

no superiores a unas 18 veces el ancho del cauce asociado al caudal medio diario. La recuperación del lecho se definió como la obtención de las cotas de fondo que habría al final del período si el proyecto de extracción no se realizara. El tiempo de recuperación estimado resultó ser del orden de dos años. Una herramienta esencial en estos análisis fue la ecuación de balance de masa de sedimento, que sumada a la aplicación de la ecuación de gasto sólido de Ackers y White y a la corrección de la curva granulométrica mediante el criterio de Bagnold para eliminar fracciones de material que pudieran estar en suspensión, predijeron resultados razonables de la variación de las cotas de fondo del cauce. Otro aporte de esta metodología es la aplicación del promedio móvil como un filtro que elimina el ruido de los cálculos asociado al error de los datos topográficos. Finalmente, se hace notar la necesidad de una validación con datos de terreno de ríos chilenos, de las expresiones de cálculo de gasto sólido existentes, a fin de mejorar la predicción del fenómeno.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo prestado por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile y el Ministerio de Obras Públicas a través del *Estudio Integral y Digitalización del Río Aconcagua*, Marzo 2000.

REFERENCIAS

Ackers P. y W.R. White. 1973. Sediment transport: A new approach and analysis. Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the ASCE, Vol. 99, N° HY11, pp 2041 – 2060.

MOP. 2000. Estudio Integral y Digitalización del Río Aconcagua. Ministerio de Obras Públicas, Ayala y Cabrera Ingenieros Consultores Asociados, Chile.

Meyer-Peter E. y R. Müller. 1948. Formulas for Bedload Transport. Proceedings, 2nd Congress I.A.H.R., Stockholm

Parker G. 1990. Surface - based bedload transport relation for gravel rivers. Journal of Hydraulic Research, Vol. 28, N° 4, pp 417 – 436.

Quiroz, A. 2001. "Metodología de Análisis de Extracción de Áridos en Cauces Naturales Chilenos". Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

EFICIENCIA DEL COLECTOR DE AGUAS LLUVIAS GRECIA-QUILÍN CON EL ZANJÓN DE LA AGUADA

HORACIO MERY M.¹
MAX BORCHERT P.²
OBRAS HIDRÁULICAS

El proyecto de la Dirección de Obras Hidráulicas denominado "Descarga del Quilín al Zanjón de la Aguada". El Zanjón presenta una pendiente fuerte en su curso, que origina escurrimientos torrenciales que hacen más complicado el diseño de las perturbaciones que se producen en la canalización cuando hay crecidas, como ocurre en este caso.

Este problema fue comprobado en un modelo físico a escala reducida de 1:20, en el Laboratorio Nacional de Hidráulica. El modelo corroboró la incapacidad del proyecto original e indicó el incremento requerido en el ancho de la sección, para soportar las crecidas centenarias en el Zanjón de la Aguada.

¹ Director de la Dirección de Obras Hidráulicas. Profesor Titular, U. de Chile
² Director Nacional de Hidráulica
³ Director Ejecutivo, Instituto Nacional de Hidráulica. Profesor Asociado, U. de Chile

no superó el límite de 100 m/s. La recuperación del lecho se definió como la obtención de las cotas de fondo que han resultado ser del orden de dos años. Una herramienta esencial en estos análisis fue el balance de masa de sedimento, que sumada a la aplicación de la ecuación de Ackers y White y a la corrección de la curva granulométrica mediante el criterio de Ackerly y White para eliminar fracciones de material que pudieran estar en suspensión, predijeron razonables de la variación de las cotas de fondo del cauce. Otro aporte de esta investigación fue la aplicación del promedio móvil como un filtro que elimina el ruido de los datos al error de los datos topográficos. Finalmente, se hace notar la necesidad de contar con datos de terreno de ríos chilenos, de las expresiones de cálculo de gasto sólido a fin de mejorar la predicción del fenómeno.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo prestado por el Departamento de Ingeniería de la Universidad de Chile y el Ministerio de Obras Públicas a través del Programa de Digitalización del Río Aconcagua, Marzo 2000.

