

# COMPORTAMIENTO DE LA PRESA RALCO Y DE OTRAS VARIABLES FÍSICAS Y AMBIENTALES DURANTE SU PRIMER AÑO DE OPERACIÓN

---



Julio Pineda Arias  
Ingeniero Civil  
ENDESA Chile

Miguel Angel Jaramillo Bopp  
Ingeniero Civil Geotécnico, MSc

Aurelio de Diego Glaria  
Ingeniero Civil



## RESUMEN

*El objetivo del trabajo es el de entregar el comportamiento de la presa Ralco, sustentado en un completo sistema de monitoreo, a un año de su funcionamiento. Esta presa fue construida con hormigón compactado con rodillo y tiene 155 m de altura, 360 m de largo de coronamiento y un volumen de 1,5 millones de metros cúbicos. Se ubica dentro de las cuatro más altas en el mundo. Se analiza el comportamiento mismo de la presa y el de su entorno físico y ambiental producto de la formación de un nuevo embalse, incluyendo aspectos como alteraciones hidrogeológicas y de degradación del lecho del río, vulnerabilidad de laderas ante procesos de deslizamientos y otros. Se concluye que el comportamiento de la presa y de su entorno ha sido en general satisfactorio. En el caso de la presa se destacan algunos aspectos que presentan cierto grado de anomalía y que deberán mantenerse bajo control.*

# ÍNDICE

1. **INTRODUCCIÓN**
2. **SISTEMA DE MONITOREO**
  - 2.1 **Monitoreo de la Presa**
    - 2.1.1 Descripción
    - 2.1.2 Análisis del comportamiento de la presa
  - 2.2 **Sistema de Seguimiento Global**
    - 2.2.1 Descripción
    - 2.2.2 Resumen del comportamiento del sistema de seguimiento global
3. **CONCLUSIONES**

## 1. INTRODUCCIÓN

La presa Ralco, una de las 4 presas de RCC más altas en el mundo, ha completado el primer año después de su llenado. En este documento se describen algunas conclusiones referidas a su comportamiento, basado en un completo sistema de monitoreo. Aparte de esto, se analiza el comportamiento de la presa tomando en cuenta algunos efectos físico y ambientales sobre el entorno. Para esto se ha tomado en cuenta la información provista por una metodología de control complementaria, como es el caso de la socavación del cauce del río, alteración hidrogeológica del cauce, vulnerabilidad de las laderas del área inundada debida a procesos de deslizamientos, y otros temas.

La presa Ralco forma parte del proyecto hidroeléctrico del mismo nombre, construido en la cuenca del río Biobío, ubicado a unos 650 km al sur de Santiago, la capital de Chile. La obra más significativa del proyecto es la presa gravitacional de hormigón compactado con rodillo (RCC), con sus 155 m de altura, 360 m de longitud de coronamiento y un volumen total de hormigón de 1,5 millones de metro cúbicos.

Su geometría fue definida para garantizar su estabilidad y resistencia ante distintas solicitaciones: peso propio, empuje hidrostático del agua, empuje de sedimentos, subpresión, acciones sísmicas y térmicas. Su paramento de aguas arriba es vertical y el de aguas abajo, escalonado y con una inclinación 0,8:1 (H/V).

Dado el carácter de alta sismicidad de la zona, se consideró una aceleración máxima del terreno de 0,18g para el sismo de operación, de ocurrencia durante la vida útil de la presa, y una aceleración de 0,28g para el máximo probable.

Se efectuaron análisis estructurales mediante modelos computacionales bi y tridimensionales de elementos finitos, estáticos, pseudo-estáticos, dinámicos y térmicos, en los cuales se representó la geometría de la presa, sus condiciones de borde y las cargas solicitantes. Se la consideró conformada por 18 bloques, limitados entre sí por juntas transversales de contracción,

situadas a 20 m en promedio una de otra. En todos estos análisis se evaluaron las interacciones entre bloques sucesivos y entre éstos y la roca de fundación y el agua embalsada.

Las fatigas del hormigón fueron determinadas tomando en cuenta diferentes combinaciones de carga y factores de seguridad, llegándose a valores diversos en la presa con un valor máximo de tracción directa de 2,08 Mpa, el cual se alcanzaba en una zona muy localizada. En consideración a lo anterior, se zonificó la sección de la presa dividiéndola en 3 partes y asignándoles tensiones requeridas de 1,85, 1,65 y 1,20 Mpa a 365 días de edad del hormigón.

## 2. SISTEMA DE MONITOREO

El sistema de monitoreo implementado en el proyecto de la presa Ralco y su entorno ha consistido en el control de la presa propiamente tal y el correspondiente al sistema de seguimiento global del entorno ambiental.

