

DIQUE DE RÍO HONDO: UTILIZACIÓN DEL MEF PARA LA EVALUACIÓN DEL ESCURRIMIENTO A TRAVÉS DEL CUERPO DE LA PRESA Y SU FUNDACIÓN.

Ing. Civil Buraschi, Javier, Ing. Civil Pujol, Alejandro
RED Ingeniería SRL - Antártida Argentina 240- Neuquén - reding@infovia.com.ar

RESUMEN

El dique de Río Hondo, proyectado y construido hace aproximadamente 40 años, fue dotado de un conjunto de dispositivos de Auscultación a fin de evaluar su respuesta y realizar un seguimiento permanente de sus condiciones de funcionamiento y seguridad. Las técnicas de Auscultación de presas, tal como se las concibe actualmente, incluyen un conjunto de metodologías de medición de parámetros de respuesta y su análisis a fin de poder evaluar el grado de seguridad de cada una de las estructuras que comprenden un aprovechamiento. En función de ello, se detalla en este trabajo, el análisis y evaluación de las condiciones de escurrimiento a través de la presa y su fundación desarrollado en el marco de las tareas de vigilancia y control de las obras que actualmente se realizan en el dique. Esta evaluación permite por un lado verificar el grado de "normalidad" de los registros obtenidos como así también verificar la capacidad y utilidad de una simulación mediante elementos finitos en la evaluación del comportamiento de estructuras existentes.

ABSTRACT

Río Hondo Dam, projected and built forty years later, was gifted with a set of auscultation devices, in order to evaluate its behavior and do a continuous observation of the operating and safety conditions. The auscultation techniques of dams, such as are presently conceived, include a set of methodologies to measure the reply parameters and its analysis in order to evaluate the security degree of each one of the structure witch form an hydroelectric exploitation. This work details the analysis and evaluation of the seepage conditions trough the dam and its foundation developed in the way of the tasks of vigilance and control of the works that are presently do in the dam. This evaluation allows to test the degree of "normality" of the measure obtained, and on the other hand to verify the capacity and utility of a simulation by Finite Elements in the evaluations of the behavior of the existent structure.

INTRODUCCIÓN

Este artículo presenta los estudios y análisis desarrollados en el marco del control de las obras que componen el aprovechamiento Hidroeléctrico Río Hondo cuya explotación se encuentra actualmente bajo el régimen de concesión a cargo de Hidroeléctrica Río Hondo S.A. Las principales observaciones detalladas aquí fueron realizadas en el marco del primer informe semestral elaborado por Red Ingeniería SRL para el período Julio/Diciembre de 1997, el cual, a fin de determinar el grado de seguridad y de eficiencia en el comportamiento de cada una de las componentes del aprovechamiento, incluyó la contrastación de los resultados de las mediciones con los registros de evolución histórica y las condiciones de funcionamiento previstas por el proyectista. En particular, se detalla aquí la utilización de la técnica de Elementos Finitos en la construcción de esquemas de comportamiento esperado a fin de determinar el grado de "normalidad" de la respuesta observada en cada uno de los parámetros auscultados.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS

Con referencia al Aprovechamiento Río Hondo, una ajustada y precisa descripción fue realizada por uno de sus proyectistas, el Ing. Moretto, durante una conferencia dictada en el año 1984, en el 8º Congreso Argentino de Mecánica de Suelos y Fundaciones. En esa oportunidad el Ing. Moretto relató:

“El dique de Río Hondo está ubicado sobre el Río Dulce, en el extremo Norte de Santiago del Estero, cerca de límite con Tucumán, a corta distancia de la ciudad de Termas. Obtiene su lago aprovechando una extensa hondonada de escasa pendiente, tanto longitudinal como transversal que forma parte de las ondulaciones poco pronunciadas que caracterizan la zona. La presa de Río Hondo no es alta: desde fundación a coronamiento solo llega a 30 m. Tiene, en cambio, una longitud de 4325 m, de los cuales 206 m. son de hormigón armado, para formar vertedero, obras de toma y central hidroeléctrica, siendo el resto de tierra.”

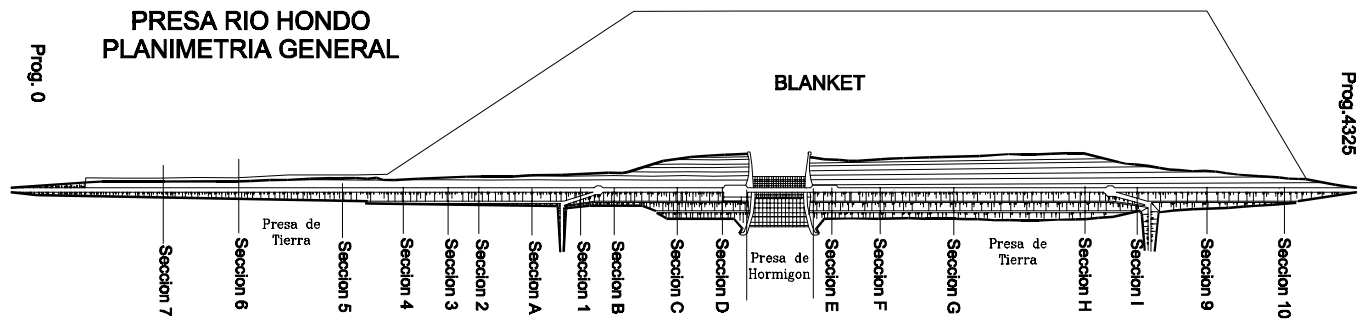
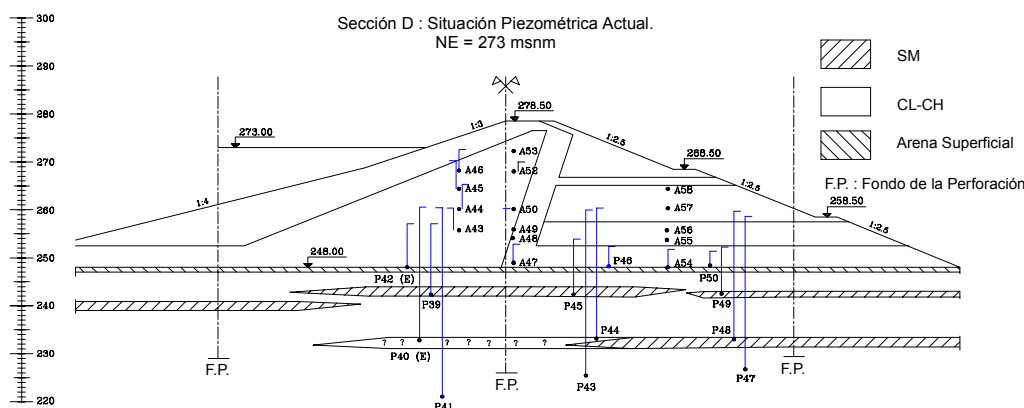


