



IV COLOQUIO NACIONAL

ANTECEDENTES SOBRE EL COMPORTAMIENTO Y ESTUDIO EN MODELO
DEL ENROCADO DE PROTECCION DE LA BARRERA MOVIL DE LA BOCATOMA
DEL CANAL TENO - CHIMBARONGO

POR

Luis Ayala R. *
Alejandro López A. *
Klaus Pontani R. **
Jorge Villavicencio V. ***

RESUMEN

En este trabajo se aportan algunos antecedentes relativos al funcionamiento del enrocado de protección del canal desripador de la Bocatoma del Canal Teno - Chimbarongo, en conjunto con una descripción de un estudio en modelo llevado a cabo para resolver el problema de la estabilidad de dicha protección.

Desde la puesta en marcha, en 1975, el enrocado de protección fue destruido en tres ocasiones, debido en parte a condiciones de funcionamiento más desfavorables que las contempladas en el diseño original. En la última oportunidad se concluyó que la falla del enrocado se debía primordialmente a una inestabilidad local, motivo por el cual se decidió efectuar un estudio en modelo a fin de clarificar la mecánica del proceso y buscar una solución definitiva al problema.

El modelo (escala 1 : 40 sin distorsión) permitió detectar zonas del enrocado potencialmente inestables, provocadas por discontinuidades del escurrimiento, como asimismo estudiar dos soluciones al problema. La solución definitiva se sometió a diversas pruebas tendientes a determinar su seguridad, especialmente en la concerniente a la condición de arrastre crítico.

La solución elegida del estudio en modelo se materializó posteriormente en el prototipo, mediante un dique de hormigón cuya finalidad es la de estabilizar las zonas más críticas de la protección.

- * Ing. Investigador del Centro de Recursos Hidráulicos. U. de Chile. Profesor de "Mecánica de Fluidos" y "Arrastre de Sedimentos" del Depto. Obras Civiles, U. de Chile.
- ** Ing. Civil de la División Estudios Hidráulicos de ENDESA. Profesor Auxiliar de "Hidráulica General" del Depto. Obras Civiles, U. de Chile.
- *** Ing. Investigador del Centro de Recursos Hidráulicos. U. de Chile. Profesor del "Laboratorio de Hidráulica" y Profesor Auxiliar de "Mecánica de Fluidos" del Depto. Obras Civiles, U. de Chile.

El canal Teno-Chimbarongo, de 13.637 m de longitud, tiene por objeto trasvasar los sobrantes del río Teno a la hoya hidrográfica del río Rapel. Los caudales son captados en el río Teno mediante una bocatoma, la cual está ubicada unos 470 m aguas arriba del puente Teno de la carretera Panamericana y consta de 3 partes principales, a saber, la toma propiamente tal, la barrera fija y la barrera móvil.

Aguas abajo de esta última se sitúa el canal desripador cuyo radier se protegió con enrocados, objeto del presente trabajo. En él se expone la forma en que originalmente se diseñó el enrocado, su comportamiento durante las crecidas ocurridas entre la puesta en servicio provisional y la definitiva, la investigación en modelo a que se recurrió para estudiar su reparación y finalmente las conclusiones obtenidas.

2. DISEÑO ORIGINAL DEL ENROCADO

Para las condiciones de funcionamiento de diseño (cota 310,70 m en la poza con las 5 compuertas totalmente abiertas) se tiene en la sección donde comienza el enrocado las siguientes características hidráulicas: $h = 2,41$ m (altura del escurrimiento) y $v_m = 8,36$ m/s (velocidad media). Al aplicar a estas condiciones la fórmula de Neill,

$$v_m = 4,95 \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}} \times \sqrt{d} \times \left(\frac{h}{d}\right)^{0,1}$$

en que v_m = velocidad admisible, en m/s

γ_s = peso específico del enrocado = 2 650 kg/m³

γ = peso específico del líquido = 1 000 kg/m³

d = diámetro del enrocado, en m

h = altura del escurrimiento, en m

se obtuvo un enrocado de 1,6 m de diámetro. Considerando excesivo el tamaño de este enrocado, tanto por la dificultad para obtenerlo como para transportarlo y colocarlo, se decidió bajarlo a $d \geq 1,0$ m, el cual según Neill, admite una velocidad $v_m = 6,93$ m/s. En cuanto a su colocación, se recomendó tener especial cuidado de colocar las rocas más pesadas en la capa superior.

Al momento de la puesta en servicio en forma provisional en Septiembre de 1975, la bocatoma se encontraba en el siguiente estado de avance:

- la toma estaba en funcionamiento
- la barrera fija aún no se había comenzado a construir. En su defecto el agua era desviada hacia la toma mediante un canalón de captación, al comienzo del cual se ubicaba una depresión en la berna, que al ser sobrepasada durante una crecida hacía las veces de fusible.
- la barrera móvil, cuyo canal de evacuación tenía el enrocado del protección de 1 000 kg en su radier.