### 2.1 Monitoreo de la Presa

#### 2.1.1 Descripción

Considerando la importancia de la Instrumentación en el control del funcionamiento de la presa, se han instalado los 201 instrumentos que se detallan en la tabla 1 y que se muestran en las figuras 1 y 2.

Tabla 1: Instrumentos instalados en la presa

Tipo de Instrumento	Símbolo	Ubicación	Cantidad	Objetivo
Termómetros eléctrico	T	Interior presa	54	Medir temperatura
Puntas Vinchón	PV	Galerías UG, IG y coronamiento	41	Medir desplazamientos en la JC y grietas
Monolitos de control topográfico	M	Coronamiento	19	Medir desplazamientos verticales y horizontales
Acelerógrafos	A	Coronamiento y roca de fundación	2	Medir aceleraciones sísmicas
Piezómetros eléctricos estáticos	PE	Bajo la presa	60	Medir la presión del agua
Piezómetro eléctrico dinámico	PD	Bajo la presa	1	Medir la presión del agua por efecto de un sismo
Puntos de control topográfico	-	Paramento de aguas abajo de la presa	6	Medir desplazamientos verticales

Piezómetros abiertos tipo Casagrande	-	En laderas inmediatamente aguas abajo de la presa	12	Medir la posición de la napa freática
Vertederos rectangulares	-	Galerías UG e IG	6	Medir caudales por filtraciones provenientes de los drenes, juntas y grietas

### Detalle de la instrumentación

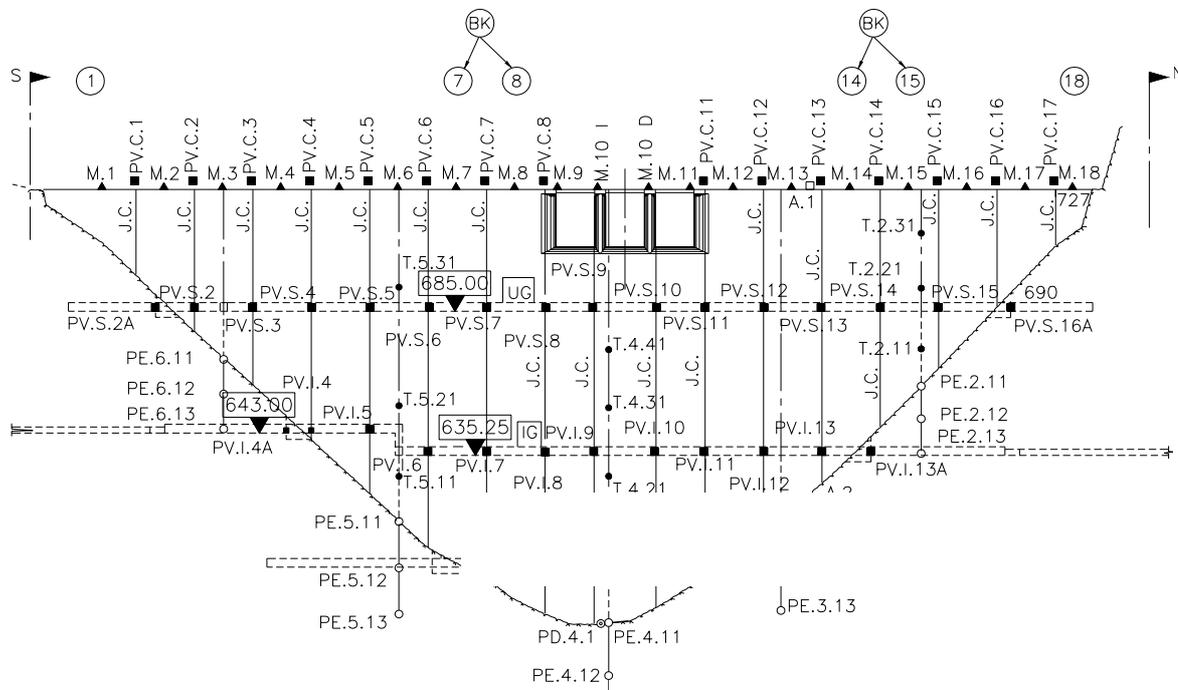
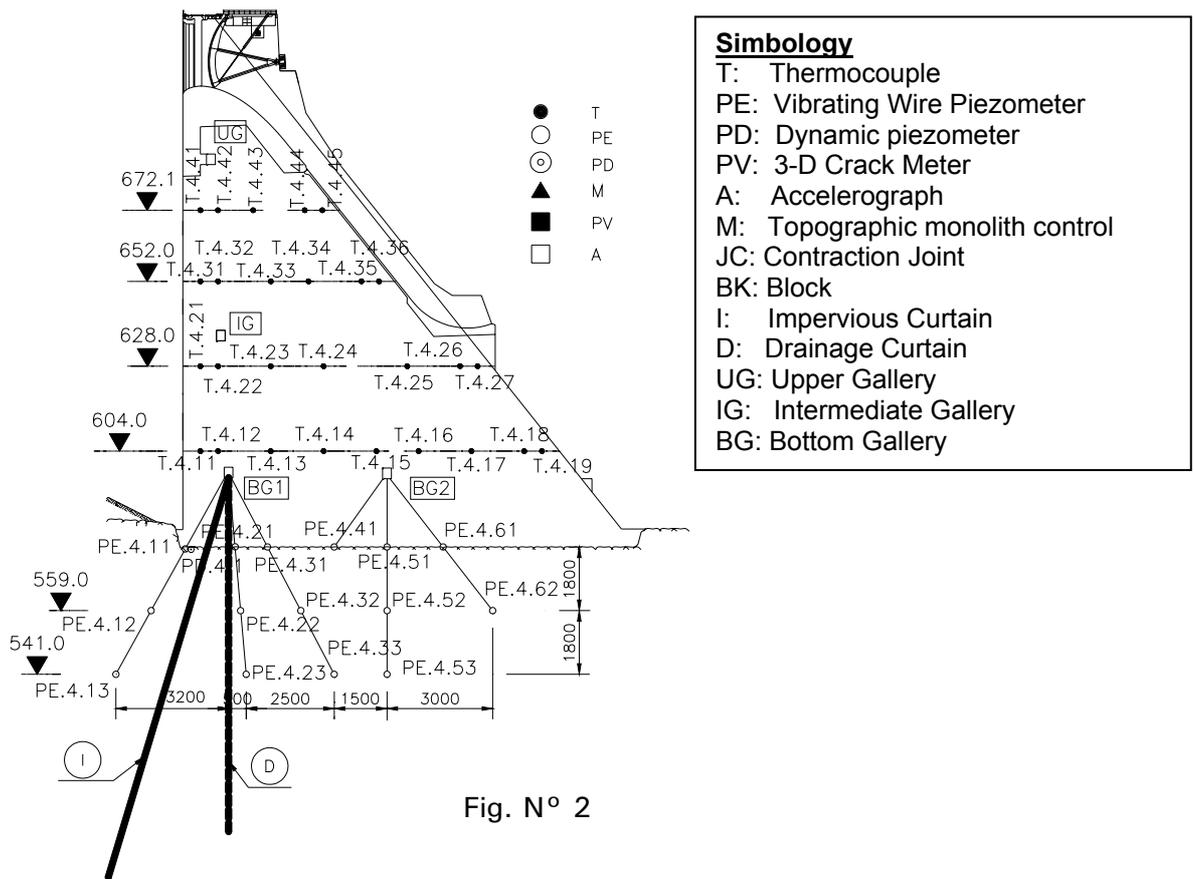