REFERENCIAS

- Ackers P y W.R. White. 1973. Sediment transport: A new approach and analysis. Proceedings of the Hydraulics Division, Proceedings of the ASCE, Vol. 99, N° HY11, pp 763-776.
- MOP. 2000. Estudio Integral y Digitalización del Río Aconcagua. Ministerio de Obras Públicas, Ayala y Cabrera Ingenieros Consultores Asociados, Chile.
- Meyer-Peter E. y R. Müller. 1948. Formulas for Bedload Transport. Proceedings of the 2nd Congress I.A.H.R., Stockholm.
- Parker G. 1996. Surface-based bedload transport relation for gravel rivers. Journal of Hydraulic Research, Vol. 28, N° 4, pp 417-436.
- Quiroz, A. 2001. "Metodología de Análisis de Extracción de Áridos en Ríos de Chile". Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

CONFLUENCIA DEL COLECTOR DE AGUAS LLUVIAS GRECIA-QUILÍN CON EL ZANJÓN DE LA AGUADA

HORACIO MERY M.¹

MAX BORCHERT P.²

ALEJANDRO LÓPEZ A.³

RESUMEN

Se da a conocer, el proyecto de la Dirección de Obras Hidráulicas denominado "Descarga del Colector Grecia - Quilín al Zanjón de la Aguada". El Zanjón presenta una pendiente fuerte en el tramo de estudio, que origina escurrimientos torrenciales que hacen más complicado el diseño de la obra, debido a las perturbaciones que se producen en la canalización cuando hay alteraciones en los contornos, como ocurre en este caso.

El diseño de la obra fue comprobado en un modelo físico a escala reducida de 1:20, en el Laboratorio del Instituto Nacional de Hidráulica. El modelo corroboró la incapacidad de conducción del proyecto original, e indicó el incremento requerido en el ancho de la sección, para permitir el paso de la crecida centenaria en el Zanjón de la Aguada.

¹ Ingeniero Civil. Asesor de la Dirección de Obras Hidráulicas. Profesor Titular, U. de Chile
² Ingeniero Civil, Instituto Nacional de Hidráulica
³ Ingeniero Civil. Director Ejecutivo, Instituto Nacional de Hidráulica. Profesor Asociado, U. de Chile.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente artículo es dar a conocer el proyecto relativamente complejo de una obra de confluencia o de unión de dos colectores de Aguas Lluvias. Se trata de la obra de entrega del Colector Grecia - Quilín, con una capacidad máxima de 25 m³/s (para una lluvia de probabilidad de 1:2 años), al Zanjón de la Aguada, que es uno de los grandes colectores de aguas lluvias de la ciudad de Santiago, el que tiene una capacidad de 105 m³/s en la llegada a la confluencia (con una probabilidad de 1:100 años). Esta última conducción tiene pendiente fuerte, lo que origina escurrimientos torrenciales e indudablemente hace más delicado el diseño de la obra, debido a las perturbaciones que se producen en la canalización cuando hay alteraciones en los contornos, como ocurre en este caso.

El diseño de la obra se comprobó con un modelo físico a escala 1:20 ($E_L=20$) en el Laboratorio del Instituto Nacional de Hidráulica (INH) de Peñaflor. El análisis teórico es muy importante y permitió, por cierto, detectar la necesidad de comprobar con un modelo hidráulico la incapacidad de conducción de la obra originalmente propuesta en el proyecto. Una vez probada esta situación, la teoría permitió fijar la anchura necesaria de la canalización del Zanjón de la Aguada justamente en la zona más estrecha correspondiente al cruce del puente de la calle Froilán Roa, la que fue verificada posteriormente en forma detallada en el modelo hidráulico.

Esta característica de la obra de entrega del colector Grecia-Quilín al Zanjón de la Aguada con pendiente fuerte, es la tónica común de varias obras de unión de diversos colectores de aguas lluvias con el Zanjón de la Aguada.

2. DISEÑO Y TEORÍA

En contraste con los regímenes subcríticos o escurrimientos tranquilos, los flujos supercríticos o escurrimientos rápidos pueden ser muy complejos cuando los contornos de la canalización no poseen alineaciones rectas, debido a las ondas estacionarias que se generan en los cambios en la alineación de las paredes del canal o de las curvas (Ippen, 1961).

En el flujo subcrítico, que depende de las condiciones de aguas abajo, los niveles de aguas arriba tienden a igualarse en el canal principal y en el canal lateral que llega, situación que no se produce en los escurrimientos supercríticos porque éstos dependen de aguas arriba, y son independientes del fenómeno de la unión de las corrientes.

En la Figura 1 se muestra una obra de unión entre dos canales de sección rectangular con anchuras diferentes. El canal principal, con un trazado prácticamente recto, conduce el caudal mayoritario "Q₁" con un ancho "b₁", en cambio el canal lateral tiene ancho "b₂" menor, y conduce un caudal "Q₂" (Q₁ > Q₂). De la unión de ambos canales se desarrolla el canal saliente de un ancho "b₃", y que conduce el caudal suma Q₃ = Q₁ + Q₂.

