

# Laboratorio de Hidráulica Aplicada

SALTO GRANDE

LABORATORIO DE HIDRÁULICA



INSTITUTO NACIONAL DE CIENCIA Y TÉCNICA HIDRÁULICAS

ESTUDIO SOBRE MODELO DE LAS OBRAS DE SALTO GRANDE

- CAPITULO II -

Investigador Responsable:

Dr. Raúl A. LOPARDO

Investigador Asociado:

Ing. Fernando J. ZARATE

Supervisión:

Dr. Moisés S. BARCHILON

Dr. Alfonso PUJOL

EZEIZA, 15 de julio de 1973.

L.H.A. - 9-002-73

Ministerio de Obras y Servicios Públicos  
Subsecretaría de Recursos Hídricos  
Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas  
LABORATORIO DE HIDRAULICA APLICADA

ESTUDIO SOBRE MODELO DE LAS OBRAS DE SALTO GRANDE

CAPITULO II - Calibración y estudio hidrodinámico (1a. etapa)

Raúl A. Lopardo, Fernando J. Zárate

Resumen: Se detallan los ensayos de calibración de pendientes superficiales en el modelo tridimensional y se plantean las condiciones de similitud de una margen erosionable con distorsión de pesos específicos del material. Se estudia la primera etapa de desvío desde el punto de vista hidrodinámico, en la versión inicial del proyectista.

Descriptores: Desvío de ríos; Cierres fluviales; Modelos físicos; Erosión de márgenes.

Geográficos/Institucionales: Salto Grande - río Uruguay

Ezeiza, julio de 1973

3

existente como aceptable a los efectos del ensayo sobre modelo.

Por otra parte, el modelo acusa correctamente las tendencias hidrodinámicas del prototipo, en cuanto a distribución de velocidades y escasas variaciones del coeficiente de rugosidad en función del tirante se refiere.

Se presentan en gráficos adjuntos (figura N° 1 y figura N° 2) las variaciones de la velocidad media y el coeficiente "n" de Manning respectivamente en función del gasto y el nivel de agua. Es de destacar que los valores dados al coeficiente "n" son medios a lo largo del tramo de río representado en el modelo.

TABLA N° 1

GASTO Q(m <sup>3</sup> /s)	ALTURA H <sub>800</sub> (m)	PENDIENTE MOD. I <sub>m</sub> (cm/Km)	PENDIENTE PROT. I <sub>p</sub> (cm/Km)	ERROR
2.710	6,515	33,00	34,9	-5%
4.395	7,594	30,26	31,2	-3%
4.800	7,853	28,90	30,0	-4%
5.700	8,395	27,00	29,0	-7%
7.875	9,625	23,90	25,2	-5%
11.800	11,805	20,40	21,0	-3%
14.500	13,200	17,60	18,00	-3%

