

0280 01149

141

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DIVISION DEL DOCTORADO

No. CLAS	.....
No. AD.	.....
FECHA	.....
PROC.	.....

AMORTIGUACION DE LA ENERGIA MEDIANTE  
LA CREACION DE UNA BARRERA HIDRAULICA

BIBLIOTECA DE LA  
DIVISION DEL DOCTORADO

TESIS QUE PARA OBTENER EL  
GRADO DE MAESTRO EN INGENIERIA  
CIVIL PRESENTA EL  
ING. GILBERTO SOTELO AVILA

México, D.F., agosto de 1961.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **CAPITULO I.-INTRODUCCION**

- a.- ANTECEDENTES
- b.- OBJETO DEL NUEVO ESTUDIO

## **CAPITULO II.-TEORIA DEL FUNCIONAMIENTO**

- a.- ECUACIONES FUNDAMENTALES Y SU EMPLEO EN PROBLEMAS SIMILARES
- b.- ECUACIONES QUE RIGEN EL FENOMENO Y SUS LIMITACIONES
- c.- SISTEMATIZACION DEL CALCULO Y RESULTADOS
- d.- CRITERIO DE DISEÑO

## **CAPITULO III.- ESTUDIO EXPERIMENTAL**

- a.- SELECCION Y DISEÑO DEL MODELO
- b.- MEDICIONES REALIZADAS Y APARATOS PARA EJECUTARLAS
- c.- RESULTADOS DE LAS MEDICIONES Y SU INTERPRETACION

## **CAPITULO IV.- CONCLUSIONES**

- a.- CONFRONTACION DE RESULTADOS TEORICOS Y EXPERIMENTALES
- b.- LIMITACIONES DE LA TEORIA Y SU EXPLICACION
- c.- POSIBILIDADES DE APLICACION

AMORTIGUACION DE LA ENERGIA MEDIANTE LA  
CREACION DE UNA BARRERA HIDRAULICA -

CAPITULO I

INTRODUCCION

a.- ANTECEDENTES

El resalto es un fenómeno conocido como un medio útil de disipar el exceso de energía y prevenir la erosión al pie de vertedores, rápidas, caídas, etc. La turbulencia inherente en el salto es resultado de los procesos de mezclado y aereación, cuya valuación ha iniciado muchas investigaciones, de tal manera que las características de un salto hidráulico en un canal rectangular pueden predecirse dentro de ciertos límites.

Es indispensable tomar en cuenta, que la dificultad principal en diseñar cualquier estructura cuyo funcionamiento sea dependiente de este fenómeno, consiste en asegurarse de su formación y controlar su posición, más que en predecir sus dimensiones.

El salto hidráulico puede formarse, si las características del escurrimiento aguas abajo permiten que el nivel de su energía coincida con el de la energía remanente del salto. Ello puede lograrse en forma natural ó forzarse mediante un escalón aguas abajo, que adiciona una reacción horizontal producida por la presencia del umbral, o bien por la utilización de deflectores colocados convenientemente en el fondo, que producen una mayor disipación de energía por el choque directo del agua contra ellos.

Sin embargo, obsérvese que en ambos casos puede ser necesario proyectar el tanque amortiguador de una profundidad tal que resulte incostruible su construcción, sobre todo cuando el nivel de la energía del escurrimiento aguas abajo sea muy inferior al de la energía remanente del salto.

Ello traería consigo el uso simultaneo de los deflectores, que tienen además la desventaja de requerir con frecuencia, gastos de conserva -

ción que incrementarían todavía más, el costo total de la estructura.

Se ocurre entonces, que la estructura disipadora ideal sería aquella que, al prescindir de estos elementos, permitiera la formación del salto-claro, por la utilización de un chorro que descargara en dirección contraria al escurrimiento general y cuyo impulso sustituyera a la reacción horizontal producida por el umbral.

En principio esta idea es factible en el caso del salto formado al pie de un vertedor.

Escande y Sananes han estudiado la manera de aumentar el coeficiente de gasto de los vertedores, mediante la acción ejercida sobre el escurrimiento, por una fisura aspirante practicada sobre la cresta (1). Dicha fisura modifica la distribución de velocidades mediante la succión de la capa límite, uniformizando las presiones en el paramento de aguas-abajo e incrementando con ello el gasto.

Las investigaciones realizadas en el Laboratorio Hidráulico de Tolosa, han permitido incluso juzgar el límite de cavitación para determinar la estabilidad de los vertedores, así como el campo de aplicación de este procedimiento ya que han demostrado que la similitud es válida.

Con estos antecedentes, el Dr. Enzo Levi Investigador del Instituto de Ingeniería, sugirió la idea de lograr la posibilidad de una ventaja adicional que consistiría en observar si, con el agua desviada por la fisura y regresada en dirección contraria a la del escurrimiento general, se logra proporcionar una "barrera hidráulica" y a su vez un impulso adicional que estabilice el salto hidráulico. Dicho impulso sustituiría y mejoraría la reacción horizontal producida por el escalón vertical, en el extremo del tanque de amortiguación así formado.

(1) Ver Leopold Escande " Transformación de las condiciones de funcionamiento en las grandes obras hidráulicas, por aspiración de la capa límite " Revista Ingeniería Vol XXX núm 3 (Julio de 1960 page 46-55)

Esta idea a primera vista pareció factible y el Instituto de Ingeniería se interesó en la construcción de un modelo en el cual se pudiera apreciar su aplicación.

El modelo ( que en adelante se llamará Alternativa 1) consistió de un canal de sección rectangular y pendiente nula, con 29.4 cm de ancho y una longitud aproximada de 4 m, provisto en el extremo aguas abajo de una caída brusca. A un metro de distancia del extremo aguas arriba del canal, se construyó con lucita un vertedor de paramentos verticales que remataba en una cresta de forma semicilíndrica con 1.75 cm de radio y que alojaba un sifón vertical de 2.5 cm de espesor y de ancho igual al del canal que era alimentado por una fisura de 1 cm de ancho. El sifón tenía un cambio brusco de dirección, continuaba con una rama horizontal y en el extremo aguas abajo, con una ranura que permitía regresar el agua a la corriente general.

