

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

IX CONGRESO NACIONAL

SOCAVACION AGUAS ABAJO DEL SALTO DE ESQUI

DEL VERTEDERO DE LA PRESA COLBUN

RICARDO RIEDEL GRUNWALDT

RESUMEN

EL evacuador de crecidas de la presa Colbún es un vertedero con un rápido que termina en un salto de esquí. Los años 1985 y 1986 se evacuaron caudales importantes por el vertedero después de los cuales fue posible medir en el prototipo la socavación local aguas abajo del salto de esquí.

En este trabajo se analiza el comportamiento del vertedero en relación a la socavación del lecho. Se efectúa un cálculo teórico de la socavación local y se compara con valores medidos en prototipo y modelo. Se considera que este trabajo constituye un aporte al análisis e interpretación de los fenómenos de socavación aguas abajo de saltos de esquí de gran caudal y altura de caída. Las conclusiones derivadas de él pueden ser de interés para el proyecto de obras similares.

Ingeniero Civil Empresa Nacional de Electricidad S.A.
Profesor Centrales de Generación-Pontificia Universidad Católica de Chile.

1.- INTRODUCCION.

El evacuador de crecidas de la presa principal del embalse Colbún, ubicado en el río Maule, es un vertedero del tipo salto de esquí. Esta obra es de propiedad de la Empresa Eléctrica Colbún-Machicura S.A. El diseño de este vertedero fue realizado con la ayuda de un modelo hidráulico, mediante el cual se visualizaron aspectos que no es posible determinar teóricamente. El proyecto y estudios en modelo de esta obra fue realizado por la ENDESA.

El año 1983 el suscrito publicó en el VI Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica un trabajo referente al diseño del vertedero Colbún en base a un modelo hidráulico. Este trabajo es una continuación del presentado en ese Congreso y se refiere al comportamiento del vertedero en relación a la socavación del lecho aguas abajo del salto de esquí considerando los resultados del modelo hidráulico, cálculos teóricos y medidas realizadas en el prototipo.

Una de las mayores dificultades en el proyecto de un vertedero tipo salto de esquí es determinar la socavación que se producirá en el cauce del río y su implicancia en las obras que se ubican en las cercanías. Con el objeto de analizar este problema en forma ordenada, primero se hará una descripción general del vertedero Colbún y del modelo físico de la obra. Luego se hará un análisis teórico general del fenómeno de la socavación y se calculará la profundidad de la fosa de erosión. Finalmente se presentarán los resultados de la socavación que fue posible medir en el prototipo después de dos crecidas importantes que se produjeron en el río Maule. Estos valores se compararán con los calculados y medidos en modelo, derivándose las conclusiones correspondientes.

2.- DESCRIPCIÓN DEL VERTEDERO DE LA PRESA COLBUN.

La obra de seguridad del embalse, destinada a evacuar los caudales de las crecidas, consiste en un vertedero frontal situado en el empotramiento derecho de la presa principal, seguido de un canal de descarga que termina en un salto de esquí que lanza el caudal directamente al lecho del río (Ver Fig. Nº 1 y Foto Nº 1). El caudal de diseño es de $7.500 \text{ m}^3/\text{s}$, valor que corresponde al de una crecida de período de retorno de 1.000 años, regulada por el embalse. La altura bruta total desde el nivel del embalse hasta el nivel de restitución en el río es de unos 105 m.

El umbral del vertedero esta controlado por cuatro compuertas de sector de 14,4 m de ancho por 16 m de altura cada una. El canal de descarga es de sección trapecial y de ancho basal variable desde 71,1 m en la parte superior a 50,0 m en la llegada al salto de esquí. El talud de las paredes es 1:4 (H:V). El tramo superior tiene una pendiente de 1% y el inferior 51,1% y termina en un salto de esquí de 25 m de radio y 40° de ángulo de salida con la horizontal.

En el canal del vertedero se han dispuesto dos aireadores. El de aguas arriba es el mas importante y tiene por objeto proteger el radier contra la cavitación. El de aguas abajo se ubicó aguas arriba del salto de esquí y tiene por objeto incorporar al flujo un mayor porcentaje de aire, produciendo una masa de agua mas esponjada y menos densa, lo cual puede ser beneficioso para atenuar la erosión del lecho rocoso de la ladera.

El vertedero se funda íntegramente en roca. En la Fig. Nº 2 se muestra un perfil geológico transversal por el lecho del río Maule. La roca en las cercanías del salto de esquí es una brecha de color gris verdoso formada por clastos angulosos de rocas volcánicas y sedimentarias de tamaños pequeños y en general inferiores a 30 cm, aglomerados por una matriz de origen volcánico. Desde el punto de vista geotécnico la roca se presenta masiva, poco fracturada y de una resistencia media de entre 200 y 300 kg/cm^2 .

El material de relleno del valle del río Maule corresponde a un fluvial moderno de granulometría extendida y con un diámetro medio del orden de 0,10 m y un $d_{90\%} = 0,28 \text{ m}$. También existen bolones aislados que pueden tener hasta unos 3 m de dimensión máxima. El espesor de la capa de fluvial llega a un máximo de 85 m en el centro del valle.