El esquema mostrado en la Figura 1 corresponde al diseño propuesto por el Corps of Engineers (1970), y desarrollado principalmente por la Oficina del Distrito de Los Ángeles (LAD). El resultado de varios estudios con modelos hidráulicos realizados por el LAD condujo a formular algunas reglas generales o criterios de diseño, los que pueden adoptarse en los proyectos de estas obras (Gildea y Wong, 1967).

Las recomendaciones de diseño propuestas por el LAD son las siguientes:

- El ángulo de intersección de los ejes de los canales que se juntan sería deseable que fuese nulo, pero en ningún caso debe ser superior a 12°.

La elevación de los niveles de agua en las secciones de aguas arriba del canal principal y del canal secundario o lateral, es aproximadamente la misma (secciones EA y AB de la Figura 1). Esta suposición es correcta en los regímenes subcríticos, que son dependientes de aguas abajo, pero no se cumple exactamente en los regímenes supercríticos, que dependen de aguas arriba, ya que las alturas de escurrimiento serán dependientes del tipo de sección y de las pendientes de los canales.

Se puede llegar a un diseño favorable aumentando algo la anchura de la sección de aguas abajo del canal saliente, con respecto a la del canal principal, esto es, b₃ > b₁.

La profundidad de un escurrimiento supercrítico no debe exceder del 90% de la altura crítica, o en forma similar, el número de Froude no debe ser inferior a 1,13, a fin de obtener un escurrimiento rápido estable en la zona de la unión de ambos canales.

Las pruebas en modelos hidráulicos de muchas obras de unión han mostrado que se generan pocas ondas cruzadas estacionarias con bajo nivel de turbulencia cuando se cumplen los criterios anteriores.

La experiencia ha mostrado que la aplicación del Principio de la Cantidad de Movimiento (ecuación del Momentum) puede ser muy útil en el análisis teórico en el proyecto de una obra de unión con ángulos pequeños.

3. APLICACIÓN DEL PRINCIPIO DE MOMENTUM

Volviendo a la Figura 1, que representa la unión de canales rectangulares, cuyos anchos se indican en la figura, es posible demostrar que se verifica muy aproximadamente:

$$\frac{b_3 \cdot h_3^2}{2} + \frac{Q_3^2}{gA_3} = \frac{b_1 \cdot h_1^2}{2} + \frac{Q_1^2}{gA_1} + \frac{Q_2^2 \cdot \cos\theta}{gA_2} + \frac{(b_3 - b_1)h_1^2}{2} \quad (1)$$

En la ecuación (1), Q₁ y Q₂ son los caudales entrantes a la unión y Q₃ es el caudal saliente. Las alturas del escurrimiento son h₁, h₂, y h₃, y A₁, A₂ y A₃ las áreas mojadas en los diferentes canales según las notaciones de la figura.

Si se denomina en general "M" a la momenta del escurrimiento en un canal rectangular:

$$M = \frac{b \cdot h^2}{2} + \frac{Q^2}{gA} \quad (2)$$

La ecuación (1) se puede escribir en forma abreviada:

$$M_3 = M_1 + \frac{Q_2^2 \cos\theta}{gA_2} + \frac{(b_3 - b_1)h_1^2}{2} \quad (3)$$

En el régimen tranquilo, (3) permite determinar las alturas h₁=h₂ conociendo la momenta M₃ (en la sección (3)).

En el caso de canales de sección trapecial, considerando una distribución hidrostática de las presiones, la fuerza debido a las presiones, en una sección cualquiera, queda determinada por la relación:

$$F_p = \left(\frac{b}{2} + \frac{mh}{3}\right)h^2 \quad (4)$$

En esta ecuación, "m" es la tangente del ángulo formado por el paramento lateral con la vertical.

Introduciendo la relación (4) con los subíndices respectivos en la ecuación del Principio del Momentum, se obtiene:

$$\frac{Q_3^2}{gA_3} + \left(\frac{b_3}{2} + \frac{m \cdot h_3}{3}\right) \cdot h_3^2 = \frac{Q_1^2}{gA_1} + \left(\frac{b_1}{2} + \frac{m \cdot h_1}{3}\right) \cdot h_1^2 + \frac{Q_2^2 \cos \theta}{gA_2} \quad (5)$$

La pérdida de carga que se produce en la confluencia se puede evaluar con el balance de energía entre las corrientes entrantes y la saliente:

$$P_u = \left(\frac{Q_1}{Q_3}\right)B_1 + \left(\frac{Q_2}{Q_3}\right)B_2 - B_3 \quad (6)$$

En el caso de una unión de canales, en que el canal principal tiene pendiente fuerte antes y después de la singularidad, dando origen a escurrimientos supercríticos no excesivamente energéticos, es posible que el segundo miembro de las ecuaciones (3) ó (5) (según sea el caso de la forma de sección) no dé una solución para las condiciones del escurrimiento en la sección (3), debido a la imposibilidad física de tener una momenta menor a un valor mínimo que corresponde al escurrimiento crítico.