Figura N° 1

“Posiblemente, las circunstancias que más caracterizan la obra de Río Hondo son sus dificultades de fundación y, en especial, la justeza con que se posibilita su realización.” Según una perforación realizada en Termas por Minas y Geología, la roca aparece en esta zona recién a los 800 metros de profundidad. En cuanto a la parte superior del perfil tiene una formación lenticular variable, constituida de limo, arena fina y arcilla compacta. El lecho del río, que tiene un ancho de unos 1400 metros, está cubierto en gran parte de arena fina, producto de su propio arrastre hasta profundidades que superan los 30 metros. Por fortuna, cerca de su margen derecha, existe una extensión de poco más de 200 metros donde aflora a poca profundidad una especie de intrusión de arcilla dura, suficientemente potente y con resistencia adecuada para colocar la obra de hormigón. Este afloramiento tiene justo las dimensiones necesarias, de modo que la obra de hormigón apenas entra, pero permite construirla recurriendo a una cimentación sencilla”.

“Fuera del lecho, las márgenes están cubiertas de limo con una densificación que varía del estado suelto al compacto, una formación de origen loésico, modificada por transformaciones posteriores, que se caracteriza por tener una estructura que se desmorona cuando el suelo se satura bajo carga. Para construir sobre la misma hubo que tratar antes el suelo, inundándolo, para provocar de entrada el derrumbe de su estructura. Las filtraciones (por la fundación), se controlan por medio de una solera impermeable y el espaldón de aguas abajo, formado de limo, se estabiliza con el uso de una chimenea, una solera drenante y un filtro de pié con caño colector y cámaras aforadoras de las pérdidas. No se han provisto, en cambio, ni zanjas ni pozos de alivio por no estimarse necesarios. Un sistema de piezómetros puestos al pié del dique diría sobre el aserto de una hipótesis que el tiempo ha probado era correcta”.

“El núcleo impermeable, también formado de limo, obtenido de las márgenes en las inmediaciones de la presa, es

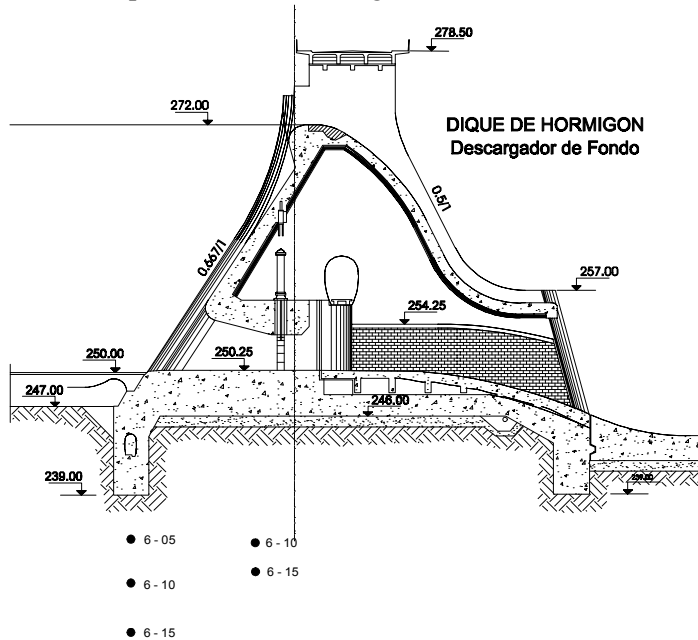


inclinado, se continúa en la solera impermeable (blanket) y forma parte del espaldón de aguas arriba. Este se completa con una fuerte cuña de arena fina y un recubrimiento de escollera, el talud de aguas abajo está recubierto de tierra vegetal” (En la figura se detalla el perfil transversal

de una sección tipo y la instrumentación instalada).

Figura N° 2

“Fuera del lecho del río, la presa de tierra conserva el mismo perfil, aunque sin la solera impermeable, pues el limo que cubre las márgenes constituye de por sí una solera de este tipo. La solera se extiende, no obstante, parcialmente sobre las márgenes en transición triangular. La obra de hormigón es armada, constituida de contrafuertes y losas formando cajones. Es aliviada para que las tensiones transmitidas a la fundación no resulten excesivas para la arcilla. Longitudinalmente, está constituida por juntas cada 15.60 m. proyectadas para que la estructura absorba, sin daño, un asentamiento de gran magnitud. Se extiende aguas abajo en una pileta de quietamiento, donde descargan las crecidas y en disipadores de energía, formados por una serie de dientes rompeolas de hormigón”.



La estructura absorba, sin daño, un asentamiento de gran magnitud. Se extiende aguas abajo en una pileta de quietamiento, donde descargan las crecidas y en disipadores de energía, formados por una serie de dientes rompeolas de hormigón”.