En la figura 1 se presentan con detalle las dimensiones del vertedor utilizado.

Los ensayos realizados demostraron que el funcionamiento, como se había pensado, era factible pero en un rango de gastos muy pequeño.

En la foto 1 se muestra el vertedor al funcionar con una carga de 2.5 cm que corresponde a un gasto de 2.45 lt/s en la que puede observarse un resalto incipiente y la gran cantidad de aire arrastrado al interior del sifón, lo que hacía disminuir su eficiencia. En la foto 2 el vertedor trabaja con una carga de 3 cm y un gasto de 3.25 lt/s en la que se presenta la fase de corrimiento del salto.

En la gráfica 1 se tiene la curva de gastos y de coeficientes de descarga  $C$  para ésta alternativa, calculados con la fórmula  $Q = C L H^{3/2}$ .

De las observaciones hechas en el modelo se concluyó que, si bien el salto se presentaba para cargas muy pequeñas, ello dependía de las dificultades encontradas para que el sifón trabajara a su máxima capacidad debido principalmente a la posición de la fisura y a los cambios de direc -

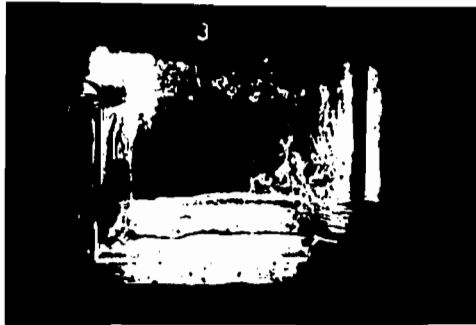


FOTO 1

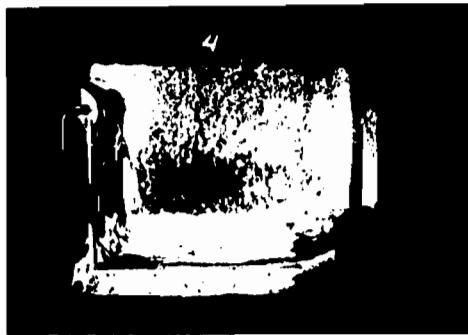
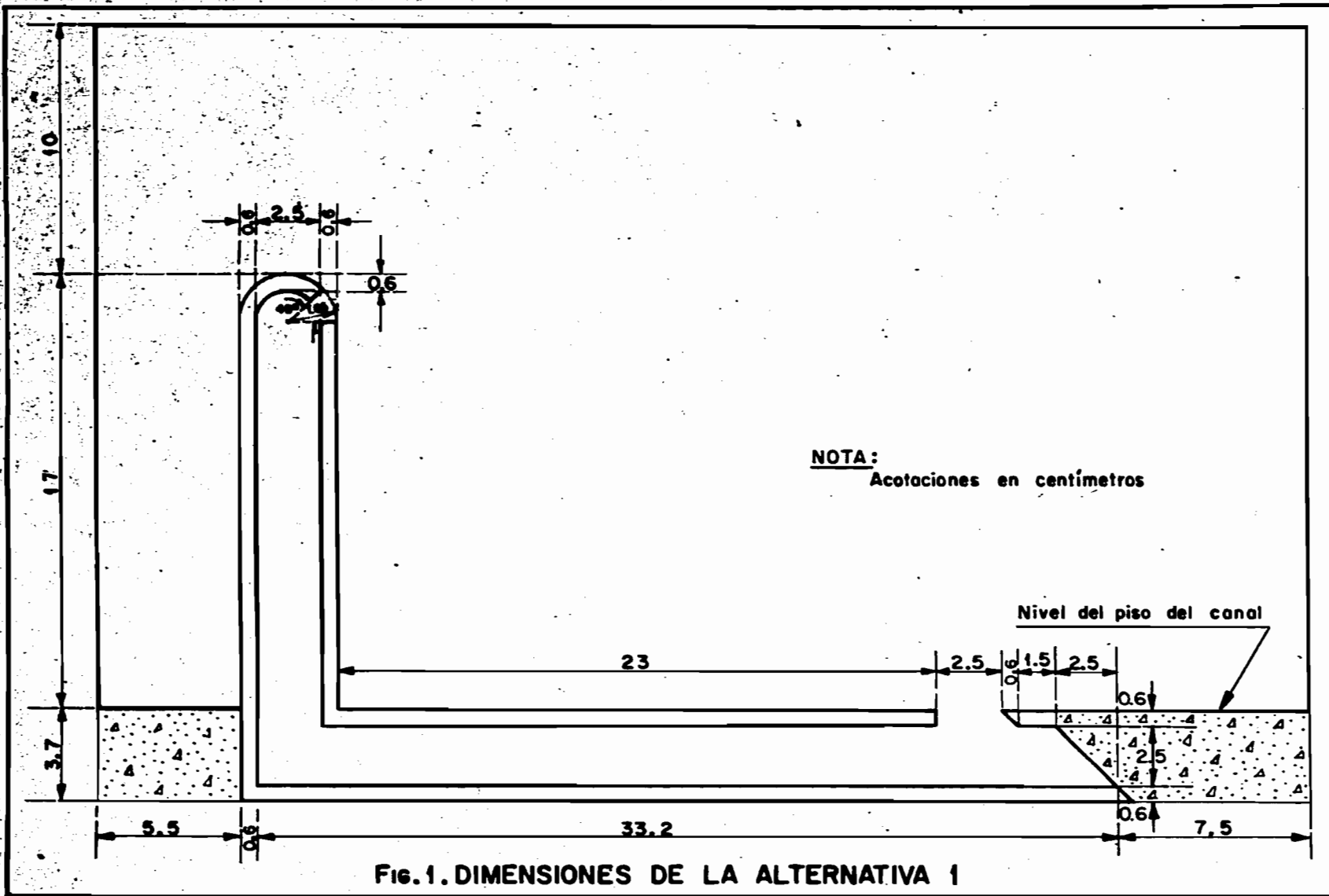