Fig.Nº 1



### 2.1.2 Análisis del comportamiento de la presa

El comportamiento estructural de la presa está siendo monitoreado mediante la observación directa durante visitas periódicas y las mediciones de los instrumentos instalados y su evolución en el tiempo.

El comportamiento general de la presa basado en los desplazamientos del coronamiento y los desplazamientos relativos entre bloques indica que, durante el año transcurrido desde el llenado, la presa se ha comportado en forma monolítica, casi sin desplazamientos relativos entre bloques. Las subpresiones mostradas por los piezómetros están dentro de límites aceptables y su evolución tiende a la estabilidad. Los caudales de las filtraciones también están dentro de los rangos esperados y tienden a la estabilidad. Los termómetros indican que el proceso de enfriamiento del hormigón sigue una evolución semejante a la esperada y adicionalmente han servido para confirmar la aparición de agrietamientos contenidos en planos verticales ubicados en medio de algunos bloques.

#### a) Temperaturas

En general en los termómetros se aprecia un comportamiento que muestra que las temperaturas se mantienen altas en el centro de la presa y disminuyen fuertemente en ambos bordes. Esto es coherente con el proceso de enfriamiento de la presa, que disipa el calor generado por el RCC por la superficie que está en contacto con el medio ambiente. En los gráficos de evolución de las temperaturas puede verse que en un comienzo la temperatura aumenta en toda la sección y después se enfría en ambos bordes. También se observa una disminución más acelerada en los termómetros cercanos a las galerías.

La evolución de las temperaturas en algunos termómetros ha mostrado descensos bruscos que se han asociado a la aparición de grietas en el hormigón en sus cercanías. Estos termómetros muestran descensos bruscos a causa del enfriamiento provocado por la conexión al agua del embalse. Estos descensos han servido para determinar el alcance de las grietas. Por ejemplo, la grieta identificada en el bloque 10, según los instrumentos, no superaría una distancia de 55 m del paramento de aguas arriba y no alcanzaría una cota superior a 652 m s.n.m. La grieta identificada en el bloque 15, según los instrumentos, superaría una distancia de 44 m del paramento de aguas arriba. También se observa que la grieta no alcanza una cota superior a 712 m s.n.m.