3.- MODELO FISICO DEL VERTEDERO.

Los estudios del evacuador de crecidas se efectuaron en un modelo hidráulico reducido a escala según las leyes de Froude, con una escala geométrica 1:100 sin distorsión. En la Fig.3 se muestra en planta parte de la zona representada en el modelo.

El fluvial del río se representó con arena (lecho móvil). La curva granulométrica se determinó usando el criterio de la velocidad de sedimenta-

ción, es decir, imponiendo la condición que las partículas homólogas entre el prototipo y el modelo tengan sus velocidades de sedimentación a la escala de velocidad de la ley de Froude.

La representación de las propiedades de la roca en un modelo es un problema que no tiene actualmente una solución práctica. No existe un material capaz de representar a escala todas las propiedades de la roca, como su resistencia a la abrasión, fisuras, grietas, cohesión entre bloques, etc. Algunos investigadores proponen usar materiales semi-cohesivos (mortero de arena, yeso y agua), otros recomiendan el uso de bloques de hormigón sueltos y de un tamaño acorde con el agrietamiento de la roca en el prototipo. Ambos métodos son de un manejo complejo y costoso y sus resultados son más bien cualitativos y de difícil interpretación.

En el modelo Colbún la roca se representó con hormigón (lecho fijo). Aceptando que en el prototipo las corrientes de recirculación que se generan en torno a la zona de impacto y que atacan las laderas del valle no serán capaces de erosionar la roca, los resultados de los ensayos con lecho de roca fijo definen las dimensiones laterales de la fosa de erosión, más que la profundidad máxima.

Con el objeto de determinar la socavación límite, se efectuaron algunos ensayos con lecho móvil total, representando tanto el fluvial como la roca con arena. Los resultados de estos ensayos definen la magnitud de la socavación límite en la zona de impacto, más que la socavación de las laderas del cerro.

Para determinar el efecto del factor tiempo en la socavación, se ejecutaron básicamente dos tipos de ensayos:

- Con caudal constante durante dos horas modelo (20 h prototipo), tiempo con el cual se alcanza prácticamente la socavación límite.
- Con caudal variable representando una onda de crecida real.

En la Fig. Nº 4 se dan tres curvas que relacionan la socavación máxima medida en el modelo en función del caudal. En el caso de una onda de crecida el caudal indicado corresponde al máximo instantáneo de la onda. En los ensa-

jos con lecho de roca fijo la fosa de erosión dejaba al descubierto la roca hasta el punto de socavación máxima.

La relación observada entre las curvas de socavación máxima es la siguiente (ver nomenclatura en Fig. Nº 4):

$$S_1 = 1,14 S_c$$

$$S_0 = 0,78 S_c$$

4.- SOCAVACION DE LA ROCA.

La energía total que es necesario disipar en un evacuador de crecidas con salto de esquí, se puede descomponer en tres partes:

- Energía que se pierde en el canal del vertedero. Su monto depende de la geometría y rugosidad del canal y puede ser del orden del 10% de la energía total.
- El chorro lanzado por el salto de esquí disipa parte de su energía en el aire, valor que también se estima del orden del 10%.
- Toda la energía remanente del chorro se disipa en el impacto en la superficie libre de aguas abajo. La socavación que se produce en el lecho forma parte del proceso de disipación de energía.

La turbulencia que se origina en la zona de impacto del chorro produce grandes fluctuaciones de presión sobre el lecho. Este campo de presiones fluctuantes torna discontinuo o acentúa las discontinuidades existentes en el macizo rocoso, tales como fallas, diaclasas, fisuras y poros, transformando el lecho rocoso cohesivo en bloques sueltos sin cohesión.

Los primeros bloques son arrastrados y expulsados por las fuerzas resultantes de estas presiones fluctuantes. A medida que se desarrolla el proceso de socavación, el drenaje que se establece entre los bloques disminuye las fluctuaciones de presión y la socavación continúa aumentando principalmente por efecto de las corrientes ascendentes que se generan en la zona de impacto. La estabilización se alcanza cuando las corrientes ascendentes no son capaces de expulsar de la fosa los trozos de roca.

Existe consenso entre los especialistas del tema que la roca se erosiona en la zona de impacto de los saltos de esquí en una magnitud que depende en forma importante del grado de fracturamiento de ella. Indudablemente que el factor tiempo juega un rol importante, pues el proceso de transformación del macizo rocoso en bloques sueltos de menor tamaño toma un tiempo difícil de evaluar. Mientras no se complete ese tiempo no se observará erosión de la roca.

