

Laboratorio de Hidráulica Aplicada

SALTO GRANDE

LABORATORIO DE HIDRÁULICA



INSTITUTO NACIONAL DE CIENCIA Y TÉCNICA HIDRÁULICAS

IV SEMINARIO DE GRANDES OBRAS HIDROELECTRICAS
LABORATORIO DE HIDRAULICA APLICADA - I.N.C.Y.T.H.
SECRETARIA DE RECURSOS NATURALES Y AMBIENTE HUMANO
MINISTERIO DE ECONOMIA DE LA NACION

ESTUDIO SOBRE MODELO DE LA NAVEGACION PROVISORIA
DURANTE LA CONSTRUCCION DE LAS OBRAS DE SALTO GRANDE

Dr. Raúl A. LOPARDO
Ing. Fernando J. ZARATE
Ing. Julio DE LIO

SUPERVISION

Dr. Moisés S. BARCHILON
Director

Dr. Alfonso PUJOL
Vicedirector

EZEIZA, noviembre de 1974

L.H.A.-12-004-74

Ministerio de Economía de la Nación
Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente Humano
IV SEMINARIO DE GRANDES OBRAS HIDROELECTRICAS
LABORATORIO DE HIDRAULICA APLICADA - INCYTH

ESTUDIO SOBRE MODELO DE LA NAVEGACION PROVISORIA

DURANTE LA CONSTRUCCION DE LAS OBRAS DE SALTO GRANDE

Raúl A. Lopardo, Fernando J. Zárate, Julio De Lío

Resúmen: Se detallan los estudios en modelo físico general a escala 1:125 realizados para optimizar las obras complementarias proyectadas para asegurar la navegación aguas arriba del cierre de Salto Grande, durante la época de estiaje del río Uruguay.

Descriptores: Cierres fluviales; Etapas constructivas; Navegacion fluvial; Hidrodinámica de enrocados.

Descriptores geográficos/institucionales: Salto Grande - río Uruguay.

Ezeiza, noviembre de 1974

INTRODUCCION

El Laboratorio de Hidráulica Aplicada ha realizado a solicitud de la Empresa Constructora Salto Grande S.A., una serie de ensayos sobre modelo reducido, con el fin de determinar las características de las obras complementarias que deberán ejecutarse para poder asegurar la navegación en la zona de aguas arriba durante los períodos de estiaje del río Uruguay.

Dichos períodos resultan críticos ya que el tirante de agua para la zona de navegación no será suficiente, provocando ello la imposibilidad de vinculación mediante motopontones previstos entre ambas márgenes.

Simultáneamente se han investigado los efectos que tendrán las obras complementarias sobre los niveles de agua resultantes contra las ataguías y las velocidades sobre la margen argentina en caso de presentarse la máxima crecida estimada para las etapas de desvío.

Las experiencias se han desarrollado en el modelo a escala 1:125, construido para satisfacer las investigaciones convenidas oportunamente con la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande, en el que este Laboratorio ha realizado los estudios de las etapas de desvío (1) (2) y tiene en curso el ensayo del total de las obras.

DESCRIPCION DE LOS ESTUDIOS

A fin de asegurar la navegacion entre las márgenes del río Uruguay durante los períodos de estiaje, la Empresa Constructora Salto Grande S.A., propuso la realización de obras complementarias durante los citados períodos. Esas obras consisten en la construcción de un espigón de enrocado que reduce el ancho de pasaje establecido para la etapa 1 de desvío produciendo una sobreelevación del nivel, en la zona aguas arriba, tal que asegure un tirante mínimo para navegacion de 3,00 m.

Considerando que el punto más alto del perfil transversal entre muelles (Figura N°1) posee una cota de +4,80 m, se fijó en cota +7,80 m el valor límite mínimo del nivel de agua a obtener por medio de las obras complementarias.

Con la ataguía de primera etapa totalmente terminada (Figura N°2) donde las celdas toman contacto con el escurrimiento, se determinó el gasto mínimo que asegura navegabilidad en la zona de estudio, y en función de ello se ensayaron gastos de 500, 1.000 y 1.500 m³/s avanzando con el nuevo espigón hasta obtener el ancho necesario de estrechamiento que permita lograr la citada cota de agua +7,80 m.

Posteriormente, se reprodujo en el modelo la crecida de 27.000 m³/s, considerada máxima probable en etapa de construcción de las obras, a efectos de cuantificar las consecuencias que los espigones complementarios tendrían sobre los niveles de agua contra las ataguías y la distribución de velocidades del escurrimiento. Este último punto resulta de especial interés en las proximidades de la margen argentina, pues implica posibilidades de erosión.

Además se verificó la estabilidad del espigón de enrocado construido en aguas bajas cuando se presenta la máxima crecida.

Como estudio adicional, se repitieron los ensayos determinantes para el estado actual de las obras, cuando aún las celdas no han sido construidas (Figura N°3).

RESULTADOS OBTENIDOS

ENSAYO N° 1

Para poder definir el momento en el que deberán comen- zarse las obras complementarias que garanticen la navegación, se impuso como etapa previa, la determinación del mínimo gasto para el cual se verifica una cota de +7,80 m en la zona de navegación con el río adecuado a la configuración final de cierre de prime- ra etapa.

Las experiencias realizadas permitieron establecer que dicho gasto mínimo corresponde a 2.500 m³/s para el cual se ob- tiene una cota de +7,85 m en la zona de navegación (Tabla N°1). Esta determinación permitió fijar el intervalo de gastos de ensa- yo de las obras complementarias en 1.500 m³/s, 1.000 m³/s y 500 m³/s.

