

13550

TES. 1717

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA HIDRAULICA

INFLUENCIA DEL DESARROLLO  
DE LA CAPA LIMITE SOBRE MODELOS

Trabajo Especial Presentado  
ante la Ilustre Universidad  
Central de Venezuela, para  
optar al título de:

INGENIERO CIVIL

Ramón José Guilarte Riveras

Fernando Vladimir Padilla López

Caracas 1.967

13550

tes. 1717

TESIS  
GP  
07

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA HIDRAULICA

INFLUENCIA DEL DESARROLLO  
DE LA CAPA LIMITE SOBRE MODELOS

Trabajo Especial Presentado  
ante la Ilustre Universidad  
Central de Venezuela, para  
optar al título de:

INGENIERO CIVIL

Ramón José Guilarte Riveras

Fernando Vladimir Padilla Lopez

Caracas 1.967

**A MIS PADRES**

**Ramón José Guilarte Riveras**

A MIS PADRES

Fernando Vladimir Padilla Lopez

## AGRADECIMIENTO

Los autores de este Trabajo Especial desean expresar su agradecimiento al Ingeniero Marco Falcón, profesor guía, y al personal -- del taller del Departamento de Ingeniería Hidráulica de la Facultad - de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, por la valiosa colaboración que oportunamente le prestaron para su realización.

## INDICE

	Página
Resumen .....	1
Notación .....	2
Introducción .....	4
Esquema del canal .....	6
Corrección en el modelo .....	7
Plan de trabajo .....	11
Equipo utilizado .....	14
Procedimiento experimental .....	17
Resultados experimentales .....	19
Discusión de los resultados .....	20
Conclusiones .....	23
Recomendaciones .....	24
Apéndice .....	25
Referencias .....	30

## RESUMEN

Se investigan dos aspectos de la influencia viscosa en el comportamiento del flujo bajo una compuerta vertical:

a) El efecto de escala, para lo cual se estudió la variación de un coeficiente de caudal con el número de Reynolds y la relación de profundidad - aguas arriba de la compuerta a la abertura de la misma, también se determinó un factor de corrección para el gasto predicho por un modelo de Froude y se concluyó que cuando el número de Reynolds del modelo varía entre  $10^4$  y  $10^5$  el factor de corrección varía entre 0.75 y 1.15.

b) El efecto del grado de desarrollo de la capa límite colocado la compuerta a dos distancias diferentes de la entrada del canal, encontrándose que el efecto es más marcado en la distribución de velocidades a lo largo de la línea media del canal que sobre el coeficiente de caudal.

Los resultados se presentan en forma de perfiles de velocidad a lo largo del eje del canal, gráficos de coeficiente de caudal vs número de Reynolds, gráficos de coeficiente de contracción vs número de Reynolds y gráficos de factor de corrección vs número de Reynolds.

## NOTACION

- M Subíndice que se refiere al modelo
- P Subíndice que se refiere al prototipo
- R Subíndice que se refiere a relativo
- r Subíndice que se refiere a real
- t Subíndice que se refiere a teórico
- H Altura aguas arriba de la compuerta
- h Altura aguas abajo de la compuerta
- b Abertura de la compuerta
- l Altura piezométrica
- L Longitud característica
- U Caudal en litros por segundo
- q Caudal unitario
- V Velocidad media
- t Tiempo
- C Coeficiente de caudal (cociente de dividir  $q_r/qt$ )
- $C_c$  Coeficiente de contracción
- $C_d$  Coeficiente de descarga
- F Número de Froude
- $Re$  Número de Reynolds
- N Cociente de dividir  $b / H$
- n Cociente de dividir  $H / b$
- v Viscosidad cinemática del agua
- g Aceleración de la gravedad

$\Delta H$  Error absoluto en H

$\Delta h$  Error absoluto en h

$\Delta l$  Error absoluto en l

$\Delta Q$  Error absoluto en Q

$\Delta q$  Error absoluto en q

$\Delta C$  Error absoluto en C

## INTRODUCCION

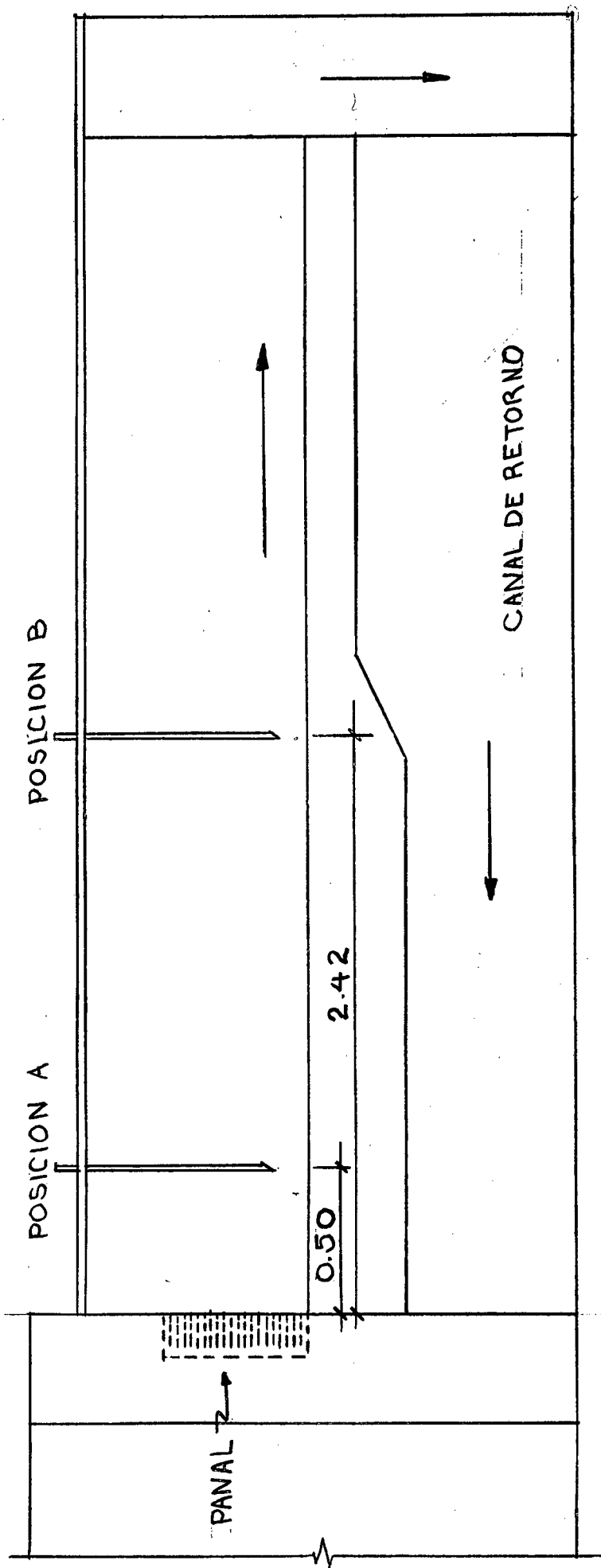
Cuando se ensaya un modelo hidráulico de Froude, por lo general se desprecian los efectos que pueda tener el desarrollo de la capa límite en las mediciones que se efectúan, pudiéndose llegar a tener un modelo cuyo funcionamiento no sea similar al del prototipo que se desea estudiar. Es sabido que en un modelo, la capa límite es relativamente mayor y más influyente que en el prototipo (efecto de escala). A conocimiento de los autores, hasta ahora no se ha estudiado el problema de cuando es afectado el comportamiento de un modelo debido a efectos viscosos, hasta tal punto que los resultados obtenidos de él para el prototipo están afectados de un error considerable. La investigación bibliográfica dió resultado negativo en este respecto, y aparece apenas esbozado en algunos libros, como por ejemplo en Ven Te Chow (1.959), donde las diferencias entre las longitudes de resaltos hidráulicos calculados a partir del modelo, con las longitudes medidas en los prototipos, se atribuyen al efecto de escala en el modelo. En la obra Engineering Hydraulic editada por H. Rouse (1.949), en el apartado correspondiente a vertederos de cresta ancha, se menciona el hecho de que aparatos de este tipo, semejantes geoméricamente, no tienen gastos semejantes si tienen longitudes distintas.

Como se sabe, la capa límite empieza a formarse al comienzo de cualquier conducto, pudiendo tener característica laminar al principio, y, si las condiciones así lo permiten, se transforma en turbulenta para números de Reynolds altos, después de haber pasado por una etapa de transición de la cual se conoce poco. En este trabajo se desea investigar la influencia que tiene el grado de desarrollo de la capa límite en la vecindad inmediata de una compuerta, sobre el coeficiente de descarga de dicha compuerta.

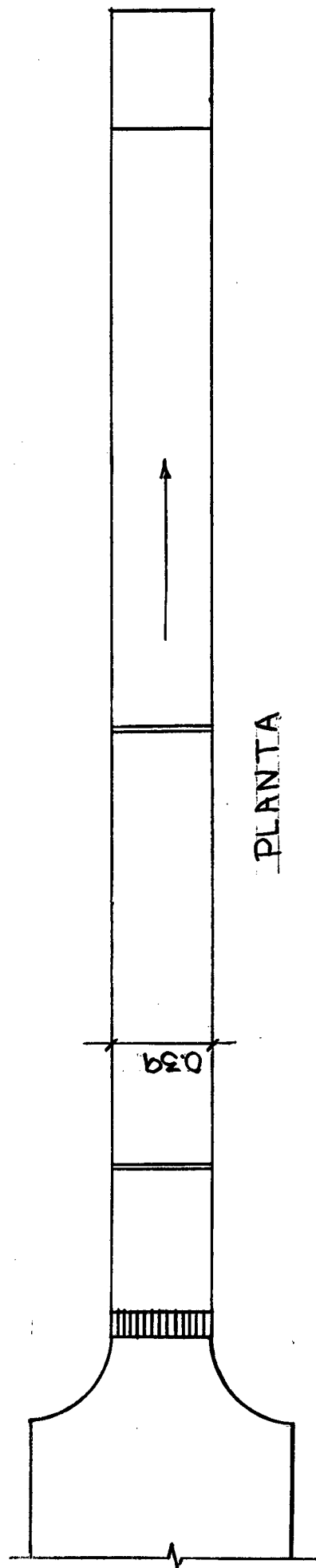
Si el fluido en un modelo hidráulico tiene una capa límite en un cierto estado de desarrollo, tal vez se comporte en forma diferente en el caso de - que esa capa límite se encuentre en otra etapa distinta; por ejemplo según varíe su espesor o la intensidad de la turbulencia.