En este caso, se da la crisis en la sección de aguas abajo (3), lo que genera alturas de régimen de río en las secciones de aguas arriba (1) y (2). La crisis de aguas abajo origina un torrente peraltado en pendiente fuerte en el canal principal saliente. En el canal principal aguas arriba se genera un río peraltado que se enlaza mediante un resalto débil con el torrente de aguas arriba. En el colector secundario la situación dependerá del tipo pendiente. Este caso se da en la unión del colector Grecia-Quilín con el Zanjón de la Aguada y tiene la ventaja de eliminar ondas estacionarias o excesiva turbulencia en la confluencia.

4. CONFLUENCIA ZANJÓN DE LA AGUADA Y COLECTOR GRECIA-QUILÍN

Descripción de la obra

Esta obra de aducción corresponde a uno de los grandes colectores de aguas lluvias para la ciudad de Santiago, de acuerdo al Plan Maestro de Obras. Como se indicó anteriormente, el caudal máximo de diseño de esta obra es de 25 m³/s, que corresponde al caudal recolectado en la zona durante una lluvia de probabilidad de 1 en 2 años. Esta obra entrega tal caudal al Zanjón de la Aguada, que es una quebrada natural canalizada que cruza a la ciudad de Santiago.

El caudal de esta canalización en el punto de confluencia con el Colector Grecia-Quilín, tendrá un caudal máximo estimado de 130 m³/s en una lluvia máxima de probabilidad de 1 en 100 años. Este caudal incluye el gasto del Zanjón y del colector.

La obra de unión de ambas conducciones, de acuerdo al diseño del proyecto se muestra en la Figura 2.

Un análisis simple del balance de energía muestra que el Bernoulli mínimo o crítico en la sección del puente Froilán Roa ($B_{c3} = 4.1$ m), supera al Bernoulli del régimen torrencial del Zanjón de la Aguada ($B_1 = 3.9$ m) y también al del colector ($B_2 = 2.3$ m), lo cual implica necesariamente que se producirá un escurrimiento crítico en la zona más estrecha y un peralte de los niveles de agua, en la zona de la confluencia de ambas canalizaciones.

Dada la complejidad del diseño y la necesidad de contar con un análisis más preciso, la Dirección de Obras Hidráulicas decidió analizar y estudiar la modificación al proyecto mediante un modelo hidráulico.

Modelo hidráulico

El modelo hidráulico fue construido en el Laboratorio de Peñaflor, del Instituto Nacional de Hidráulica, a una escala de 1:20. Se reprodujo de acuerdo al esquema de la Figura 2, con el objeto de verificar la real capacidad de la obra.

La modelación física consideró la representación de un tramo de 200 m del Zanjón de la Aguada, el puente Froilán Roa, 70 m del tramo final del colector y la obra de descarga del colector.

5. DIAGNÓSTICO DEL ANTEPROYECTO

La etapa de diagnóstico consistió básicamente en analizar el comportamiento hidráulico de la interacción del Zanjón de la Aguada y la descarga del Colector Rotonda Grecia-Quilín. Para esto, se realizó un ensayo cualitativo sin presencia del colector, y una serie de ensayos con presencia del colector, con caudal nulo y con el caudal de diseño de 25 m³/s.

Los caudales totales ensayados fueron entre otros, los siguientes: 40 m³/s ($T_r=2$ años), 70 m³/s ($T_r=10$ años), 110 m³/s ($T_r=50$ años) y 130 m³/s ($T_r=100$ años).

El ensayo cualitativo sin el colector fue para verificar la capacidad de porteo del Zanjón. En este ensayo, se determinó que la capacidad de porteo correspondía a la de diseño, de 130 m³/s.

Los ensayos con el colector con gasto nulo, se efectuaron para verificar la influencia de las obras de descarga en la capacidad de porteo del Zanjón. En estos ensayos, se determinó que la capacidad de porteo disminuía a 110 m³/s.

Para examinar el escurrimiento en la confluencia de ambas canalizaciones, se efectuaron ensayos con el caudal del colector de 25 m³/s y caudales crecientes por el Zanjón de la Aguada.

La Figura 3 muestra el eje hidráulico por el eje central del Zanjón de la Aguada, con un caudal entrante de 72 m³/s y el aporte de 25 m³/s entregado por el colector. Este ensayo muestra que la capacidad máxima de la conducción se reduce a 97 m³/s en la situación del proyecto original. La Foto 1 muestra una vista de tal situación.