ENSAYO N° 2

Siendo el estado de las obras el correspondiente a la configuración final para etapa 1 de desvío, se probó para un gas- to de 1.500 m³/s la cota resultante en la zona de navegación, ha- biéndose obtenido un valor de +7,06 m. Debido a que este valor no satisface las condiciones impuestas para asegurar la navega- ción, se procedió a la construcción de un espigón de enrocado que estreche la zona de escurrimiento libre hasta obtener una co- ta de +7,80 m en zona navegable. Dicho espigón se ubicó sobre el eje de la presa (línea M-K) siendo reproducido mediante un enro- cado de piedras comprendidas entre 33 Kg y 262 Kg de peso.

Los sucesivos estados logrados durante el ensayo se re- sumen en la Tabla N°1.

ENSAYO N° 3

Esta prueba tiene idénticos objetivos que los enuncia- dos para el Ensayo N°2, siendo en este caso el gasto $Q = 1.000$ m³/s y habiéndose construido el espigón en coincidencia con el e- je de la presa (M-K), (Posición N°1 de la Figura N°2).

Los diversos estados alcanzados durante el ensayo se resumen en la Tabla N°1.

Una vez lograda la cota +7,80 m de embalse para un an-

cho de estrechamiento de 95 m, se midió la cota de agua en el punto 19Z de la cuadrícula, resultando +7,64 m.

En este ensayo la piedra comprendida entre 33 Kg y 262 Kg de peso resultó inestable a partir de un ancho de estrechamiento de 100 m, por lo que se la reemplazó por enrocado de 272 a 909 Kg de peso, que demostró adecuada estabilidad para obtener el estado final.

ENSAYO N° 4

Para completar las investigaciones dentro del intervalo de gastos propuestos, y para posición N°1 del espigón (Figura N°2) se ensayó el comportamiento de las obras complementarias para $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$.

En la Tabla N°1 se detallan los distintos estados alcanzados durante el ensayo.

El enrocado utilizado fue de 33 Kg a 262 Kg de peso hasta alcanzar un ancho de estrechamiento de 45 m, a partir del cual debió cambiarse el material por piedras de 272 Kg a 909 Kg de peso, con las que se logró el estrechamiento final de 37 m. Para ese estado el nivel de agua en el punto 19Z de la cuadrícula fue de +7,70 m.

ENSAYO N° 5

Concluidas las pruebas en la zona del eje de la presa (posición N°1, Figura N°2), se investigó el funcionamiento de las obras complementarias en caso de ubicarlas sobre la traza del puente provisorio de segunda etapa (posición N°2, Figura N°2), adoptando para dichos ensayos la misma secuencia de gastos que los ya estudiados.

Partiendo de la situación de río libre y para un gasto $Q = 1.500 \text{ m}^3/\text{s}$, se avanzó el espigón de enrocado, habiéndose obtenido en las sucesivas fases de la prueba, los valores que se consignan en la Tabla N°1.

Para un estrechamiento de $B = 156 \text{ m}$ se obtuvieron las condiciones de navegación en la zona de muelles (cota +7,80 r), comprobándose que el enrocado utilizado (33 Kg a 262 Kg de peso) no fue erosionado. En este estado se midió la cota de agua resultante en la zona inmediatamente aguas arriba del espigón (punto 3W de la cuadrícula) que fue +7,59 m.

ENSAYO N° 6

Los objetivos de esta prueba son idénticos a los enunciados para la anterior (Ensayo N°5), siendo en este caso el gasto $Q = 1.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Los sucesivos estados alcanzados durante el ensayo se detallan en la Tabla N°1.

En este caso el estrechamiento necesario para alcanzar el nivel requerido que asegurase la navegación de los motopontones resultó $B = 90 \text{ m}$.

El espigón fue construido siguiendo la traza del puente provisorio de segunda etapa, empleando rocas de 33 Kg a 262 Kg de peso, cuya estabilidad no aparece comprometida para la situación final alcanzada. El nivel de agua resultante inmediatamente aguas arriba de las obras (punto 3W de la cuadrícula) fue de +7,58 m.

ENSAYO N° 7

Para completar esta serie de ensayos se investigó el comportamiento de las obras con el mínimo gasto adoptado correspondiente a $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$.

El procedimiento seguido fue el mismo de los ensayos anteriores, habiéndose realizado el cierre según la traza de las pilas del puente de servicio de segunda etapa, hasta lograr que el nivel aguas arriba cumpliera con los mínimos requeridos para que la navegación entre muelles quede asegurada.

El tipo de roca utilizada para la construcción del espigón, responde a los tamaños comprendidos entre 33 Kg y 262 Kg de peso prototipo, que resultó estable en el estado final obtenido para un estrechamiento $B = 28 \text{ m}$, consignándose en la Tabla N°1 otros estados parciales.

La medida en el punto 3W de la cuadrícula, dio como resultado una cota de +7,58 m.

COMPORTAMIENTO DE LAS OBRAS EN CONDICIONES DE MAXIMA CRECIDA

A efectos de cuantificar las consecuencias que los espigones complementarios tendrían sobre los niveles de agua contra las ataguías y la distribución de velocidades de escurrimiento sobre la margen argentina, se reprodujo en el modelo la crecida de $27.000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerada máxima probable en etapa de construcción de las obras.

Con este evento crítico se probaron en los Ensayos N° 8 y N° 9, las configuraciones obtenidas en las pruebas N° 4 y N° 7 respectivamente, ambas realizadas con un gasto $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$, ya que suponen las condiciones más desfavorables pues en ellas se producen los mayores estrechamientos del río.

ENSAYO N° 8

El espigón se ubicó sobre el eje M-K, siendo el ancho de estrechamiento $B = 37 \text{ m}$. Considerando que el enrocado debe resultar estable cuando se comporta como umbral sumergido, se empleó para su construcción una mezcla de rocas de las siguientes características:

- 50% comprendida entre 33 Kg y 262 Kg de peso
- 50% comprendida entre 909 Kg y 2.180 Kg de peso.

La cota de coronamiento de las obras complementarias fue fijada en $+8,00 \text{ m}$ de acuerdo a los valores de nivel de agua medidos en el punto 19Z de la cuadrícula, durante los ensayos anteriormente realizados con esta configuración.