A partir de estas condiciones iniciales se hará un breve recuento de las crecidas del río Teno, los destrozos que durante ellas sufrió el enrocado del canal desripador y la forma en que fue reparado.

3.1 Crecidas ocurridas en el invierno de 1976

Las mayores crecidas de ese año se registraron en el mes de Junio, en que el caudal del río Teno en la zona de la bocatoma alcanzó unos 800 m³/s. De este caudal llegaron a la barrera unos 300 m³/s, los que pasaron íntegramente por los vanos de las 5 compuertas totalmente abiertas de la barrera móvil, evacuándose el resto del caudal por el fusible del canalón de aducción antes mencionado.

Con el paso de la crecida se desarmó el enrocado del canal desripador, hundiéndose parte de las rocas en el lecho mismo y siendo otras arrastradas hasta unos 500 m hacia aguas abajo.

Se estimó que la destrucción del enrocado se debió en parte a la ausencia de filtros bajo el enrocado (esto permitió que se lavara el sedimento fino sobre el que se apoyaba) y en parte al hecho de no contar aguas abajo de él con la altura de agua estimada (aún no se había construido la barrera fija) produciéndose en el lecho altas velocidades las que originaron socavaciones mayores a las esperadas.

Durante los primeros meses del año 1977 se construyeron 30 m de barrera fija (aumentando así la capacidad de evacuación de

2.90 la obra en unos 180 m³/s) y se reparó el radier del canal desripiador re colocando el enrocado sobre dos capas de filtro.

3.2 Crecidas ocurridas en el invierno de 1977

Durante los días 21 y 22 de Julio se produjeron las mayores crecidas del año 1977 y presumiblemente también los mayores daños a la obra. En esa oportunidad llegó a la barrera un caudal cercano a los 800 m³/s, alcanzando el agua en la poza la cota 311 m. De este caudal, unos 550 m³/s fueron evacuados por la barrera móvil estando las 5 compuertas totalmente abiertas y 230 m³/s ($q = 7 \text{ m}^3/\text{s} \times \text{m}$) por la barrera fija.

Según lo observado en esa oportunidad, los daños producidos correspondieron principalmente a un asentamiento del enrocado, moviéndose además parte del enrocado adyacente al extremo de aguas abajo del muro en ala en que terminaba la separación de la barrera móvil con la barrera fija.

Esta vez, considerando que ya se contaba con filtros, se pensó que los daños causados a la obra se debieron a las severas condiciones de operación a que ella fue sometida, por cuanto fue sobrepasado el caudal de diseño ($Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ por la barrera móvil y $q = 5 \text{ m}^3/\text{s} \times \text{m}$ por la fija) y también a que nuevamente se generaron altas velocidades aguas abajo del enrocado, añadiéndose un efecto de mayor turbulencia en la singularidad producida por el muro en ala antes mencionado (ver fig.1).

La reparación de la obra consistió en recolocar el enrocado con sus respectivos filtros en la zona en que se destruyeron y en prolongar hacia aguas abajo el muro que separa ambas barreras. Además de las reparaciones citadas se prosiguió la construcción de la barrera fija, (completándose los 270 m que la componen) y demás obras de la bocatoma.

3.3 Crecidas ocurridas en el invierno de 1978

A comienzos de Mayo de 1978 quedó lista para su funcionamiento la bocatoma del canal Teno-Chimbarongo, faltando sólo la conexión del grupo electrógeno de emergencia de las compuertas de la barrera móvil (ver fig. 2). El mayor caudal registrado durante las crecidas

del río Teno de ese año (en los días comprendidos entre el 17 y 23 de Julio) en la zona de la bocatoma fue de 1 100 m³/s, de los cuales 650 m³/s pasaron por la barrera fija y 450 m³/s por la barrera móvil (caudales inferiores a los de diseño). Es interesante destacar que tan solo en la madrugada del día 21 de Julio se observó que fallaban algunas partes de la obra, pudiendo detectarse la remoción del enrocado del radier del canal desripiador y la del enrocado situado inmediatamente aguas abajo del muro que separa la barrera fija de la barrera móvil, desordenándose además el enrocado del diente de la barrera fija en la zona adyacente.