#### b) Subpresiones

En el análisis de estabilidad de la presa se consideró la subpresión de acuerdo a las recomendaciones del FERC, que dieron como resultado subpresiones como las que se muestran en la figura 3. En este modelo, la línea 3 indica la mínima subpresión que podría existir si la cortina de drenaje funcionara con un 100% de eficiencia y la línea 1 si los drenajes no funcionaran o no existieran. La línea 2 es la subpresión intermedia adoptada en el diseño considerando que los drenes funcionan con un 60% de eficiencia.

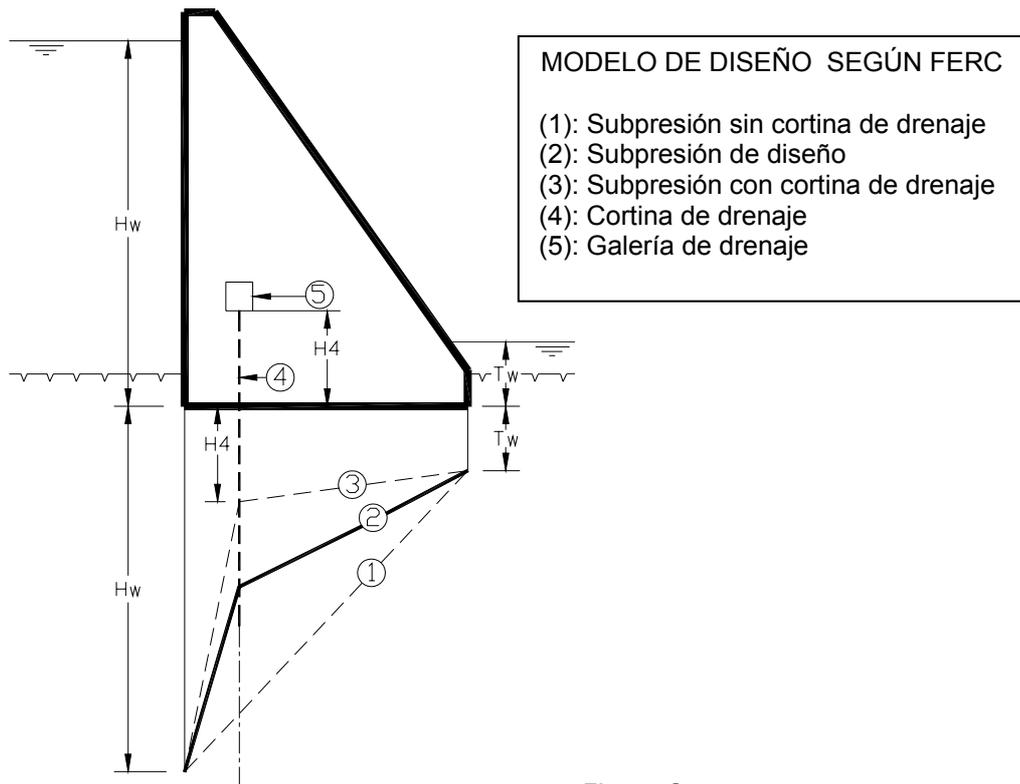


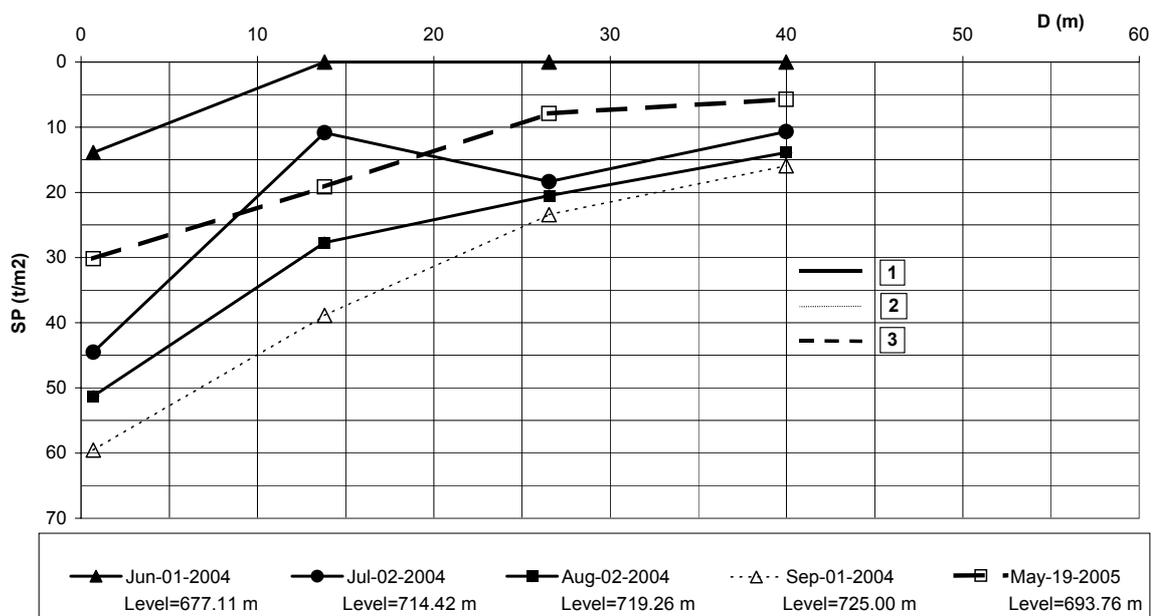
Figura 3

La presa cuenta con una cortina de drenaje (D) con perforaciones de 4" de diámetro espaciadas cada 3 m a lo largo de toda la presa, unida a las galerías (UG, IG y BG1), como se muestra en la figura 2. Las subpresiones medidas han indicado un excelente comportamiento de la cortina de impermeabilización y de la cortina de drenaje mostrando claramente el quiebre del diagrama por efecto de la cortina de drenaje (línea 4 en figura 3). Sin embargo, en un sector al norte de la presa, al inicio del llenado el quiebre en el diagrama fue bastante marcado, pero al transcurrir el tiempo dicho quiebre se fue perdiendo hasta desaparecer por completo, sin exceder los niveles de diseño.

En la figura 4 se muestra el historial de subpresiones registradas en el bloque 15 que indica la pérdida de efectividad de la cortina de drenaje a través del tiempo, donde las trazas "1" corresponden a las subpresiones medidas durante el transcurso del primer llenado; la traza "2" corresponde a la subpresión medida con el nivel máximo del embalse (nivel 725 m); y la "3" corresponde a las subpresiones que se midieron cuando el embalse descendió de nivel.