La cota de agua resultante en el embalse para esta condición, alcanzó el valor $+20,46 \text{ m}$, habiéndose relevado, además, velocidades sobre la margen argentina y niveles contra las ataguías.

ENSAYO N° 9

En este caso, el espigón se ubicó siguiendo la traza del puente provisorio de segunda etapa, con un ancho de estrechamiento de $B = 28 \text{ m}$.

Tanto el material empleado como la cota alcanzada por el coronamiento del enrocado fueron idénticos a los del ensayo anterior.

Para esta prueba el nivel de agua en la zona aguas arriba de las obras fue de +20,43 m, habiéndose realizado mediciones de niveles y velocidad en varios puntos de interés.

ENSAYO N° 10

Además de los citados ensayos, se realizó una prueba para gasto máximo sin la presencia de las obras complementarias que arrojó resultados concordantes con las pruebas efectuadas en idénticas condiciones, en ocasión del estudio de cierre de primera etapa (1).

Para esta serie de ensayos (N°8, N°9 y N°10), se realizaron mediciones de velocidad a lo largo de la línea CC de la cuadrícula, y se relevaron niveles en varios puntos contra las ataguías de primera etapa, detallándose en las Tablas N°2 y N°3, los valores obtenidos.

El análisis de los resultados de la Tabla N°2 muestra que, la máxima cota de agua alcanzada contra las ataguías durante los ensayos fue de +20,46 m, valor que se mantiene por debajo del nivel de coronamiento de las ataguías que corresponde a cota +21,50.

Comparando los valores consignados en la Tabla N°3, surge que la presencia de las obras complementarias no introduce cambios significativos en las velocidades observadas a lo largo de la margen argentina.

El pasaje de la corriente en condiciones críticas ($Q = 27.000 \text{ m}^3/\text{s}$) por sobre el coronamiento del espigón produjo, en ambas configuraciones probadas, una leve erosión del material más fino que formaba parte de la mezcla utilizada en su construcción. La sección transversal del enrocado se alargó hacia aguas abajo transformándose en un trapecoide por efecto de la corriente, sin embargo, el vértice aguas arriba de dicha sección se mantuvo en el nivel original, es decir a cota +8,00 m.

El espigón, al funcionar como umbral sumergido, produce ondulaciones en la superficie libre del escurrimiento que se propagan hacia aguas abajo del mismo. A causa de la velocidad de la corriente y de la geometría del atracadero, construido aguas arriba sobre la margen argentina, se observó un fenómeno de separación de los filetes líquidos, que se reproducirá en prototipo con ondas superficiales a lo largo de la línea de separación del flujo.

ENSAYOS ADICIONALES

• Ante la posibilidad de que se produzca un estiaje que comprometa la navegación entre las márgenes durante el período en que las celdas aún no están construídas, y donde las obras de cierre se completan con una ataguía longitudinal exterior a las mismas, se resolvió la realización de pruebas adicionales.

ENSAYO N° 11

Para la realización de esta prueba, se adoptó la condición de mínimo gasto en coincidencia con el de los ensayos anteriormente efectuados, o sea $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$. En estas condiciones se relevó la cota de aguas arriba, en la zona de navegación que resultó de +6,41 m.

Como el valor obtenido no alcanza la cota fijada para asegurar la navegación, se procedió a construir un espigón de enrocado sobre el eje M-K, con el cual se logró el nivel +7,80 m, cuando el ancho libre de pasaje se redujo a 35 m.

El nivel de agua observado en la zona inmediatamente aguas arriba del espigón, resultó de 7,58 m.

El enrocado con el cual fue materializado el espigón, estuvo comprendido entre 33 Kg y 262 Kg de peso, resultando adecuada su estabilidad.

ENSAYO N° 12

El procedimiento de la prueba fue el siguiente: Una vez establecido el régimen con un gasto $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ como en el ensayo anterior, la cota en el perfil entre muelles resultó de +6,41 m.

Se comenzó entonces a realizar el cierre arrojando un material granular suelto, cuyos tamaños corresponden a los comprendidos entre 33 Kg y 269 Kg del prototipo sobre la traza del puente provisorio de segunda etapa desde el vértice aguas arriba de la ataguía longitudinal de primera etapa hacia la margen argentina, hasta que la lectura del nivel de agua medida aguas arriba fuese la necesaria como para que no se viese comprometida la navegación de los motopontones, valor fijado en cota +7,80.

El estrechamiento resultante fue de $B = 35$ m, estaba ubicado desde la línea B-B de la cuadrícula hacia la ataguía longitudinal, pues con el objeto de no provocar velocidades elevadas cerca de la margen argentina que es erosionable, se completó el cierre con un espigón construido desde la margen argentina hasta la línea B-B (Figura N°3, posición N°2). Esta configuración que resulta más conveniente desde el punto de vista constructivo, puesto que permite construir la mayor parte del espigón desde la margen uruguaya, no presenta perturbaciones apreciables del escurrimiento que puedan producir procesos de erosión importantes.

La cota observada aguas arriba del espigón fue de 7,58 m.