El modelo corroboró la determinación teórica del peralte del eje hidráulico aguas arriba del puente Froilán Roa, y la generación de altura crítica bajo el puente.

Las experiencias efectuadas con el modelo hidráulico mostraron que efectivamente la capacidad máxima de porteo del Zanjón de la Aguada sin el colector es de 130 m³/s. El hecho de agregar la obra de entrega del colector (con aporte nulo) a la canalización del Zanjón, reduce la capacidad máxima de porteo a 110 m³/s, y con el caudal del colector de 25 m³/s, la capacidad máxima de porteo del Zanjón se reduce a 97 m³/s.

6. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Se presentaron dos posibles alternativas de solución: aumentar la sección bajo el puente Froilán Roa, y desplazar la obra de entrega del colector, aguas abajo del puente.

La DOH determinó finalmente modelar la alternativa que ensancha la sección bajo el puente, de 9.7 m de ancho basal original a 11.8 m, lo cual origina un escurrimiento crítico bajo el puente con una revancha aceptable. Esta solución fue ensayada para verificar la capacidad de evacuar la crecida centenaria de diseño del Zanjón, esto es, 130 m³/s.

La Figura 4 muestra el diseño de esta solución, la Figura 5 muestra el eje hidráulico para la condición de diseño de la solución y la Foto 2 muestra la situación en el modelo.

La alternativa de mejoramiento analizada satisface los requerimientos exigidos en cuanto a capacidad de porteo, desbordes y flujo ordenado en la zona de la descarga del colector y bajo el puente Froilán Roa.

Sobre la base de los ensayos realizados en el modelo físico para esta configuración, se pudo concluir lo siguiente:

- La solución encontrada fue satisfactoria desde el punto de vista hidráulico, pues la crecida centenaria de 130 m³/s, aportados por el Zanjón y el colector, escurre libremente bajo el puente.
- El eje hidráulico presentó variaciones transversales inferiores a los 0.5 m, en la totalidad del trayecto.
- En el resalto de ondas que se genera aguas arriba de la confluencia de ambos escurrimientos, se observó un desborde del orden de los 0.2 m como máximo.

7. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

El diseño de las obras de unión que incluyen canalizaciones con pendiente fuerte, son de un análisis teórico muy incierto y es indispensable utilizar la modelación física en estos casos. En el caso de tener torrentes débiles, como en el presente estudio, se obtiene una solución muy adecuada, cuando se establece un régimen subcrítico en la zona de la confluencia misma, con escurrimientos torrenciales aguas arriba y aguas abajo de ella. De esta manera se evitan las ondas estacionarias propias de los regímenes torrenciales, al producirse quiebres o cambios de la dirección de los escurrimientos y en los choques de corrientes.

En el modelo físico fue posible corroborar los siguientes aspectos: La sección de aguas abajo de la confluencia debe ser mayor que la sección aguas arriba de ella (criterio empleado para determinar la solución adoptada). El ángulo de encuentro de 9° entre los ejes del colector y del Zanjón de la Aguada, tuvo un buen funcionamiento. Se determinó la magnitud de la incidencia del colector en la disminución de la capacidad de porteo de Zanjón de la Aguada.