“Todo el dique de hormigón está cimentado sobre arcilla dura, incluidos los muros de ala que forman el contacto entre estructura de hormigón y dique de tierra. A pesar de sus escasos 30 m. de altura, esta obra participa de la distinción de ser una de las presas de hormigón más altas del mundo fundadas sobre arcillas. Se posibilita gracias a detalles muy cuidadosos en cuanto a drenes y filtros disipadores de la subpresión, los que sirven de defensa respecto a su posible deslizamiento, pues es esta una seguridad difícil de conseguir cuando hay arcilla como terreno de fundación”.

Figura N° 3

PRESA DE MATERIALES SUELTOS. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO OBSERVADO.

Descripción del Sistema de Auscultación.

Actualmente, los parámetros Auscultados en la presa de tierra son: Presiones neutras en el cuerpo de la presa y fundación, Nivel de la Línea de Saturación, Asentamientos y Caudales de filtración.

Respecto del control de presiones neutras en la fundación se han instalado en diferentes profundidades un conjunto de piezómetros Casagrande ubicados hacia aguas arriba, por debajo y hacia aguas abajo del eje de presa.

La información piezométrica se complementa con un conjunto importante de Piezómetros en Asentímetros (tipo Casagrande) y Células electroacústicas instalados en tanto en el Núcleo como en el espaldón de aguas abajo de la presa. En el perfil de la presa de la página anterior se detalla una distribución típica de los piezómetros en una de las secciones Auscultadas.(Sección D). Los instrumentos han sido agrupados fundamentalmente en el sector correspondiente al antiguo cauce del río, en las secciones identificadas como A, B, C y D (sobre el sector de margen Derecha) y E, F, G, H, e I, en la margen Izquierda. (Ver Figura de Planimetría General)

Con respecto a los asentamientos, actualmente se realizan campañas de nivelación de precisión sobre mojones instalados en el coronamiento y distanciados aproximadamente unos 25 metros entre sí. Por último, los caudales de drenaje colectados por el sistema solera/dren son medidos en cámaras aforadoras distribuidas a lo largo del pie de presa.

A partir de la descripción de las principales características del proyecto y los puntos más críticos o de mayor importancia con referencia a la seguridad de las obras realizadas en el punto anterior, pueden resaltarse los siguientes aspectos:

- La presa se encuentra en una longitud importante fundada sobre terrenos permeables (arenas), en donde, además, se desarrollan las secciones de mayor altura (dentro del antiguo cauce del río).

La construcción del blanket hacia aguas arriba cumple una función fundamental en el control de presiones neutras en la fundación y la prevención de riesgos de sifonaje. En este sector de la fundación, se instalaron numerosos piezómetros Casagrande a fin de verificar la eficiencia de la solución adoptada y la presencia de aguas termales a presión.

- Un punto muy importante a fin de interpretar el comportamiento de la presa, sobre todo en el sector donde se ubicaba el cauce del río, es la distribución de materiales en la fundación y los antecedentes previos a la construcción de la obra. A tal fin debe considerarse que "el cauce del río está formado por arcillas muy compactas, en cuyo interior se hallan, a partir de los 15m. aproximadamente de profundidad (Cota 233) lentes arenosos con agua a presión de carga más o menos igual en algunos casos superior al terreno natural. Este banco de arcilla está cubierto en su parte superior por un manto de arena de espesor variable desde pocos metros en su lado derecho hasta cerca de 25 m. en el izquierdo" (Moretto).
- A fin de mantener bajo observación las presiones neutras en el interior de la presa se instalaron en 9 secciones instrumentadas (a ambos lados del tramo de hormigón) piezómetros en Asentímetros y Células Electro-Acústicas.
- La instrumentación del cuerpo de la presa se complementó con un conjunto de asentímetros distribuidos en su interior a fin de mantener bajo control la posible ocurrencia de asentamientos debido a dificultades surgidas en el proceso de compactación en el material del núcleo.

Objetivos y Metodología de Análisis.

Los objetivos del control y seguimiento de las obras resultan variables y se ajustan en el tiempo a sus diferentes estados de carga y/o funcionamiento. No obstante puede realizarse una clasificación entre aquellos controles a realizar durante la construcción y primer llenado, y aquellos propios de la fase de operación normal, a varios años de la puesta en carga de la obra. Los primeros resultan normalmente más intensivos y de mayor detalle en función de la experiencia recogida a lo largo de la historia de falla de presas, las cuales en su mayor parte ocurren durante el primer llenado. Los segundos, buscan detectar efectos de mayor alcance o modificación de los parámetros principales de funcionamiento (permeabilidad, consolidación secundaria, etc.) o la respuesta ante eventos de ocurrencia excepcional (sismos).

Mientras que el control inicial se realiza comparando los valores medidos con aquellos esperados de acuerdo a estimaciones y cálculos previos, en la fase de operación se cuenta con una cantidad importante de información proveniente del Sistema de Auscultación instalado por lo cual es posible analizar además de los valores alcanzados por cada parámetro, su evolución en el tiempo.

De acuerdo a lo anterior, además de los objetivos generales de control de funcionamiento de cada una de las estructuras del aprovechamiento, el análisis desarrollado tiene los siguientes objetivos particulares:

- Eficiencia del Blanket: Análisis de Niveles piezométricos en la fundación y su evolución. Detección de modificaciones en las condiciones de permeabilidad de la fundación y/o integridad del blanket.
- Eficiencia del Sistema Núcleo / Filtros : Evolución de los niveles piezométricos en el interior del núcleo y en el espaldón de aguas abajo. Análisis de la evolución de los registros obtenidos para la detección de problemas de lento desarrollo (tubificación, etc.).
- Evolución de las filtraciones colectadas por el sistema de drenaje ubicado a pie de presa y de arrastre de material fino en el sector del antiguo cauce del río en donde se detectaron napas artesianas de elevada presión por debajo de terrenos relativamente impermeables en la fundación de la presa.
- Detección de modificaciones en la evolución de los registros de asentamiento históricos y comparación con los valores y tendencias esperadas de acuerdo a la fase de consolidación actual.