Debe entenderse que los resultados encontrados en este trabajo sólo son aplicables en el rango de las variables en el cual se realizaron -- los experimentos. Por lo tanto, estos resultados sólo son de valor cualitativo para la estimación de los efectos en investigaciones con otros modelos y no se pueden tomar como generales. Para el caso particular estudiado --- aquí, se indica un método mediante el cual se puede corregir el efecto de escala en el modelo.-

FIGURA 1



ELEVACION CANAL DE VIDRIO



PLANTA

CORRECCION EN EL MODELO

La condición para que exista similitud dinámica entre un modelo y un prototipo geoméricamente semejantes es:

$$F_M = F_P \quad (1)$$

donde  $F_M$  es un número de Froude del modelo y  $F_P$  es el correspondiente número de Froude del prototipo. De (1) se obtiene que

$$\frac{F_M}{F_P} = F_R = 1 \quad (2)$$

Sabiendo que

$$F_R = \frac{V_R}{\sqrt{g_R L_R}} = 1 \quad (3)$$

donde  $V_R = \frac{V_M}{V_P}$  es la escala de velocidades correspondientes en el modelo y en el prototipo,  $L_R$  es la escala de longitudes correspondientes en el modelo y en el prototipo, y  $g_R = 1$ , de (3) se deduce que

$$V_R = \frac{L_R}{T_R} = L_R^{1/2} \quad (4)$$

donde  $T_R$  es la escala de tiempos correspondientes en el modelo y en el prototipo. Finalmente, de (4) se obtiene que

$$L_R^{1/2} = T_R \quad (5)$$

El gasto relativo por unidad de ancho sería

$$q_{T_R} = \frac{L_R^2}{T_R}$$

y de (5)

$$q_{T_R} = L_R^{3/2} \quad (6)$$

que es la escala de gastos unitarios y que se utiliza para predecir el gasto en el prototipo una vez conocido el gasto en el modelo. El resultado -- dado por (6) está basado en similitud de tipo Froude y supone que los efec

Además, con el objeto de visualizar el desarrollo de la capa límite a lo largo del canal, se hicieron mediciones de velocidad a lo largo de su línea media y se dibujaron los perfiles correspondientes. Estas mediciones se hicieron para la relación  $H/b=8$  en ambas posiciones de la compuerta.

### EQUIPO UTILIZADO

La parte experimental del presente trabajo se llevó a cabo utilizando los siguientes aparatos:

- 1) CODO.- Con el objeto de medir los caudales mayores de 17lts/seg, hubo de calibrarse un codo de 8" de diámetro colocado en la tubería de abastecimiento del canal de vidrio donde se efectuaron las experiencias.
- 2) VERTEDERO.- Para medir los caudales menores de 17lts/seg, se calibró un vertedero triangular con dos aberturas superpuestas con diferentes ángulos; la superior 90° y la inferior de 30°. Este verdadero está colocado debajo del canal de vidrio en el canal de retorno. El verdadero se calibró con otro similar que a su vez fue calibrado en un tanque volumétrico.
- 3) PIEZOMETRO DIFERENCIAL DE AGUA.- Con este aparato se midieron las diferencias de altura piezométrica correspondiente a diferencias de presión en el codo.
- 4) POZO O TANQUE AMORTIGUADOR.- Mediante este aparato se midieron las alturas de agua en el vertedero correspondiente a los diferentes caudales. Este pozo está conectado a un lado del canal de retorno, y las alturas se determinaron con un medidor de punta en forma de gancho.
- 5) MEDIDOR DE PUNTA.- Estos se utilizaron para medir las profundidades --- aguas arriba y aguas abajo de la compuerta, ambos montados sobre carrros para poder deslizarlos a lo largo del canal.
- 6) TUBO DE PITOT.- Para medir las velocidades se utilizó un tubo de Pitot montado en el mismo carro donde se fijó el medidor de punta aguas arriba, y estaba fijo a su vez a una regla vertical graduada con el objeto de colocar la punta del tubo en las posiciones deseadas.
- 7) TRANSDUCTOR DE PRESIONES MODELO KPL5.- Este aparato se utilizó para medir las diferencias de presiones registradas por el Pitot. Su uso se justifi

ficó por la precisión que se necesitaba, ya que las velocidades medidas -- eran muy pequeñas y las diferencias de presiones, las cuales no pasan de - 5 o 6 milímetros, no se puede determinar con precisión con un piezómetro - diferencial ordinario. Se utilizó una membrana deflectante de rango  $\pm 1$  -- psi. Para calibrar este aparato se usó un manómetro micrométrico de una mi lecima de pulgada de apreciación.

8) AMPLIFICADOR REGISTRADOR DE DOS CANALES MODELO 321.- Este aparato regis tra en forma gráfica las diferencias de presiones detectadas por el trans ductor. Para efectuar este registro se estableció previamente en el aparato un cierto rango de medida correspondiente a una diferencia de presión - fijada en el manómetro micrométrico ya mencionado.

9) COMPUERTA.- Como modelo a ensayar se utilizó una compuerta vertical --- de 100 cms de altura y 39 cms de ancho, la cual estaba colocada en el canal.

10) CANAL DE VIDRIO.- Este canal tiene un ancho interior de 39 cms y cms de longitud. En el se coloca la compuerta y en su parte inferior, en el canal de retorno, el vertedero ya mencionado. La entra del canal es una transición curva en las paredes y en el fondo.

11) PANAL DE ALUMINIO.- Para conseguir una distribución uniforme de veloci dades al empezar el canal, con el objeto de asegurar que la capa límite co mience a desarrollarse en la parte uniforme de éste, se utilizó un panal - de aluminio de aberturas exagonales y con una altura de 50 cms. Esta altu ra se escogió para que con los gastos máximos el agua no vertiera sobre él. El panal se colocó a la salida de la transición justamente al comienzo del canal.

12) PLANCHA METALICA.- Para caudales grandes el panal causa unas ondulacio nes en la superficie del agua que son indeseables por la perturbación que

introducen en el flujo. Para eliminar este inconveniente se ideó una plancha metálica en forma de pala que se colocó justamente delante del panal y produce el efecto de "Alizar" la superficie del agua.

### PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Una vez colocada la compuerta en uno de los dos sitios determinados en el canal, se procedió a darle una cierta abertura que guardará una relación predeterminada con la profundidad aguas arriba. Se estableció así un caudal el cual se media con un codo si era mayor de 17lts/seg, o -- con un verdadero si era menor, haciéndose las medidas dos veces con un intervalo de por lo menos 5 minutos entre ellas con el objeto de asegurar un régimen estable. La carga sobre el vertedero se media con un pozo adosado al canal de retorno donde se encontraba el vertedero; la diferencia de presiones en el codo se medía con un piezómetro diferencial de agua; las profundidades aguas arriba y aguas abajo de la compuerta se midieron con un -- medidor de punta; y la abertura de la compuerta se midió con una escala -- graduada adosada a ésta.

Las mediciones de velocidad se hicieron utilizando un tubo de Pitot pequeño el cual estaba conectado a un transductor de presiones modelo KP15 que a su vez transmitía la señal a un amplificador -- registrador de -- dos canales, modelo 321, donde se iba registrando en forma gráfica pudiendo luego transformarse estas lecturas a milímetros de altura de agua.

La forma de realizar las mediciones fue la siguiente: se dividió el tramo del canal en varias estaciones (7 para la compuerta en el sitio -- más alejado de la entrada del canal, y 4 para el sitio más cercano) situadas a una cierta distancia de la compuerta considerando que éstas eran suficientes para ofrecer un esquema representativo del desarrollo de la capa límite. Las distancias entre las estaciones más cercanas a la compuerta -- eran menores que las de las más alejadas, con el objeto de detectar mejor la influencia de ésta en las distribuciones de velocidades. En cada esta--

ción se midió la velocidad a lo largo de la vertical, la cual se dividió en varios intervalos desde el fondo del canal hasta la superficie del agua, siendo la separación entre intervalos menor cerca del fondo con la intención de definir con detalle la curvatura del perfil de velocidades, y aumentando luego hacia arriba donde las velocidades eran más uniformes.

Todas las mediciones se hicieron a lo largo del eje del canal para lo cual se utilizó un carrito que podía deslizarse longitudinalmente -- apoyado en unas guías situadas en los bordes del canal, y en el cual estaba colocado el tubo de Pitot fijo a una regla vertical graduada pudiendo desplazarse tanto horizontal como verticalmente. Utilizando una escala vertical y otra horizontal podía fijarse la posición del tubo de Pitot en cualquier sitio con bastante exactitud.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los resultados aparecen resumidos en los gráficos de coeficiente de caudal ( $C$ ) vs número de Reynolds ( $Re$ ), coeficiente de contracción en el modelo ( $C_{cM}$ ) vs número de Reynolds ( $Re$ ), factor de corrección ( $C_{dMr}/C_{dP}$ ) vs número de Reynolds ( $Re$ ), y los gráficos de distribución de velocidades que se anexan a continuación. También se incluyen tabulados el conjunto de datos obtenidos experimentalmente y una estimación de los errores en  $Q_r$ ,  $Q_t$ , y  $C$ .

TABLA N° 1.

COMPUERTA EN EL SITIO A									
m	b	h	Q <sub>r</sub>	error Q <sub>r</sub>	Q <sub>t</sub>	error Q <sub>t</sub>	C	error C	R
	cms	cms	lts/seg	%	lts/seg	%		%	
3	1	0,8	1,84	13,6	2,03	12,7	0,90	23,3	5351
	2	1,4	4,80	7,0	5,00	7,5	0,96	13,5	13060
	3	1,9	10,20	4,7	8,61	5,4	1,18	9,5	22654
	4	2,5	13,24	3,5	12,86	4,2	1,02	7,3	33825
	5	3,0	17,96	2,8	17,45	3,4	1,02	6,0	45901
	6	3,6	26,63	0,8	22,88	7,5	1,16	7,8	60181
	7	4,3	32,10	0,7	28,78	6,4	1,11	6,7	75695
	8	4,8	39,03	0,6	35,38	5,6	1,10	5,9	92959
	9	5,4	45,70	0,6	43,08	4,9	1,06	5,2	113286
	10	6,0	53,18	0,5	49,24	4,5	1,08	4,8	129490
	12	7,2	66,28	0,4	64,02	3,8	1,03	4,0	168355
	4	1	0,8	2,14	10,2	2,58	12,1	0,84	19,9
2		1,4	5,61	5,3	5,82	7,7	0,96	12,0	15302
3		1,9	10,24	3,5	10,34	5,3	0,99	8,3	27195
4		2,5	15,77	2,6	15,65	4,0	1,00	6,4	41158
5		3,1	24,07	0,7	21,19	8,7	1,13	8,7	55716
6		3,6	33,68	0,7	28,13	7,2	1,19	7,0	73968
7		4,3	36,59	0,6	35,15	6,2	1,04	6,3	92437
8		4,9	45,58	0,5	43,11	5,4	1,06	5,6	113373
9		5,5	53,50	0,4	50,36	5,0	1,06	5,1	132437
6	1	0,8	2,83	6,8	3,24	12,1	0,87	16,8	8535
	2	1,3	7,13	3,5	7,78	7,2	0,92	10,0	20474
	3	1,9	12,94	2,4	13,30	5,2	0,97	7,1	34988
	4	2,5	19,85	5,3	20,25	10,1	0,98	14,0	53267
	5	3,1	28,09	0,5	27,35	8,4	1,03	8,2	71914
	6	3,7	36,33	0,4	36,28	6,9	1,00	6,9	95423
8	1	0,6	2,85	5,3	3,55	13,0	0,80	16,2	9346
	2	1,3	8,10	2,7	8,42	7,9	0,96	9,7	22147
	3	1,9	15,29	1,8	15,62	5,2	0,98	6,6	41067
	4	2,5	22,49	0,5	23,82	10,0	0,94	9,5	62643
	5	3,3	31,87	0,4	32,36	8,2	0,99	8,0	85090

TABLA N° 2.