TABLA N° 1

| Ensayo N° | Q m ³ /s | Posic. espigón | Ancho de pa saje B (m) | Cota zona navegación (m) |
|-----------|------------------------|----------------|---------------------------|--------------------------------|
| 1 | 2.500 | - | Sin espigón | +7,85 |
| 2 | 1.500 | N°1, Fig. N°2 | Sin espigón | 7,06 |
| 2 | 1.500 | N°1, Fig. N°2 | 200 | 7,20 |
| 2 | 1.500 | N°1, Fig. N°2 | 140 | 7,81 |
| 3 | 1.000 | N°1, Fig. N°2 | Sin espigón | 6,66 |
| 3 | 1.000 | N°1, Fig. N°2 | 100 | 7,69 |
| 3 | 1.000 | N°1, Fig. N°2 | 95 | 7,84 |
| 4 | 500 | N°1, Fig. N°2 | Sin espigón | 6,01 |
| 4 | 500 | N°1, Fig. N°2 | 80 | 6,78 |
| 4 | 500 | N°1, Fig. N°2 | 65 | 7,04 |
| 4 | 500 | N°1, Fig. N°2 | 50 | 7,45 |
| 4 | 500 | N°1, Fig. N°2 | 45 | 7,65 |
| 4 | 500 | N°1, Fig. N°2 | 37 | 7,88 |
| 5 | 1.500 | N°2, Fig. N°2 | Sin espigón | 7,08 |
| 5 | 1.500 | N°2, Fig. N°2 | 156 | 7,84 |
| 6 | 1.000 | N°2, Fig. N°2 | Sin espigón | 6,69 |
| 6 | 1.000 | N°2, Fig. N°2 | 90 | 7,81 |
| 7 | 500 | N°2, Fig. N°2 | Sin espigón | 6,01 |
| 7 | 500 | N°2, Fig. N°2 | 70 | 6,90 |
| 7 | 500 | N°2, Fig. N°2 | 38 | 7,48 |
| 7 | 500 | N°2, Fig. N°2 | 28 | 7,81 |

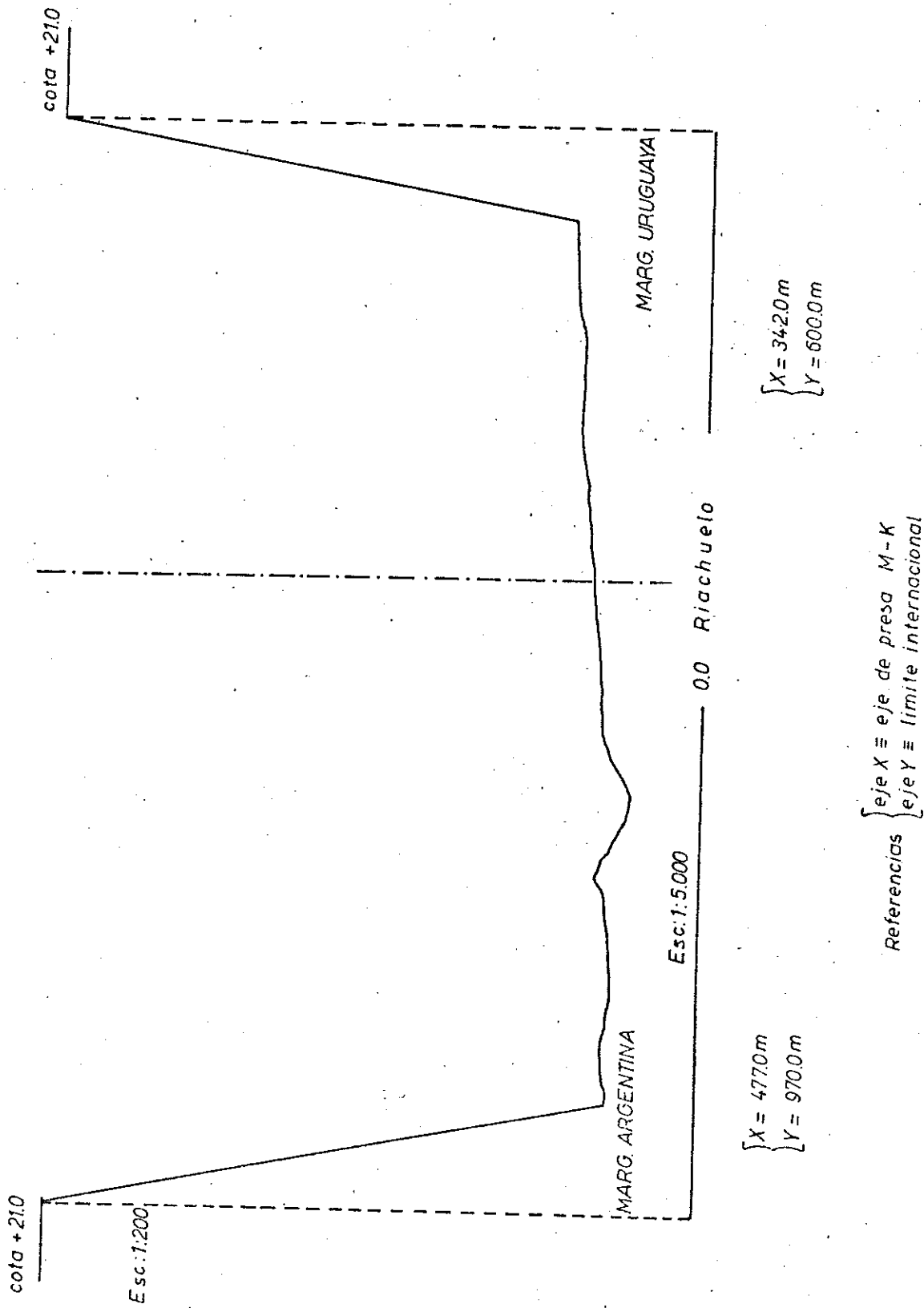
TABLA N° 2
Mediciones de Velocidad en M/S

| Punto | Ensayo N° 8 | Ensayo N° 9 | Ensayo N° 10 |
|-------|-------------|-------------|--------------|
| 24CC | 5,16 | 4,74 | 5,08 |
| 27CC | 5,03 | 4,78 | 4,82 |
| 30CC | 4,65 | 5,00 | 5,01 |
| 33CC | 4,40 | 4,77 | 4,75 |
| 36CC | 4,30 | 4,87 | 5,06 |
| 39CC | 4,22 | 5,01 | 5,03 |