FOTO 2

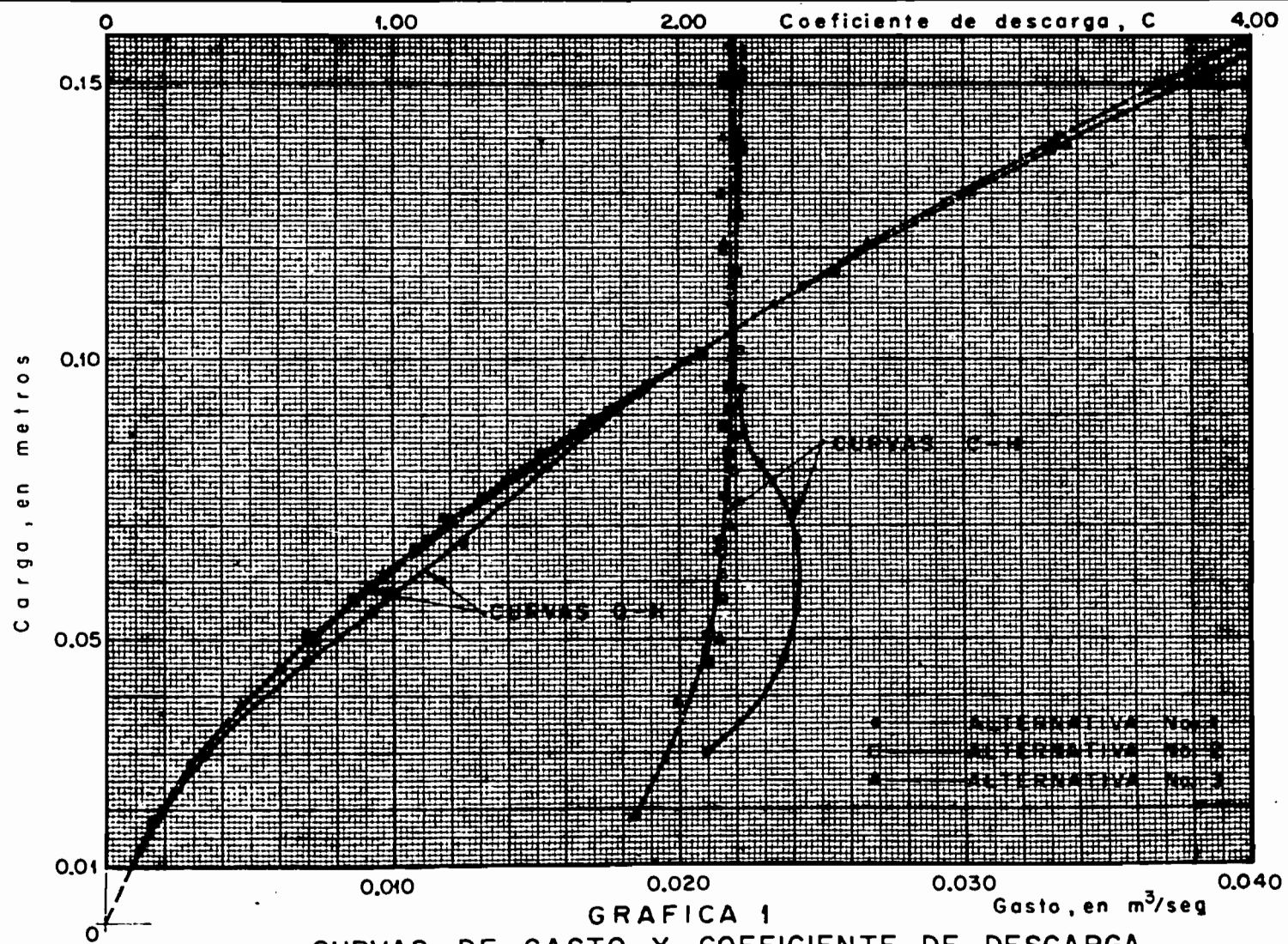


FOTO 3

BIBLIOTECA DE LA  
DIVISION DEL DOCTORADO







ción tan bruscos con los cuales se había proyectado.

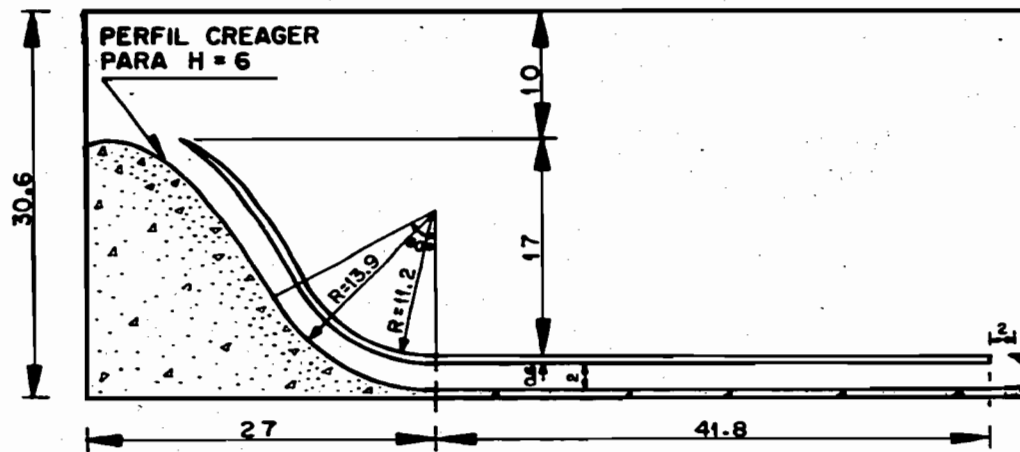
Se pensó que el rendimiento aumentaría, si se hiciera una forma de entrada más adecuada y a su vez que el cambio de dirección fuese gradual. Se proyectó así la Alternativa 2 en un vertedor con perfil Creager para una carga de diseño de 6 cm. El sifón tenía un ancho de 2 cm y se ajustaba al perfil del vertedor, con un cambio de dirección gradual y un radio al eje del sifón de 12.9 cm y finalmente una rama horizontal de 41.8 cm de longitud que descargaba nuevamente en la corriente aguas abajo del vertedor, a través de una segunda ranura.