4. EL MODELO HIDRAULICO

4.1 Justificación del modelo

Según se deduce del resumen de la historia del funcionamiento de la protección del canal desripiador, esbozada en los párrafos precedentes, ésta se ha destruido todos los años desde que la obra se puso en funcionamiento en forma provisional en el año 1975. Si bien es cierto que esta situación se debe en parte a que la bocatoma ha tenido que funcionar bajo condiciones más exigentes que aquellas consideradas en el proyecto, el grado de destrucción alcanzado y la complejidad del escurrimiento en algunas zonas de la obra aconsejaban realizar un estudio detallado del problema de modo de clarificar el mecanismo y origen del proceso de destrucción del enrocado. Es por eso que se consideró necesario recurrir al estudio en modelo hidráulico antes de efectuar la nueva reparación de la obra. El estudio en modelo fue encargado al Centro de Recursos Hidráulicos de la Universidad de Chile.

4.2 Descripción del modelo

Tomando en cuenta las características y dimensiones del canal que disponfa el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Chile, se adoptó para el modelo la escala 1 : 40 sin distorsión, lo cual permitió reproducir la barrera móvil y además 14 m (de prototipo) de la barrera fija.

La instalación experimental consistió en un canal de 1,18 m de ancho, 1,05 m de alto y 14 m de longitud, con una de sus paredes vidriadas para facilitar las observaciones, tal como se muestra en la figura 3.

En cuanto al modelo mismo, la barrera móvil se reprodujo en toda su extensión, materializándose el radier, los muros y los machones con terciado marino. En relación a las compuertas de sector, éstas no se reprodujeron pero en vez de ellas se confeccionaron 5 compuertas planas que sirvieron posteriormente para lograr los niveles de agua requeridos aguas abajo de ellas.

Aguas arriba de la barrera móvil se reprodujeron también mediante terciado marino machones, radieres y el talud de las rejillas de la bocatoma. A su vez, los 14 m de prototipo de la barrera fija de enrocado se materializaron mediante una capa de piedras pegada sobre una estructura de madera de igual inclinación que el prototipo, dejándose sólo sin consolidar su diente terminal.

Aguas abajo de la protección de enrocados del canal desripador se reprodujeron 80 m de lecho móvil del río Teno, continuándose aguas abajo de esta zona con un radier fijo con una pendiente de 5‰ , valor medio del lecho del prototipo. Finalmente en el extremo de aguas abajo del canal se instaló una trampa destinada a recoger los sedimentos arrastrados por el escurrimiento.

4.3 Calibración del modelo

Una vez construido el modelo se procedió a calibrarlo atendiendo a los siguientes aspectos :

- Lograr una adecuada representación de las condiciones hidráulicas, es decir, del nivel de agua en la poza y de los caudales que escurren por los vanos de las compuertas desripadoras y por encima de la barrera de enrocado para una condición de apertura total de compuertas.
- Reproducir el problema sedimentológico, es decir la destrucción del enrocado en forma análoga a la ocurrida en el prototipo.

Los primeros ensayos realizados y su comparación con lo observado en el prototipo, revelaron lo siguiente :

- Operando el modelo con las compuertas totalmente abiertas, de acuerdo a la condición de operación del prototipo, y no obstante obtenerse la correcta distribución de caudales por unidad de ancho, el modelo no reprodujo la velocidad del escurrimiento al comienzo del enrocado del

canal desripador, la cual es de vital importancia en su destrucción. Esto se debió a que la rugosidad del modelo resultó mayor que la que le corresponde a escala de prototipo, evidenciándose en el modelo un notorio efecto de los machones sobre el escurrimiento.

Para resolver este aspecto, y poder así obtener a la entrada del enrocado de protección la correspondiente velocidad deducida teóricamente para el prototipo, se trasladaron las compuertas a las ranuras ubicadas en el extremo de aguas abajo de los machones. Allí se fijó a todas ellas una abertura de 8,7 cms (escala del modelo), obteniéndose de esta manera la altura del escurrimiento y la velocidad requerida al comienzo de la protección.

Para las condiciones obtenidas de la calibración hidráulica, la calibración sedimentológica reveló que era excesiva la resistencia a la destrucción de los enrocados del modelo en relación a la del prototipo. Se estimó que esto podría deberse a una mayor trabazón entre las piedras del enrocado, debido a su forma y rugosidad superficial.

Para resolver esto se actuó disminuyendo primero el peso de las piedras (de 16 gr a 14 gr), para luego aumentarlo nuevamente a 16 gr, pero modificando su forma, reemplazando las piedras de aristas vivas por otras de cantos redondeados.

Para estas condiciones se verificó el proceso de destrucción del enrocado, el cual resultó similar al del prototipo en lo relativo a la forma en que quedó el enrocado después de la última crecida.

4.4 Soluciones estudiadas

De la calibración del modelo se puede deducir que el proceso de destrucción del enrocado comienza en su extremo de aguas abajo y en especial en la zona ubicada frente al muro que separa la barrera móvil de la barrera fija debido a la discontinuidad del escurrimiento que allí se produce. Al pie de dicho muro divisorio se origina una desestabilización de las rocas que componen el enrocado, o sea, se produce un fenómeno local que genera una socavación retrógrada sobre el resto del enrocado, siendo éste el mecanismo de destrucción y no un arrastre general del enrocado.