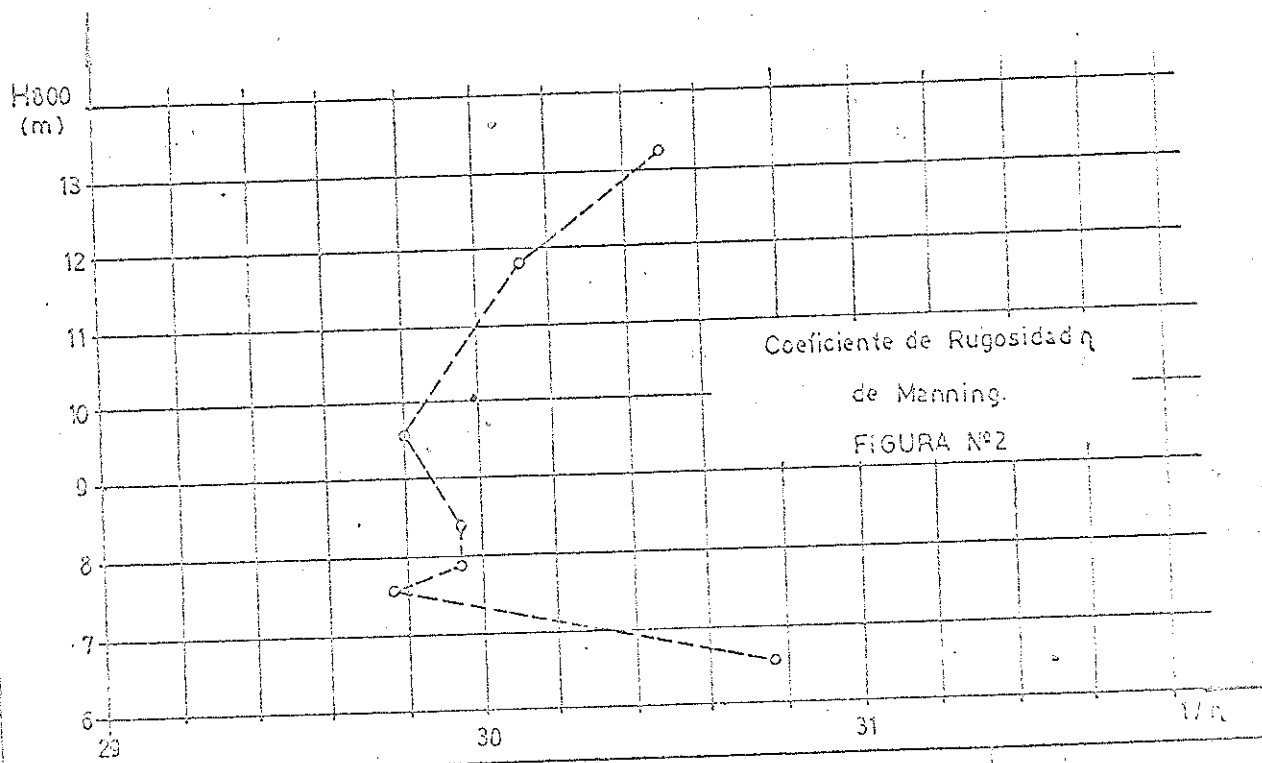
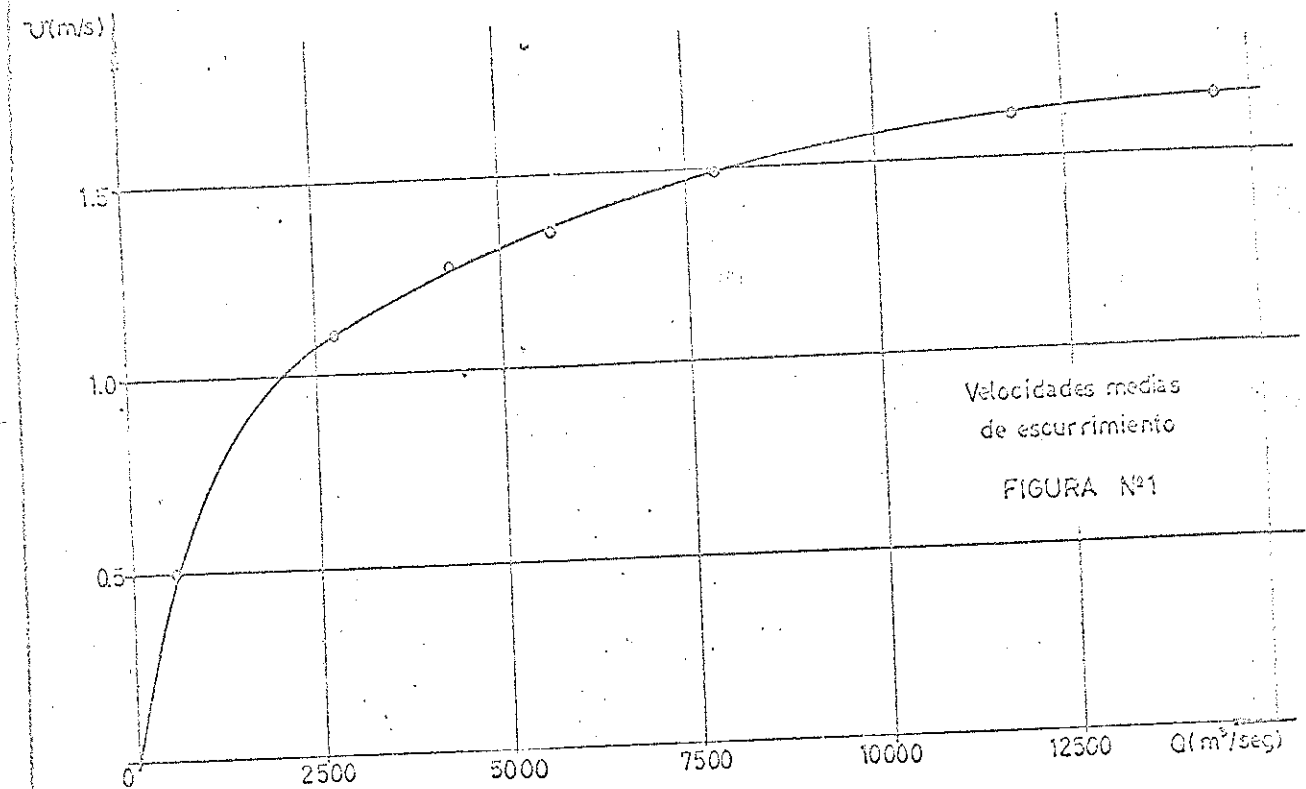
TABLA N° 2