En la figura 2 se presentan las dimensiones de esta alternativa, en la cual puede verse que el desnivel entre la cresta del cimacio y el piso del canal es el mismo que el de la alternativa 1.

Al ensayarse la alternativa 2 se observó de inmediato una mejoría considerable en el funcionamiento, al mantenerse un salto hidráulico estable hasta con una carga de 6 cm que corresponde a un gasto de 9.5 lt/s con un "barrido" parcial del salto con una carga de 7.5 cm a partir la cual el salto desaparecía, propagándose el escurrimiento rápido en todo el canal aguas abajo. Conviene aclarar que en ningún caso se forzó a que el tirante en el canal tuviera algún valor específico, pues éste era el que resultaba de las condiciones naturales del escurrimiento producidas por la caída brusca, en el extremo aguas abajo.

En la foto 3 se muestra el vertedor al funcionar con una carga de 6 cm que es la condición en que se presenta resalto claro. En la gráfica 1 aparecen las curvas de gasto y coeficiente de descarga del vertedor para la alternativa 2.- Obsérvese que el coeficiente es siempre creciente hasta un máximo de 2.26.

A pesar de que con los resultados obtenidos de la alternativa 2, se había logrado comprobar que las ideas supuestas eran correctas, se



**NOTA:**  
Acotaciones en centímetros

**FIG.2. DIMENSIONES DE LA ALTERNATIVA 2**

pensó en una mejoría adicional si el cambio de dirección en la zona de descarga del sifón era menos brusca, de tal manera que la pérdida de carga por salida se redujera a un mínimo.

Con esta idea, se modificó la salida por medio de curvas circulares de tal modo que el chorro descargara con un ángulo de  $45^{\circ}$  respecto a la horizontal. Las modificaciones hechas se presentan en la figura 3.

Los resultados obtenidos en el ensayo de esta alternativa que llamaremos con el número 3, demostraron una vez más una gran mejoría en el funcionamiento, ya que se logró un salto muy estable hasta con una carga de 12.5 cm, a partir de la cual se empezaba a presentar un salto parcial inestable hasta con una carga de 15.4 cm que, al ser rebasada, propiciaba que el escurrimiento rápido se propagara en todo el canal aguas abajo.

Nuevamente en este caso, no fue forzado el tirante del canal, teniendo incluso valores inferiores al conjugado mayor.

En la foto 4 el modelo funciona con una carga de 12.5 cm que es la última condición para la cual se presentaba el resalto completo. En la foto 5 el modelo funciona con una carga de 15.4 cm, que era la última con la cual se presenta un resalto incompleto con fases alternativas de corrimiento y retroceso.

Las curvas de gasto y coeficiente de descarga están dibujadas en la gráfica 1 para la alternativa 3, con un máximo en C de 2.19.

Por medio de piezómetros colocados en el sifón y con un limnómetro de punta se determinaron las alturas piezométricas en el interior del sifón y el perfil de la superficie del agua para la carga de 12.5 cm con la cual se presenta la condición de resalto claro y aparecen dibujadas en la figura 4, en la cual se ve que el tirante medio en el canal aguas abajo es de 13.6 cm, el cual es inferior al tirante conjugado mayor en el salto.