TABLA N° 3
Medidas de Niveles en Metros sobre el Cero del Riachuelo

| Punto | Ensayo N° 8 | Ensayo N° 9 | Ensayo N° 10 |
|-------|-------------|-------------|--------------|
| L1 | 20,28 | 20,36 | 20,10 |
| 10A | 20,32 | 20,32 | 20,06 |
| 11J | 20,46 | 20,43 | 20,35 |
| 12Q | 18,48 | 18,90 | 18,76 |
| 15P | 18,48 | 18,58 | 18,38 |
| 20R | 18,70 | 18,16 | 18,21 |
| 26Q | 17,96 | 17,70 | 17,73 |
| 32LL | 18,75 | 18,64 | 18,69 |

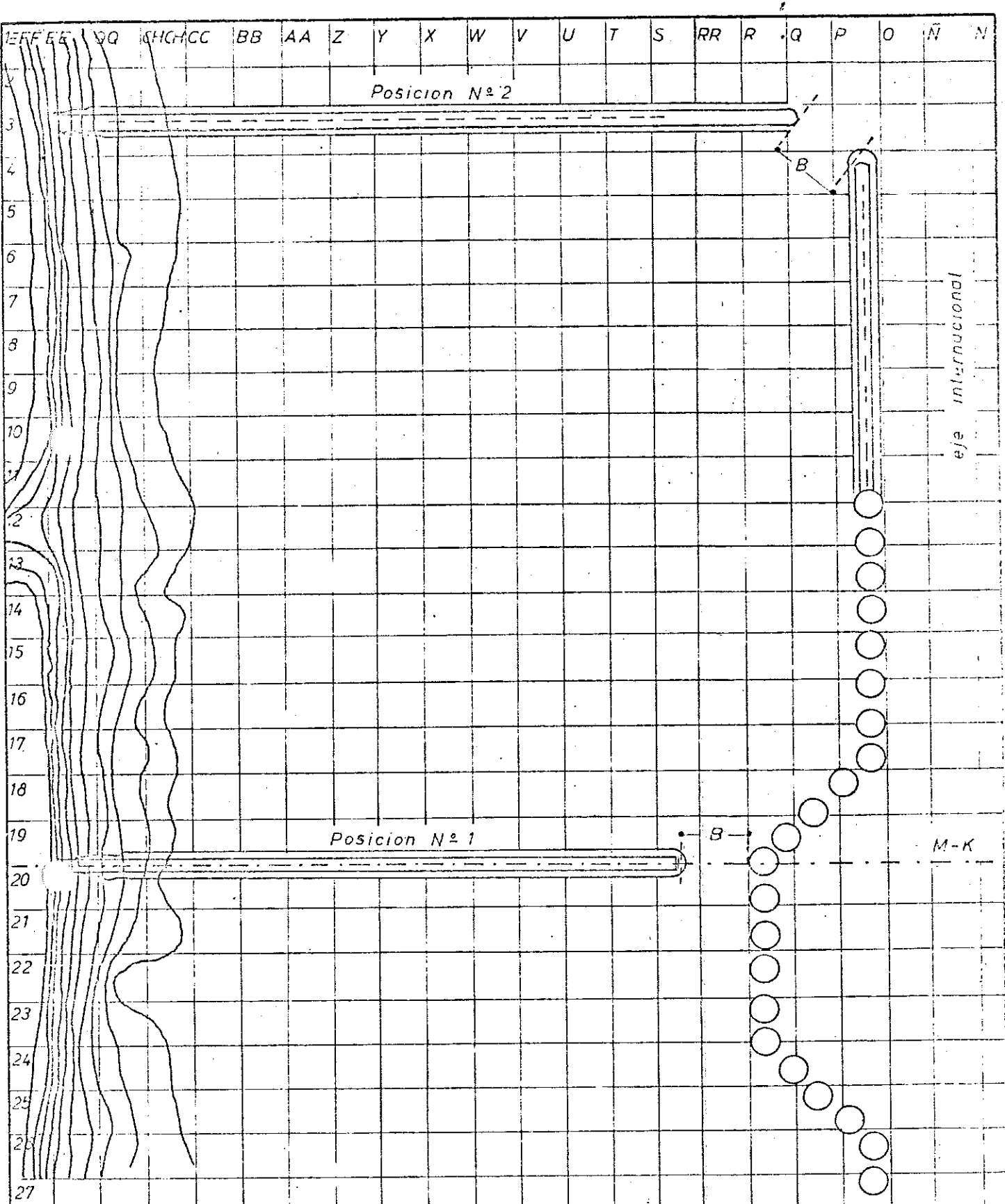
LABORATORIO DE HIDRAULICA APLICADA
ensayo sobre modelo de Salto Grande
etapa de cierre - obras complementarias