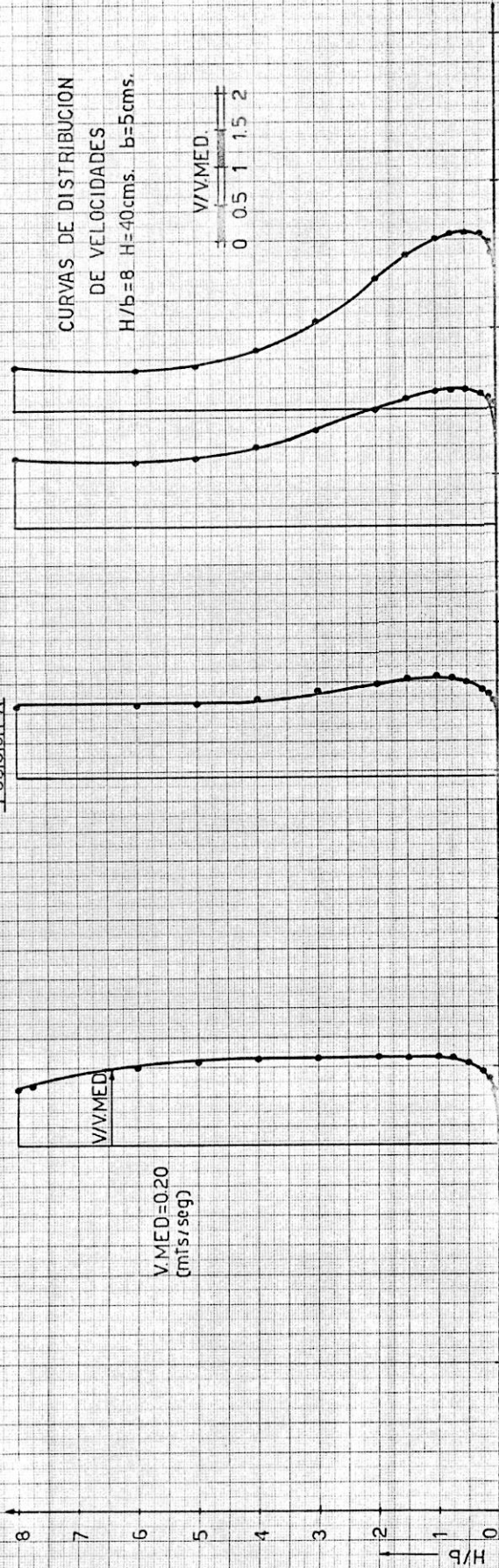
COMPUERTA EN EL SITIO B									
m	b	h	Q <sub>r</sub>	errorQ <sub>r</sub>	Q <sub>t</sub>	errorQ <sub>t</sub>	C	errorC	IR
	cms	cms	ltb/seg	%	ltb/seg	%		%	
3	1	0,9	1,70	13,7	1,85	14,1	0,91	24,3	4868
	2	1,5	4,73	7,0	4,80	7,8	0,98	13,8	12625
	3	2,0	8,47	4,7	8,27	5,6	1,02	9,7	21740
	4	2,6	12,87	3,5	12,37	4,3	1,04	7,5	32543
	5	3,2	17,87	2,8	17,00	3,5	1,06	6,1	44695
	6	3,8	22,51	0,8	22,18	7,8	1,01	8,0	58327
	7	4,4	29,28	0,7	28,02	6,7	1,04	6,9	73693
	8	5,1	36,22	0,6	33,95	5,9	1,07	6,1	89288
	9	5,8	45,15	0,6	40,25	5,3	1,12	9,9	105845
	10	6,3	50,64	0,5	47,42	4,7	1,07	4,9	124697
	12	7,5	64,37	0,4	62,44	3,9	1,03	4,1	164221
	4	1	0,9	2,04	10,2	2,30	13,5	0,88	20,9
2		1,4	5,59	5,3	5,75	7,8	0,97	12,1	15115
3		2,0	10,06	3,5	9,90	5,6	1,02	8,6	26034
4		2,6	15,40	2,7	15,04	4,2	1,02	6,6	39542
5		3,2	20,41	0,8	20,84	8,9	0,98	8,8	54806
6		3,9	27,51	0,7	26,73	7,6	1,03	7,6	70307
7		4,5	34,91	0,6	34,06	6,4	1,03	6,5	89562
8		5,1	42,97	0,5	41,14	5,7	1,04	5,8	108181
9		5,6	52,48	0,4	49,11	5,1	1,07	5,2	129163
6	1	0,9	2,60	6,8	2,92	13,6	0,89	17,9	7677
	2	1,5	7,08	3,5	7,21	7,8	0,98	10,5	18960
	3	2,0	12,76	2,4	12,83	5,4	0,99	7,3	33737
	4	2,7	19,34	5,3	19,29	10,7	1,00	14,4	50730
	5	3,2	26,13	0,5	26,57	8,7	0,98	8,0	69877
	6	3,9	34,69	0,4	39,93	7,2	0,99	7,1	91856
8	1	0,8	2,87	5,3	2,73	17,2	1,06	19,2	7168
	2	1,3	7,99	2,7	8,3	8,0	0,96	9,8	21837
	4	2,6	22,51	0,5	22,65	10,6	0,99	10,0	59561
	5	3,2	31,14	0,4	33,29	8,0	0,94	7,8	87546

GRAF N°1

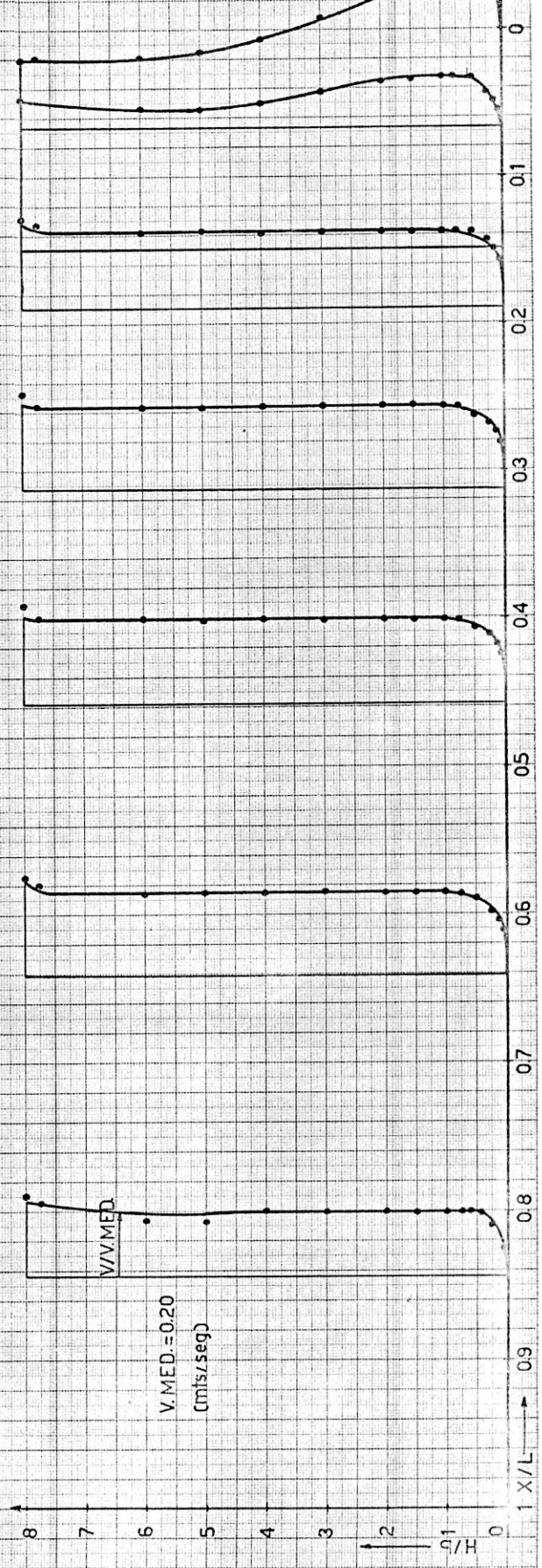
CURVAS DE DISTRIBUCION  
DE VELOCIDADES  
H/b = 8 H = 40 cms. b = 5 cms.

V/V.MED.  
0 0.5 1 1.5 2

POSICION A



POSICION B



CURVAS DE DISTRIBUCION  
DE VELOCIDADES  
 $H/b=8$   $H=32$  cms.  $b=4$  cms.

V/V.MED.  
0 0.5 1 1.5 2

POSICION A

POSICION B

V/V.MED.

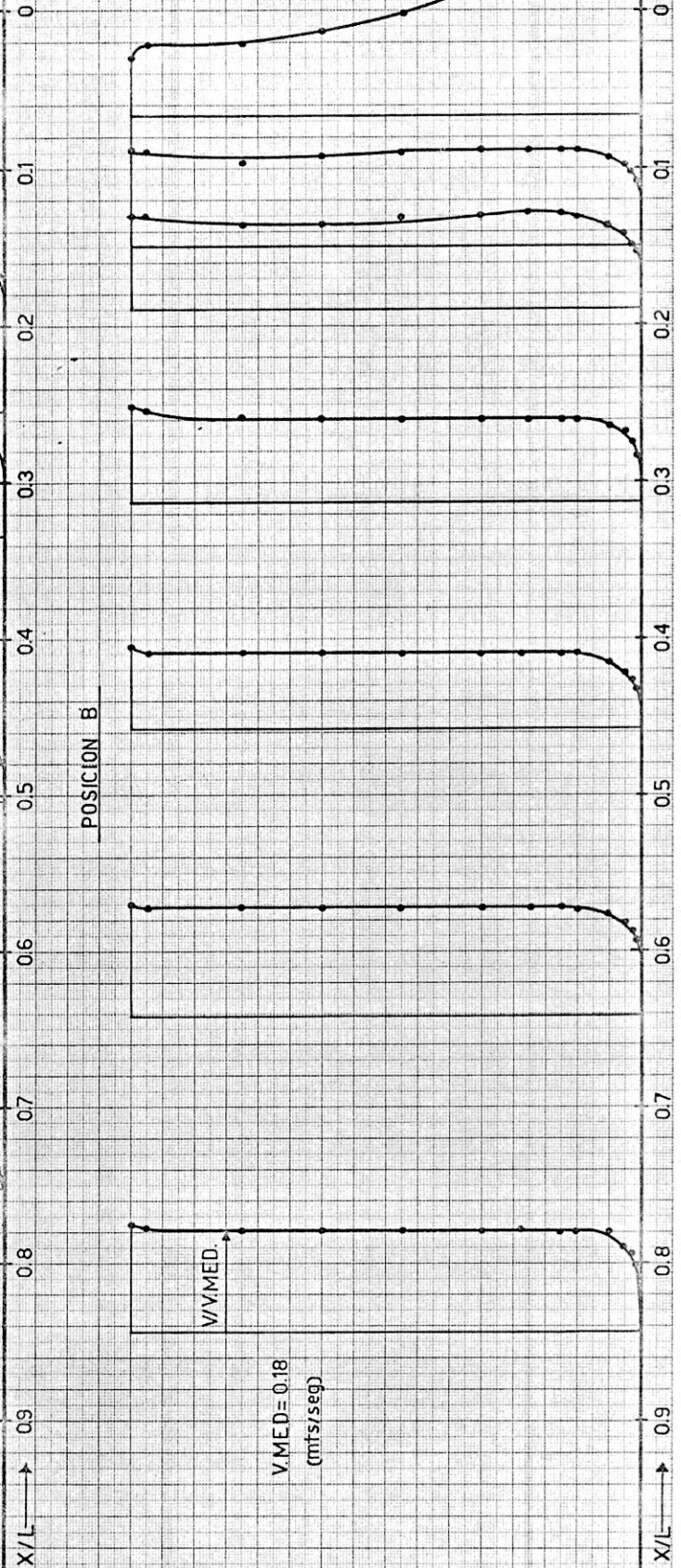
V.MED=0.18  
(mts/seg)

V/V.MED.