En el caso del vertedero Colbún el fluvial será fácilmente socavado en la zona de impacto del salto de esquí y la fosa de erosión alcanzará la roca basal. Este aspecto fue corroborado por los ensayos en el modelo y medidas en el prototipo. También se piensa que la roca en esa zona se erosionará hasta llegar con el tiempo a un perfil de equilibrio. Sin embargo, existe duda respecto a la capacidad de las corrientes de recirculación para socavar las laderas rocosas del cerro y comprometer el salto de esquí y pie de la presa. De acuerdo con los ensayos en el modelo hidráulico, estas velocidades pueden llegar a valores del orden de 8 m/s.

La ENDESA solicitó la asesoría de especialistas extranjeros para responder a esta interrogante. Hubo dos corrientes de opinión. Unos indicaron que la roca de las laderas sería erosionada y propusieron proteger el pie del salto de esquí con un muro profundo empotrado en la brecha. Otros consideraron que la roca era blanda pero masiva y muy poco fracturada y no sería erosionada por las corrientes de recirculación y erosión retrógrada. Además, como las crecidas en Chile son de corta duración la hipotética socavación en esa zona sería gradual y podrían efectuarse protecciones locales en caso necesario.

La ENDESA fue partícipe de esta última opinión y para evaluar en forma mas concluyente la resistencia de la roca, se ejecutaron pruebas de erosión en prototipo. Estas consistieron en ensayos dinámicos de desgaste mediante un chorro de agua limpia de alta velocidad (28 m/s) incidiendo normal a la superficie de un bloque de la brecha Colbún y midiendo el desgaste en función del tiempo. Se observó que la roca no presentaba desgaste apreciable, midiéndose aproximadamente 0,5 mm después de 8 horas de ensayo. En una prueba similar sobre una muestra de hormigón de 300 kg/cm² de resistencia, no se detectó erosión de la superficie. Estos ensayos confirmaron la confianza en la estabilidad de la roca al pie del salto de esquí.

Finalmente, previo a la puesta en servicio del vertedero se ejecutó un levantamiento del terreno y se propuso medir la socavación después de la evacuación de caudales superiores a unos 1.000 m³/s.

5.- CALCULO DE LA SOCAVACION.

El fenómeno de la socavación que se produce aguas abajo de un salto de esquí es sumamente complejo, interviniendo muchas variables, algunas propias de cada caso particular. En la literatura se encuentran varias fórmulas que permiten el cálculo de la socavación máxima en un lecho granular, siendo la dispersión de los resultados muy grande. También existen expresiones complejas, especialmente en la bibliografía soviética, que permiten el cálculo de la socavación en un lecho rocoso. Sin embargo, todas las cualidades teóricas de estas expresiones están oscurecidas por la complejidad de su utilización práctica.

Con el objeto de efectuar un cálculo aproximado de la socavación, que necesariamente debe complementarse con estudios en modelo, se aplicaron los dos métodos sencillos siguientes:

5.1. CHIVIDINI-LOPARDO-VERNET-ANGELACCIO (1983).

La fórmula propuesta por estos investigadores es válida para gastos unitarios elevados, altas alturas de caída y material sin cohesión mayor de 1 cm de diámetro, similar al caso de Colbún. Refiriéndose a la nomenclatura definida en la Fig. N° 4:

$$Y/H = (S+hr)/H = 2,5 \sqrt{(q/\sqrt{gH^3})} \quad (1)$$

Esta fórmula fue calibrada con datos del modelo de Alicurá, donde los coeficientes de velocidad C_v en el salto de esquí tenían valores comprendidos entre 0,6 y 0,75.

$$C_v = \sqrt{H_o/(H_o + P_o)} \quad (2)$$

La fórmula mencionada fue aplicada por sus autores a 80 casos, tanto de prototipo como de modelo, obteniendo errores medios cuadráticos del orden del 20%.

Aplicándola al caso de Colbún se obtiene:

Q (m ³ /s)	q (m ² /s)	H (m)	hr (m)	Po (m)	Ho (m)	Cv	Y (m)	S (m)
2.000	40	107,8	2,20	23,28	56,87	0,842	28,80	26,60
4.500	90	105,0	5,00	9,99	70,16	0,936	42,91	37,91
7.500	150	104,7	5,30	7,12	73,03	0,955	55,36	50,06

La pérdida de carga en el rápido se calculó con un coeficiente de rugosidad $n = 0,012 \text{ s/m}^{1/3}$.

5.2 LUDOVICO IVANISSEVICH MACHADO (1980).

Este autor propone una fórmula para lechos no cohesivos basada en la teoría de la tensión tangencial causada por un chorro que incide en un depósito con agua y su equilibrio con la tensión tangencial crítica de arrastre de los granos. La fórmula da la socavación límite de la fosa de erosión. Contrastándola con numerosos datos de modelo y prototipo da siempre socavaciones ligeramente superiores a las medidas.

$$Y/H = (S+hr)/H = 2,39 \sqrt{Cv q / \sqrt{gH^3}} (H/d_{90\%})^{0,0645} \quad (3)$$

El coeficiente de velocidad Cv es en este caso el de la velocidad incidente Vu y se expresa como (ver Fig. N° 4):

$$Cv = \sqrt{Hu/(Hu + Po + Pu)} \quad (4)$$

Adoptando según recomendaciones del USBR $Pu = 0,1 Ho$ y considerando que el fluvial de Colbún tiene un diámetro $d_{90\%} = 0,28 \text{ m}$, se obtiene:

Q (m ³ /s)	q (m ² /s)	H (m)	hr (m)	Po (m)	Ho (m)	Pu (m)	Hu (m)	Cv	Y (m)	S (m)
2.000	40	107,8	2,20	23,28	56,87	5,69	78,83	0,855	37,35	35,15
4.500	90	105,0	5,00	9,99	70,16	7,02	87,99	0,915	57,48	52,48
7.500	150	104,7	5,30	7,12	73,03	7,30	90,28	0,928	74,66	69,36

Los valores calculados por ambos métodos se han ubicado en la Fig. N°4.

6. SOCAVACION MEDIDA EN EL PROTOTIPO.

El llenado del embalse Colbún se inició en Noviembre de 1984, llegando el nivel a la cota del umbral del vertedero en Enero de 1985. En Julio de ese mismo año se produjo una crecida que hizo necesario evacuar por el vertedero un caudal máximo de $1.260 \text{ m}^3/\text{s}$ y posteriormente en Julio de 1986 se produjo otra crecida, de 100 años de período de retorno, que llevó a evacuar un caudal máximo de $5.500 \text{ m}^3/\text{s}$. En la Fig. N° 5 se muestra el hidrograma de esta crecida y en las fotografías N°1 y N°2 se muestra el vertedero funcionando.

Después de las crecidas mencionadas se efectuó un levantamiento batimétrico de la fosa de erosión según los tres perfiles indicados en la Fig. N° 3. Probablemente la conclusión mas importante de esas medidas fue que la roca no se socavó al pié del vertedero ni en la zona de impacto. Los valores de la socavación máxima medida por el eje del vertedero para las dos crecidas se han dibujado en la Fig. N° 4. En realidad la socavación máxima podría ser algo mayor, considerando que en el modelo se observó que ella no se produce exactamente en el eje del vertedero. En todo caso las diferencias son de segundo orden. Observando la Fig. N° 4 se constata la excelente concordancia de las medidas del prototipo con las medidas en modelo con lecho de roca fijo (S_0) y con la calculada por la fórmula de Chividini et al. La pequeña diferencia entre la carga total H de las crecidas del prototipo con las del modelo y las consideradas en el cálculo, tienen un efecto despreciable en la socavación máxima, considerando que ella depende de la potencia $0,25$ de H .

En la Fig. N° 6 se ha dibujado un perfil por el eje del vertedero mostrando la socavación medida en el prototipo y en el modelo. Desgraciadamente no se dispone de perfiles de socavación por ondas de crecida en el modelo, sólo se tiene la socavación máxima, motivo por el cual se han dibujado en la figura N° 6 los perfiles correspondientes a ensayos con caudal constante. También se han dibujado las trayectorias teóricas del chorro. Obsérvese la coincidencia entre la zona de impacto y la socavación máxima.

En la tabla siguiente se indican los valores de la socavación máxima medida en los tres perfiles indicados en la Fig. N° 3. Los valores de modelo (lecho de roca fijo, onda de crecida) han sido interpolados para los caudales de las crecidas medidas en el prototipo.

Q (m ³ /s)	Perfil Izquierdo		Perfil por el Eje		Perfil Derecho	
	Modelo So(m)	Prototipo So(m)	Modelo So(m)	Prototipo So(m)	Modelo So(m)	Prototipo So(m)
1.260	6,5	9,1	24,0	23,1	8,8	9,1
5.500	19,4	21,7	40,5	37,7	24,9	25,7

Las diferencias que se observan entre el prototipo y el modelo son muy pequeñas, más aun considerando que los antecedentes de terreno nunca son suficientes como para representar exactamente la topografía del terreno natural, especialmente la de la roca basal.

7. CONCLUSIONES

Del análisis de la socavación local producida aguas abajo del salto de esquí del vertedero Colbún se han derivado las siguientes conclusiones:

- Las medidas de socavación efectuadas en el prototipo después de dos crecidas importantes, una de las cuales fue de un periodo de retorno de 100 años (Fig. N° 5), indican que la roca no se ha erosionado en la zona de impacto del chorro ni al pie del salto de esquí. Probablemente la socavación de un lecho rocoso requiere un tiempo más largo que el de las crecidas de los ríos chilenos. Otro aspecto que sin duda ha contribuido a evitar la socavación de la brecha Colbún es su calidad, blanda pero masiva, con muy pocas grietas y fisuras. Habría que continuar controlando la evolución de la socavación para confirmar estas apreciaciones.
- El material fluvial del lecho ha sido socavado fácilmente. Las socavaciones medidas en el prototipo concuerdan muy bien con las medidas en el modelo hidráulico cuando se representa la onda del caudal efluente. La socavación máxima calculada por el método de Chividini et al también concuerda muy bien estos valores (Fig. N° 4).
- Considerando el hecho que en el modelo no se reproduce la incorporación de aire al torrente y que sin embargo la socavación en el prototipo es sólo ligeramente inferior a la medida en el modelo (Fig. N° 4), se concluye que influencia del porcentaje de aire del flujo es pequeña en la magnitud de la fosa de erosión.