De los hechos que se acaban de mencionar se podría deducir que en primer lugar es necesario lograr estabilizar la última corrida de piedras (la situada en el extremo de aguas abajo del enrocado). Es así como se decidió estudiar una solución que compatibilizara este aspecto con el empleo de un mínimo de rocas, con el objeto de poder reparar el enrocado con las rocas existentes (aquellas que se fueron más las que estaban apiladas en las inmediaciones de la bocatoma). La solución que se estudió y que cumplía con ambos requisitos consistió en introducir en el lecho del río inmediatamente aguas abajo del enrocado una tabla vertical de poco espesor (≈ 6 mm). Esta tabla, que impedía el desplazamiento hacia aguas abajo de la última corrida de piedras, terminaba en su extremo izquierdo a unos 30 cm (12 m en el prototipo) al sur del muro que separa ambas barreras y en su extremo derecho se quebraba en ángulo recto hacia aguas abajo al llegar a la traza formada por el talud del pretil norte y el enrocado del fondo (solución A).

Habiéndose observado que este quiebre introducía una perturbación al escurrimiento, la que a su vez originaba una importante socavación local, se decidió suprimirlo y continuar con la tabla siguiendo el talud 2 : 1 (H:V) del enrocado de protección del pretil norte. Esta solución (solución B) se ensayó para las condiciones de diseño de la bocatoma y como el enrocado del radier demostrara gran estabilidad, se decidió adoptarla. Previo a esto se realizaron algunos ensayos adicionales destinados a determinar su coeficiente de seguridad tanto en lo referente a inestabilidad del enrocado por efecto de la discontinuidad del escurrimiento en la zona crítica anteriormente mencionada, como por efecto de arrastre y de saltación de las unidades de enrocado. Las condiciones a que se sometió el enrocado durante estos ensayos fueron mucho más desfavorables que las de diseño y mucho más rigurosas que las que pueden presentarse en la realidad, permitiendo definir el factor de seguridad utilizado en el diseño de las unidades de enrocado cuando éstas se calculan según el criterio de arrastre crítico. Los resultados de esta experimentación se muestran en la figura 4 en que se lleva el cociente h/D (h = altura de agua al comienzo del enrocado y D = diámetro teórico de las rocas) vs. el número de Froude del escurrimiento para experiencias

de ruptura (movimiento generalizado del enrocado). La condición de ruptura se consiguió aumentando paulatinamente la velocidad del escurrimiento, anotándose las condiciones inmediatamente antes de la ruptura (puntos blancos del gráfico de la figura 4) y las inmediatamente posteriores a ella (puntos negros). En dicho gráfico se han agregado dos curvas que representan estas condiciones límites, definiéndose así una "banda" de condiciones críticas para el modelo, cuyo único objeto es mostrar la tendencia general del límite de estabilidad del enrocado, pero de manera alguna pretenden servir como curvas de diseño. Además se ha incluido la curva que corresponde a una extrapolación a valores de $h/D < 2$ de la fórmula propuesta por Neill. Ella se agregó para permitir visualizar el grado de confiabilidad de los resultados que se obtienen al extrapolarla a las condiciones descritas. Para el enrocado de la bocatoma del canal Teno-Chimbarongo se obtuvo un coeficiente de seguridad al arrastre de aproximadamente 1,4, considerando que para el diseño del prototipo se utilizó un número de Froude igual a 1,72 y se adoptó un diámetro de enrocado de 1 m.

Finalmente, cabe señalar que de no haber mediado la premura de tiempo, se podrían haber estudiado otras soluciones como v.gr., no terminar el enrocado con una pared vertical sino con un talud de enrocados inclinado hacia aguas abajo que se fuera enterrando en el lecho del río, etc., con el objeto de poder establecer criterios más generales para el futuro diseño de obras similares.

5. EL PROYECTO

Para garantizar la estabilidad del enrocado de acuerdo a lo observado en el modelo, en el proyecto del mismo se consideraron los siguientes aspectos :

- Tratar de evitar que se desplace la última corrida de rocas (la situada en el extremo de aguas abajo) lo que se logra consolidándolas. Dado el número limitado de piedras con que se cuenta y el alto costo y la demora que significaría reabrir la cantera, se decidió colocar un diente terminal de hormigón en el que se apoya la última corrida de rocas (Ver fig. 5). Esta solución, además de significar un ahorro en cuanto a la cantidad de rocas, da una gran estabilidad al paramento

2.96 vertical de aguas abajo del diente y a su vez permite mantener una rugosidad y un aspecto uniforme en toda la superficie del enrocado.