perfil transversal entre muelles

FIGURA N° 1

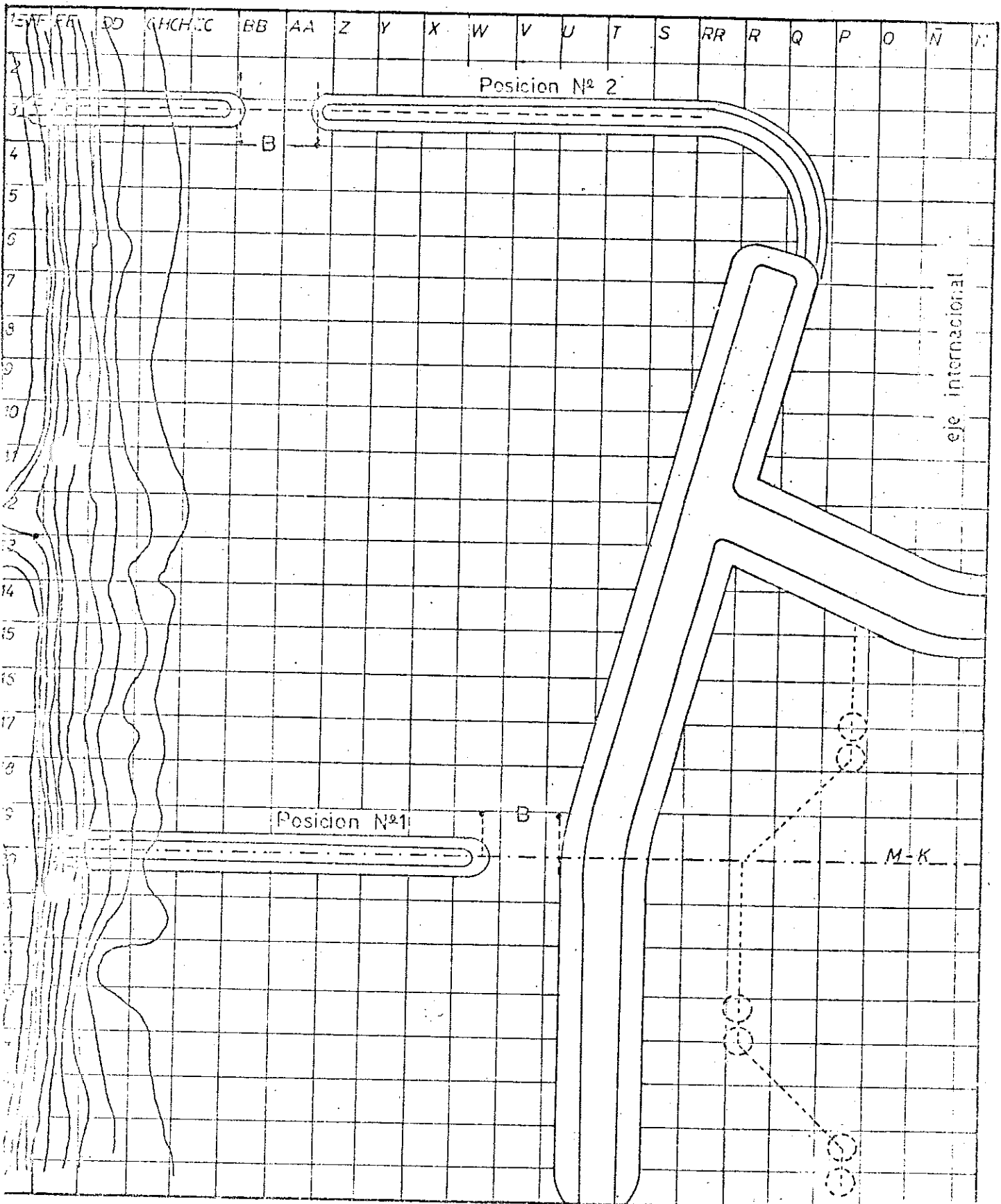
LABORATORIO DE HIDRAULICA APLICADA
 ensayo sobre modelo de Salto Grande
 etapa de cierre - obras complementarias



ubicacion planialtimetrica de las obras complementarias para navegacion

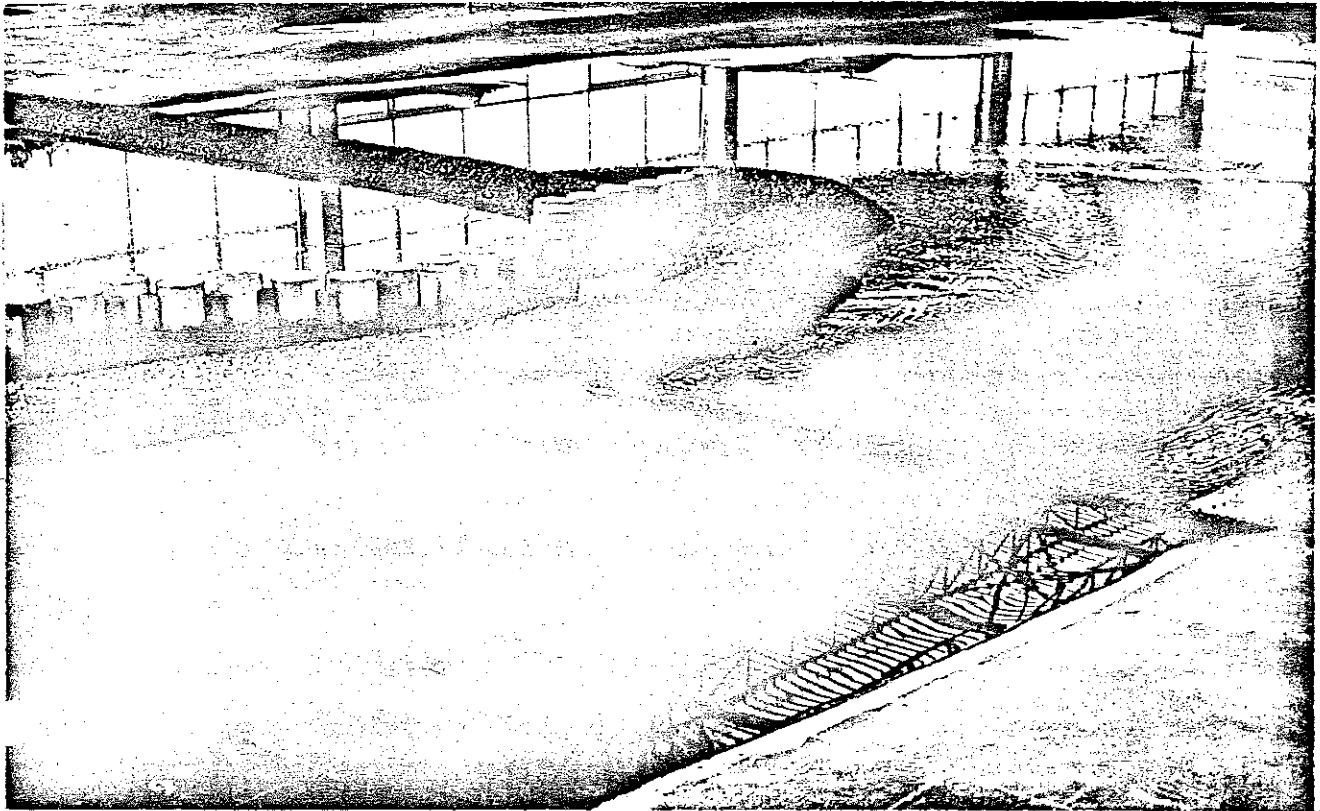
FIGURA N° 2

LABORATORIO DE HIDRAULICA APLICADA
 ensayo sobre modelo de Salto Grande
 etapa de cierre - obras complementarias
 celdas tablestacadas sin instalar