Con referencia a la información obtenida a partir de las mediciones realizadas en el conjunto de los dispositivos de auscultación instalados, su evolución es representada en forma de gráficos ya sea en función del tiempo o del tipo causa / efecto vinculando el parámetro medido con las variaciones del nivel de embalse, la temperatura, etc.

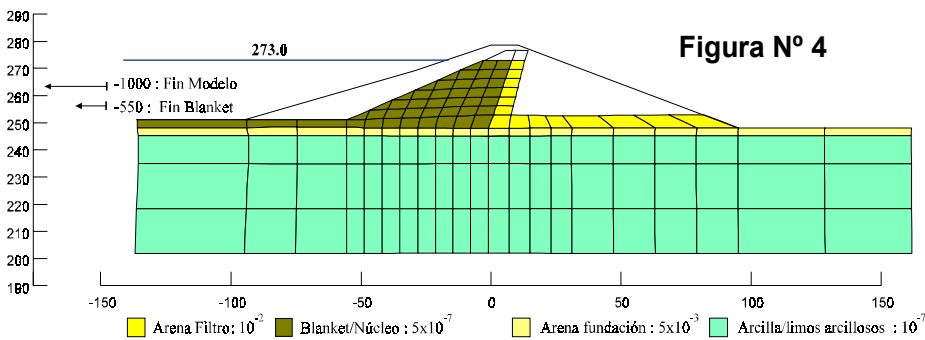
Comportamiento esperado

Uno de los objetivos de la Auscultación es establecer si los valores observados se corresponden con las previsiones de proyecto. Sin embargo, existe un numeroso grupo de obras en el país proyectadas y construidas hace más de 40 años, en las cuales pocas veces se dispone de los criterios de diseño utilizados y en otros, se encuentran ya superados por el estado del arte actual.

A fin de obtener los parámetros de respuesta esperados ante cada situación de carga, se realizó un análisis del esquema de escurrimiento en base a Elementos Finitos, siguiendo la distribución de materiales para cada sección detallada en las memorias de las campañas de investigación geotécnica desarrolladas durante la construcción. Este análisis consideró, en principio, una geometría similar a las de las secciones D o E, ubicada a ambos lados de la presa de hormigón. Los valores de permeabilidad adoptados para cada material correspondieron a valores medios de los indicados en las memorias de proyecto para núcleo y fundación y valores extrapolados de otras obras similares para material de filtro, solera drenante y espaldón de aguas arriba.

Resultados obtenidos

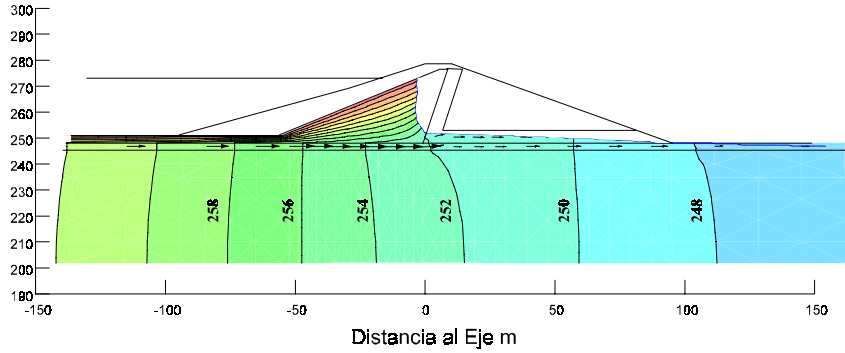
En la figura siguiente se detallan las principales características del modelo utilizado: malla y tipo de elementos, distribución de materiales y valores de permeabilidad adoptados.



Se hace notar que el modelo se extendió hasta 1000 mts hacia aguas arriba del eje de la presa, abarcando todo el desarrollo del blanket y una zona de captación de 400 metros finalizada en elementos infinitos que mejoran substancialmente las condiciones de borde en los límites del modelo.

Los resultados obtenidos considerando el nivel de embalse

igual a 273 msnm: pelo libre en el cuerpo de la presa, campo de velocidades y curvas equipotenciales, se representan en la figura siguiente.



De su observación se desprenden los siguientes puntos más importantes:

- La línea de saturación permanece dentro de la solera drenante en el espaldón de aguas abajo. Esta condición que resulta fundamental para la estabilidad se obtiene al suponer un excelente funcionamiento del dren de pie de presa y de la solera drenante, lo cual produce un importante gradiente en el perfil de la superficie libre hacia aguas

abajo.

- Los vectores velocidad dibujados evidencian que la gran parte de las filtraciones pasan a través de la capa de arena superficial, la cual alimenta a la solera filtrante y es drenada por el dren de pie de presa. Ese efecto reduce

los gradientes sobre el espaldón de aguas abajo obteniéndose líneas equipotenciales casi verticales (distribución casi hidrostática).

- En la fundación del pie de aguas arriba, los niveles resultan aproximadamente 260 con una importante pérdida de carga respecto del nivel de embalse de aproximadamente el 45 %.
- En el núcleo resulta una pérdida de carga importante, con salida de la superficie libre en la base del filtro de aguas abajo. No obstante, debe indicarse que el nivel del agua en la solera está controlado por el flujo en la capa de arena superficial de la fundación y no por el flujo a través del núcleo, que resulta prácticamente nulo.
- Por otra parte, a fin de considerar en cierta forma la influencia que lentes arenosas más o menos continuos por debajo de la cota 230 tendrían sobre los niveles piezométricos se consideró en forma complementaria un modelo que incluyó una capa de arena de 5 m. de espesor no continua hacia aguas arriba y abajo, sino confinada entre el eje y el pie de presa. El resultado indicó que esta capa sería drenada por la solera y los niveles piezométricos bajos que se observan en la fundación del espaldón se extenderían hacia cotas inferiores y hacia aguas arriba. Como esta situación no guarda relación con lo observado, no se describe en detalle.