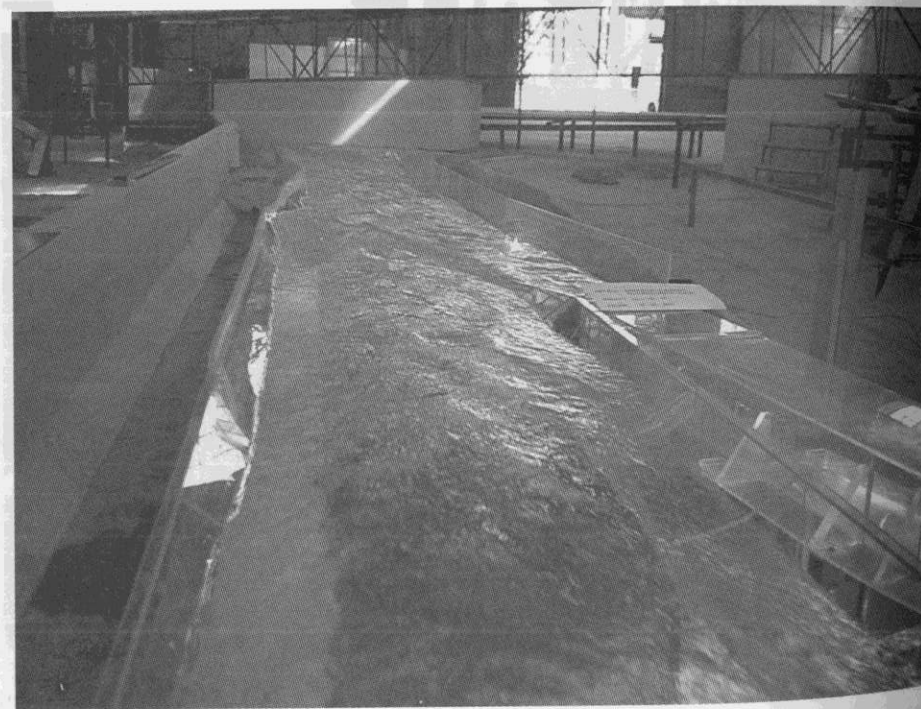
REFERENCIAS

- Ippen, A. 1961. "Mechanics of supercritical flow in high velocity flow in open channel". Transactions of the ASCE, Vol. 161.
- Gildea y Wong 1967. "Flood-control channel hydraulics". Memorias del XII Congreso Internacional de la AIIH (IAHR), Vol. 1.
- Corps of Engineers. 1970. "Hydraulic Design of Flood-Control Channels". Engineer Manual. US Army Corps of Engineers.

Foto 1: Proyecto Original Ensayo D-72-25



Foto 2: Proyecto de Solución Ensayo S-105-25



Copyright © 1978, US Army Corps of Engineers. "Hydraulic Design of Road Channel Structures". US Army Corps of Engineers.