V.MED=0.18  
(mts/seg)

8  
7  
6  
5  
4  
3  
2  
1  
0  
H/H

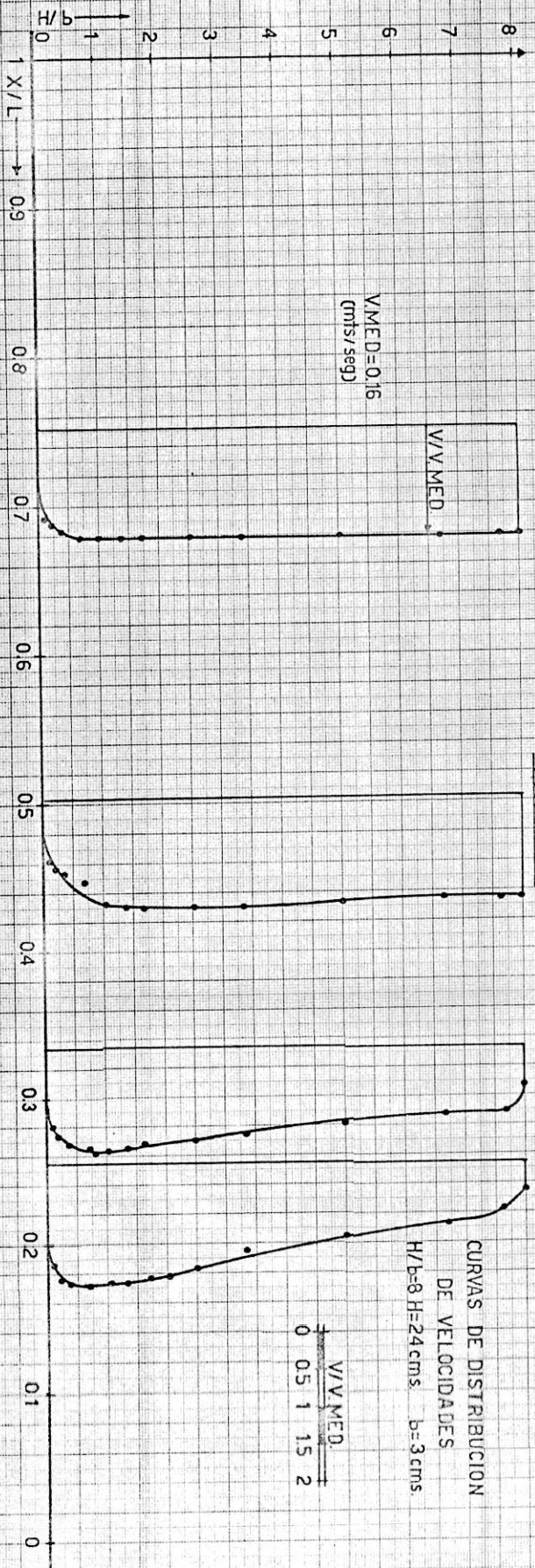
8  
7  
6  
5  
4  
3  
2  
1  
0  
q/H



CURVAS DE DISTRIBUCION DE VELOCIDADES

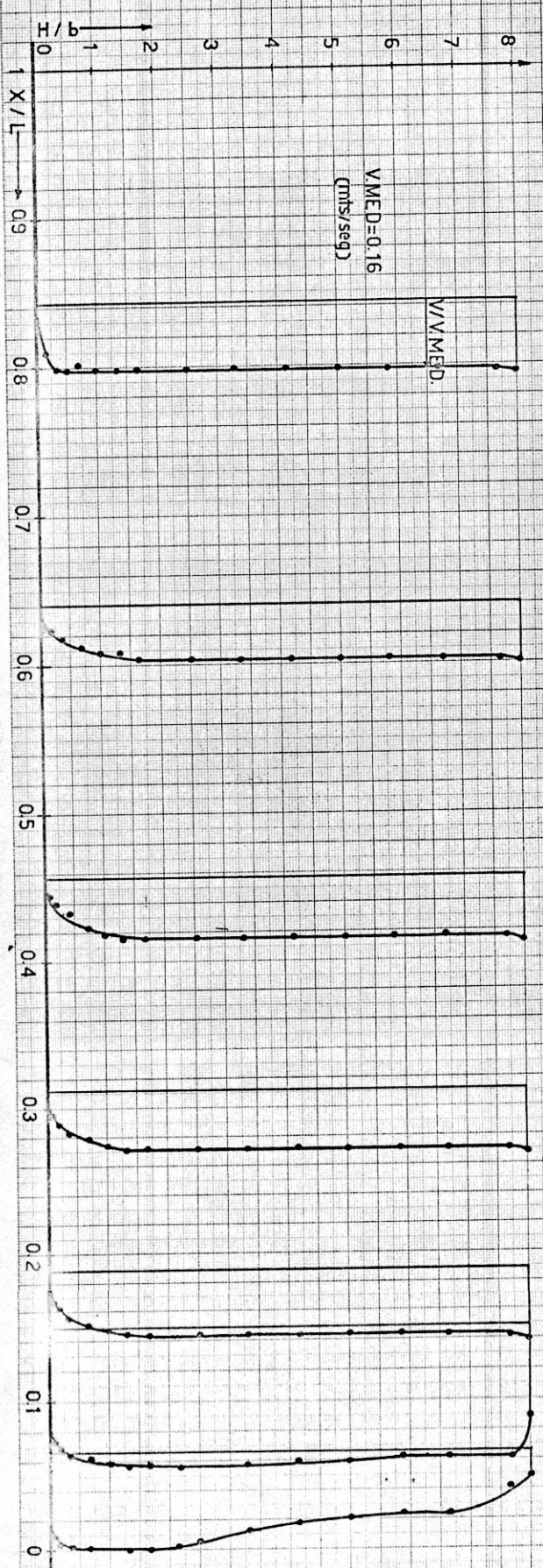
H/b=8 H=24 cms b=3 cms

V/V MED. 0 0.5 1 1.5 2



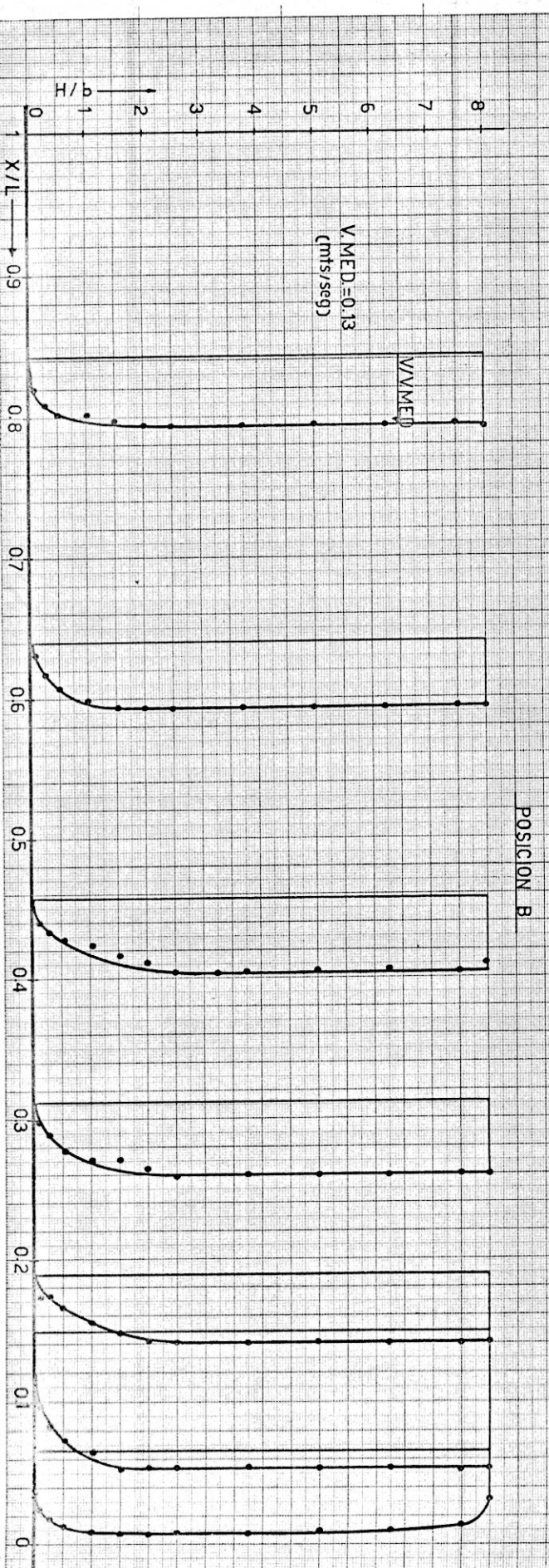
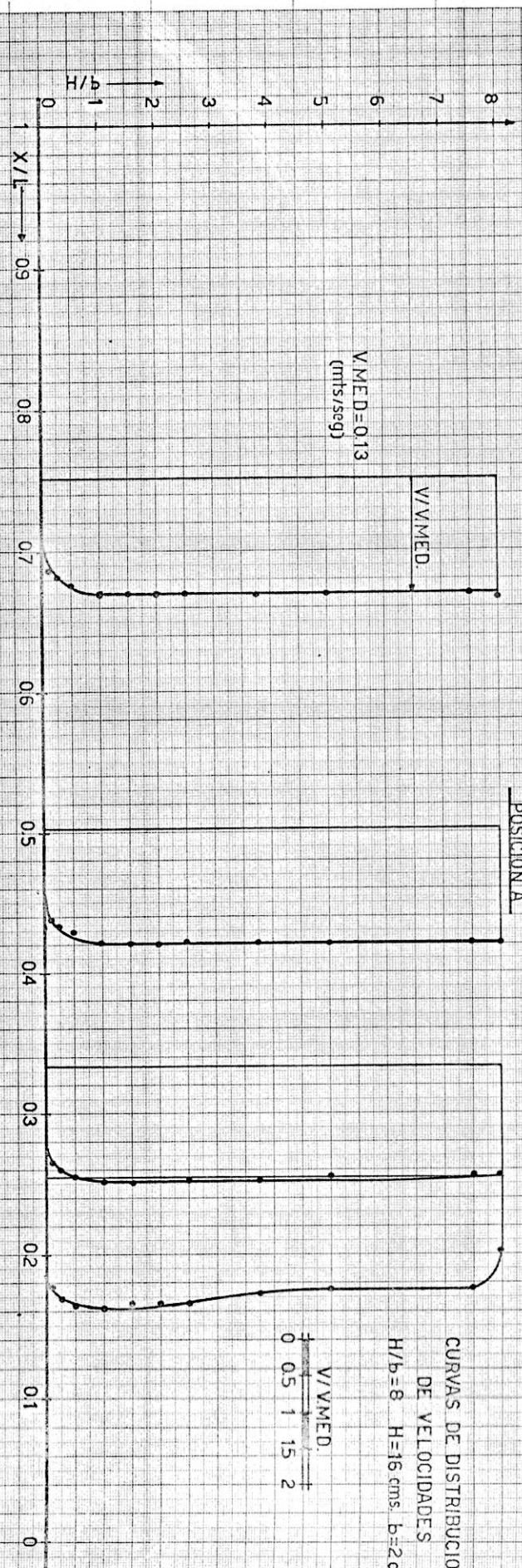
POSICION A