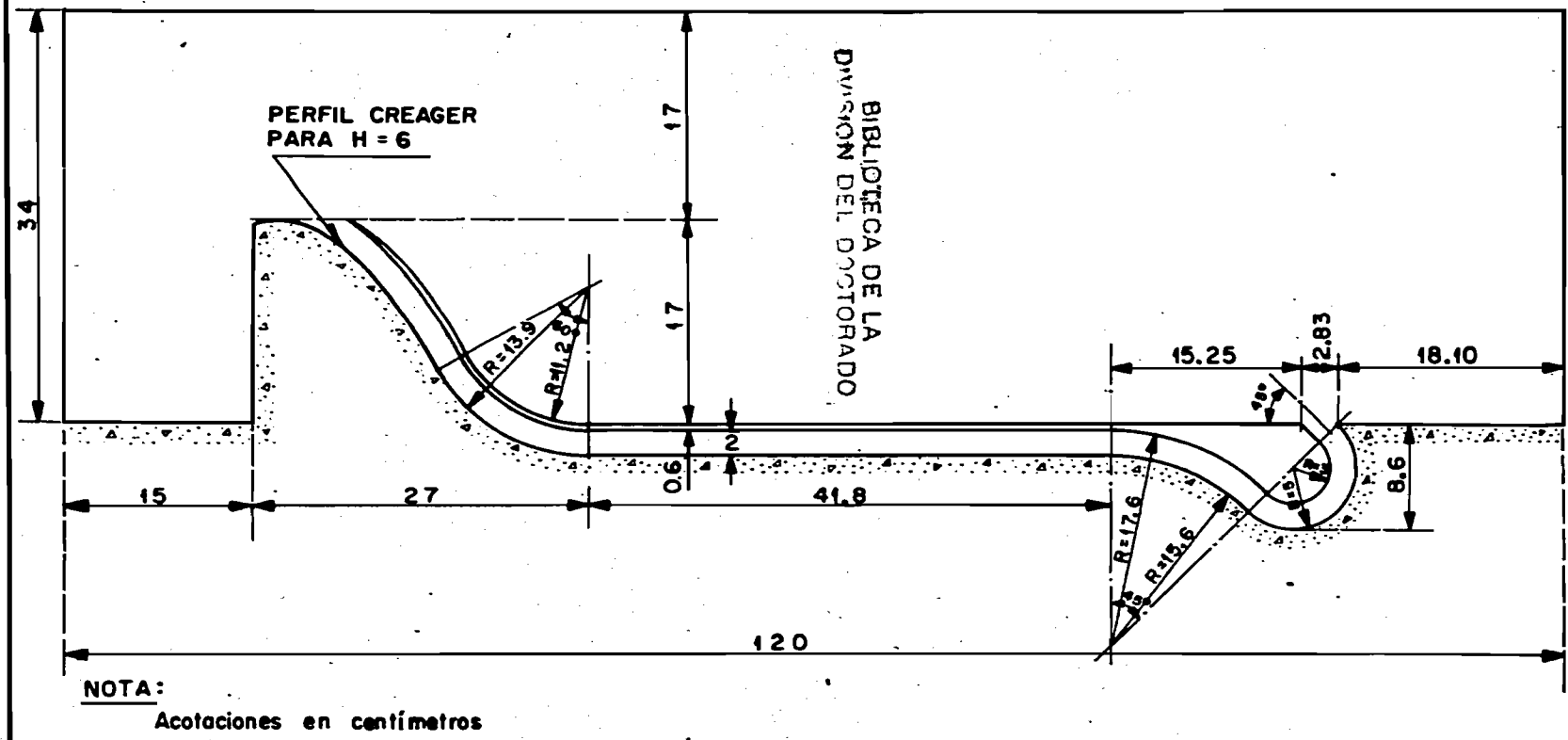


Fig.3. DIMENSIONES DE LA ALTERNATIVA 3

BIBLIOTECA DE LAS DIVISIONES  
DE INGENIERIA  
RADO DE INGENIERIA

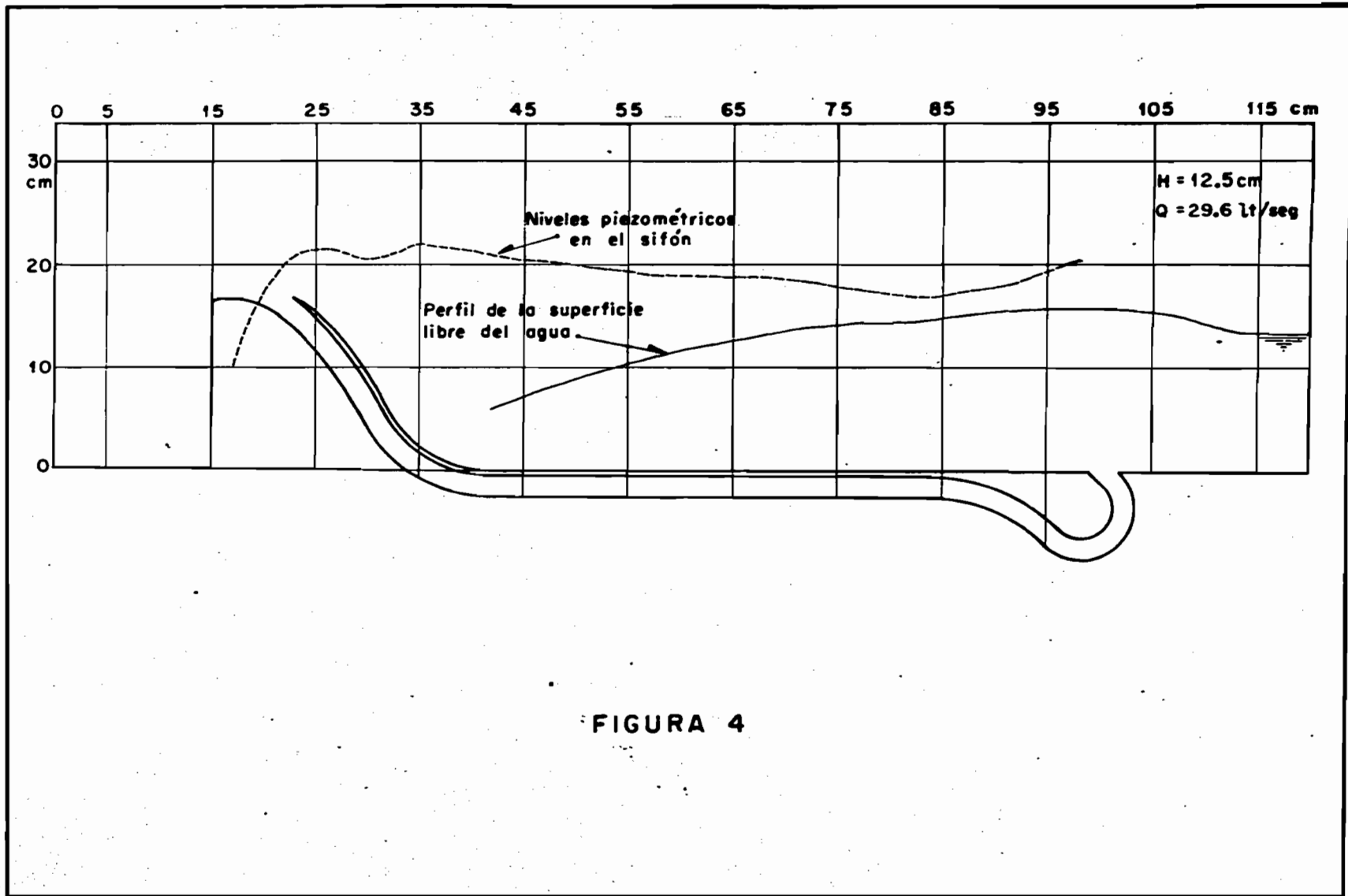


FIGURA 4

Con el fin de lograr que el salto fuera estable aun con cargas superiores a 12.5 cm, se colocó una compuerta en el extremo aguas abajo del canal, con la cual se forzó a un tirante que formara el salto, lo cual fue posible aun con la carga máxima de 15.4 cm.

En la foto 6 se presenta el modelo con una carga de 15.4 cm, al forzarse el salto con dicha compuerta. Compárese esta foto con la 5.