Comportamiento Observado

La situación piezométrica para los niveles máximos de embalse alcanzados en los últimos años en una sección tipo ubicada sobre el antiguo cauce del río se resume en la Figura N° 2. A partir de los niveles registrados y de su comparación con aquellos obtenidos en el modelo, se concluye:

Fundación

- Los niveles piezométricos en la fundación del espaldón de aguas abajo se mantienen a nivel del techo de la solera filtrante. Este punto, previsto por el modelo de análisis, resulta trascendente para las condiciones de estabilidad del espaldón de aguas abajo.
- Hacia aguas arriba del eje de presa, los piezómetros ubicados en la fundación por encima de la cota 230 registran niveles piezométricos cercanos a 255, valor prácticamente idéntico al previsto por el modelo matemático en ese sector. En este sentido debe resaltarse que el modelo utilizado, con los valores de permeabilidad establecidos en la documentación de proyecto, predice ajustadamente la reducción de presiones neutras a lo largo de la fundación de 500 m. de blanket hasta la fundación de la presa.
- En cotas inferiores a 230 y hacia aguas abajo, los niveles medidos resultan aproximadamente 6 metros superiores a los calculados. De la descripción de la estratigrafía de la fundación realizada en las memorias citadas se destaca la presencia de napas a presión anteriores a la construcción de la presa en este sector, con niveles incluso superiores al terreno natural. Por lo tanto, se considera muy probable que esta situación se haya mantenido en el tiempo ya que responde a la hidrogeología propia de la zona. El comportamiento observado plantea la existencia de dos "acuíferos" independientes separados por una capa de arcilla de aproximadamente 20 metros. Este hecho parece confirmarse con los resultados de los análisis de agua de las cámaras aforadoras de ese sector que indican la presencia de contenidos altos de flúor propios de las aguas termales de la zona.

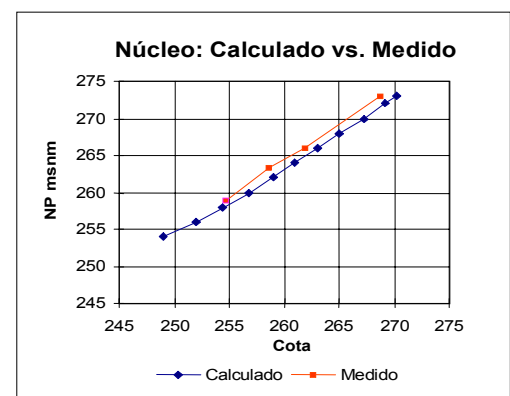
Núcleo

- En la figura de la derecha se representó la distribución de niveles piezométricos en el núcleo, para los casos medidos y calculados.

En abscisas se indicaron las cotas a lo largo de una vertical 10 metros hacia aguas arriba del eje de la presa y en ordenadas los niveles piezométricos correspondientes.

Como se observa, los valores medidos resultan levemente superiores a los calculados aunque de variación muy similar.

Esta última característica indica que los órdenes de permeabilidades del modelo y la realidad son bastante similares, excepto en la zona del núcleo en contacto con el espaldón de



aguas arriba donde probablemente exista una zona de transición de condición de permeabilidad intermedia entre espaldón y núcleo, no considerada en el modelo, que provoque el pequeño decalaje observado en el gráfico.

Se concluye que tanto para el cuerpo de la presa como para los niveles superiores de la fundación los niveles piezométricos alcanzados resultan similares a los previstos por el modelo de escurrimiento para condiciones de funcionamiento normales. Los niveles inferiores de la fundación evidencian un comportamiento aislado del sistema generado por el embalse toda vez que sus niveles son generados a partir de la hidrogeología propia de la zona y previa a la construcción del embalse.

PRESA DE HORMIGÓN

Tal como lo indicara el Ing. Moretto sobre el sector de hormigón se ubica uno de los puntos más críticos de la obra : la unión del blanket con la estructura de hormigón. Una falla en este punto produciría el ingreso de agua a presión en la fundación de la presa incrementando los riesgos de sifonaje y deslizamiento. Para su vigilancia, se han instalado un conjunto de piezómetros aproximadamente alineados bajo el diente de hormigón de aguas arriba y en el tercio central de la solera de cada módulo según la disposición que se observa en la Figura N° 3.

Análisis del Escurrimiento bajo hipótesis de proyecto.

Al igual que lo indicado para la presa de tierra, en este sector la principal atención está destinada a mantener bajo observación a aquellos parámetros considerados más críticos por el proyectista para la estabilidad de la obra.

En particular el seguimiento de las presiones neutras en la fundación a fin de prever posibles modificaciones en el sistema Blanket-fundación y la comparación de los niveles de presiones neutras en la fundación con aquellos previstos por el proyectista en sus cálculos de estabilidad. Sobre este particular, debe considerarse:

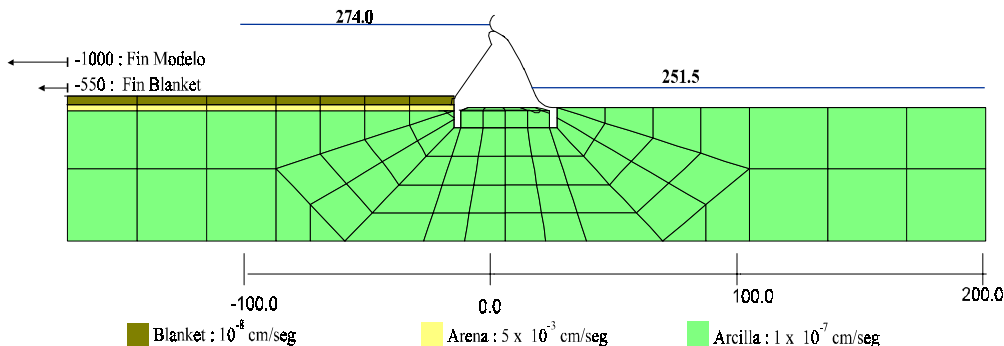
- Para el proyecto, el análisis de escurrimiento fue realizado mediante el procedimiento de analogía eléctrica. El modelo contempló la existencia de una capa de arena por debajo del blanket de aproximadamente 1.5 m de espesor. Por debajo de la arena se consideraron 2 posibilidades: a.) un estrato ilimitado de arcilla o b.) un estrato de arcilla de 20 metros y por debajo una capa de arena similar a la superficial.
- El modelo analizado consideró la colocación de un dren adyacente al diente de aguas abajo pero no incluyó el dren de aguas arriba, no contemplado hasta esa fase del proyecto. En principio, el dren de aguas arriba fue colocado posteriormente al análisis realizado como una medida adicional para una eventual rotura de la unión blanket/ hormigón. Sin embargo, como se verá más adelante, su influencia es determinante en el control de las subpresiones inmediatamente hacia aguas arriba de la presa.

A fin de poder evaluar las condiciones actuales de funcionamiento se consideró necesario determinar la distribución de presiones neutras esperables en la fundación considerando la instalación del dren de aguas arriba, manteniendo constante el resto de los parámetros especificados en el proyecto. Se realizó para ello un análisis por Elementos Finitos del esquema de escurrimiento esperado considerando un nivel de embalse de 274 msnm y un nivel de restitución de 251.50 (condiciones de proyecto).

Como resumen del análisis realizado se detalla:

- El modelo contempló valores de permeabilidad medios para la arena superficial y la arcilla respecto de los rangos indicados en las memorias mencionadas.

En la Figura se esquematizó la malla de elementos finitos, el tipo de elementos utilizados y los valores de permeabilidad adoptados.



- Se consideraron 4 escenarios diferentes:

Escenario 1: Situación sin drenaje. Arcilla infinita. Este escenario es solo conceptual y busca poner de manifiesto los valores y distribución de presiones neutras esperables en caso de producirse una pérdida total o parcial del sistema de drenaje.

Escenario 2: Sistema de drenaje de Proyecto. Arcilla infinita. Busca poner de manifiesto la distribución de subpresiones resultante de las hipótesis de proyecto y la eficiencia de un solo dren para el control de presiones neutras en la fundación.

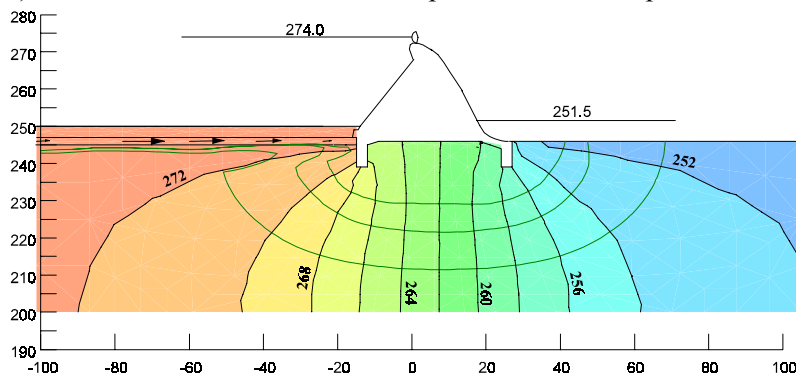
Escenario 3: Sistema de drenaje actual. Arcilla infinita. Evalúa la distribución de presiones neutras esperables considerando el funcionamiento óptimo de ambos drenajes.

Escenario 4: Sistema de drenaje actual. Banco de arcilla de 20 metros seguido por un estrato infinito de arena similar a la superior.

En todos los casos se consideraron relaciones de anisotropía K_h/K_v iguales a 1 y 10.

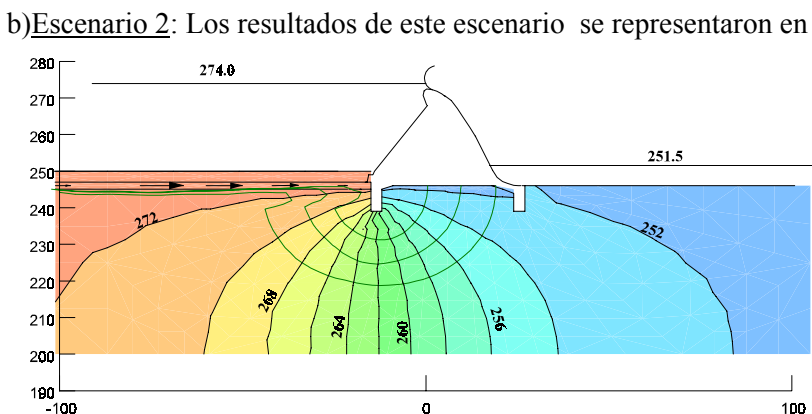
Resultados obtenidos del cálculo de la red de escurrimiento

- a) Escenario 1: La distribución de presiones neutras presenta un fuerte gradiente en la fundación desde un valor prácticamente coincidente con el nivel de embalse hacia aguas arriba hasta la



prácticamente coincidente con el nivel de embalse hacia aguas arriba hasta la restitución hacia aguas abajo. La presencia de una capa de arena bajo el blanket, conectada con el embalse hacia aguas arriba y prácticamente confinada hacia aguas abajo por la presa y la arcilla, crea un efecto de “tubo cerrado”, con un flujo muy bajo, una reducida pérdida de carga y presiones en el extremo prácticamente iguales al nivel de embalse. Comparada con la distribución de presiones considerada en el proyecto en este escenario las subpresiones sobre el diente de aguas arriba resultarían visiblemente superiores, variando de un valor igual a 30 mca en la base del diente hasta aproximadamente 25 mca en la base del blanket.