POSICION B

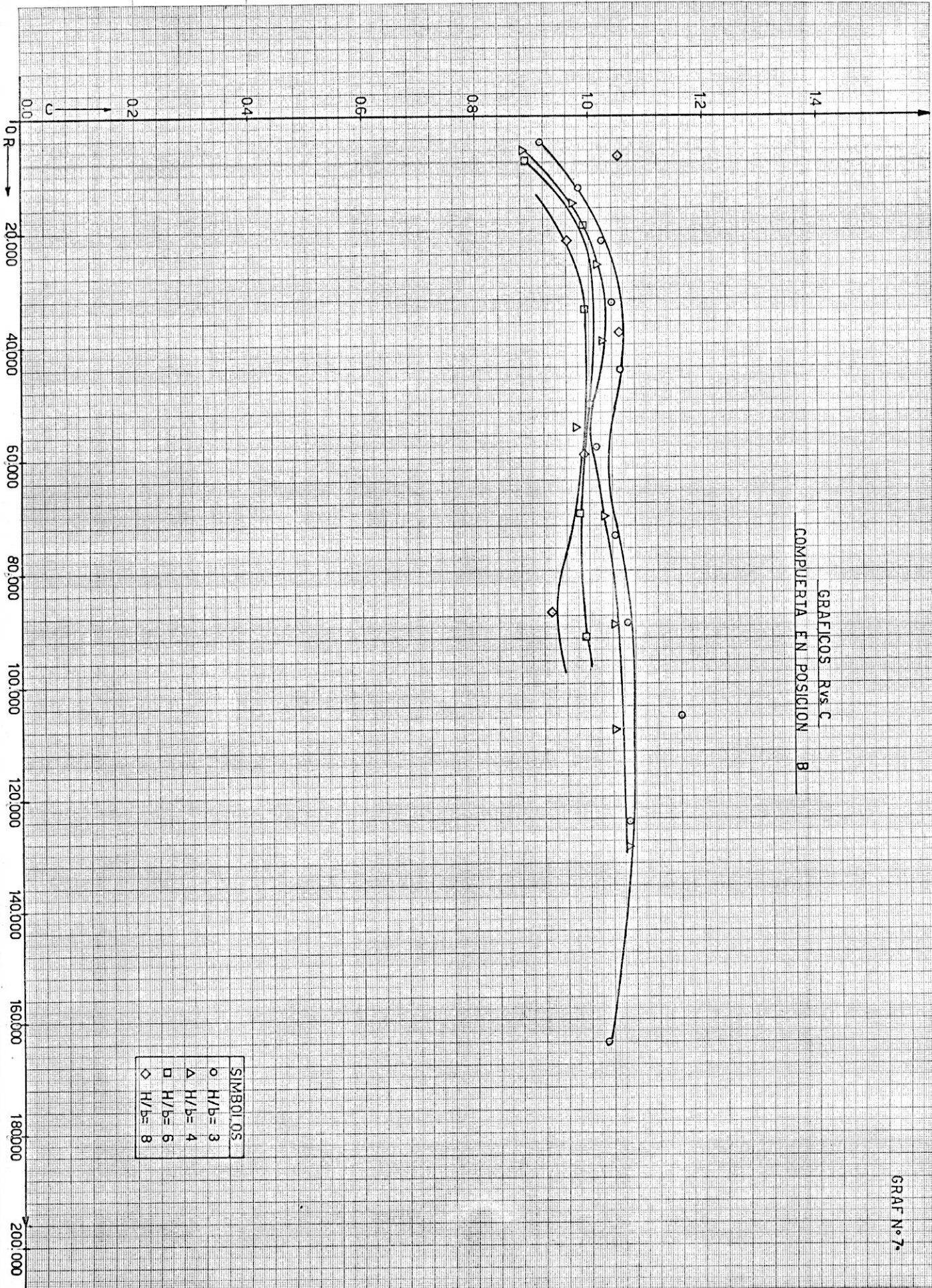


CURVAS DE DISTRIBUCION DE VELOCIDADES

H/b=8 H=16 cms. b=2 cms.

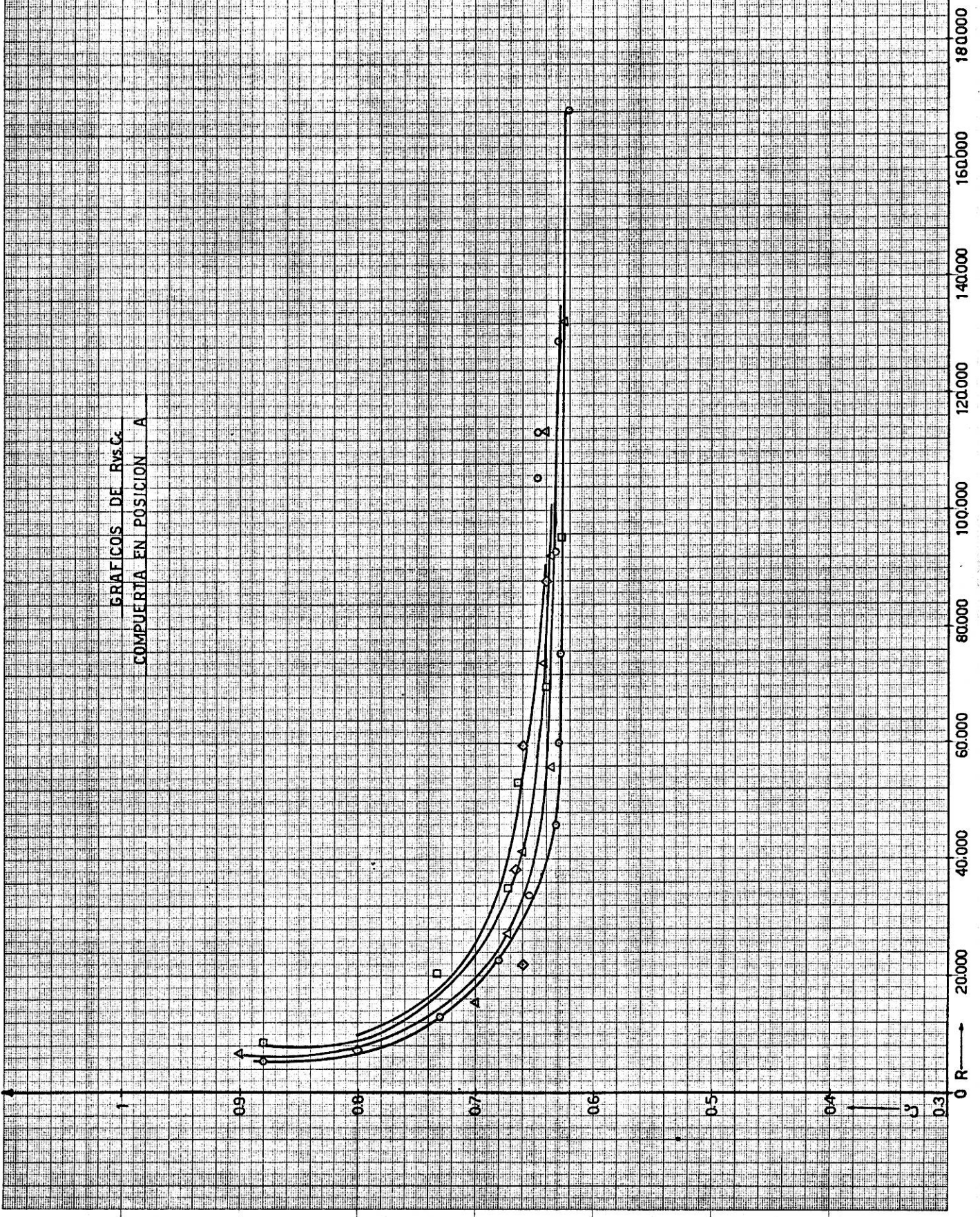


GRAFICOS Rvs C  
COMPUERTA EN POSICION B



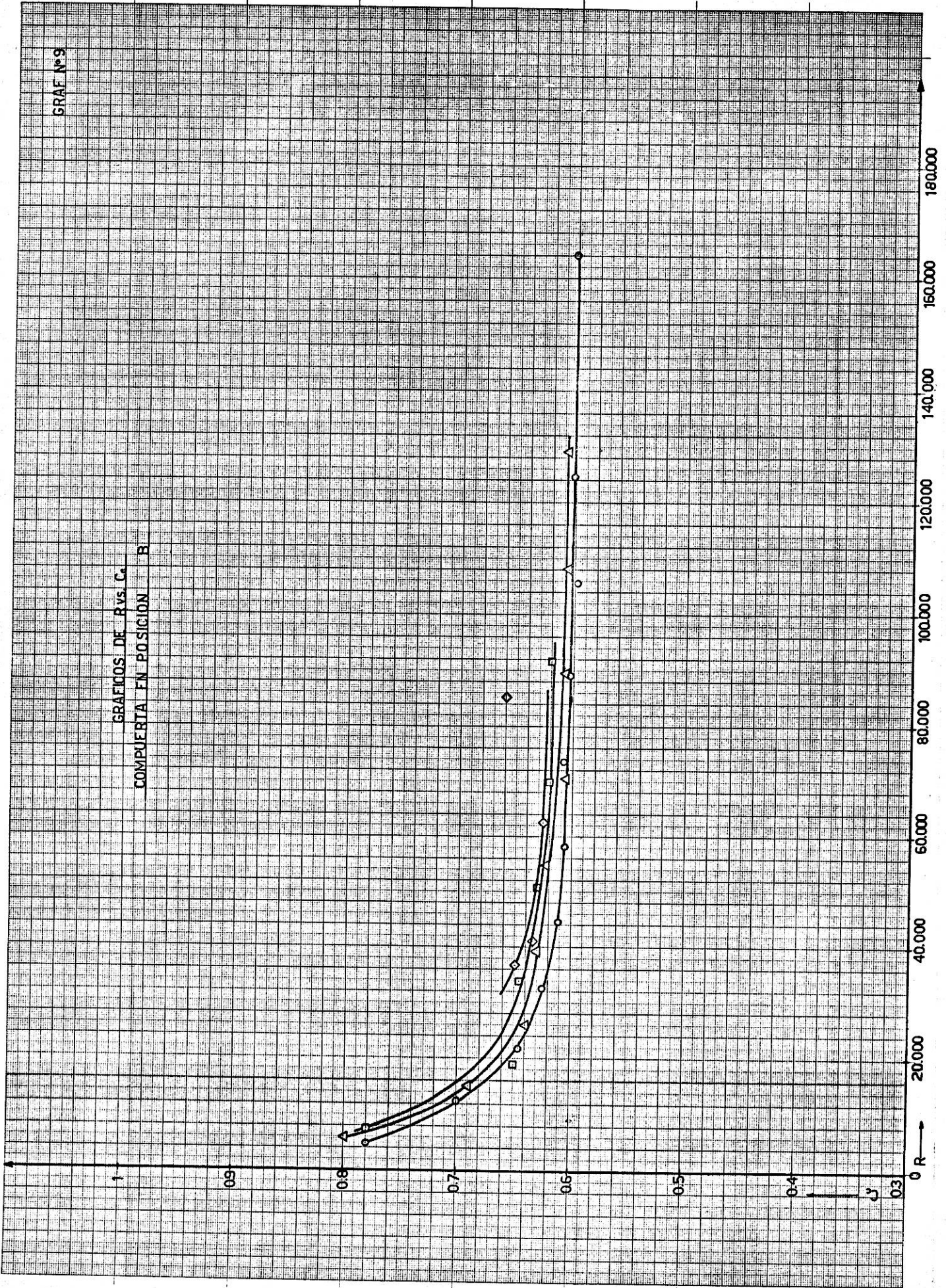
SIMBOLIOS	
○	H/b = 3
△	H/b = 4
□	H/b = 5
◇	H/b = 8