La socavación máxima medida en el modelo con una onda de crecida es aproximadamente un 78% de la medida con un caudal constante igual al máximo instantáneo de la crecida.

El método de cálculo de Ivanissevich concuerda bien con la socavación medida en el modelo con lecho móvil total, es decir, da el valor límite de la socavación.

La socavación límite producida por un caudal constante es aproximadamente un 46% superior a la socavación producida por una onda de crecida con ese caudal como máximo instantáneo.

Las medidas efectuadas en el prototipo confirman la excelente capacidad de los modelos físicos para representar el fenómeno de la socavación y en consecuencia constituir una herramienta fundamental en el diseño de las obras hidráulicas.

BIBLIOGRAFIA

Riedel R. (1983). "Algunas conclusiones del estudio experimental del evacuador de crecidas de la presa Colbún", VI Congreso Nacional de Hidráulica, vol. I, Santiago de Chile.

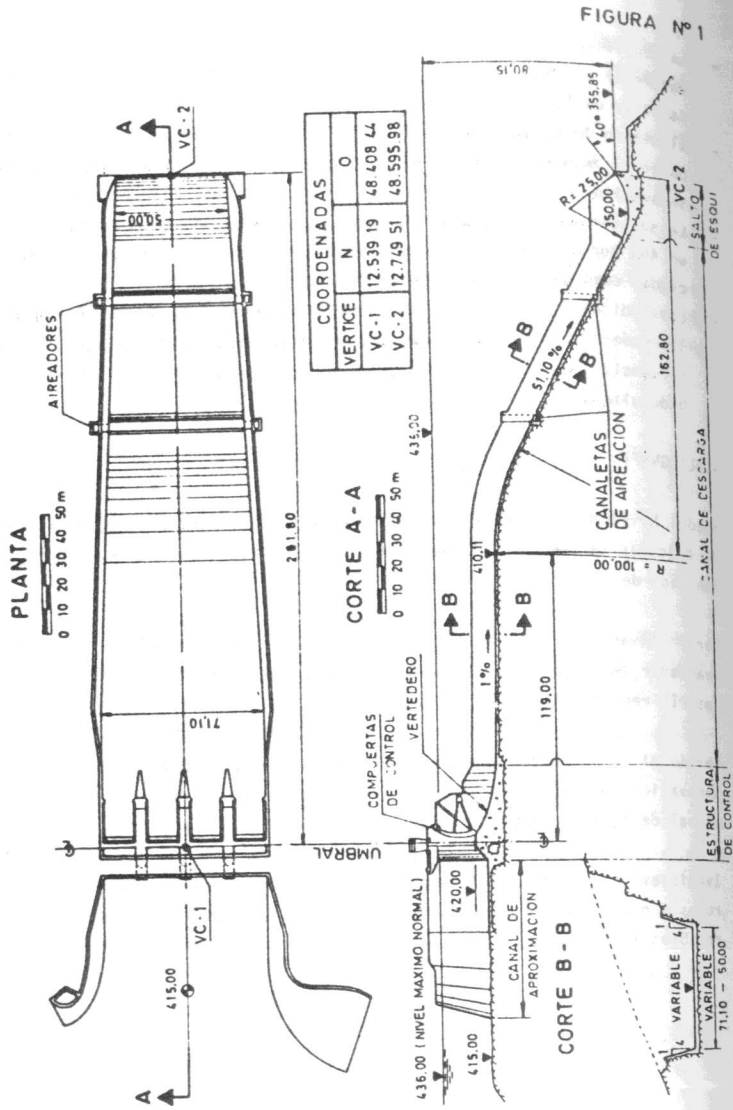
Mery; Alvarado; Riedel (1986). "Embalse Colbún Diseño hidráulico del evacuador de crecidas". CIER, Subcomité de construcción de sistemas eléctricos, IX reunión, tomo VI.

Chividini M; Lopardo R; Vernet G; Angelaccio C. (1983). "Evaluación de la socavación máxima aguas abajo de aliviaderos en salto de esquí". X Congreso Nacional de Agua, Córdoba, Argentina.

Ivanissevich L. (1980). "Fórmulas para calcular el límite de erosión en lechos rocosos o granulares". XII Seminario Nacional de Grandes Presas, Río de Janeiro, Brasil.

