equipo y maquinaria disponible, antes del proceso de construcción.
7. Las producciones máximas de colocación de RCC se lograron utilizando la banda transportadora y las más bajas utilizando rampa – vagonetas y chute – vagonetas.
8. El ubicar en el programa de obra la construcción de la “Toma de Aguas/Torre Compuertas” y “Descarga de Fondo” paralelas a la “Colocación del RCC” y el “Vertedor” respectivamente, permitió poder ir adelantando las labores de pre llenado del embalse aún sin haber concluido la construcción del “Vertedor” y además adelantar las pruebas de las compuertas de la “Toma de Aguas” y “Descarga de Fondo”.
9. La elaboración de un modelo de pre llenado, permite definir los sitios más seguros, ubicados aguas arriba, para instalaciones esenciales en la construcción de la presa, como lo son la banda transportadora y la planta de RCC. Ya que el modelo permite simular los niveles máximos a los cuales llegará el río aguas arriba, en caso de que supere la capacidad del túnel de desvío, la ataguía y la descarga de fondo.
10. El haber aplicado las acciones de mitigación después de la afectación de la tormenta Alma en mayo del 2008, permitió que el tiempo de recuperación en las obras de la presa del PH PIRRÍS ante la tormenta Thomas en noviembre del 2010, se llevara a cabo en menos de 15 días.
11. La ejecución de los procesos presentados en este documento se pueden mejorar en la medida que se incorporen nuevas tecnologías que han sido aplicadas en países desarrollados como Estados Unidos, China, Japón, Brasil o España, donde se encuentra el 70% de las presas de RCC de todo el mundo.

Recomendaciones

1. Durante la construcción de la presa, se recomienda que en la zona de escombrera se mantenga un acopio de material sin tratar (sin acarreo y compactación dentro de la escombrera), para el caso de que ese material se pueda aprovechar en rampas de acceso o rellenos cercanos a las obras de la presa.
2. Los equipos de los procesos de producción, se deben dimensionar y seleccionar, para estar en la capacidad de mantener, durante la construcción de la presa, las tasas máximas de colocación de RCC, diaria, semanal y mensualmente.
3. Es fundamental diseñar y actualizar periódicamente, un cuadro único de necesidades de consumo de concreto en la obra, para que este sea la base de trabajo de los procesos de producción por tipo de agregados y por resistencia en los concretos. Además que este cuadro sirva de apoyo en las estimaciones de otros componentes como aditivos.
4. Una vez que se actualicen los diseños de mezcla de los concretos por utilizar en obra, estos deben de llegar permanentemente, no solo a los encargados de obras civiles, sino también a los encargados de los procesos de producción, para que en conjunto se revisen las proyecciones de consumo de agregados y concretos, y con esto determinar cualquier incremento o descenso en los volúmenes cuantificados originalmente.
5. En la elaboración del modelo final de explotación del tajo, es importante proyectar su capacidad de almacenamiento de material, para tenerlo presente en caso de que las escombreras disponibles superen el volumen de trabajo para el que fueron diseñadas.
6. En las obras adicionales a la presa (rellenos de prueba, ataguías, caminos, etc.), donde se coloque RCC, se recomienda programar, junto con el montaje de la planta de RCC, para que en esas obras se aproveche para calibrar, depurar y medir las producciones de la planta en acción, previo al arranque de la presa.
7. Otra recomendación es incrementar el monitoreo y control continuo de la ruta de acarreo, sobre todo durante la colocación de RCC, ya que en esa etapa constructiva, el tránsito se eleva, debido al transporte masivo de cemento, y el funcionamiento continuo de esa ruta entra como un proceso más, que se debe de mantener, para asegurar la continuidad en el colocado de concreto en la presa.
8. La banda transportadora de concreto debe instalarse de manera que garantice la colocación de RCC en todas las etapas de construcción del cuerpo de la presa.
9. Para la ubicación de la banda transportadora, se recomienda que para la colocación de los postes de soporte, se consideren no solo aspectos estructurales y sísmicos, sino también el impacto indirecto que pueda sufrir esa estructura, producto del desbordamiento del río.
10. En la salida de la banda transportadora desde la planta de RCC, se recomienda que se cuente con suficiente espacio, para el mantenimiento y limpieza con equipo y maquinaria, como retro excavadoras, ya que en ese punto es común que se aglomeren grandes cantidades de concreto.
11. El control de materiales como la formaleta prefabricada y el acero de refuerzo, debe de proyectarse mediante modelos teóricos de utilización, que contemplen la actualización constante de los cambios y el control en el ingreso y su despacho en los talleres de carpintería.
12. Se recomienda la elaboración de cartillas de despiece de acero, similares a las utilizadas en la presa del PH PIRRÍS, para poder mantener un control no sólo en el despacho y colocación de acero estructural en obra, sino para separar el control del acero no