GRAFICOS DE Rvs.Cs.  
COMPUERTA EN POSICION A

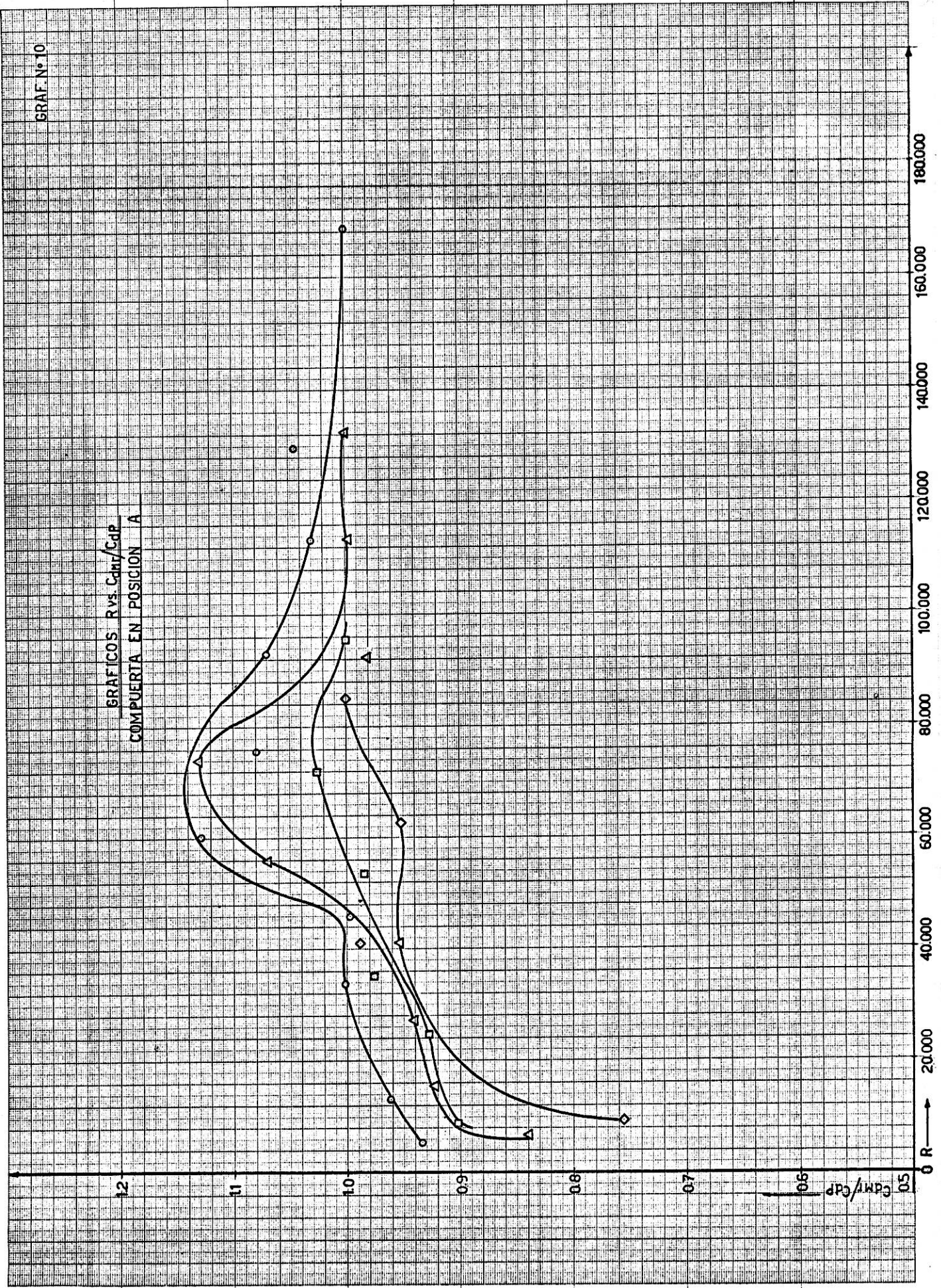


GRAF N° 9

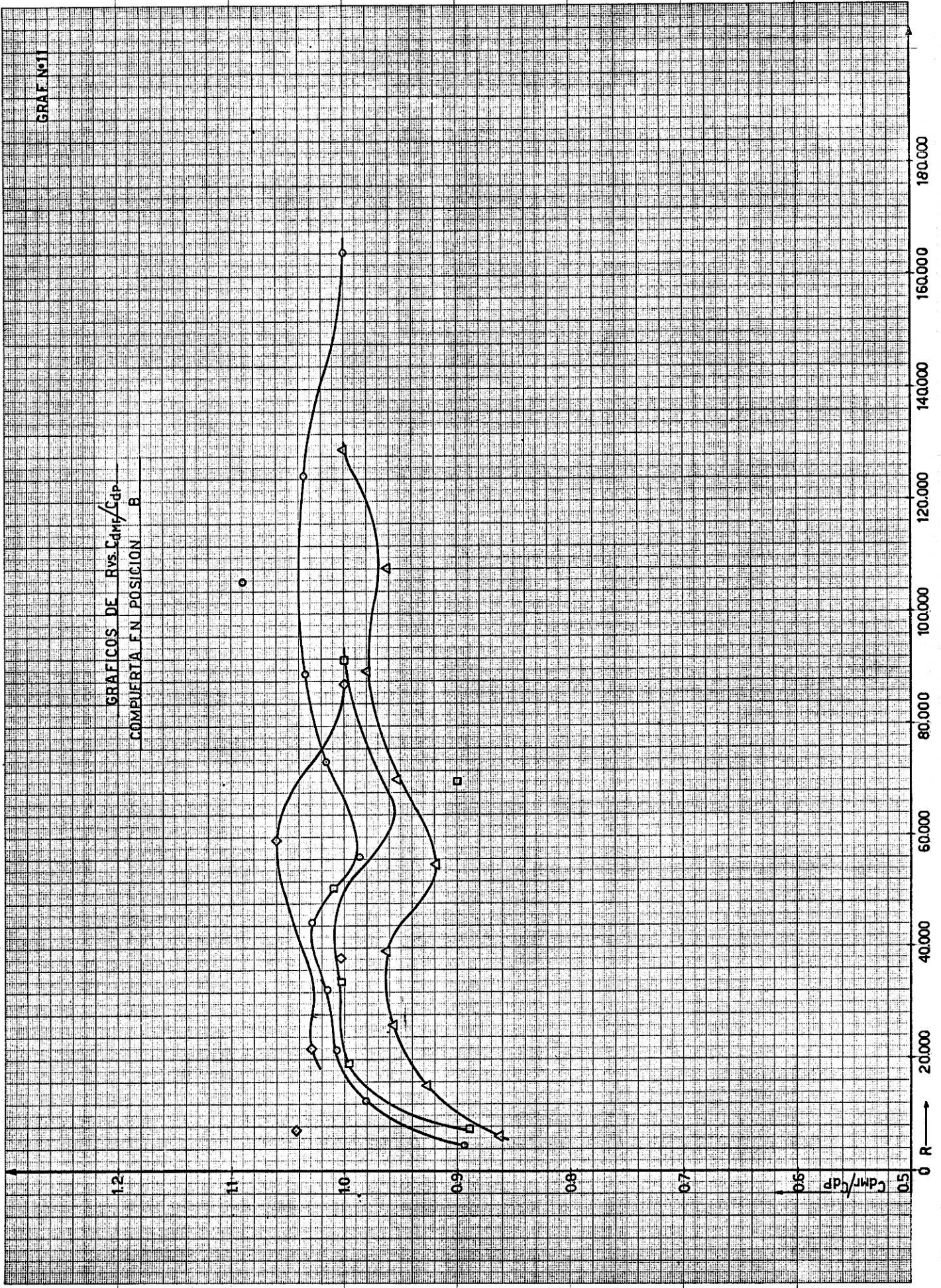
GRAFICOS DE R vs. C<sub>a</sub>  
COMPUERTA EN POSICION B



GRAFICOS Rvs. C<sub>DM</sub>/C<sub>DP</sub>  
COMPUERTA EN POSICION A



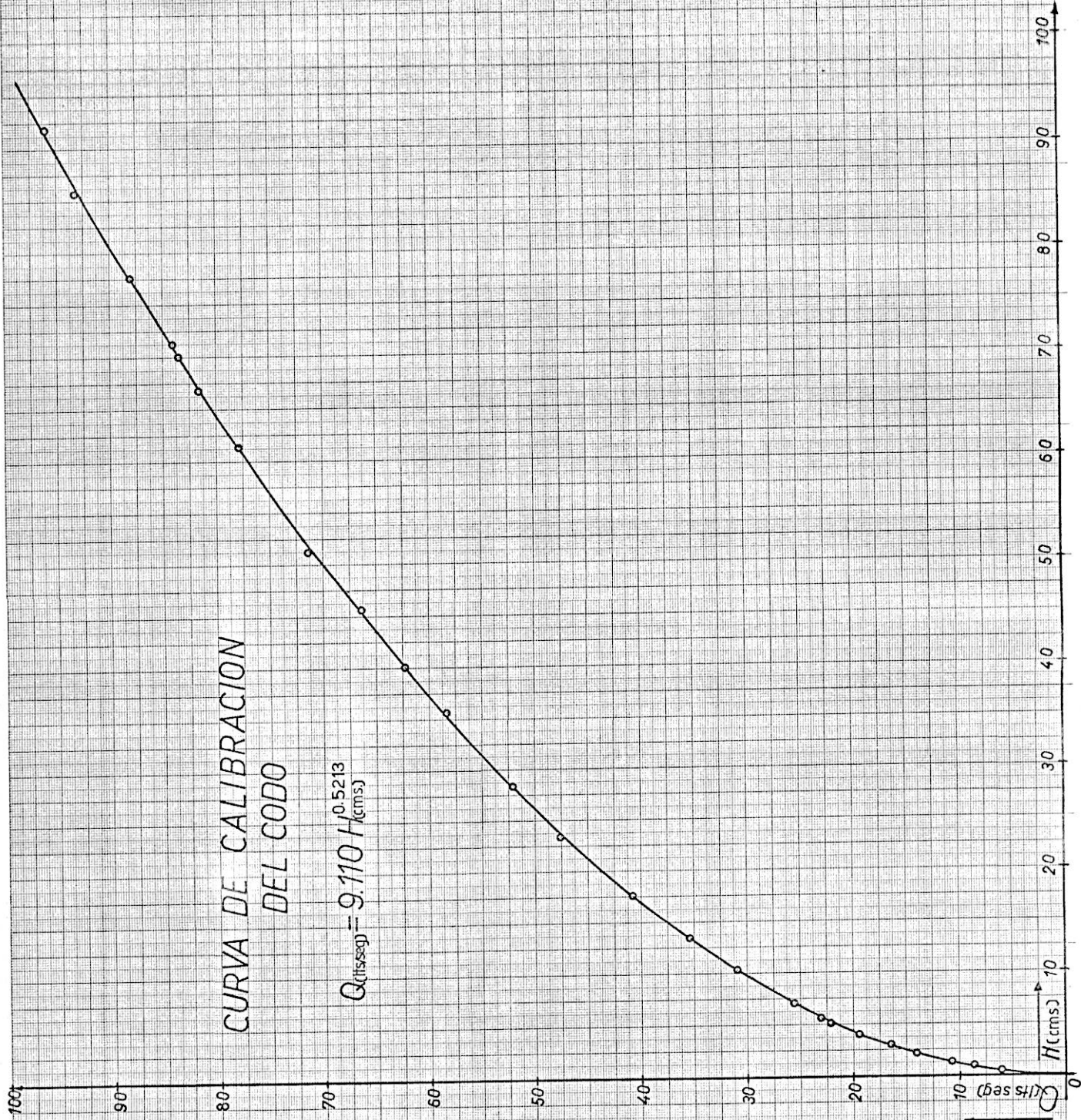
GRAFICOS DE Rvs.  $C_{dm}/C_{dp}$   
COMPUERTA F.N. POSICION B