- Considerando la socavación observada en el modelo y que el lecho del río aguas abajo de la barrera móvil pueda bajar aún más por la ausencia temporal de gasto sólido (retenido en la poza aguas arriba de la barrera), se decidió dar al diente de hormigón una profundidad total de 4 m, medida a partir de la superficie terminada del enrocado.
- Con el objeto de que la última corrida de enrocado colocada sobre el diente no tuviera opción de desplazarse hacia aguas abajo porque pudiera ser insuficiente el hormigón de aglomeración para evitarlo, se agregó en el extremo de aguas abajo del diente un pequeño muro o refuerzo de 0,70 m de alto y 0,50 m de espesor, contra el que se apoyará el enrocado. Este muro se colocó a todo lo largo del diente exceptuando el talud del pretil norte, puesto que el enrocado que continúa en dicho talud aguas abajo del diente evita que se puedan desplazar las rocas colocadas sobre él.
- Una seguridad adicional a la estabilidad del enrocado se obtiene al consolidar una franja de 2 m de ancho en todo el perímetro del radier, aumentando ésta a 4,5 m en el enrocado ubicado sobre e inmediatamente aguas arriba del diente de hormigón. De esta manera también se logra una seguridad adicional contra el posible volcamiento del mismo.
- Llenar con bolones de $D \geq 0,15$ m la zanja de construcción situada inmediatamente aguas abajo del diente terminal de hormigón. En la medida que se contará con rocas de rechazo (que no cumplen con las especificaciones del enrocado) éstas podrían reemplazar la capa superior de bolones, dando prioridad a aquella zona de la zanja que enfrenta al muro que separa la barrera fija de la barrera móvil, pues según se ha visto en el modelo, es ésta la zona más vulnerable de la obra.

Finalmente cabe señalar que aprovechando el período de estiaje el proyecto se construyó en los meses de Marzo y Abril del presente año (1979). De la construcción se puede destacar que el diente de hormigón quedó fundado en lahar y que las rocas que sobraron de la reparación se colocaron en vez de bolones aguas abajo del diente frente al muro que separa ambas barreras.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

2.97

De lo mencionado en los párrafos anteriores se puede deducir que la destrucción de la protección de enrocados se debió principalmente a la existencia de zonas expuestas a una discontinuidad del escurrimiento (la que aparece en el extremo de aguas abajo del muro divisorio de las barreras fija y móvil) y además, a la pérdida de estabilidad que sufriera la última corrida de enrocados cuando desapareció su apoyo por aguas abajo debido a la degradación y canalización del lecho. Respecto al primer aspecto cabe mencionar que la discontinuidad del escurrimiento originaba la desestabilización de los elementos de enrocado en la zona citada, proceso de falla que posteriormente se extendía hacia aguas arriba y transversalmente hacia el resto del enrocado. En cuanto al segundo fenómeno, se destaca que siendo de menor gravitación que el anterior, al avanzar este proceso se va desgranando paulatinamente el enrocado hacia aguas abajo, que sumado al aspecto ya mencionado, culmina en la destrucción total del enrocado. De ello se concluye que se hace indispensable evitar la desestabilización de los elementos de enrocado en la zona del muro de separación entre ambas barreras y a su vez impedir que se desplace la última corrida de rocas, quitando así el apoyo a aquellas situadas aguas arriba de ellas. Estas conclusiones no sólo son válidas para el caso en referencia sino que deben ser consideradas en el futuro diseño de protecciones de enrocados.

Finalmente se estima que dadas las limitaciones con que se contaba en ese momento, a saber, plazo para la investigación en el modelo hidráulico, cantidad de rocas disponibles, plazos para la reparación de la obra durante el estiaje, etc., la solución implementada en el prototipo cumple con las condiciones antes mencionadas.

Se consideraría interesante poder continuar la investigación básica con respecto al diseño de enrocados para sí poder obtener fórmulas confiables, dado que las que se emplean en la actualidad corresponden a extrapolaciones de los actualmente en uso, lo que puede llevar a un sobredimensionamiento considerable de las unidades de enrocado.

1. Wolman, M.G., "A method of Sampling Course River-Bed Material", AGU, Trans. Vol. 35, N° 6, 1954.
2. Neill, C.R., "Mean Velocity Criterion for Scours of Course Uniform Bed-Material", IAHR, XIII Congress, Vol. N° 3, 1967.
3. ENDESA, "Captación rfo Teno-Canal Teno Chimbarongo-Proyecto de la bocatoma". Memoria N° 220 del archivo de OICOH, Abril 1974.
4. ENDESA, "Canal Teno-Chimbarongo - Efecto de las crecidas ocurridas en el rfo Teno los días 21 y 22 de Julio de 1977", Memoria N° 252 del archivo de OICOH, Julio 1977.
5. ENDESA, "Canal Teno-Chimbarongo - Comportamiento de la bocatoma durante las crecidas de Julio de 1978", Memoria N° 265 del archivo de OICOH, Septiembre 1978.
6. Ayala, L., López, A., Villavicencio, J., "Modelo de enrocado de protección de la barrera móvil. Bocatoma canal Teno-Chimbarongo", U. de Chile, CRH-79-2-E, Junio 1979.