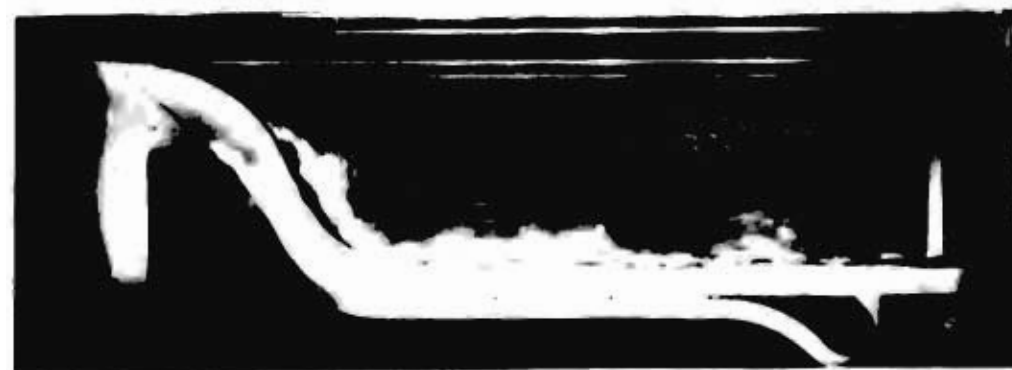
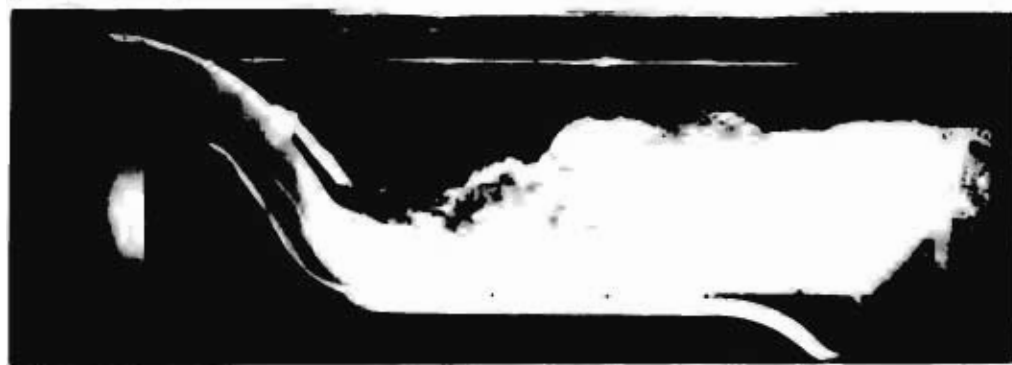
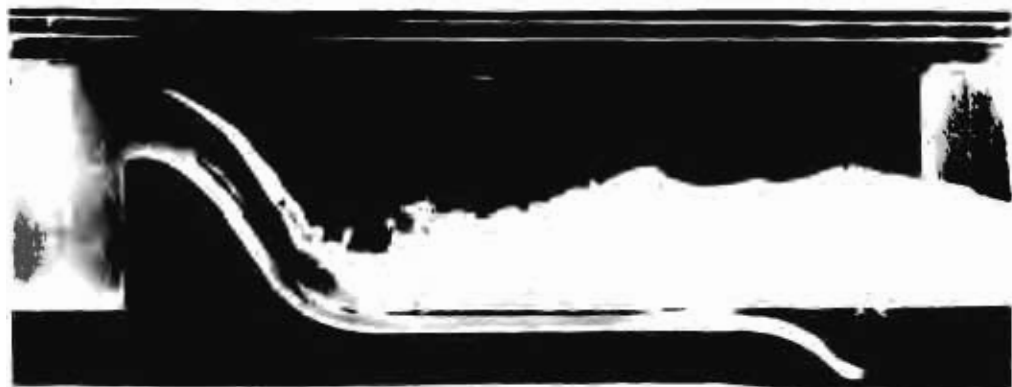
Finalmente se quiso observar la eficiencia de esta alternativa al colocar un pedazo de madera de sección triangular, que cerrara la entrada del sifón, sin permitir escurrimiento inferior. Se notó de inmediato que, para cualquier carga, la formación del salto era imposible al existir un corrimiento hacia aguas abajo aun para cargas pequeñas.

En la foto 7 se presenta el modelo con el sifón obturado, para el mismo gasto que produciría una carga de 12.5 cm si no se hubiera cerrado la entrada del sifón. Compárese esta foto con la 4.

#### b.- OBJETO DEL NUEVO ESTUDIO

Conviene aclarar que la idea inicial de conseguir simultáneamente a la barrera hidráulica, un aumento muy considerable de eficiencia de la estructura vertedora por aspiración de la capa límite, no ha podido realizarse, en cuanto al reemplazar el paramento vertical de la Alternativa 1 por los inclinados de las Alternativas 2 y 3, se perdió la oportunidad de crear una depresión apreciable en la lámina vertiente. Comprobación clara de éste hecho la tenemos en las curvas de coeficiente de descarga que aparecen en la gráfica 1, de las cuales sólo la primera alcanza valores netamente superiores a los normales.

Sin embargo, las pruebas señaladas en el inciso anterior permitieron cerciorarse de la aplicabilidad de las ideas expresadas y unificar el criterio para ensayos posteriores y concluir además que una estructura con las características antes anotadas, sería la solución a una serie de pro-





blemas que con mucha frecuencia se presentan en la disipación de energía.

Los modelos han permitido demostrar, que es posible forzar a un salto hidráulico en circunstancias tan adversas como la de no tener la garantía de que aguas abajo se presente determinado tirante, caso muy frecuente en algunos disipadores.

Ante esta perspectiva, el problema amerita la elaboración de una teoría que explique el fenómeno y permita dar toda la generalidad posible, no sólo en la disipación de la energía al pie de vertedores, sino también para todas aquellas estructuras que presenten el mismo problema.

Dicha teoría estaría basada en la aplicación simultánea de las leyes de impulso, de continuidad y del teorema de Bernoulli; con la cual puedan hacerse cálculos teóricos que posteriormente se comprueben en el Laboratorio.

Los parámetros más importantes han resultado ser el número de Froude antes del salto, la dimensión transversal del sifón y el tirante en el canal aguas abajo, con la cual la investigación se reduce a la variación de estos parámetros.