Teniendo en cuenta que lo esperable y deseable es tener subpresiones más bajas, se estará implementando una limpieza y complementación del sistema de drenaje a objeto de controlar los aumentos de subpresión detectados. En caso que estas medidas resulten insuficientes, se analizará la posibilidad de sellar, mediante alguna metodología adecuada por definir en su momento, aquellas grietas que al alcanzar la superficie del paramento de aguas arriba, constituyan fuente potencial de filtración de agua proveniente del embalse y consecuentemente puedan generar aumentos de la subpresión en el contacto presa-roca.

Los resultados obtenidos con la instrumentación piezométrica instalada permiten concluir que la cantidad de secciones instrumentadas no fue redundante.



**Figura 4:** Historial del diagrama de subpresiones en el bloque 15. D (m) corresponde al ancho de la fundación de la presa en el bloque 15 y SP ( $t/m^2$ ) a la subpresión bajo el sello de fundación.

### c) Caudales

Se ha mantenido un control permanente de las filtraciones a través de las galerías UG e IG controlándose los caudales en los contactos presa-roca y en

las salidas de las galerías (caudal total). Se observó que durante los primeros 6 meses del primer llenado, las filtraciones provenientes de los contactos presa-roca eran significativas, sin embargo éstas comenzaron a disminuir paulatinamente aún cuando el embalse alcanzó su nivel máximo. Actualmente las filtraciones en los contactos son menores a 10 l/s.

Por el contrario, las filtraciones provenientes de los drenes, juntas y fisuras fueron aumentando paulatinamente y en la actualidad constituyen el 70% al 90% de las filtraciones totales. Se debe destacar que muchas fisuras con bajo caudal se colmataron con carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) proveniente de la cal libre ( $\text{CaO}$ ) del cemento de la presa de CCR.

Las filtraciones registradas, con el nivel máximo del embalse (nivel 725 m), alcanzaron a 50 l/s en la UG, 68 l/s en la IG y 160 l/s en la BG (1,8 l/s por metro de altura de presa).

#### d) Desplazamientos

Los desplazamientos del coronamiento de la presa respecto de las laderas, que se aprecian como un buen índice de su comportamiento estructural. Una muestra de algunos desplazamientos medidos en el costado izquierdo de la Presa se incluye en la figura 5.