- estructural despachado en el taller de doblado.
13. Se recomienda que se mantenga una cuadrilla específica de trabajo en las labores de limpieza y lavado permanente de la formaleta prefabricada, de los paramentos, para evitar disminuir sus usos, producto de la contaminación por morteros o concretos ya endurecidos, que deterioran y atascan los elementos que componen esa formaleta.
 14. Para el proceso de selección de anclaje en la formaleta de los paramentos, se recomienda que se haga una vez que el diseño de mezcla del RCC se haya terminado de definir, para ensayar el anclaje en condiciones reales de colocación y que a su vez, los proveedores de formaleta conozcan las características de la mezcla, para optimizar el sistema de encofrado del RCC.
 15. La ubicación y definición de las obras provisionales deben de considerar no solo su rotación, con respecto al avance de la presa, sino también con la afectación que pueda tener ante posibles crecidas del río, deslizamientos y rutas de evacuación disponibles.
 16. Modelar, previo al arranque del RCC, varias propuestas y alternativas de colocación de grúas torre, en el cuerpo de la presa. Esto con el objetivo de definir anticipadamente, junto a los diseñadores de la presa, las ubicaciones apropiadas de las grúas, para las diferentes etapas de construcción en la obra.
 17. Es indispensable para la construcción de presas similares a la del PH PIRRÍS, la ubicación de grúas torre con alta capacidad, en la zona central de la presa, para que no solo apoye la colocación del RCC, sino la construcción de una estructura tan compleja como lo es el "Vertedor de Excedencias".
 18. Se recomienda analizar y elaborar varias alternativas de colocación de RCC, adicionales a la banda transportadora, durante los procesos previos de inicio; esto para poder asegurar la colocación del RCC, aún cuando se enfrenten problemas por averías o mantenimiento en la banda transportadora, así como a diferentes elevaciones en la presa. Esta recomendación además surge también a raíz de la definición de los recursos previos, con los que la presa tiene que contar, para asegurar el transporte del RCC de la planta hasta la presa, bajo cualquier condición de trabajo.
 19. El levantamiento de las condiciones de los concretos, sobre los que se va a sustentar el RCC en la presa, debe de ser debidamente evaluados previo al inicio de la colocación del RCC; esto para asegurar que una vez iniciado el proceso de construcción de la presa, no se tengan que enfrentar reparaciones riesgosas de las márgenes, al mismo tiempo.
 20. En las estructuras complementarias de la presa, como la "Toma de Aguas", "Torre Compuertas", "Contra presa", "Vertedor de Excedencias" y "Descarga de Fondo", se deben definir modelos previos de colocación de concretos en 3D, para cuantificar los avances de obra y coordinar, de acuerdo con los modelos en 3D de acero de refuerzo, el despacho del material al sitio de obra. Además, apoyar en la planificación previa de los procedimientos de construcción y las secuencias de coladas.
 21. Durante la revisión de los programas de obra, ensayar varias rutas críticas con base en las fechas del *pre llenado*, llenado de embalse y entrega final de obras.
 22. Otra recomendación es la actualización de los planes de evacuación ante crecidas del río, por lo menos cada 3 meses (como parte del plan de gestión de riesgos), desde que se comienza las obras de la construcción de la presa hasta que se alcance la cota final con el RCC; después de este punto se podrá someter a evaluación la revisión de los planes de evacuación.
 23. Para futuros proyectos de graduación, el estudiar y analizar los procesos de selección de plantas, maquinarias y equipos (de acuerdo a dimensiones y capacidades) para la construcción de la presa del PH PIRRÍS, así como en otros proyectos, es un importante complemento al documento acá desarrollado.
 24. Por último se recomienda, al igual que el trabajo desarrollado en este documento, hacer uno similar pero orientado a la gestión del riesgo desde el punto de vista integral, es decir la gestión del riesgo ante desastres naturales, gestión del riesgo desde el punto de vista financiero, de equipos, de seguridad ocupacional, entre otros.