ALTURA H <sub>800</sub> (m)	GASTO Q(m <sup>3</sup> /s)	VEL. MEDIA U (m/s)	RADIO HIDR. R (m)	PENDIENTE I (cm/Km)	COEFICIENTE 1/n
6,575	2.710	1,11	2,80	33,00	30,77
7,594	4.395	1,26	3,80	30,26	29,76
7,853	4.800	1,29	4,05	28,90	29,94
8,395	5.700	1,36	4,60	27,00	29,94
9,625	7.875	1,49	5,80	23,90	29,80
11,805	11.800	1,62	7,30	20,40	30,12
13,200	14.500	1,64	8,15	17,60	30,50

# LABORATORIO NACIONAL DE HIDRAULICA APLICADA

## Estudio sobre modelo de Salto Grande

### Calibración



Velocidades medias y coeficientes de Manning

Figuras 1 y 2

## II- SIMULACION SEDIMENTOLOGICA DE LA MARGEN EROSIONABLE

En los modelos fluviales a fondo móvil la determinación de escalas no puede basarse sólo en el análisis dimensional, y resulta en general de la consideración de ciertas otras hipótesis, acerca de la ley de transporte de material sólido o de la ley de pérdida de carga del escurrimiento.

El estudio solicitado por la C.T.M. a este Laboratorio incluye (Nota N° T/84/73) la estimación de la erosión sobre la margen derecha del río Uruguay, en un tramo limitado en dimensiones lineales y en cotas (Nota N° T/57/73), por lo que el modelo sólo reproduce esa zona con material removible.

El análisis del problema no involucra una similitud tal que reproduzca correctamente la morfología fluvial, ni interesa en ese tramo (siendo una margen y no el fondo del río) mantener estrictamente una ley de pérdida de carga semejante.

Las escalas fundamentales del modelo, discutidas en el Capítulo I, ya han definido las condiciones iniciales del problema. Por tratarse de una obra hidráulica de estas características ha resultado imprescindible trabajar con semejanza de Froude perfecta (sin distorsiones lineales). En efecto, las limitaciones del modelo general presentan:

$$e_L = e_H = 1:125 \text{ (escala de longitudes)}$$

$$e_v = e_t = 1:11,18 \text{ (escala de velocidades y tiempos)}$$

restricciones que dificultan la elección de las relaciones adecuadas para escalas en el tramo de fondo móvil.

Considerando la naturaleza del fenómeno que interesa investigar, es razonable pretender que el modelo reducido presente las mismas condiciones hidrodinámicas en escala para la iniciación de arrastre de los granos sólidos del fondo, que las que presenta el prototipo en idénticas circunstancias; esto se denomina "similitud de iniciación de arrastre".

Si se esquematiza el fenómeno de iniciación de arrastre mediante la curva de Shields, u otras más sencillas, se define una ley del tipo

$$D_* = f(R_*) \quad (1),$$

donde:

$$D_* = \left[ g \frac{(s-1)}{\nu^2} \right]^{1/3} d \quad R_* = \frac{V_* d}{\nu}$$

$g$  = aceleración de la gravedad

$s$  = relación de pesos específicos sólido-líquido

$\nu$  = viscosidad cinemática

$d$  = diámetro promedio (tamiz pasa 50%)

$V_* = \sqrt{gRi}$  = velocidad de corte

$R$  = radio hidráulico de la sección

$i$  = pendiente de la línea de energía

El análisis de escala a partir de este criterio nace de la consideración  $D_{*p} = D_{*m}$  y  $R_{*p} = R_{*m}$  donde el subíndice  $p$  significa prototipo y  $m$  modelo.