Sin embargo, como en el modelo de que se disponía no era posible conseguir la totalidad de conclusiones, se resolvió construir un cuarto modelo que tuviera toda la flexibilidad deseada y con el cual se comprobaron los resultados teóricos y a su vez el método de diseño que permitiera el control del fenómeno.

## CAPITULO II

### TEORIA DEL FUNCIONAMIENTO

#### a.- ECUACIONES FUNDAMENTALES Y SU EMPLEO EN PROBLEMAS SIMILARES.

Es bien conocido, que las condiciones de un salto hidráulico son tales, que las leyes de impulso y continuidad y el teorema de Bernoulli pueden ser convenientemente usadas para analizar el problema con el método unidimensional y que además los resultados teóricos han sido comprobados, en multitud de casos, mediante pruebas de Laboratorio.

En el método de análisis unidimensional, se ignora la variación de las características del escurrimiento a través de cualquier sección y se presta atención solamente al cambio de los valores medios en la dirección del flujo.

Con el fin de valuar adecuadamente la magnitud de los errores que pueden resultar de este método es necesario observar cuidadosamente la derivación de las relaciones correspondientes.

Con referencia a la figura 4', la ecuación de continuidad, permanece la misma cuando se escribe en términos de la velocidad media para el tubo de flujo mayor. Esto es:  $Q = \int_A v dA = V_1 A_1 = V_2 A_2 \dots (1)$

En la cual  $v$  es la velocidad en cada punto y  $V$  la media en la sección.

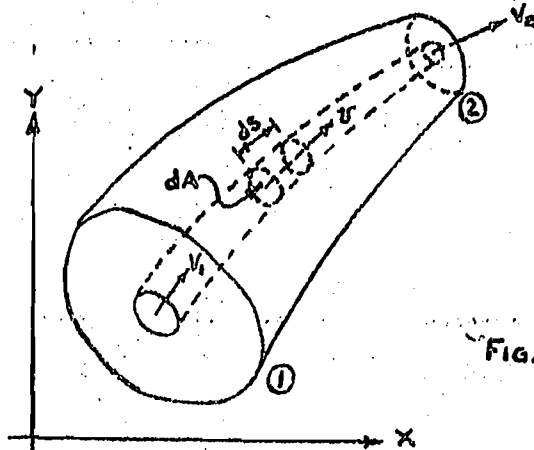


Fig. 4'

Por otra parte, puesto que la ecuación de Energía y del Impulso, envuelven diferentes potencias de la velocidad media, a la vez podría anticiparse que al reemplazar la media de las potencias por la potencia de la media se introduciría algún error, aún si no fueran involucradas otras aproximaciones. De este modo, de la integración de la 2a ley de Newton, podría establecerse la ecuación del Impulso.

$$\Sigma F_x = \frac{\rho}{g} \int_Q [(u_x)_2 - (u_x)_1] dQ$$

en la cual el 1o. miembro representa la suma de las fuerzas externas en la dirección X, ejercidas sobre el cuerpo del líquido en estudio (esto es, por la acción de la gravedad, por la frontera y por el líquido, antes y después de las dos secciones extremas) lo cual, para su valuación, requiere un conocimiento detallado de su distribución.

Si las dos secciones extremas están localizadas adecuadamente, en zonas de flujo uniforme antes y después de las secciones 1 y 2, el procedimiento de valuación puede ser simplificado a la forma:

$$\Sigma F_x = \frac{\rho}{g} Q [(\beta V_x)_2 - (\beta V_x)_1] \quad (2)$$

*Depositar la velocidad por*

en la cual el coeficiente  $\beta$  representa un factor de corrección para compensar el uso de la velocidad media y vale:

$$\beta = \frac{1}{A} \int_A \left(\frac{v}{V}\right)^2 dA \quad (3)$$

Nótese que dicho coeficiente será siempre positivo ya que la relación  $\left(\frac{v}{V}\right)^2$  es positiva aun en el caso de zonas de flujo invertido.

Finalmente, de la integración en el cuerpo en estudio de la ecuación de trabajo y energía, podría deducirse que:

$$\int_Q (p_1 + \rho z_1 - p_2 - \rho z_2) dQ = \frac{\rho}{2g} \int_Q (v_2^2 - v_1^2) dQ$$

*Claro está por qué*

Como en el caso anterior, ésta ecuación exige para su integración, un conocimiento detallado de la distribución de presiones y velocidades sobre las dos secciones extremas. Sin embargo, si cada sección está localizada adecuadamente en una zona de flujo uniforme, la ecuación anterior se transforma en la llamada ecuación de Bernoulli :

$$\alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho} + Z_1 = \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho} + Z_2 \quad (4)$$

en la cual  $\alpha$  es un factor de corrección para compensar el uso de la velocidad media :

$$\alpha = \frac{1}{A} \int_A \left( \frac{v}{V} \right)^3 dA \quad (5)$$

La valuación de los factores  $\alpha$  y  $\beta$  requiere obviamente, un conocimiento a priori de la distribución de velocidades a través de cada sección extrema.

En el caso de un tubo circular con régimen laminar, en el cual la distribución es de tipo parabólico,  $\beta$  vale 1.33 y  $\alpha = 2$ .

Por otra parte, es fácil deducir, que en el caso de una distribución uniforme de velocidades en la sección,  $\alpha = \beta = 1$ , se llega entonces las ecuaciones de Impulso y de Bernoulli comúnmente usadas. Sin embargo se ha visto, que en el caso de existir zonas de separación, ambos coeficientes pueden llegar a ser muy grandes. (?)

De este modo, conviene hacer notar, que el considerar  $\alpha = \beta = 1$  como lo haremos posteriormente, acarrea un cierto error cuya magnitud por el momento no es posible precisar, máxime si se considera que en el problema planteado, pueden existir tales zonas de separación. Por tanto es de esperarse que los resultados teóricos no concuerden exactamente con los experimentales habiendo necesidad de hacer correcciones posteriores, que se espera sean de pequeña magnitud.

b.- ECUACIONES QUE RIGEN EL FENOMENO Y SUS LIMITACIONES

La estructura por analizar puede considerarse representada esquemáticamente en la figura 5 con el canal de sección rectangular.