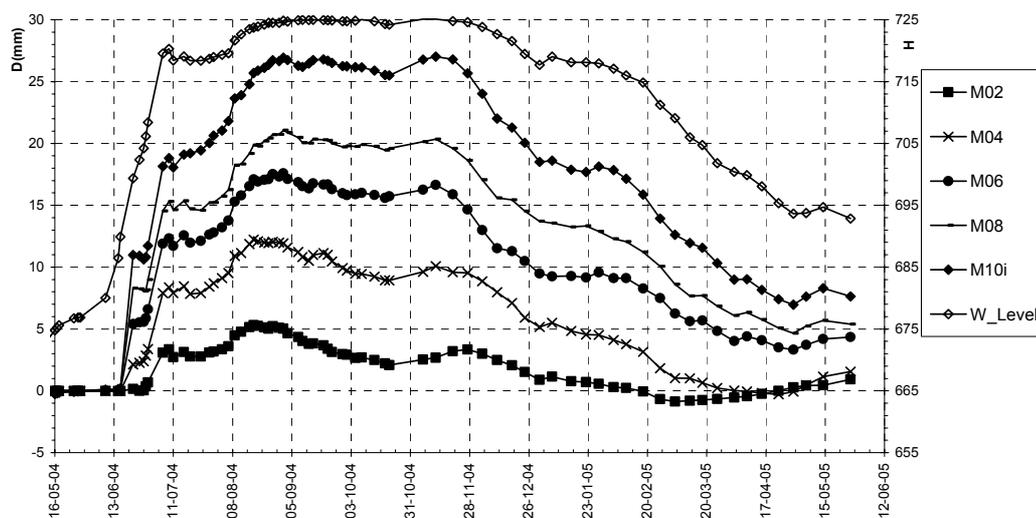


Figura 5: Desplazamientos horizontales del coronamiento.

En este gráfico se puede ver una cierta concordancia entre la variación de la cota del embalse y el desplazamiento de los monolitos. En términos generales, la deformación generada por el empuje del agua se ha recuperado cuando el embalse ha bajado. Debe tomarse en cuenta que los desplazamientos mostrados están afectados por la variación estacional de la temperatura ambiente y por los errores de medición. Los desplazamientos medidos son coherentes con un Módulo de Elasticidad global del orden de 12.000 Mpa. Sin embargo, al comienzo del llenado del embalse se puede apreciar que incrementos de cota de agua no produjeron incrementos proporcionales de deformaciones. Esto se debería a un transiente provocado por la infiltración gradual del agua del embalse en el macizo rocoso.

#### e) Puntas Vinchón

Los desplazamientos de las puntas Vinchón se han medido en las direcciones vertical, longitudinal (paralela al eje de la presa) y transversal. En la gran mayoría de los puntos de medida los desplazamientos transversales y verticales son prácticamente nulos y solamente los desplazamientos longitudinales muestran valores medibles. Esto indicaría que el método constructivo de las juntas, basado en dejar una superficie sinuosa, ha cumplido su objetivo de lograr transmitir el esfuerzo de corte entre bloques. Los desplazamientos longitudinales muestran, en general, valores bajos y en algunos casos valores levemente crecientes, que no tienen correlación con la cota del embalse, lo que se explicaría por el proceso de enfriamiento del hormigón. Se exceptúan de este comportamiento los puntos de medida ubicados en las juntas extremas 1 y 16, que han tenido desplazamientos longitudinales y verticales importantes. Esto indica que los bloques extremos tienden a comportarse en forma independiente del resto de la presa, lo que concuerda con los resultados de los cálculos de estabilidad que se hicieron durante la etapa de diseño.

#### f) Acelerógrafos

No se ha obtenido registro de aceleraciones sísmicas de la roca o de la presa, ya que durante el año transcurrido no ha ocurrido ningún movimiento sísmico de intensidad apreciable.

## **2.2 Sistema de seguimiento global**

### *2.2.1 Descripción*

Además del seguimiento de las variables propias del comportamiento de la presa misma a través de la instrumentación incorporada a ella, el proyecto Ralco considera una serie de acciones de seguimiento global, que comprenden aspectos de carácter físico, en su entorno, y medioambientales. Entre las acciones por aspectos físicos se destacan las relativas al comportamiento de: las laderas del embalse y su vulnerabilidad ante procesos de deslizamientos, de las alteraciones hidrogeológicas del cauce del río en las proximidades de la presa y de la eventual socavación del cauce aguas abajo por alteración del régimen de escurrimiento. Entre los tópicos medioambientales cabe señalar: monitoreo volcánico, de la biota y calidad del agua, de sobrevivencia de especies vegetales vulnerables o en riesgo de extinción, de la población de peces y hábitats de reproducción de peces en la franja de caudal ecológico, de reforestación y restauración paisajística en áreas intervenidas, de planes de asistencia de continuidad a comunidades indígenas.

A continuación se hace una descripción más detallada de los procesos de monitoreos que se estiman de mayor relevancia:

#### *2.2.1.1 Comportamiento de las laderas del embalse:*

El área de inundación del embalse y en especial sus laderas presentan algunos sectores con remociones en masa ocurridas durante la era geológica del Cuaternario. Estas zonas se han monitoreado desde antes del llenado del embalse y se ha hecho un seguimiento del estado de las laderas afectadas por la inundación.