GRAE N° 12

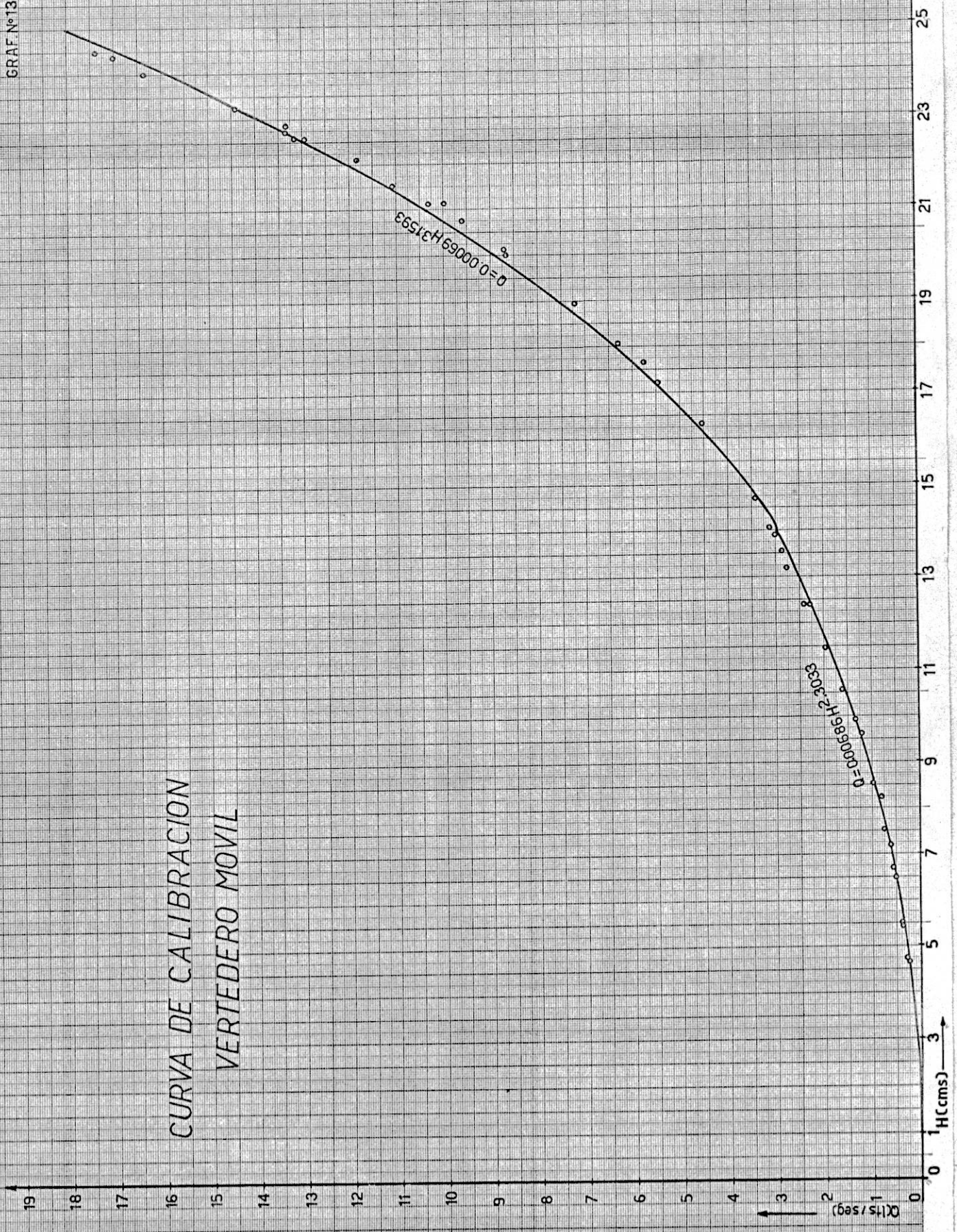
CURVA DE CALIBRACION  
DEL CODO

$$Q_{(Hz\text{seg})} = 9.110 H_{(cms)}^{0.5213}$$

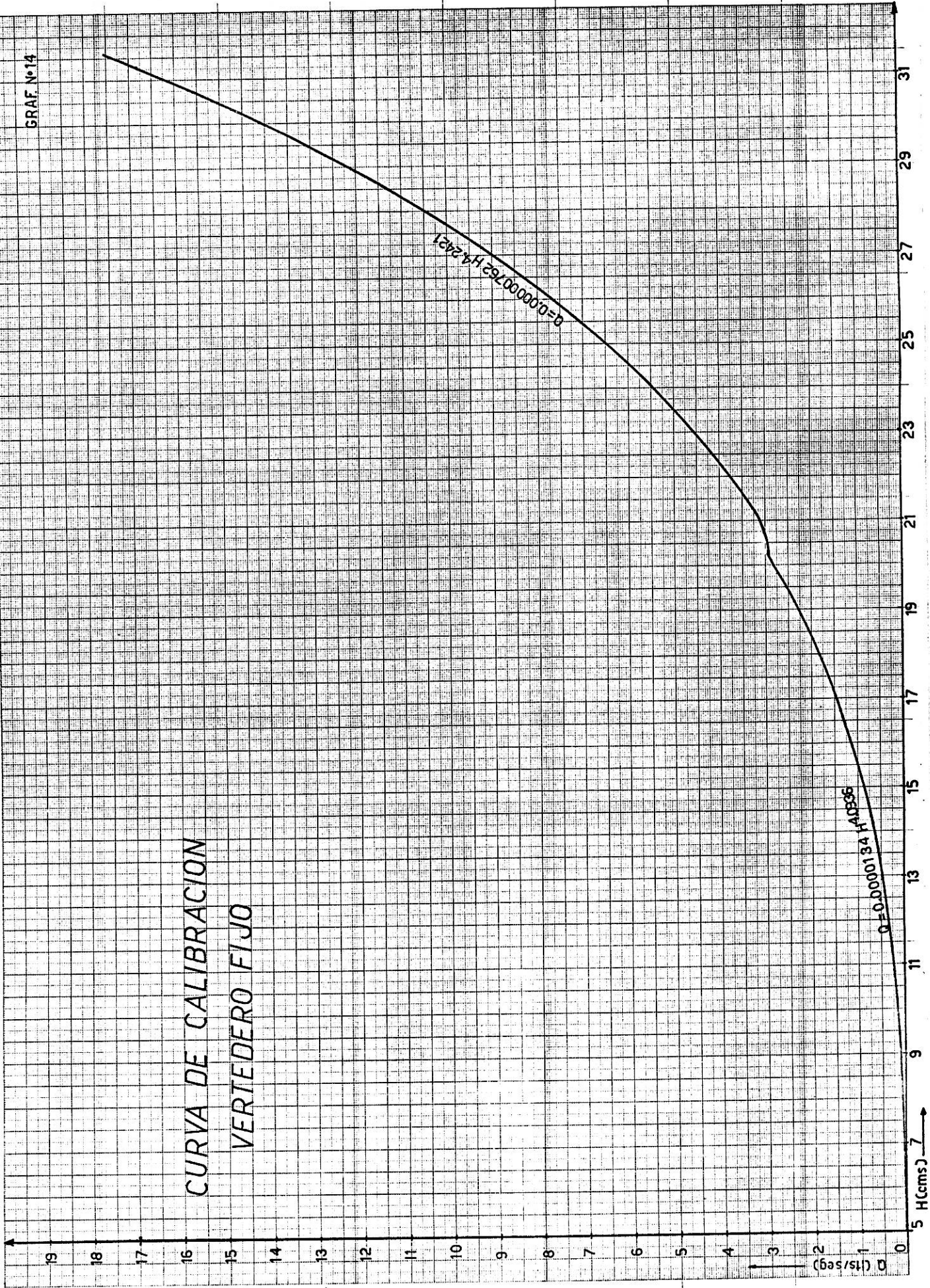


GRAF. Nº 13

# CURVA DE CALIBRACION VERTEDERO MOVIL



CURVA DE CALIBRACION  
VERTEDERO FIJO



## DISCUSION

Examinando los gráficos de número de Reynolds ( $Re$ ) vs coeficiente de caudal ( $C$ ), se observa una tendencia ondulatoria en la distribución de los puntos. En el caso A hay una mayor dispersión de éstos que en el B.

Para números de Reynolds menores que 25.000 el coeficiente de caudal es siempre menor que 1, y disminuye al disminuir el número de Reynolds. Con la compuerta en la posición A, los gráficos de distribución de velocidades para estos números de Reynolds, indican que la velocidad en el eje del canal es aproximadamente dos veces la velocidad media, esto es debido a una alta resistencia viscosa en las paredes, por lo que las velocidades en las cercanías de éstas deben ser muy pequeñas. El efecto de la viscosidad también se nota cerca del fondo, y la distribución de velocidades es tridimensional, estando las velocidades mayores en el eje y a una distancia del fondo a partir de  $H / b$  1,5. A consecuencia de esto, la velocidad del agua que pasa por la abertura de la compuerta es menor, ocasionando un coeficiente de caudal bajo. Con la compuerta en la posición B la magnitud de la velocidad a lo largo del eje es aproximadamente igual a la velocidad media, lo que indica una menor influencia de las paredes, por lo que la distribución es más uniforme a lo ancho del canal, esto es posiblemente debido a que por haber una mayor longitud, la capa límite a lo largo de las paredes ha tenido oportunidad de hacerse turbulenta. Cerca de la compuerta se nota una aceleración del flujo por debajo de la misma; esto dos

factores tienden a originar un aumento en el coeficiente de caudal. Cerca del fondo la influencia de la viscosidad es más acentuada que en el caso anterior, lo que contrarresta el aumento en el coeficiente de caudal, sin embargo en los gráficos de coeficiente de caudal (C) vs número de Reynolds ( $Re$ ), se nota que el coeficiente de caudal sigue siendo mayor que en el caso anterior.

Para número de Reynolds entre 25.000 y 100.000 aproximadamente, los puntos oscilan alrededor del valor 1, observándose una mayor dispersión de éstos en el caso A.

En el caso B para números de Reynolds cercanos a 25.000 (pero mayores), se nota que la velocidad a lo largo del eje es sensiblemente igual a la velocidad media, aunque sigue habiendo influencia de la viscosidad en el fondo. La distribución total es bastante uniforme y el coeficiente de caudal próximo a 1. En el caso A las velocidades en el eje siguen siendo mayores que la media, pero hay menor influencia de las paredes, lo que ocasiona que el coeficiente de caudal se aproxime a 1. Para esta región no hay gran diferencia entre los casos A y B.

Para números de Reynolds entre 50.000 y 100.000 comienzan a haber aceleraciones fuertes en la zona cercana a la compuerta, las que son contrarrestadas por la resistencia viscosa de las paredes, manteniéndose el coeficiente de caudal cercano a 1. En el caso A para las relaciones 3 y 4, se observa que el coeficiente de caudal se hace muy grande debido a que ocurren aceleraciones a lo ancho del canal y la distribución transversal de velocidades es pronunciada. Para las otras relaciones, los casos A y B son semejantes en esta zona.