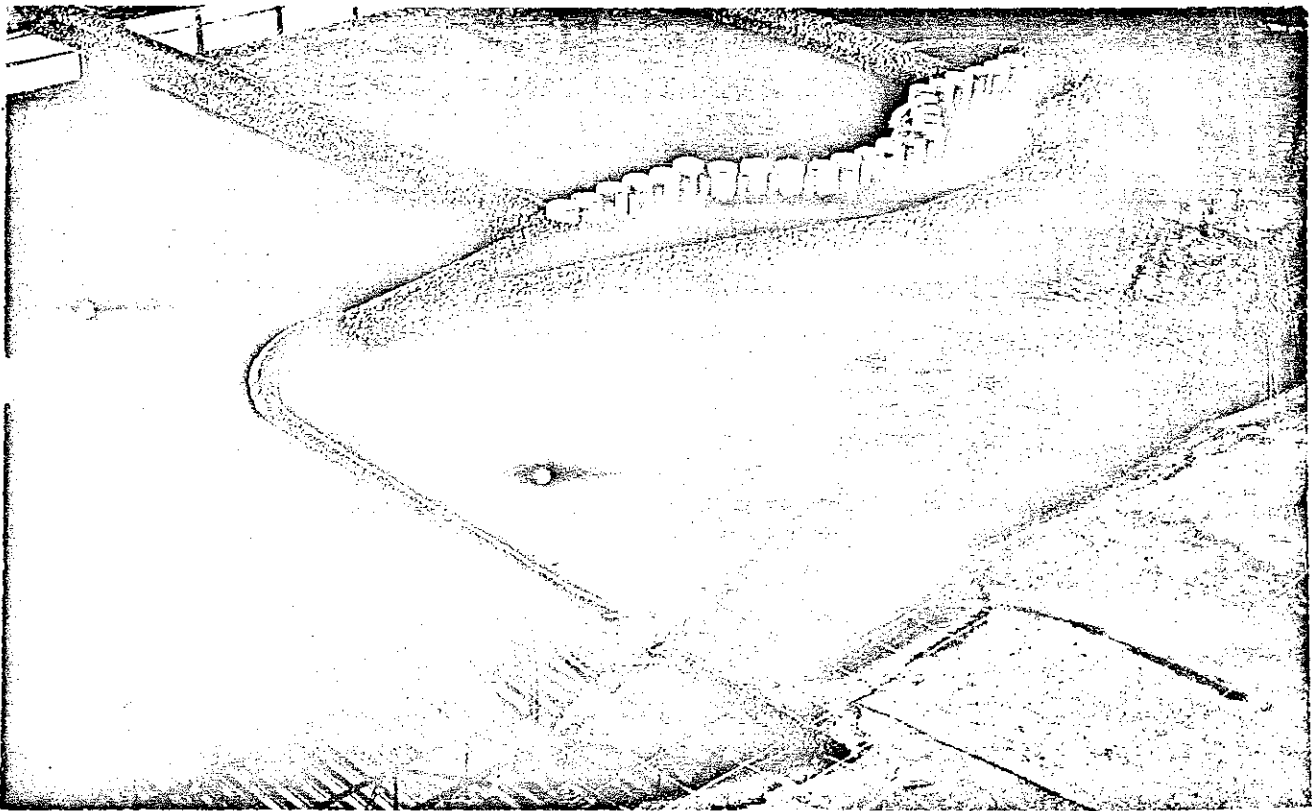


ubicacion planialtimetrica de las obras complementarias para navegacion

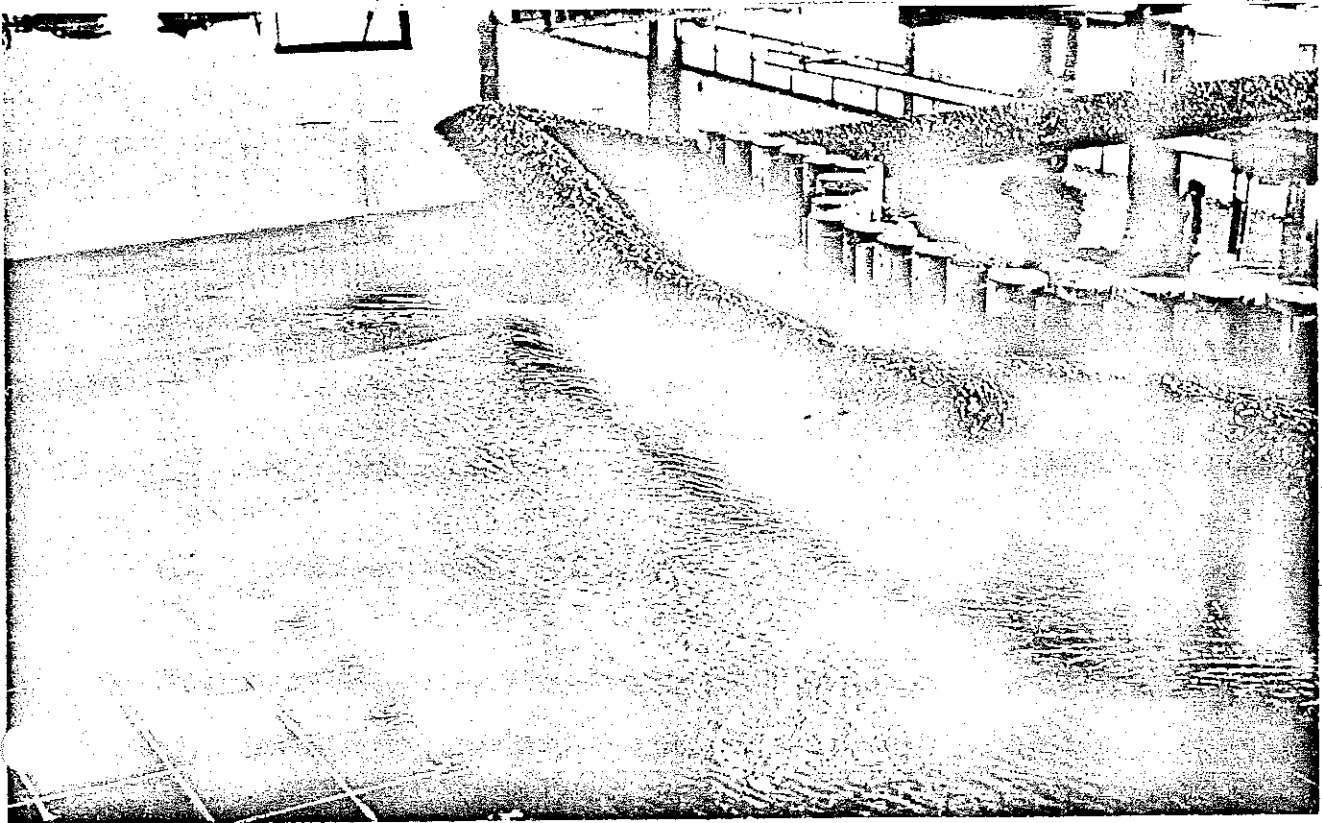
FIGURA N° 3



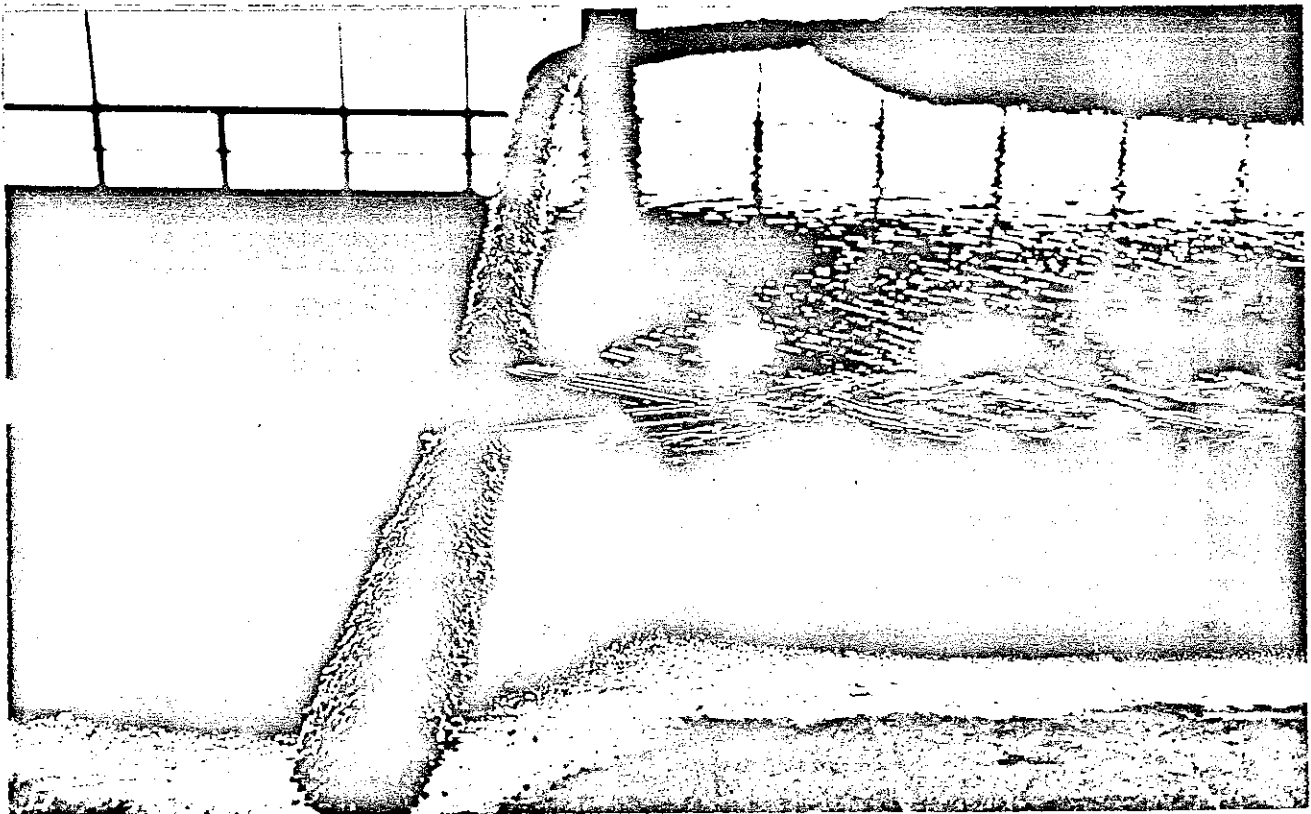
Fotografía N°1: Espigón complementario, en posición N°1, $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$



Fotografía N°2: Espigón complementario en posición N°1, $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$



Fotografía N°3: Espigón complementario en posición N°2, $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$



Fotografía N°4: Espigón complementario en posición N°2, $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$

RECONOCIMIENTO

La discusión técnica con el Ing. Martín BASTERRECHEA, ha reportado valiosos elementos para el desarrollo de este trabajo.

La tarea fotográfica estuvo a cargo del señor Norberto MULLER.

Colaboraron en el presente estudio:

| | |
|---------------------------|--------------------------------|
| Angel Rubén RISOLI | : Técnico principal del modelo |
| Mercedes Jorgelina CEPEDA | : Secretaria |
| Daniel MONTENEGRO | : Dibujante |