#### *2.2.1.2 Situación hidrogeológica del cauce aguas abajo de la presa:*

Con el objeto de verificar el comportamiento del cauce aguas abajo de la presa frente las alteraciones producto de la operación del embalse, desde

antes del llenado y posterior al mismo, se ha inspeccionado el cauce y las laderas del río Bio-Bío.

#### *2.2.1.3 Seguimiento de la socavación del cauce del río:*

Se efectúa con periodicidad anual, estableciendo las alteraciones altimétricas medidas sobre 13 perfiles batimétricos patrones aguas abajo de la presa, transversales al cauce, situados aproximadamente a 1 km uno de otro. El primer levantamiento fue efectuado con anterioridad al inicio del llenado del embalse, por lo que puede considerarse como línea base o de referencia del comportamiento futuro del cauce.

#### *2.2.1.4 Monitoreo volcánico:*

A distancias variables entre 12 y 50 km del sitio de la presa se sitúan 4 volcanes. Ellos son el Callaqui, el más cercano, que no ha tenido erupciones relevantes en los últimos 1.000 años, pero que actualmente presenta una actividad latente menor del tipo fumarola, el Copahue y el Lonquimay, que sí han estado activos en épocas recientes, pero que se encuentran más alejados de Ralco, y finalmente, el Tolhuaca, sin registro de erupciones históricas y actualmente sólo con actividad geotermal. El sistema previsto para el monitoreo de estos volcanes comprende una red de sismómetros para detección de las señales precursoras de eventos en los volcanes Callaqui y Copahue y una red de receptores geodésicos (GPS), para El Lonquimay y Tolhuaca, complementados con un sistema de limnímetros electrónicos, cuyo objetivo es detectar la afluencia de avalanchas, flujos laháricos y/o piroclásticos y/o de remociones en masa hacia el embalse, mediante observaciones de cambios puntuales e instantáneos de su nivel. Se ha concebido que la información recogida mediante estas redes de instrumentos sea transmitida hacia un centro de control centralizado a través de un sistema de comunicaciones que combina un enlace radial de señales, con la red de comunicaciones propia de la central y con la perteneciente a una empresa de telecomunicaciones privada. En dicho centro de control, ubicado en la Universidad de Concepción, a unos 300 km de Ralco, un equipo de expertos vulcanólogos debe procesar la información y generar las alarmas que sean del caso al detectarse la proximidad de un evento, activando así los

planes de contingencia establecidos para la operación de la central. Está previsto recibir también la información en la sala de comando de la central.

#### *2.2.1.5 Monitoreo de la biota y calidad del agua:*

Se efectúan mediciones trimestrales del material particulado del río y de otros parámetros involucrados, siendo las más relevantes las de concentración de sólidos totales suspendidos en 3 estaciones distribuidas en su curso hasta el océano Pacífico, a unos 300 km de la zona de la presa.

#### *2.2.1.6 Sobrevivencia de especies vegetales vulnerables bajo protección:*

Se ha desarrollado un programa correspondiente a línea base, de identificación de individuos de las especies que se encuentran en esta situación en el tramo de unos 12 km de longitud, situado entre la presa y el punto de restitución de las aguas desde la descarga de la central hidroeléctrica. Las especies protegidas son las denominadas guindo santo, ciprés de la cordillera y lleuque.

#### *2.2.1.7 Monitoreo y estudio de migración de peces:*

Se ha efectuado una campaña de marcaje de más de 6.600 y de recaptura de más de 2.000 individuos, disponiéndose para ello de 12 distintas estaciones de control a lo largo del río Biobío. Es destacable el estudio de reproducción de un tipo de bagre, que es un pez nativo, efectuándose el monitoreo, tanto de su reproducción de manera artificial, como de su alimentación y de las condiciones del medio que le son favorables, destacándose entre éstas las ideales en cuanto a temperatura y calidad del agua.

#### *2.2.1.8 Reforestación y restauración paisajística en áreas intervenidas:*

Por las cortas de vegetación inevitables, derivadas de la construcción de las obras, se ha comprometido como compensación la reforestación de una superficie de 17 km<sup>2</sup>. Esta labor se ha focalizado en 3 sectores correspondientes a reservas nacionales, en zonas de comunidades étnicas

nativas y en terrenos de otras centrales hidroeléctricas de ENDESA Chile. Otro aspecto que ha merecido ser monitoreado a partir de la puesta en marcha del proyecto es la restauración de los sitios que fueron ocupados durante la construcción por instalaciones temporales, escombreras y yacimientos, donde se procede a reperfilarse el relieve del terreno, cubrir con material común y de origen vegetal y sembrar pastos y especies de árboles y arbustos nativos, de preferencia las que se encuentran bajo protección.