VERTEDERO COLBUN

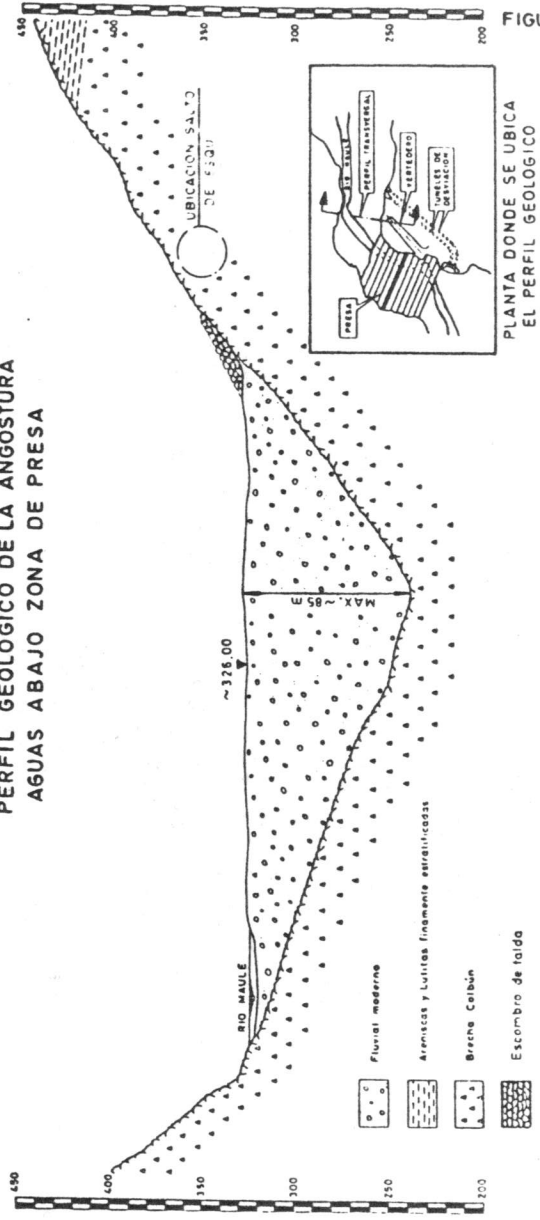
Disposición General



286

PERFIL GEOLOGICO DE LA ANGOSTURA

AGUAS ABAJO ZONA DE PRESA



PLANTA GENERAL
UBICACION PERFIL DE SOCAVACION

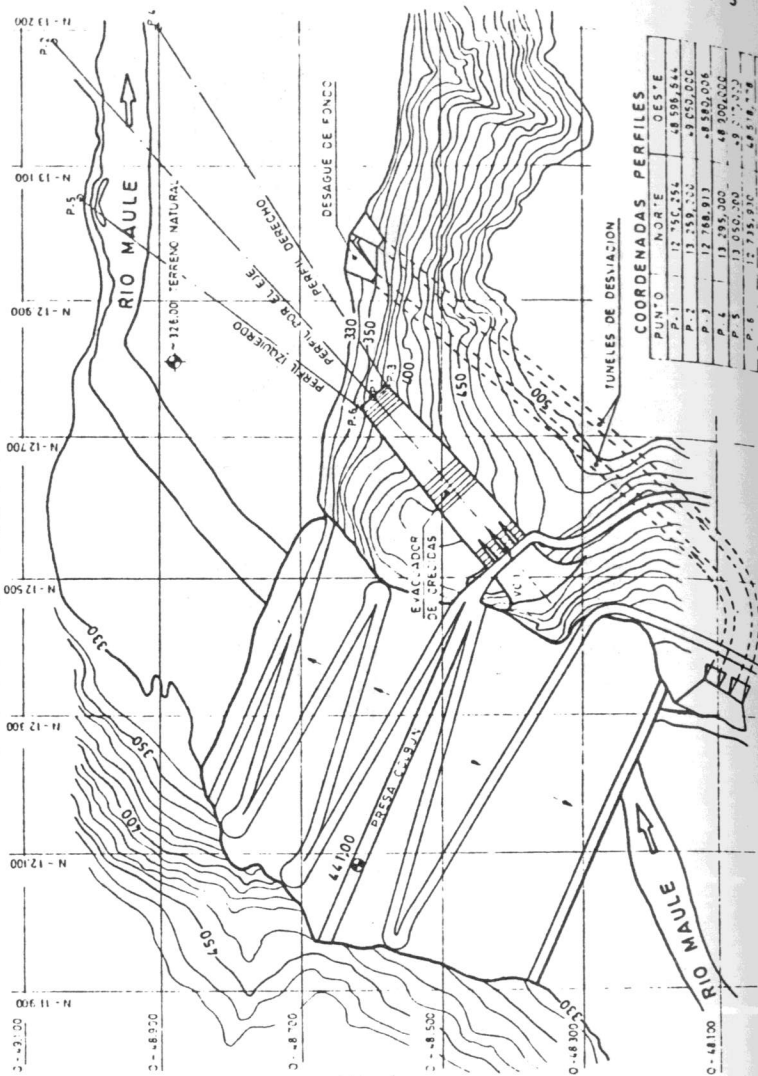
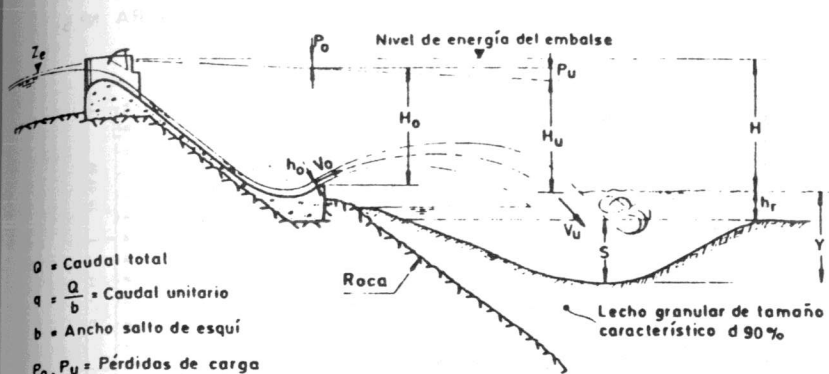