Del cálculo se desprende que es indispensable distorsionar el modelo (aumentando las alturas respecto de las longitudes horizontales) si se pretende mantener la similitud con diámetros prácticamente manejables de material sólido. En estas condiciones, es necesario admitir nuevas hipótesis.

El primero de los parámetros de la ley de iniciación de arrastre puede ser reemplazado por la relación  $V_*/W$  entre velocidad de corte y velocidad de caída de la partícula sólida (2), con lo que se expresa

$$V_*/W = f'(R_*).$$

De acuerdo con el criterio de Zwamborn (3) para ríos

- 
- (1) BONNEFILLE, R.: L'utilisation des paramètres adimensionnels dans l'étude de l'hydrodynamique des sédiments, 2a. Tesis Université de Grenoble, Francia, 1968.
  - (2) LIU, H.K.: Mechanics of sediment-repples formation, Proc. ASCE, abril 1957.
  - (3) ZWAMBORN, J.A.: Reproducibility in hydraulic models of prototype river morphology, La Houille Blanche, Nº 3, 1966.

7

que tienen en su fondo granos de arena cuyos diámetros estén por debajo de los 520 micrones puede despreciarse la condición  $R_{*p} = R_{*m}$ , siempre que la relación no exceda el orden de diez veces. En esas condiciones, basta mantener la relación

$$\left[ \frac{V_*}{W} \right]_p = \left[ \frac{V_*}{W} \right]_m$$

para gobernar la vinculación entre granos de prototipo y modelo.

Considerando la distribución granulométrica del prototipo, obtenida de datos provistos por la C.T.M. (fig. N° 3), se determina que el diámetro medio (definido por el tamiz que retiene el 50% de material sólido) es del orden de 200 micrones.

La velocidad de caída para un grano de arena de esas características resulta

$$W_p = \sqrt{\frac{4}{3} g (s-1) \frac{d_p}{C_{Wp}}} = 3 \text{ cm/s}$$

donde  $C_W$  es un coeficiente de resistencia dependiente del número de Reynolds de caída  $R_W = \frac{Wd}{\nu}$ .

Considerando la relación de escalas

$$e_W = e_{V_*} = e_V = e_L^{1/2}$$

que incluye el criterio de Froude, resulta

$$e_W = 11.18 = \frac{W_p}{W_m}$$

Luego,

$$W_m = 0,268 \text{ cm/s.}$$

Si se utilizara en el modelo un material del mismo peso específico que el prototipo ( $\gamma = 2,65 \text{ gr/cm}^3$ ) se necesitaría arena de 0,055 mm de diámetro medio, que por demasiado fina está fuera de los límites prácticos.

Por ello, se decidió adoptar carbón mineral de río Turbio molido cuyo peso específico es del orden de  $1,30 \text{ gr/cm}^3$  con un diámetro medio 0,2 mm (de forma de tener  $e_d = 1$ ), cuyas caracte-

8

terísticas lo hacen aconsejable.

Habiéndose determinado la escala de diámetro de grano  $e_d = 1:1$  y la escala de pesos específicos de material  $1:2,04$ , se calculará la escala de tiempos sedimentológicos a partir de la condición de similitud del volumen de transporte sólido.

Según el criterio de Frijlink (4) el gasto sólido de arrastre puede ser obtenido de un ábaco lineal en diagrama semi logarítmico, con coordenadas

$$X = \frac{T}{d \sqrt{\mu g R i}} \quad Y = \frac{d (s-1)}{\mu R i}$$

donde T es el volumen aparente en la unidad de tiempo de acarreo sólido por unidad de ancho, y  $\mu$  el coeficiente de rizos, definido por

$$\mu = \left[ \frac{U}{5,75 V_* \log.12 (R/d_{90})} \right]^{3/2}$$

con el diámetro de grano  $d_{90}$  que está dado por la abertura de la malla del tamiz que permite el pasaje del 90% de la muestra, y la velocidad media U obtenida de la división del gasto líquido por el área de la sección transversal.