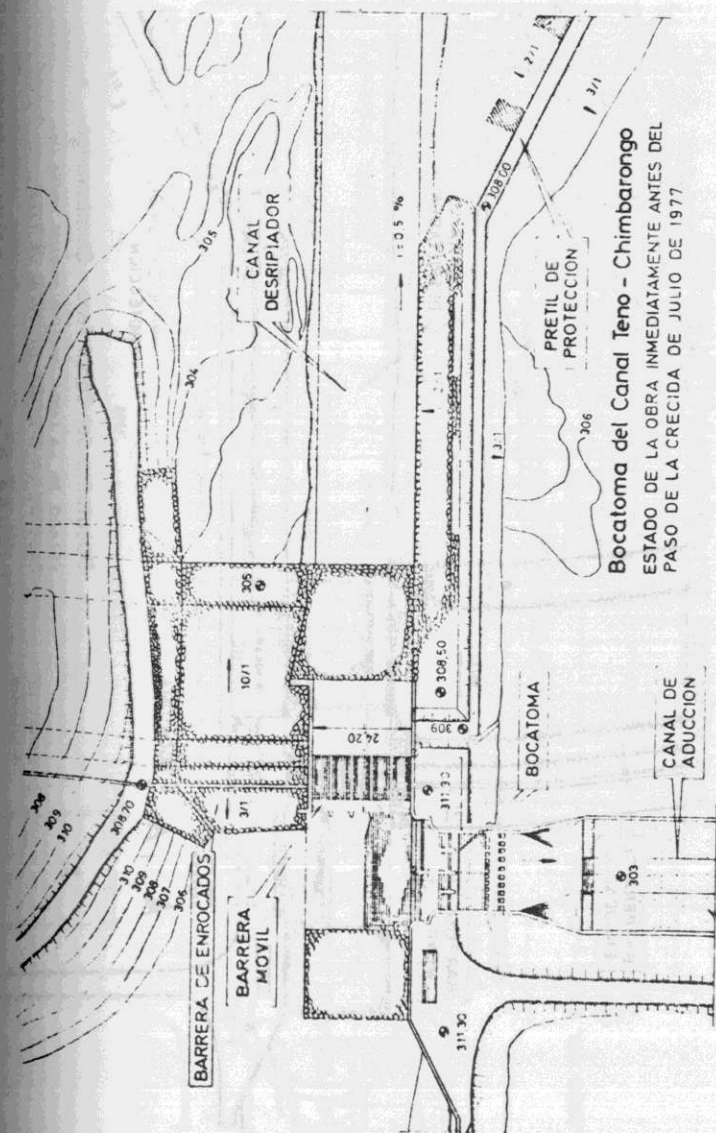
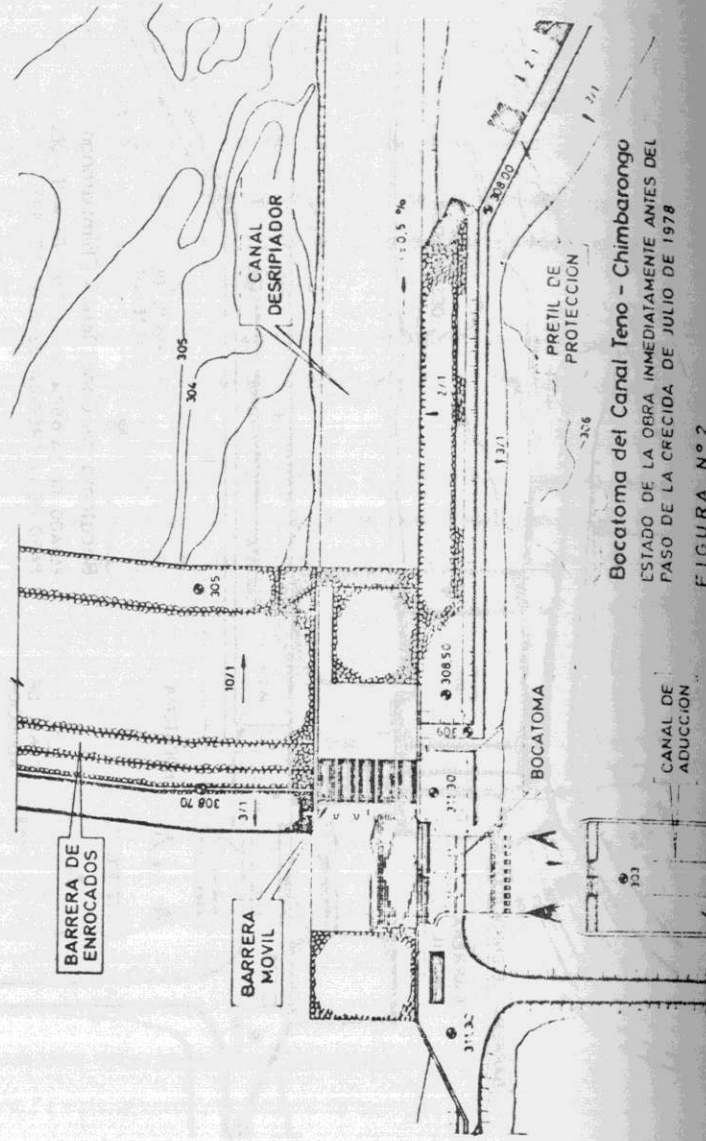