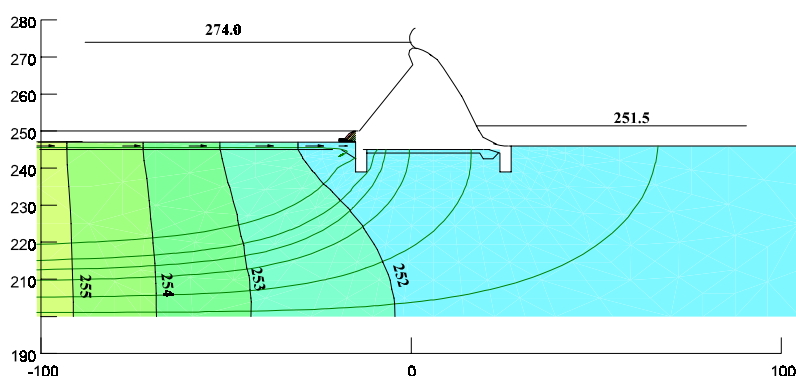
b) Escenario 2: Los resultados de este escenario se representaron en la figura siguiente.



Como se observa, el efecto del dren hacia aguas abajo reduce notablemente las subpresiones en la base de la solera, concentrando todo el gradiente en el sector del diente de aguas arriba pero sin llegar a reducir al nivel de la restitución las presiones sobre la base del diente de aguas arriba, como se consideró en los análisis de estabilidad del proyecto. Se observa también que esta solución mantiene el efecto de “tubo cerrado”, produciendo

niveles muy similares al nivel de embalse en el extremo de aguas abajo de la capa de arena.

- c) Escenario 3: Los resultados para este escenario 3 son resumidos en la figura siguiente.



Evidentemente, los valores de presiones neutras y su distribución varían considerablemente respecto de los casos anteriores debido a la marcada influencia del dren de aguas arriba. La instalación del dren elimina el efecto de “tubo cerrado” de las soluciones anteriores y produce alrededor de la fundación una distribución de niveles

piezométricos aproximadamente constante y de valores ligeramente superiores al nivel de restitución. La causa de una reducción tan marcada de las presiones en la fundación de la presa es provocada por un incremento importante en los caudales de drenaje. En el escenario 2 las pérdidas resultaban prácticamente despreciables : 90 lts/hora, mientras que con la incorporación del dren de aguas arriba, ascenderían a 3600 lts/hora (1 lts/seg). Por otra parte, el efecto del dren de aguas arriba genera un incremento muy marcado del coeficiente de seguridad al deslizamiento sobre las estimaciones del proyecto,; aproximadamente el 50%. El efecto de la anisotropía en la arcilla produce una tendencia de las líneas equipotenciales a horizontalizarse y desplazarse hacia aguas abajo con mayores valores en los primeros metros por debajo de la fundación que aquellos calculados al considerar un material isótropo. Este punto tiene una particular importancia al momento de la interpretación de los registros obtenidos.

d) **Escenario 4:** Por último, el escenario 4 consideró la presencia de un estrato de arena de características similares a la superficial por debajo de la arcilla y con continuidad en toda la extensión del blanket y hacia aguas abajo. La existencia de esta capa contribuye al drenaje de la fundación de la presa, extendiendo la eficiencia de los drenes en profundidad y hacia aguas arriba. Los caudales de filtración resultan no obstante muy similares al escenario 3. Debe considerarse también que la distribución piezométrica representada resulta dependiente de las condiciones de borde del problema. Si esa capa de arena no tuviera continuidad hacia aguas abajo (pero sí hacia aguas arriba), los niveles piezométricos crecerían mucho, por el mismo mecanismo de “tubo cerrado” indicado anteriormente, alcanzando valores de 264 msnm en la base de la arcilla y decreciendo en forma casi lineal hacia la superficie. En realidad, en las descripciones de la estratigrafía de la fundación realizada durante las campañas de investigación se indica la presencia de lentes arenosos por debajo de los 20 metros del manto arcilloso antes que una capa continua de arena, conteniendo agua a presión cuyo nivel piezométrico superaba muchas veces al nivel del terreno natural.

Análisis del comportamiento observado

Con referencia a los niveles piezométricos registrados en la fundación de la presa pudo observarse que los valores alcanzados para niveles de embalse cercanos a 273 resultan diferentes a los indicados en los gráficos del punto anterior.

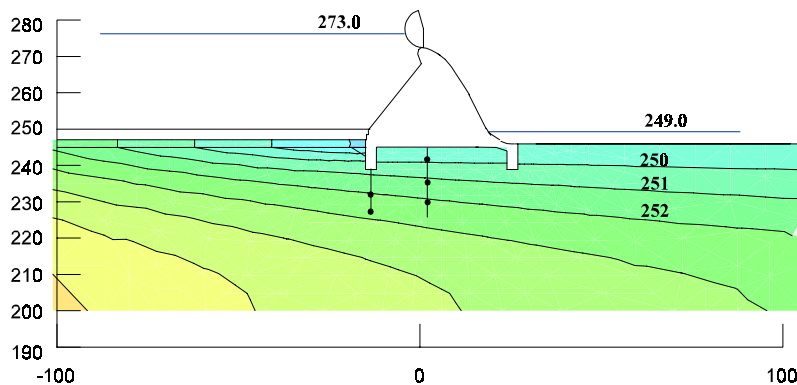
Si bien el cálculo allí especificado fue realizado bajo las condiciones de proyecto, esto es Nivel de embalse a cota 274 y nivel de restitución 251.50, se observa que la distribución de las curvas equipotenciales allí indicadas no resultan adecuadas para representar la situación medida, independientemente de los valores en si mismos.