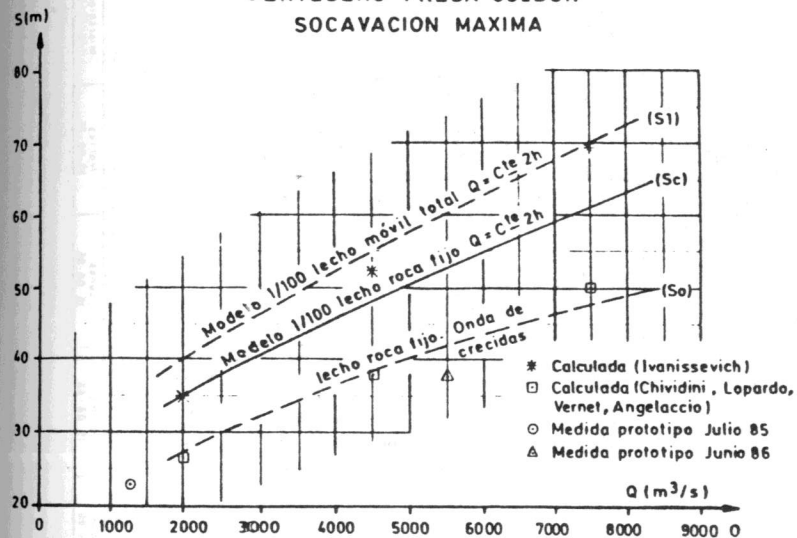
FIGURA N° 3

FIGURA N° 4

ESQUEMA GENERAL DE DEFINICION DE VARIABLES



VERTEDERO PRESA COLBUN
SOCAVACION MAXIMA



NIVELES EN EL EMBALSE

Modelo y calculo	= 436
Crecida Julio 85	= 427
Crecida Junio 86	= 434

CRECIDA DE JUNIO DE 1986

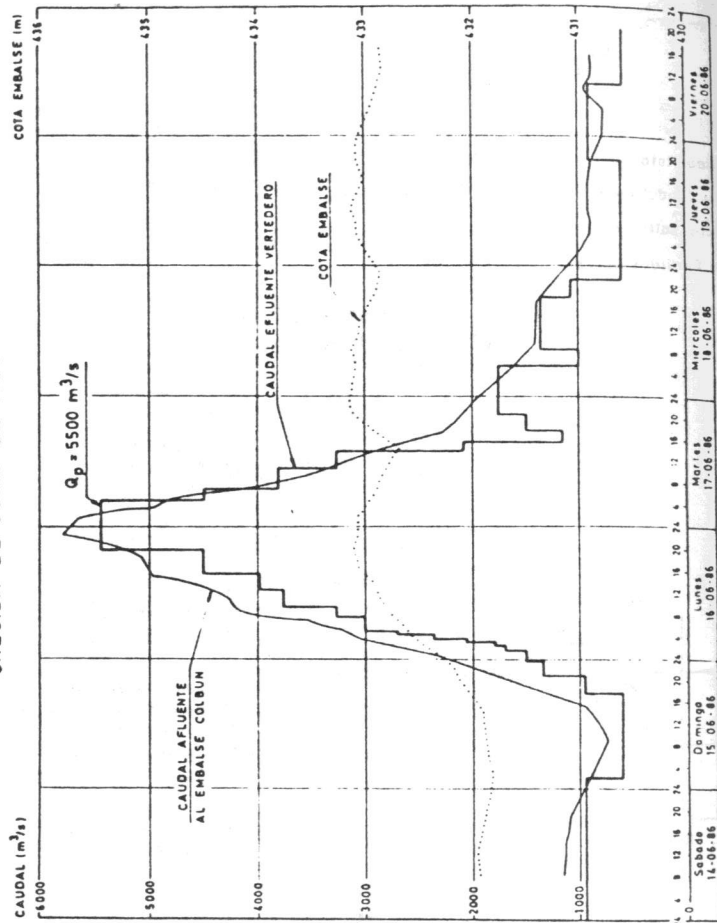