Con los datos del prototipo se calcula  $\mu_p$ ; y luego  $Y_p$ . Del ábaco de Frijlink se extrae el  $X_p$  correspondiente, y de su valor se calcula la única incógnita:  $T_p$ .

Pasando a modelo esos datos, y considerando  $d_m = 2 \times 10^{-4}$  m y  $S_m = 1,30$ , se calcula  $\mu_m$  y con este  $Y_m$ . Del diagrama se extrae  $X_m$  y de allí se despeja el acarreo en el modelo  $T_m$ .

Se puede entonces calcular la escala de acarreos

---

(4) FRIJLINK, J.: Discussions des formules de debit solide de Kalinske, d'Einstein et de Meyer - Peter et Muller. Compte Rendu des II Journées de L'Hydraulique de la Société Hydro-technique de France, Grenoble, 19 .

(gastos sólidos por unidad de ancho)  $e_T = \frac{T_m}{T_p}$  y de allí la escala de tiempos sedimentológicos

$$e_{ts} = \frac{e_L^2}{e_T}$$

que permite conocer la duración de los ensayos (Tabla N° 3).

LABORATORIO NACIONAL DE HIDRAULICA APLICADA

Estudio sobre modelo de Salto Grande

Tiempos sedimentológicos

TABLA Nº3

Q (m <sup>3</sup> /s)	d (m)	d <sub>50</sub> (m)	(S-1)	R (m)	V (m/s)	V <sub>cr</sub> (m/s)	i	J <sub>cr</sub>	Y	X	T (m <sup>2</sup> /s)	e <sub>t</sub>	e <sub>ts</sub>	t <sub>s</sub>
4800	PROTOTIPO	2x10 <sup>-4</sup>	1.65	4.132	1.269	0.1103	3x10 <sup>-6</sup>	0.236	1.12	3.5	3.77x10 <sup>-5</sup>	1:60	1:260	90 días
	MODELO	2x10 <sup>-4</sup>	0.30	0.033	0.115	0.0099	3x10 <sup>-6</sup>	0.625	9.70	0.4	6.32x10 <sup>-7</sup>			8.3 hs.
12000	PROTOTIPO	2x10 <sup>-4</sup>	1.65	7.477	1.632	0.125	2.1x10 <sup>-6</sup>	0.261	0.80	4.0	5.11x10 <sup>-4</sup>	1:36	1:434	90 días
	MODELO	2x10 <sup>-4</sup>	0.30	0.06	0.146	0.112	2.1x10 <sup>-6</sup>	0.633	7.50	0.8	1.42x10 <sup>-6</sup>			5 hs.
16000	PROTOTIPO	2x10 <sup>-4</sup>	1.65	11.00	1.70	0.127	1.5x10 <sup>-4</sup>	0.253	0.79	4.0	5.11x10 <sup>-5</sup>	1:36	1:434	15 días
	MODELO	2x10 <sup>-4</sup>	0.30	0.060	0.152	0.0114	1.5x10 <sup>-4</sup>	0.604	7.52	0.6	1.42x10 <sup>-6</sup>			50 min.
27000 (*)	PROTOTIPO	2x10 <sup>-4</sup>	1.65	-	-	-	-	-	-	-	-	1:36	1:434	7 días
	MODELO	2x10 <sup>-4</sup>	0.30	-	-	-	-	-	-	-	-			22.2 min.

(\*) No existiendo datos del prototipo se extrapolaron las escalas calculadas para grandes gastos



### III - ESTUDIO DE LA PRIMERA ETAPA DE ATAGUIAS

#### a) DETALLES TECNICOS DEL PROYECTO

De acuerdo al nuevo proyecto de la disposición general de las obras, provisto por la firma consultora MAIN y Asociados, la primera etapa de desvío del río tiene por objeto cerrar una importante zona del curso fluvial a efectos de permitir en su interior estanco la construcción de la sala de montaje y sala de máquinas correspondiente a la margen uruguaya, y dieciséis vanos del vertedero central que consta en total de diecinueve.

La obra se introduce en el cauce reduciendo el ancho de escurrimiento normal del río en sus dos terceras partes. La disposición y medidas generales se pueden apreciar en el plano adjunto de la figura Nº 4.