PLANTA GENERAL MODELO PROYECTO ORIGINAL

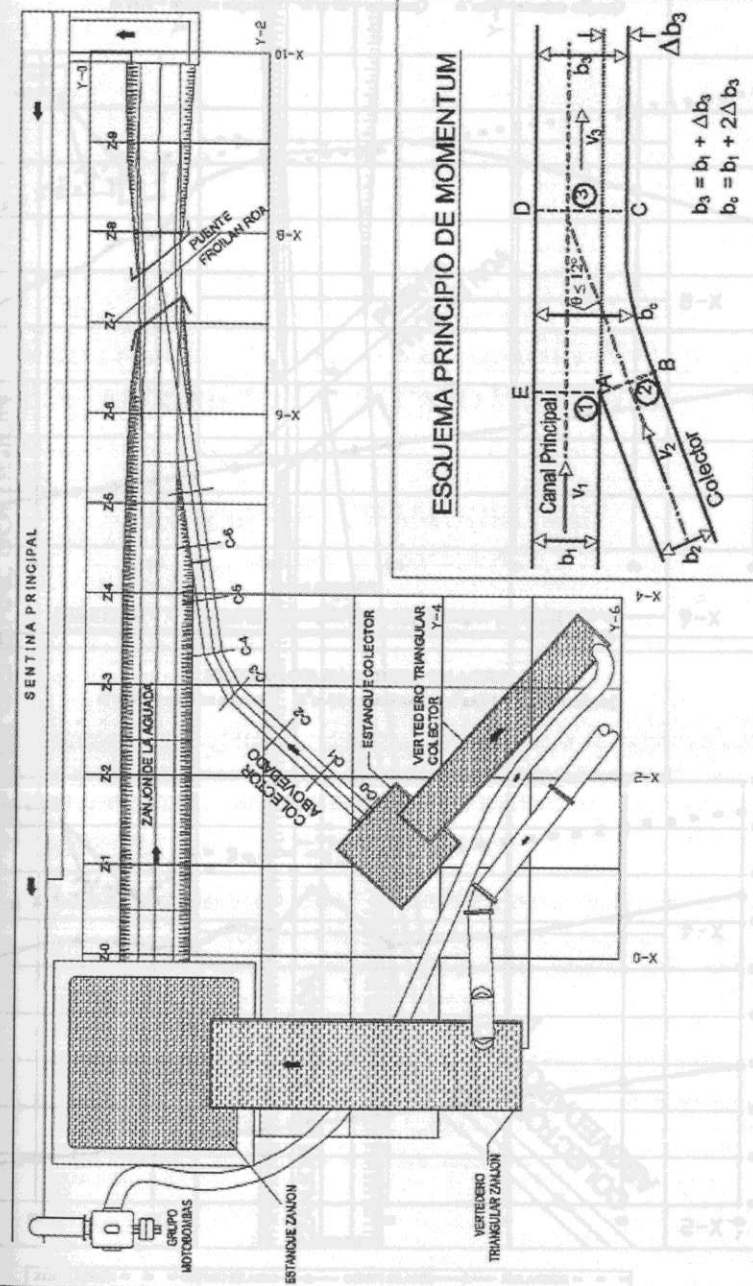


Fig. 2

Fig. 1

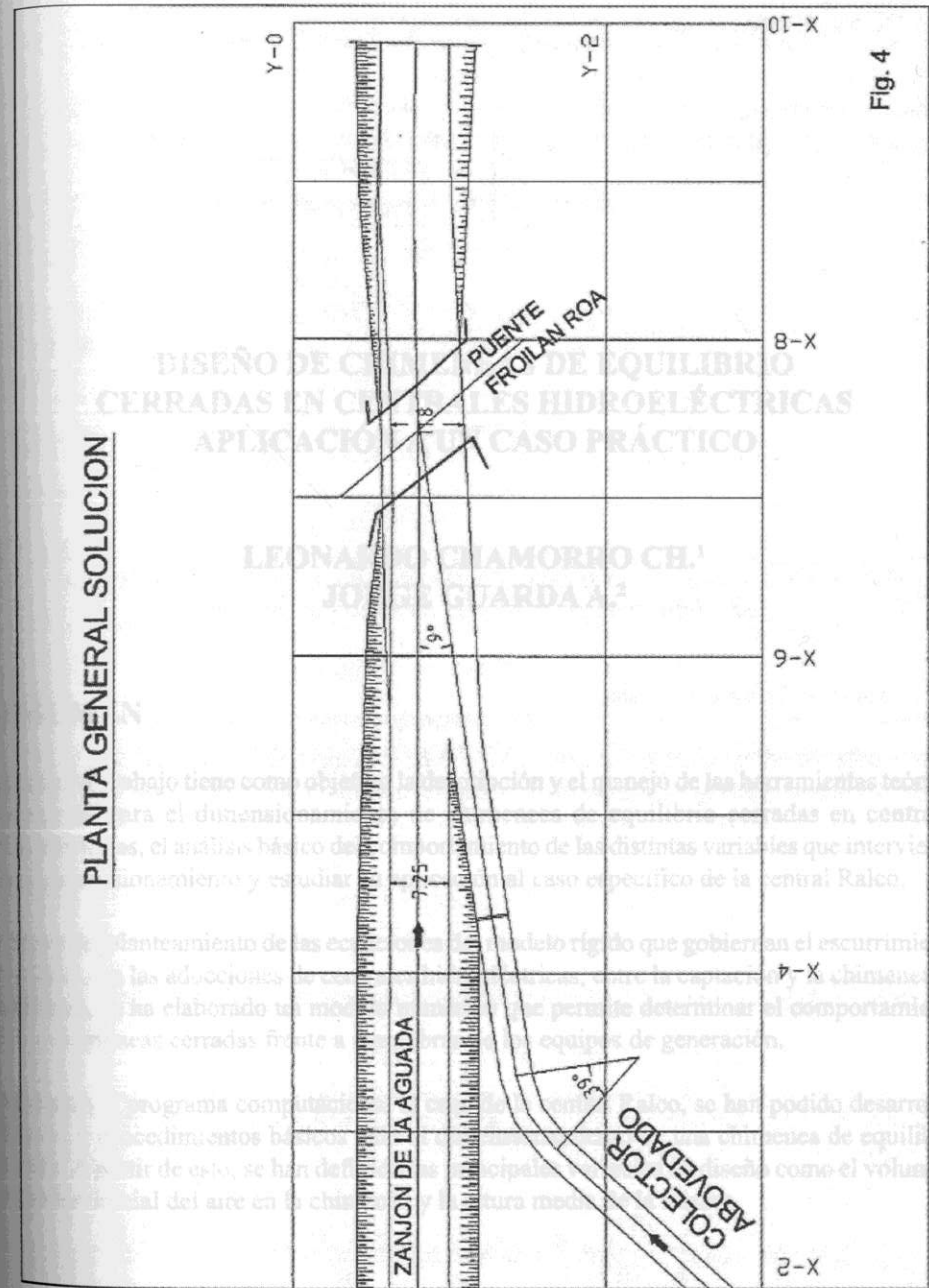
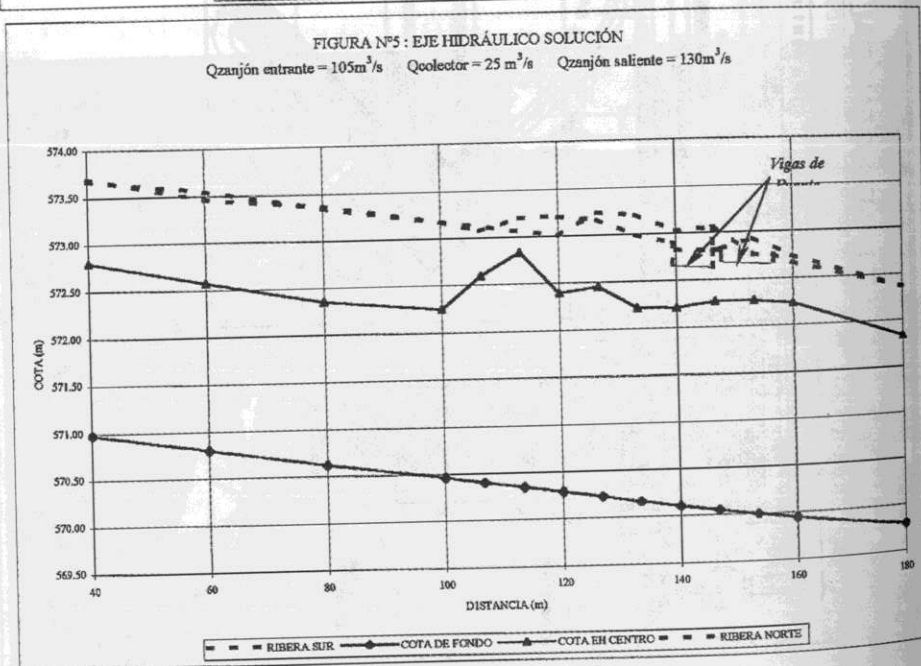
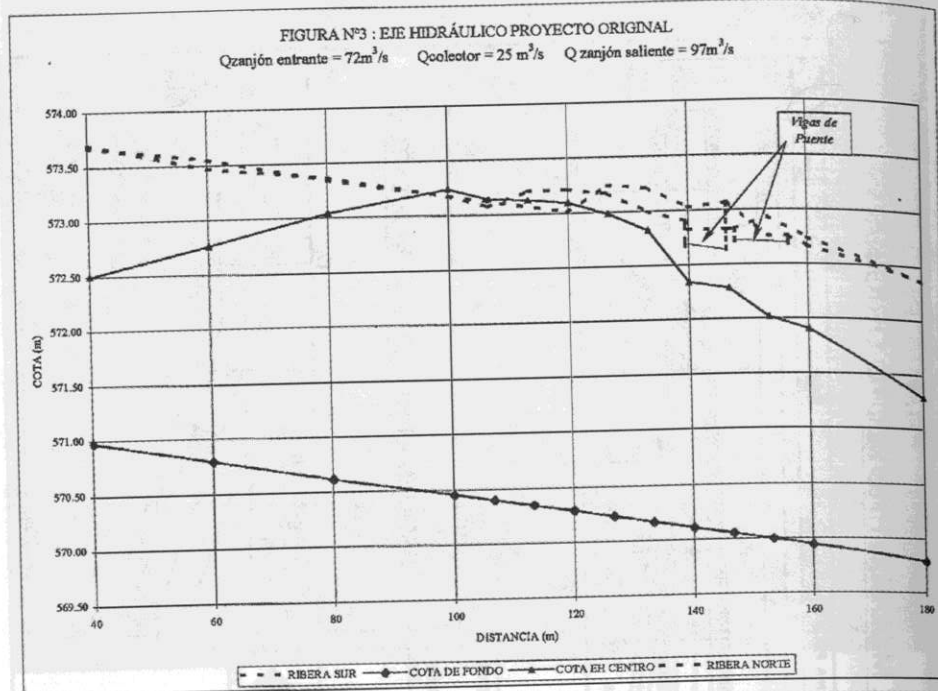


Fig. 4

DISEÑO DE CERRAMIENTOS DE EQUILIBRIO
 CERRADAS EN CERRAMIENTOS HIDROELÉCTRICAS
 APLICACIÓN DE UN CASO PRÁCTICO
 LEONARDO CLAMORRO CH.
 JOSE GUARDA A.

abajo tiene como objeto la descripción y el manejo de las herramientas teóricas
 para el dimensionamiento de los cerramientos en controles
 de flujo, el análisis básico de comportamiento de las distintas variables que intervienen
 en el fenómeno y evaluar el caso específico de la central Ralco.
 mantenimiento de las ec. (1) y (2) el modelo rígido que gobiernan el escurrimiento
 las adiciones de las ecuaciones (3) y (4) en el caso de un flujo de tipo chorro de
 las elaborado un modelo matemático que permite determinar el comportamiento
 de los cerramientos frente a las variaciones de los equipos de generación.
 programa computacional desarrollado en el caso de estudio, se han podido desarrollar
 los algoritmos basados en el método de los elementos finitos para la simulación de equilibrio
 de flujo, se han definido los principales principios de diseño como el volumen,
 el área del aire en la cámara y la altura media.