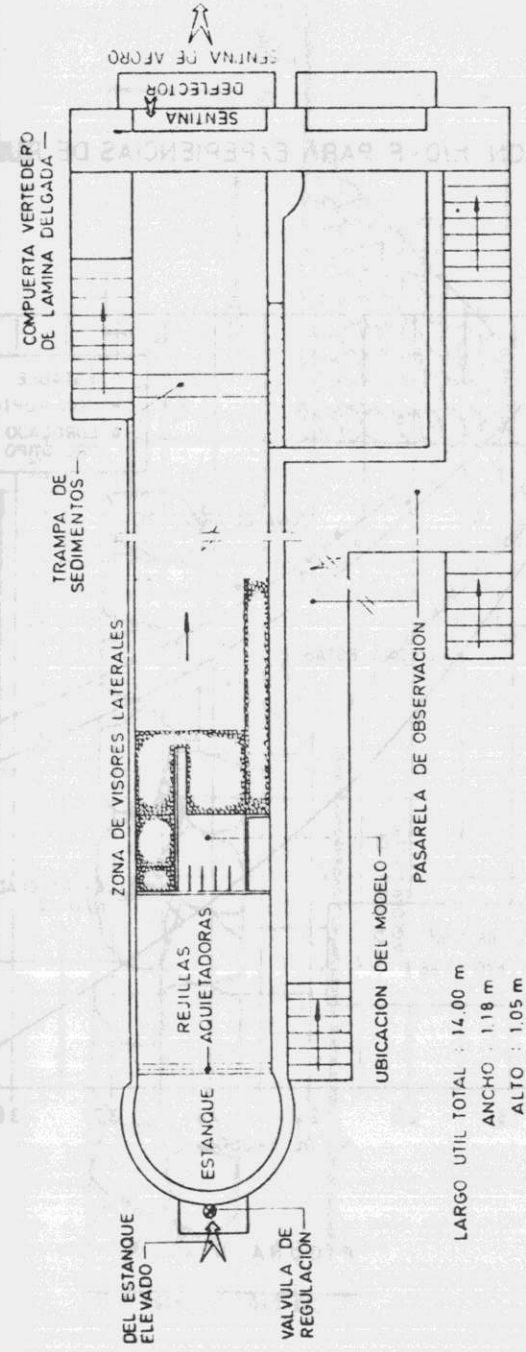