FIGURA Nº 5

VERTEDERO COLBUN PERFIL LONGITUDINAL POR EL EJE

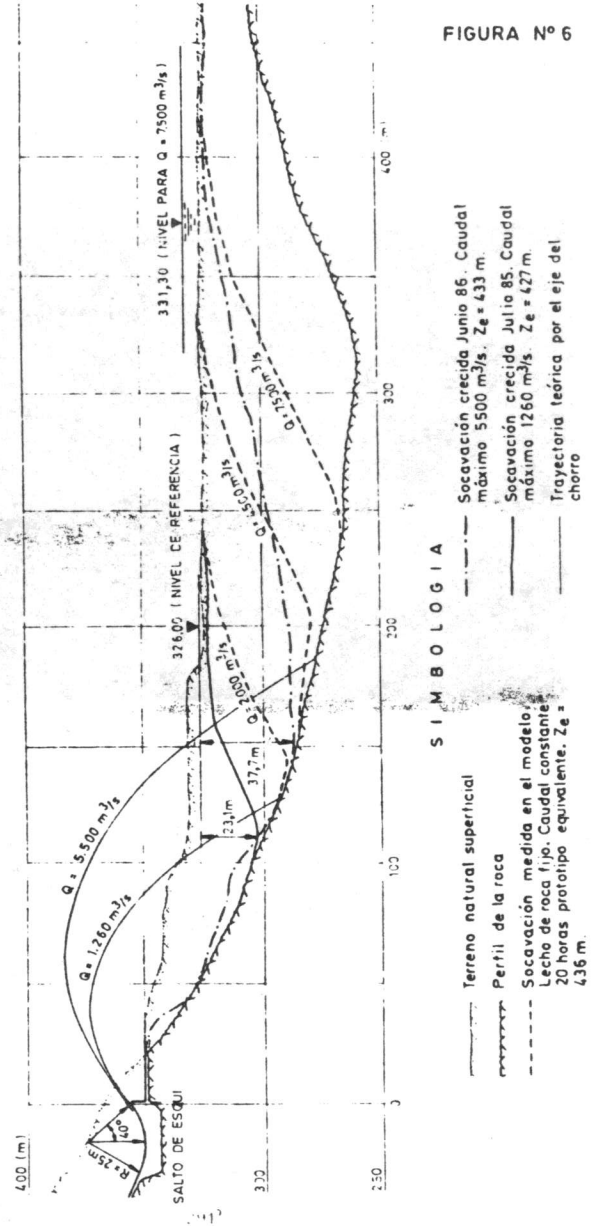


FIGURA Nº 6

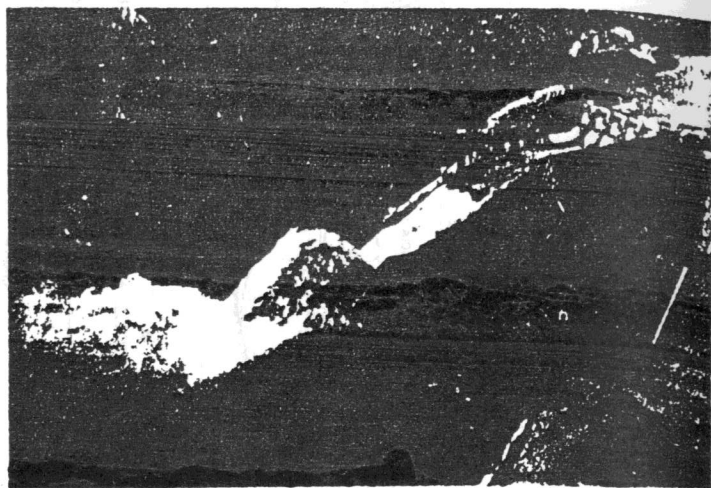


FOTO N°1

VERTEDERO EVACUANDO $600 \text{ m}^3/\text{s}$

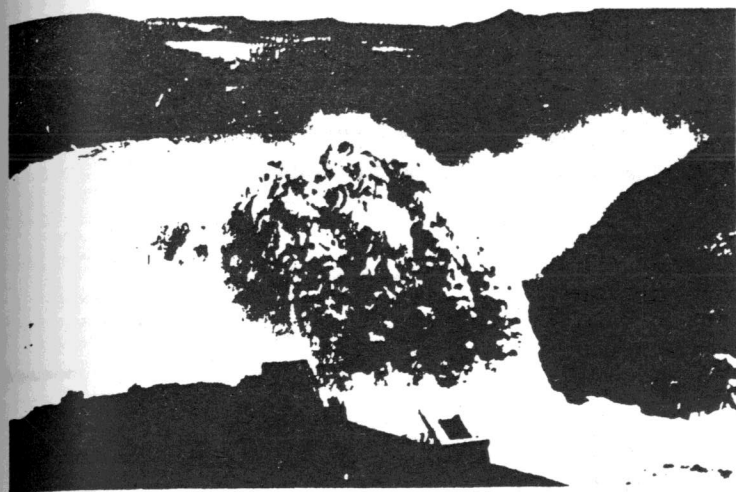


FOTO N°2

SALTO DE ESQUI LANZANDO $3.260 \text{ M}^3/\text{s}$