#### *2.2.1.9 Planes de asistencia de continuidad a comunidades indígenas:*

Producto de la creación del embalse fueron relocalizadas 77 familias de comunidades indígenas, siendo trasladadas a 2 sitios diferentes en la zona circundante al proyecto. Para estas familias se ha diseñado lo que se denomina un plan de asistencia de continuidad, que establece 4 programas de trabajo por un período de 10 años. Se trata de un programa productivo, ganadero, forestal, uno social, uno cultural y uno turístico. Este plan se ejecuta y se monitorea a través de un equipo de profesionales, que mantienen una relación permanente con las familias y son los encargados de llevar a cabo las actividades de cada programa.

#### 2.2.2 Resumen del comportamiento del sistema de seguimiento global

A continuación, de manera resumida, se presenta una síntesis del comportamiento de las otras variables cuyo seguimiento está considerado en la operación de las obras relacionadas con la presa Ralco:

Comportamiento de las laderas del embalse: De la inspección periódica se ha observado que las zonas de antiguas remociones en masa han permanecido estables y también las laderas, no obstante se ha observado el desarrollo de una erosión superficial de forma escalonada debido al oleaje en los distintos niveles de embalse, no registrándose a la fecha daños importantes sobre el nivel máximo del embalse. En la figura 6 se muestra la erosión producida dentro del área de inundación.

Se ha observado que las zonas de antiguas remociones en masa han permanecido estables y también las laderas. También se ha observado el desarrollo de una erosión superficial de forma escalonada debido al oleaje en

los distintos niveles de embalse, no registrándose a la fecha daños importantes sobre el nivel máximo del embalse.



Figura 6: Erosión superficial escalonada típica por efecto del oleaje

Situación hidrogeológica del cauce: Las inspecciones del cauce y las laderas del río Biobío aguas abajo de la presa no muestran evidencia de filtraciones debido al llenado del embalse.

Seguimiento de la socavación del cauce del río: Después de aproximadamente un año de operación del embalse, los levantamientos efectuados en el alineamiento de los perfiles patrones no muestran mayores variaciones en la topografía del cauce aguas abajo de la presa.

Monitoreo volcánico: Aún no se cuenta con información, por no haberse completado la instalación del sistema de comunicaciones asociado a las redes de monitoreo de sismómetros, GPS y limnímetros, instrumentos que sí se encuentran emplazados en los lugares previstos para ello. En todo caso, desde la entrada en operación de la central y el embalse Ralco no ha habido manifestaciones visibles de algún episodio volcánico. El sistema debería estar operando en el segundo semestre de 2005.

Monitoreos medioambientales: Los monitoreos de estos aspectos, que en general corresponden a programas de estudios y mediciones de distintos parámetros, no han mostrado cambios que sean relevantes como consecuencia de la irrupción de la presa Ralco en la cuenca del Biobío, manteniéndose dentro de los márgenes esperados.

### **3. CONCLUSIONES**

Después de transcurrido un año desde la puesta en agua de la presa Ralco, se puede concluir que su comportamiento global ha sido satisfactorio, tanto en lo referente a la estructura de la presa como a las incidencias ambientales sobre el entorno y las comunidades indígenas locales.

En lo que se refiere a la estructura de la presa, la conclusión apuntada se basa en la comparación de los valores obtenidos de los diferentes monitoreos y sus análisis respectivos, con los correspondientes a los parámetros determinados al efectuar el diseño de la presa.

No obstante lo anterior, se observa como una anomalía dentro del buen comportamiento de la estructura de la presa, la detección de grietas contenidas en planos verticales en la parte central de los bloques 10, 12 y 15; sin embargo, sólo comprometen una fracción de la sección transversal de dichos bloques. Aún cuando ello de ninguna manera compromete la estabilidad de la obra, la existencia de tales planos ha inducido el aumento de la piezometría en la zona del contacto presa-roca en el costado derecho de la presa, la que se ha aproximado a los valores teóricos de diseño. Se estará implementando una limpieza y complementación del sistema de drenaje a objeto de controlar los aumentos de subpresión detectados.

Los seguimientos efectuados en la zona afectada por la inundación del embalse han mostrado que ésta no se ha visto afectada en forma significativa. Del mismo modo, los monitoreos medioambientales no han mostrado cambios que sean relevantes como consecuencia de la irrupción de la presa Ralco en la cuenca del Biobío, manteniéndose dentro de los márgenes esperados.

Los planes de asistencia de continuidad a las comunidades indígenas, que contemplan un programa productivo, ganadero, forestal, uno social, uno cultural y uno turístico, ejecutados y monitoreados a través de un equipo de profesionales, han ido desarrollándose en forma exitosa, logrando producir una aceptación cada vez mayor de la comunidad a su nuevo entorno.