Para números de Reynolds mayores de 100.000 los coeficientes de -

caudal de todas las relaciones en ambos casos tienden asintóticamente al valor 1, esto se debe a que de este valor en adelante, la influencia viscosa es despreciable en comparación con los efectos acelerados de la compuerta como se nota en las curvas de velocidad.

En los gráficos de número de Reynolds ( $Re$ ) vs corrección del modelo ( $C_{dMr} / C_{dp}$ ) se nota la misma tendencia que en los gráficos de número de Reynolds ( $Re$ ) vs coeficiente de caudal ( $C$ ), haciéndose esta corrección igual es menor de 1 para números de Reynolds menores de 40.000, lo cual coinciden con los coeficientes de caudales menores que 1 para esta zona; desde números de Reynolds 40.000 hasta 120.000 la corrección es mayor de 1, lo cual es debido al aumento del coeficiente de caudal en esta zona; de aquí en adelante la corrección tiende rápidamente a la unidad.

## CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos, se concluye que en general existe -- una influencia del grado de desarrollo de la capa límite en el modelo.

Para números de Reynolds menores de 25.000 el efecto de escala es acentado, creciendo al aumentar la relación  $H / b$ . Para números de Rey----nolds mayores, el coeficiente de caudal oscila alrededor de 1, y para núme ros de Reynolds mayores de 100.000 el coeficiente de caudal tiende a 1.

Al colocar la compuerta en el sitio A, los coeficientes de cauda les para números de Reynolds menores de 25.000, son ligeramente menores -- que los que se obtienen colocando la compuerta en el sitio B. Para números de Reynolds entre 50.000 y 100.000 se nota que para las relaciones peque-- ñas de  $H / b$  (3 y 4), los coeficientes de caudal que se obtienen en el ca so A, son mucho mayores (alrededor de 20%) que los que se obtienen en el caso B, por lo tanto es en esta zona donde tomarse en cuenta la colocación del modelo. Como es de esperarse para números de Reynolds mayores de ----- 100.000 donde no hay influencia de la viscosidad, no hay efecto de escala ni de colocación del modelo.

El factor de corrección es menor de 1 para números de Reynolds -- hasta 40.000; mayor del 1 para números de Reynolds entre 40.000 y 120.000 y de allí en adelante se hace 1, aunque se nota que para relaciones de  $H / b$  crecientes, el valor de corrección del modelo ( $C_{dMr} / C_{dp}$ ) igual a 1 se al canza para números de Reynolds menores.

### RECOMENDACIONES

Los autores de este trabajo hacen las siguientes recomendaciones:

- 1) Que se hagan más ensayos de este tipo con la compuerta colocada en ---- otras posiciones y que se tomen distribuciones de velocidad en el sentido transversal del canal con el objeto de definir más claramente la influencia del desarrollo de la capa límite sobre el modelo.
- 2) Ensayar otros modelos en otras condiciones realizando experiencias semejantes a las descritas.
- 3) Que el canal donde se hagan los ensayos sea suficientemente largo y más ancho con el objeto de eliminar en lo posible el efecto de las paredes.

APENDICE I

ESTIMACION DE LOS ERRORES

El valor exacto de una magnitud física no puede ser determinado sin error mediante mediciones. Dada la naturaleza del presente trabajo, en el cual los valores que se obtienen de caudales y velocidades para distintos desarrollos de la capa límite en algunos casos sólo presenta pequeñas diferencias entre sí, se hace imprescindible una valoración de los errores de cada medición para de este modo conocer la confiabilidad de los resultados obtenidos. En las experiencias que se hicieron con la compuerta, los resultados se presentan en gráficos de  $R$  vs.  $q_v / q_r$  siendo  $q_r$  el caudal unitario real medido con el codo o con el vertedero, y  $q_v$  el caudal teórico calculado con la ecuación

$$q_v(h, H) = \frac{\sqrt{2g} h \sqrt{H-h}}{\sqrt{1-(h/H)^2}} \quad (I)$$

donde  $h$  es la profundidad aguas abajo de la compuerta y  $H$  la profundidad aguas arriba. Aplicando el principio de superposición de errores a esta ecuación se obtiene:

$$\Delta q_v(h, H) = \frac{\partial q_v}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial q_v}{\partial H} \Delta H \quad (II)$$

Haciendo las derivaciones respectivas y sustituyendo se tiene

$$\frac{\Delta q_v}{q_v} = \frac{2H+h}{2(H+h)h} \Delta h + \frac{H+2h}{2(H+h)H} \Delta H \quad (III)$$

donde  $\Delta h(2H+h) / 2 (H+h) h$  representa el error relativo de  $q$  debido a un error de  $h$  en  $h$ , y el sumando  $\Delta H(H+2h) / 2 (H+h)H$  el error respecto de  $H$ .

La ecuación (I) puede ser escrita en la forma

$$q_{\pm} = \frac{\sqrt{2gn}}{1 + \frac{1}{n}} \quad \text{siendo } n = \frac{H}{h} \quad \text{(IV)}$$

la cual da un error relativo

$$\frac{\Delta q_{\pm}}{q_{\pm}} = \frac{n(2\Delta h + \Delta H) + \Delta h + 2\Delta H}{2h(n+1)} \quad \text{(V)}$$

de donde se ve el error aumentará cuando se tengan valores pequeños de h.

Se puede decir de acuerdo a las observaciones hechas que

h 1 mm y H 3 mm

El caudal teórico tiene el valor  $q_{\pm} \pm \frac{\Delta q_{\pm}}{q_{\pm}}$

donde  $q_{\pm}$  se puede calcular con las ecuaciones (I) o (IV), y  $\frac{\Delta q_{\pm}}{q_{\pm}}$  con las ecuaciones (III) o (V).

Se puede obtener también el error de medir el caudal con el codo o con el verdadero. Como ya se explicó, hubo de procederse a la calibración de un codo y de un vertedero. El error que se puede cometer en la calibración en sí es muy pequeño, pero como en el caso del codo las diferencias de altura piezométrica se determinaron con un piezómetro diferencial de agua, es más seguro tomar como error real aquel que resulta de desplazar la lectura del piezómetro en una cierta cantidad  $\pm \Delta l$ , ya que los niveles de agua en el aparato no son constantes sino que los meniscos presentan una cierta oscilación sobre todo para caudales grandes. Por observaciones directas pudo determinarse que  $\Delta l = 2\text{mm}$  para caudales pequeños y  $\Delta l = 4\text{mm}$  para caudales grandes. En los resultados se señalan los errores  $\Delta Q$ , siendo este el promedio de las diferencias entre el gasto correspondiente a una lectura H del piezómetro y las correspondientes a  $l + \Delta l$  y --

1 -Δl. En el caso del vertedero se siguió un procedimiento semejante y la altura de agua se midió con un pozo, admitiéndose un error de  $\pm 1\text{mm}$  para caudales grandes, y de  $\pm 0,5\text{mm}$  para caudales pequeños. Los resultados son presentados en forma similar a los del codo.

Los gastos reales calculados con el codo o el vertedero se pueden expresar por una relación de la forma  $Q_v \pm \Delta Q_v$ , o como caudales unitarios  $q_v \pm \Delta q_v$ .

Finalmente, el coeficiente  $C = q_v / q_t$  tendrá la forma

$$C = \frac{q_v \pm \frac{\Delta q_v}{q_v} \times 100}{q_t \pm \frac{\Delta q_t}{q_t} \times 100}$$

o sea:

$$C = \frac{q_v}{q_t} \pm \left( \frac{\Delta q_v + \Delta q_t}{1 + \Delta q_t} \right) 100$$

## APENDICE II

### DETERMINACION DE LOS GASTOS REALES

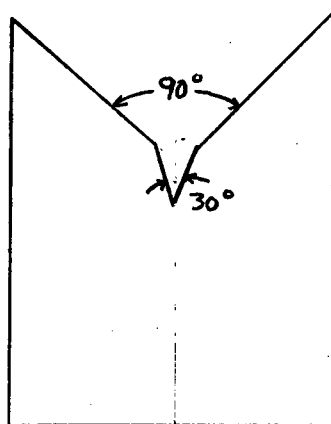
Como se ha indicado con anterioridad, por gasto real,  $q$ , se entiende el caudal determinado mediante instrumentos calibrados para tal efecto. Estos instrumentos son un codo y un vertedero, el primero es bastante preciso para caudales grandes y el segundo lo es para caudales pequeños.

Calibración del codo.- Este aparato hubo de calibrarse debido a que los valores que se obtienen utilizando una fórmula en función de las diferencias de alturas piezométricas dan un error de  $\pm 10\%$ , y las más precisas, que son ecuaciones ajustadas experimentalmente, sólo garantizan un error de  $\pm 3\%$  y deben ser usadas en codos circulares de dimensiones muy bien conocidas, el cual no es el caso actual. Se procedió, por lo tanto, a calibrar en sitio un codo de  $90^\circ$  y de 8" de diámetro formado por secciones rectas, para lo cual se armó una tubería de 8" de diámetro conectada a la válvula del canal de vidrio con el objeto de llevar el agua hasta un tanque volumétrico donde podían medirse los volúmenes de líquido que pasaban por la tubería por unidad de tiempo. A cada caudal ( $Q$ ) medido correspondía una diferencia de altura piezométrica ( $H$ ) que se medía con un piezómetro diferencial de agua conectado a dos huecos piezométricos en el codo. Los resultados de este aforo aparecen en el gráfico (12) donde se muestra la curva de calibración del codo y la ecuación  $Q = 9,110 H^{0,5213}$  la cual se ajustó a los puntos experimentales por el método de los mínimos cuadrados.  $Q$  se expresa en lts/seg y  $H$  en cms.

Calibración del vertedero.- Para lograr mayor precisión a medida que los caudales se hacían más pequeños, se ideó un vertedero compuesto; es decir,

con una abertura de  $90^\circ$  superpuesta a una abertura de  $30^\circ$ .

La forma del vertedero se puede ver a continuación.



Este vertedero está colocado en el canal de retorno del canal de vidrio, y debido a la imposibilidad de trasladarlo a un tanque volumétrico para su calibración, hubo que calibrarlo indirectamente con otro vertedero de idénticas dimensiones. Para calibrar este último se midían los volúmenes por unidad de tiempo en un tanque volumétrico y las correspondientes cargas sobre el vertedero. Este vertedero portátil se colocó luego en el canal de vidrio y los caudales medidos por él se hacían corresponder con las respectivas cargas medidas sobre el vertedero colocado en el canal de retorno. Los resultados obtenidos en estos aforos se indican en los gráficos (13) y (14) donde se muestran las curvas de calibración de ambos vertederos y sus respectivas ecuaciones, las cuales se hallaron de la misma manera que se hizo para el codo.

REFERENCIAS

- 1) Ven Te Chow, "Open-Chanel Hydraulics", Mc Graw-Hill, New York, 1.959
- 2) Hunter Rouse, "Mecánica de Fluidos Elemental", Editorial Dossat, Madrid, 1.945. Página 84, figura 46
- 3) Hunter Rouse, "Engineering Hydraulics", John Wiley & Sons, Inc, New York, 1.949
- 4) Felicísimo Ramos, "Errores de Observación", Universidad de Madrid, Madrid, 1.963
- 5) John A. Replogle, "Evaluation of Pipe Elbous as Flów Meters", Journal of the Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the A.S.C.E. 1.966