FIGURA N° 1



Bocatomá del Canal Teno - Chimbarongo
ESTADO DE LA OBRA INMEDIATAMENTE ANTES DEL PASO DE LA CRECIDA DE JULIO DE 1978
FIGURA N° 2



INSTALACION EXPERIMENTAL UTILIZADA

FIGURA N° 3

RELACION h/D-F PARA EXPERIENCIAS DE RUPTURA

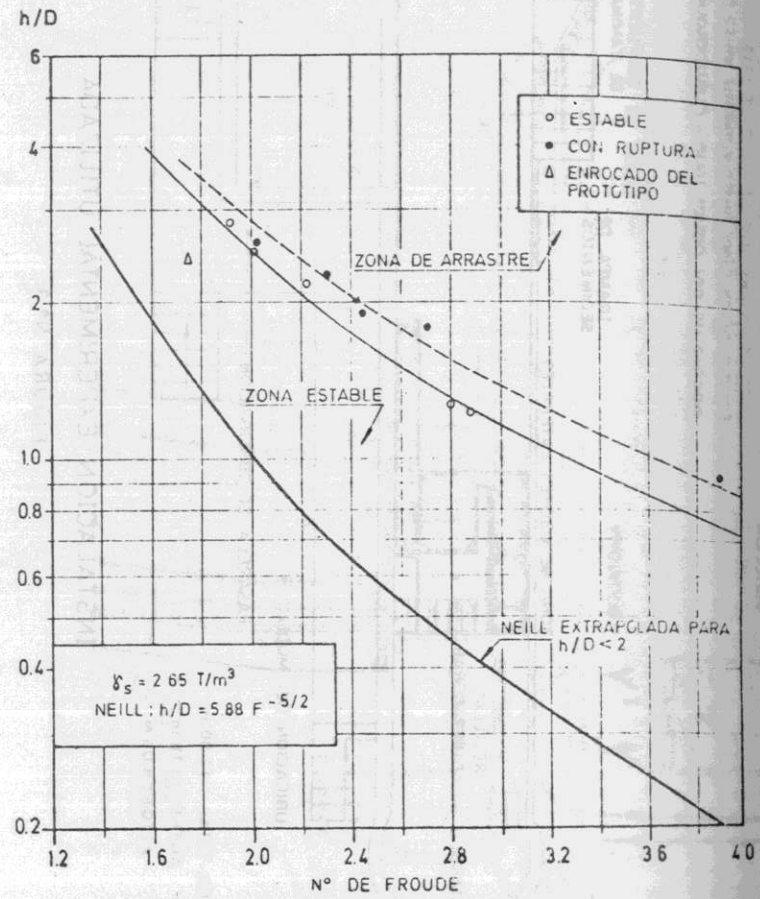


FIGURA Nº 4

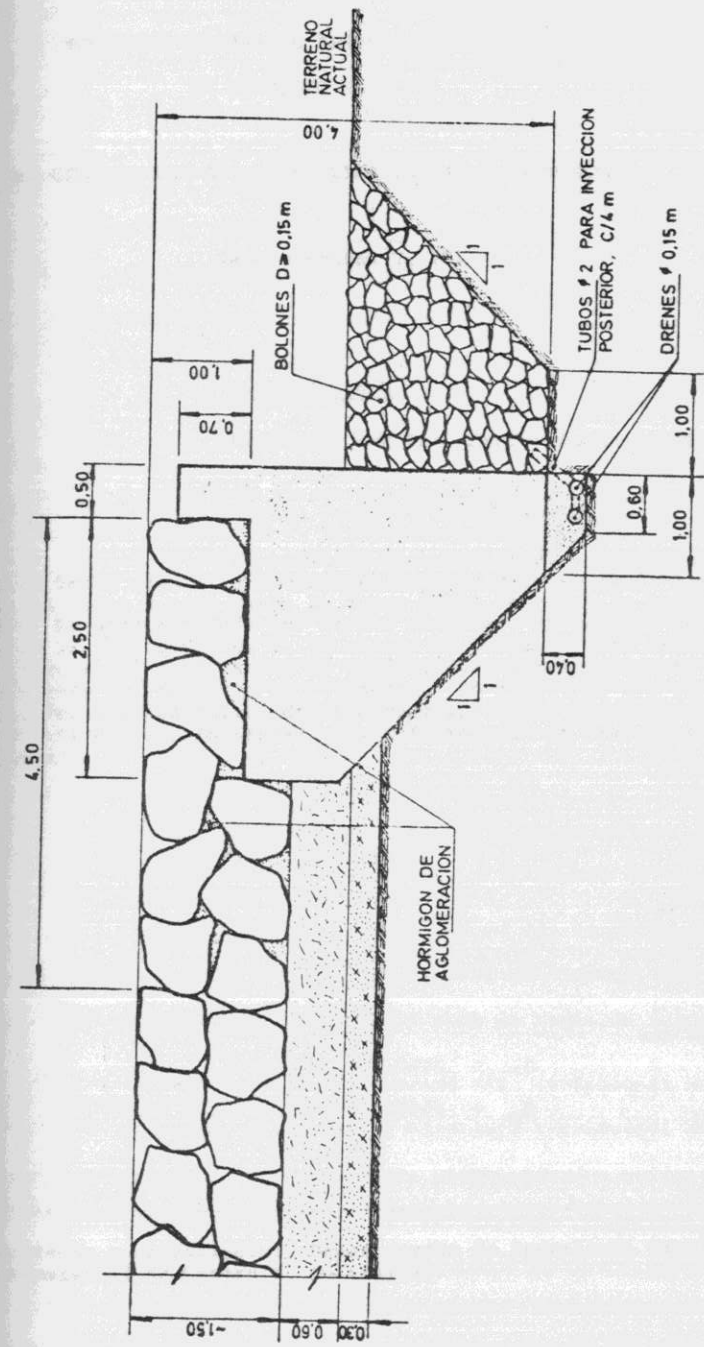


FIGURA Nº 5