Apéndices

- **Plano de taller 001.** Levantamiento de la fundación de la presa
- **Plano de taller 002.** Plantas para distribución eléctrica en la presa.
- **Plano de taller 003.** Ubicación de tuberías de agua y aire en la presa.
- **Plano de taller 004.** Modelado del proceso de colocación de RCC, con vagonetas y rampa de acceso, en la presa.
- **Plano de taller 005.** Proyección de colocación de la formaleta prefabricada en los paramentos de la presa.
- **Plano de taller 006.** Comparación de alternativas de colocación de RCC en la presa: *Crawler* versus *Swinger*, a diferentes elevaciones.
- **Plano de taller 007.** Ubicación general de la maquinaria, para el arranque de la colocación del RCC.
- **Plano de taller 008.** Modelado del proceso de inicio real, en la colocación de RCC en la presa del PH PIRRÍS.
- **Plano de taller 009.** Ubicación de accesos provisionales a la presa.
- **Plano de taller 010.** Construcción de galería de drenaje, dentro de la presa.
- **Plano de taller 011.** Ubicación de grúa POTAIN MD1100 en la zona vertedora de la presa.
- **Plano de taller 012.** Ubicación de las grúas torre utilizadas en la Presa del PH PIRRÍS.
- **Plano de taller 013.** Ubicación de grúa torre en la contra presa.
- **Plano de taller 014.** Colocación de RCC con el sistema de hiper bloques.
- **Plano de taller 015.** Rampa de acceso aguas abajo de la presa
- **Plano de taller 016.** Plataforma de izar para el sacado de equipos en la presa.
- **Plano de taller 017.** Inicio de construcción de la toma de aguas y colocación de la tubería de blindaje.
- **Plano de taller 018.** Modelo de colocación de concreto convencional en la toma de aguas y torre compuertas.
- **Plano de taller 019.** Modelo del acero estructural en 3D, de la toma de aguas y torre compuertas.
- **Plano de taller 020.** Secuencia de construcción de la contra presa.
- **Plano de taller 021.** Modelo de colocación de concreto convencional en la contra presa.
- **Plano de taller 022.** Modelo del acero estructural en 3D de la Contra presa.
- **Plano de taller 023.** Modelo de colocación de concreto convencional en el “Vertedor de Excedencias”.
- **Plano de taller 024.** Detalle de la zona, para el montaje de la grúa de alta capacidad en el “Vertedor de Excedencias”.
- **Plano de taller 025.** Modelo del acero estructural en 3D, del “Vertedor de Excedencias”.
- **Plano de taller 026.** Modelo de colocación de concreto convencional en la “Descarga de Fondo”.
- **Plano de taller 027.** Modelo del acero estructural en 3D, de la “Descarga de Fondo”.
- **Plano de taller 028.** Niveles de agua en la zona aguas abajo de la presa del PH PIRRÍS, ante un *pre llenado*.

Anexos

Anexo 01. Plan inicial de evacuación ante avenidas del río, de las obras de la presa del PH PIRRÍS (Oficina Técnica “Sitio Presa”, ICE).

Anexo 02. Plan final de evacuación ante avenidas del río, de las obras de la presa del PH PIRRÍS (Oficina Técnica “Sitio Presa”, ICE).

Anexo 03. Gráfica de colocación de RCC con banda, vagoneta y *Chute*, en la presa del PH PIRRÍS (Oficina Técnica “Sitio Presa”, ICE).

Anexo 04. Colocación diaria de RCC en la presa del PH PIRRÍS (Oficina Técnica “Sitio Presa”, ICE).

Referencias

¹ <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/memorias/vertparedelg/vertparedelg.html>

CNE. 2003. **ESTADO DEL ARTE DE LAS PRESAS DE HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO.** España: Colegio de ingenieros de caminos, canales y puentes, 221p.

ICE. 2005. **SECCIÓN 4 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS, LICITACIÓN PÚBLICA N° 7225-E PH PIRRIS.** Costa Rica: Editorial ICE, 567p.

Obras por Contrato, ICE. 2009. **INFORME DE RECLAMO POR LOS DAÑOS OCASIONADOS POR LA TORMENTA TROPICAL ALMA SITIO PRESA PH PIRRÍS.** Costa Rica: Editorial ICE, 25p.

Ortega, F. 2009. **INFORME ORDEN DE TRABAJO N4 Y VISITA AL PROYECTO 1-4 DE SEPTIEMBRE.** FOSCE. 23p.

Ortega, F. 2007. **INSPECCIÓN DEL RCC DE ALTA PASTA A EMPLEAR EN PIRRÍS.** FOSCE. 23p.

Chávez, Y. 2010. **PROCESO DE PRODUCCIÓN DE AGREGADOS.** Informe final. PH PIRRIS, ICE. 60 p.

Leiva, G. 2010. **EXPLOTACIÓN DEL TAJO PRESA.** Informe ejecutivo de cierre. PH PIRRIS, ICE. 60 p.

Chávez, Y. 2010. **CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS UTILIZADOS EN LAS OBRAS PRESA PH PIRRÍS.** San Carlos, Tarrazú ICE. Comunicación personal.

Ríos, I. 2010. **PROCESO DE ACARREO DE CEMENTO EN LAS OBRAS PRESA PH PIRRÍS.** San Carlos, Tarrazú ICE. Comunicación personal.

Ríos, I. 2010. **PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE CONCRETO EN OBRAS SITIO PRESA.** San Carlos, Tarrazú ICE. Comunicación personal.

García, P. 2010. **COLOCACIÓN DE FORMALETA DOKA EN LOS PARAMENTOS DE LA PRESA DEL PH PIRRÍS.** San Carlos, Tarrazú ICE. Comunicación personal.

Bonilla, J. 2010. **MODELO DE EXPLOTACIÓN DEL TAJO.** San Carlos, Tarrazú ICE. Comunicación telefónica.

Rivera, A. 2010. **PROCESO DE COLOCACIÓN DE RCC.** San Carlos, Tarrazú ICE. Comunicación personal.

Naranjo, G. 2010. **ANÁLISIS FOTOGRÁFICO TORMENTA TROPICAL ALMA.** San Carlos, Tarrazú ICE. Comunicación personal.