El sector construido en material granular tiene un ancho de coronamiento de 10 m y sus taludes son variables, definidos de acuerdo con el proyecto original (5). Las cotas de coronamiento mínimas son: para aguas arriba 22,00 m y para aguas abajo 20,00 m.

El sector frontal de la ataguía está conformado por una serie de cilindros de tablestacas metálicas (coffer-dams), de 18 metros de diámetro y 22 metros de altura.

La obra debe funcionar adecuadamente para crecidas de hasta 27.000 m<sup>3</sup>/s, debiéndose analizar su comportamiento hidráulico para una serie de gastos inferiores, de 2.000 m<sup>3</sup>/s, 5.000 m<sup>3</sup>/s, 12.000 m<sup>3</sup>/s y 18.000 m<sup>3</sup>/s.

---

(5) ACRES-HIDROSUD-APPISA; Contrato SG01, Vol. III, dibujo Nº 1064, Buenos Aires, 1971.

El estudio sobre modelo tiene por objeto:

- 1 - El registro de velocidades y líneas de corriente para todas las condiciones de funcionamiento citadas, con especial interés sus valores máximos en las cercanías de la obra y a lo largo de la margen opuesta.
- 2 - El conocimiento, para cada estado, del perfil de la superficie libre afectado por la pérdida localizada de energía que provoca la presencia de la ataguía en el escurrimiento.
- 3 - La estimación de las condiciones de erosión sobre la margen argentina como consecuencia de los incrementos de velocidad provocados por el cierre parcial, para los diferentes gastos establecidos.

#### b) DETALLES TECNICOS DEL MODELO

El estudio se desarrolló utilizando el modelo general, en escala 1:125, ya detallado en el Capítulo I. Se recuerda que la escala de gastos líquidos es 1:174.693 y la de velocidades 1:11,18.

El sector de margen erosionable fue modelado utilizando carbón mineral molido como material de transporte, por las razones expuestas en el estudio de semejanza sedimentológica. La escala de diámetros resultó así la unidad, y la de tiempos de erosión, si bien variable con el estado del río, de 1:434 para gastos mayores a 10.000 m<sup>3</sup>/s.

Las dimensiones de la ataguía reproducen en escala 1:125 los valores del prototipo, y su ubicación responde a los datos de MAIN y Asociados respecto de los ejes fijos de referencia. La parte de material granular fue representada en forma rígida, mediante canto rodado cementado con una lechada de mortero, debido al carácter estrictamente hidrodinámico de este primer estudio. Los cilindros se construyeron en mortero de cemento y arena mediante un molde de acero inoxidable, respetándose estrictamente medidas y formas.

## c) METODOLOGIA DE LOS ENSAYOS

Los ensayos realizados tuvieron las siguientes características:

- medición de los gastos de ingreso al modelo. Para los gastos de 2.000 m<sup>3</sup>/s, 5.000 m<sup>3</sup>/s y 12.000 m<sup>3</sup>/s se utilizó el circuito particular, con medición por vertedero Rehbock. Los gastos mayores fueron provistos por el sistema general de alimentación del Laboratorio, con medición por diafragma aforador, cuya pérdida de energía es relevada en un piezómetro a mercurio.
- reproducción del nivel de agua correspondiente a la ley altura-gasto. A ese efecto se opera la compuerta de control ubicada en el extremo de aguas abajo del modelo hasta lograr en el perfil 800 una lectura del nivel de agua concordante con el gasto que escurre (figura N<sup>o</sup> 5).
- registro de la pendiente hidráulica del río en la zona estrechada. Se leen los limnómetros ubicados a lo largo del modelo, determinándose así el perfil longitudinal de la superficie libre, y consecuentemente la pérdida de energía localizada proveniente del efecto de cierre de la ataguía.
- registro de las líneas de corriente en el sector de desvío del río. Desde un punto ubicado sobre el modelo se fotografían las trayectorias de partículas que viajan con el escurrimiento. Se utilizó "confetti", y en ciertos casos flotadores de aluminio o recortes rectangulares de cartulina, obteniéndose en algunos registros las redes de escurrimiento y en otros una interpretación de la distribución de velocidades superficiales.
- medición de velocidades de escurrimiento. Los instrumentos utilizados son micromolinetes KENT, con precisión del orden de 2,5%, y cuyo indicador electrónico ha sido conectado a un multímetro digital que permite obtener valores digitales integrados en diez segundos. En cada ubicación del molinete se toman tres integraciones consecutivas de diez segundos y se