En particular, resulta:

- Por sobre la cota 230, los niveles piezométricos medios a lo largo de prácticamente toda la fundación se ubican entre 250 y 252 msnm.
- Por debajo de la cota 230, muy probablemente dentro de la zona en la cual se encontraron lentes de arena con agua a presión durante las etapas de investigaciones previas a la obra, los niveles medios en toda la fundación resultan más elevados, del orden de 256 msnm.
- Esta situación es similar a la observada en la fundación de la presa de materiales sueltos, en el sector ubicado sobre el viejo cauce del río, e incluso, los niveles piezométricos resultan similares, por lo cual resultan válidas las observaciones realizadas en oportunidad de su análisis, indicando la presencia de dos acuíferos de comportamiento diferente, separados por una gruesa capa de arcilla, prácticamente impermeable. Mientras que los niveles superiores junto a la capa de arena superficial participa del esquema de flujo generado por el embalse, los niveles inferiores mantienen los niveles de presión neutra propios de la hidrogeología del sitio, y presentes con anterioridad a la construcción de la presa.
- En los niveles por sobre la cota 230, se observa que instrumentos ubicados a aproximadamente la misma cota (aquellos ubicados 5 metros por debajo del diente de fundación de aguas arriba y los instalados 10 metros por debajo de la fundación de la solera de la presa) indican valores muy similares en todos los módulos. Esta situación indica que las líneas equipotenciales en la superficie tienden a resultar más horizontales que aquellas indicadas en el cálculo mencionado.

En función de lo indicado se construyó un nuevo modelo de escurrimiento tendiente a explicar el mecanismo de escurrimiento en los niveles superiores a 230 (los inferiores obedecen a causas independientes del flujo) . En este modelo se consideraron los mismos valores de permeabilidad que en los cálculos iniciales pero modificando la relación de Anisotropía. Es conocido que en suelos naturales, y más aún, en depósitos aluvionales, la relación

K_h/K_v puede llegar a ser muy elevada. De los cálculos detallados con anterioridad se observa como el incremento de la relación de anisotropía produce una horizontalización de las curvas equipotenciales bajo la fundación de la presa. Partiendo de la distribución piezométrica observada a través de las mediciones en los niveles superiores, se determinó que una relación de anisotropía igual a 50 genera un esquema de flujo bastante coherente con el observado.



En la figura se representaron las curvas equipotenciales calculadas, donde se ha superpuesto la posición de los piezómetros a fin de facilitar su comparación con los valores medidos. En general se observa que el modelo indicado produce valores inferiores a 252 por sobre la cota 230 y una horizontalidad de las curvas equipotenciales en ese nivel, tal cual es el mecanismo observado.

SÍNTESIS Y CONCLUSIONES

En los puntos anteriores se detalló para uno de los componentes de la obra su estado de funcionamiento considerando los registros de la instrumentación instalada y las observaciones realizadas en las sucesivas inspecciones realizadas. En particular:

- Se indicaron los objetivos específicos del control de las obras de Río Hondo atento a las particularidades del diseño. Se enumeraron los puntos de mayor necesidad de control y su relación con los criterios seguidos por el proyectista.
- Se realizó un análisis numérico sobre un modelo de escurrimiento de la presa de materiales sueltos. Este análisis permitió definir los órdenes de presiones neutras esperables en el núcleo y en la fundación de la presa.
- De igual forma se realizó un estudio de la red de escurrimiento bajo la presa de hormigón de acuerdo a las hipótesis de proyecto. Se analizó además la situación considerando la configuración del sistema de drenaje actual y aquella esperable en caso de que este pierda su eficiencia.

Del conjunto de estudios realizados, se concluye:

Presa de Materiales Suelos

Dentro del cauce del río la distribución piezométrica en la fundación indica la presencia de dos acuíferos de respuesta diferente. Inmediatamente por debajo del blanket y la presa, aparece una capa de arena de espesor variable por donde, según los modelos de escurrimiento, se desarrolla en gran parte el flujo. Por debajo de la arena superficial se extiende una capa de arcilla y/o limos arcillosos de aproximadamente 20 metros de espesor, que independiza a los niveles subyacentes del comportamiento inmediatamente por debajo de la presa. Por debajo de la arcilla, y conforme a la descripción realizada en la litología de proyecto, se encontraría un segundo acuífero constituido por arcilla con lentes de arena a presión cuyos niveles piezométricos resultan más elevados y condicionados por la hidrogeología histórica, incluso previa a la obra.

Los niveles superiores, por donde se desarrolla principalmente el flujo presentan en general valores concordantes con la red de escurrimiento calculada, evidenciando bajos gradientes y una distribución prácticamente hidrostática debajo de la solera drenante del espaldón de aguas abajo.

Con los niveles piezométricos actuales, se considera que no existen riesgos de inestabilidad y sifonaje en ninguna de las secciones instrumentadas.

Los valores de presiones neutras en el núcleo resultan bastante similares a los resultados de los cálculos realizados al igual que su distribución. El núcleo evidencia una importante pérdida de carga con una línea de saturación con salida en la base del filtro de aguas abajo, situación casi óptima desde el punto de vista de la seguridad del espaldón de aguas abajo.

En general los registros son estables, sin evidencias de desarrollo de algún proceso de erosión interna en las secciones instrumentadas.

Presa de Hormigón

Se observa que se mantienen en la fundación de este sector las mismas características observadas en el resto del cauce del río. Esto es, la presencia de dos acuíferos diferentes separados por una capa de arcilla de aproximadamente 20 metros de espesor. Los niveles piezométricos en el acuífero superior, que son los que afectan más directamente a las condiciones de estabilidad de la presa, resultan en general bajos, similares a los niveles de restitución y compatibles con los resultados del modelo de cálculo. Su factor de seguridad al deslizamiento resultaría elevado, superior a 2, y en condiciones más favorable que las especificadas en las memorias de proyecto, debido al importante efecto del dren instalado hacia aguas arriba.