adopta como velocidad en ese punto el promedio de las tres lecturas realizadas. Se midieron velocidades a lo largo de un perfil transversal del río en la zona estrechada, con un valor cada 25 m del prototipo. Se obtuvieron también las velocidades a lo largo de la margen derecha, también con valores cada 25 metros. En la zona de quiebre de cilindros se buscó en cada ensayo el valor de la velocidad máxima, adoptando ese punto para la determinación del más alto valor. También se midió en cada ensayo el valor de velocidad en el punto de encuentro entre ataguía de material granular y coffer-dams.

- antes de cada ensayo se reproduce la topografía de la zona erosionable en el modelo, moldeando el carbón húmedo con la ayuda de un nivel de anteojo automático. Transcurrido el tiempo de ensayo, calculado según se presenta en la Tabla N° 3, se registró en cada caso la nueva posición de la margen argentina. Para los gastos menores (incluido el de 12.000 m<sup>3</sup>/s) se determinó la zona erosionada por comparación de márgenes en planta, dado que los taludes resultantes en cada ensayo mostraban una característica barranca. En los mayores gastos, existiendo una zona más amplia de inundación, fue necesario además relevar algunas curvas de nivel para estimar el volumen erosionado.

#### d) RESULTADOS OBTENIDOS

De los ensayos realizados según la metodología antes expuesta se obtuvieron los resultados cuyas características fundamentales se detallan a continuación:

- Q = 2.000 m<sup>3</sup>/s. Figura N° 6. Distribución transversal de velocidades y margen erosionada tras tres meses de duración del gasto fijado. Resumen de valores más representativos de velocidad:

V<sub>A</sub> = 1,93 m/s; velocidad en el punto de encuentro entre ataguía granular y coffer-dams.

$V_B = 3,05$  m/s; velocidad en el punto de quiebre de los coffer-dams y máxima en todo el escurrimiento.

$U = 1$  m/s; velocidad media del río antes de haberse construido la ataguía.

$U' = 2,16$  m/s; velocidad media del río en la zona estrechada por efecto de la ataguía.

$V_{MT} = 2,80$  m/s; velocidad máxima leída en el perfil transversal ubicado 100 m aguas abajo del perfil de la presa.

$V_{ML} = 1,65$  m/s; velocidad máxima determinada paralelamente a la costa argentina.

La erosión registrada (figura Nº 6) es tal que llega hasta la cota + 6,00 m y no parece importante.

- $Q = 5.000$  m<sup>3</sup>/s. Figura Nº 7. Distribución transversal de velocidades y margen erosionada tras tres meses de duración del gasto fijado.

Resumen de valores de velocidad:

$V_A = 2,66$ m/s	$U' = 3,21$ m/s
$V_B = 4,20$ m/s	$V_{MT} = 3,86$ m/s
$U = 1,30$ m/s	$V_{ML} = 3,12$ m/s

La margen ha sido ya algo más erosionada pero los efectos parecen haberse estabilizado tras los tres meses de duración del ensayo.

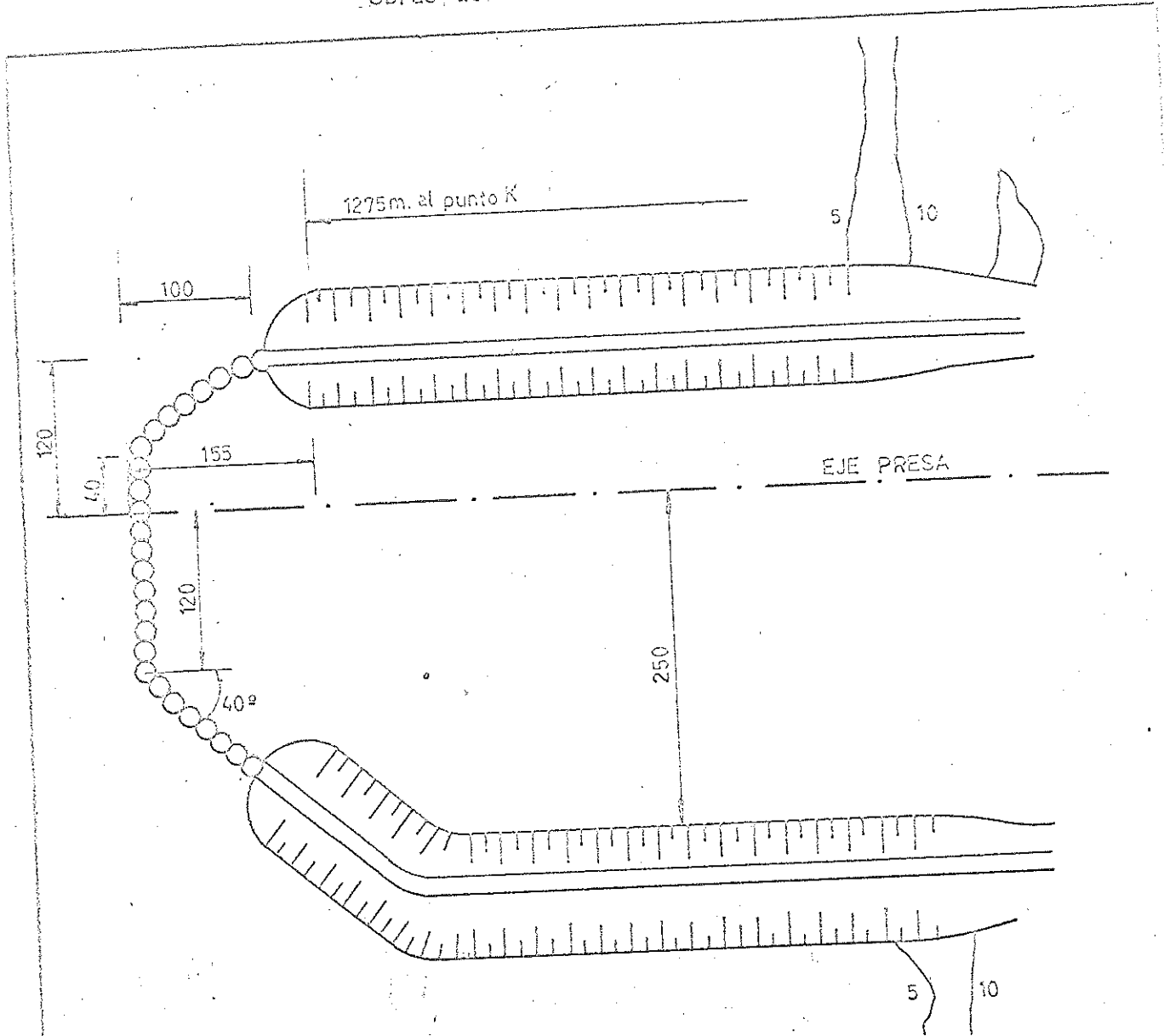
- $Q = 12.000$  m<sup>3</sup>/s. Figura Nº 8. Distribución transversal de velocidades y longitudinal a lo largo de la margen derecha. Relevamiento de esa margen erosionada luego de tres meses de duración de la crecida.

Resumen de valores de velocidad:

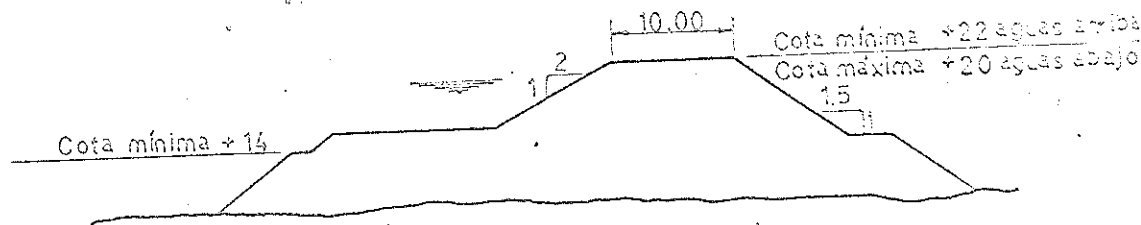
# LABORATORIO NACIONAL DE HIDRAULICA APLICADA

## Estudio sobre modelo de Salto Grande

### Obras de desvío - Etapa 1



NOTA: Las medidas estan expresadas en metros



Planta y perfil transversal de la atagüa

Figura N° 4