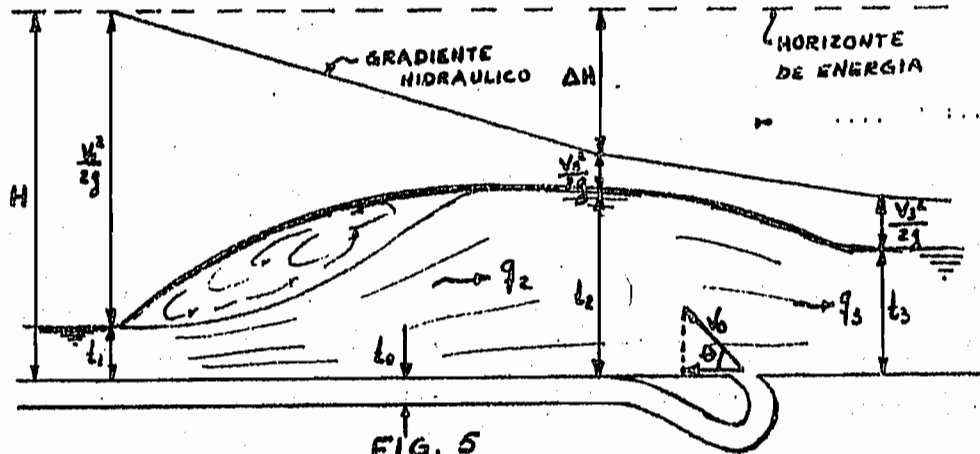


FIG. 5

Consideremos que  $q_0$  es el gasto unitario en el sifón,  $q_2$  el gasto unitario en la zona del salto y  $q_3$  el gasto unitario aguas abajo de la estructura, la ecuación de continuidad establece.

$$q_3 = q_0 + q_2 \quad (6)$$

Por otro lado, si  $t_0$  representa la dimensión transversal del sifón,  $\Delta H$  la diferencia de energía entre las secciones (1) y (2) y  $K$  una constante en la cual se incluyen las pérdidas de carga en el sifón, puede escribirse del teorema de Bernoulli.

$$q_0 = K \sqrt{g} t_0 \sqrt{\Delta H} \quad (7)$$

Y además, si  $t_2, V_2$  y  $t_3, V_3$  representan los tirantes y velocidades en las secciones (2) y (3) respectivamente y  $V_0$  la velocidad de descarga del sifón, se tendría de la aplicación de la ley del Impulso:

$$\frac{1}{2} (t_2^2 - t_3^2) - \frac{q_0}{g} (V_0 \cos \theta + V_3) = \frac{q_2}{g} (V_3 - V_0) \quad (8)$$

$$t_2 = \frac{t_1}{2} (\sqrt{1 + \theta F_1^2} - 1) \quad (9)$$

en donde  $F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g t_1}}$  es el número de Froude en la sección 1. Finalmente de la ecuación de continuidad.

$$V_0 = \frac{q_0}{t_0} \quad (10a)$$

$$V_1 = \frac{q_1}{t_1} \quad (10b)$$

$$V_2 = \frac{q_2}{t_2} \quad (10c)$$

$$V_3 = \frac{q_3}{t_3} \quad (10d)$$

Al sustituir las ecuaciones (10) en la ecuación (8) y agrupar términos se tiene :

$$\frac{1}{2}(t_1^2 - t_3^2) - \frac{q_0^2}{g t_0} \cos \theta - \frac{q_0 q_3}{g t_3} = \frac{q_1 q_3}{g t_3} - \frac{q_1^2}{g t_2}$$

Al tener de (6) que  $q_0 = q_3 = q_2$ , la ecuación anterior puede escribirse.

$$\frac{1}{2}(t_1^2 - t_3^2) - \frac{\cos \theta}{g t_0} (q_3 - q_1)^2 - \frac{q_3}{g t_3} (q_3 - q_1) = \frac{q_1 q_3}{g t_3} - \frac{q_1^2}{g t_2}$$

Al desarrollar, los paréntesis y simplificar:

$$\frac{1}{2}(t_1^2 - t_3^2) - \frac{\cos \theta}{g t_0} q_1^2 - \frac{\cos \theta}{g t_0} q_2^2 + \frac{2 \cos \theta}{g t_0} q_1 q_2 - \frac{q_1^2}{g t_3} + \frac{q_1^2}{g t_2} = 0$$

Agrupando términos se tiene :

$$\frac{1}{2}(t_1^2 - t_3^2) - \left(\frac{\cos \theta}{g t_0} + \frac{1}{g t_3}\right) q_1^2 + \left(\frac{1}{g t_2} - \frac{\cos \theta}{g t_0}\right) q_1^2 + \frac{2 \cos \theta}{g t_0} q_1 q_2 = 0$$

Al sustituir nuevamente  $q_2$  y  $q_3$  obtenidos de (10 b) y (10 d) se tiene :

$$\frac{1}{2}(t_1^2 - t_3^2) - \left(\frac{\cos \theta}{t_0} + \frac{1}{t_3}\right) \frac{V_1^2 t_1^2}{g} + \left(\frac{1}{t_2} - \frac{\cos \theta}{t_0}\right) \frac{V_1^2 t_1^2}{g} + 2 \frac{\cos \theta}{g t_0} V_3 t_3 V_1 t_1 \quad (11)$$

*hacer  
desarrollar  
el desarrollo*

Por otro lado, al sustituir (10 b), (10 d) y (7) en (6) y despejar

$V_3$

$$V_3 = K\sqrt{g}\sqrt{\Delta H} \frac{t_0}{t_3} + V_1 \frac{t_1}{t_3} \quad (12)$$

Al sustituir (12) en (11) y simplificar

$$\frac{t_1^2}{8} (2 + 8F_1^2) - \frac{t_1^2}{4} \sqrt{1 + 8F_1^2} - \frac{t_3^2}{2} - K^2 t_0 \Delta H \cos \theta - \frac{V_1^2}{g} \frac{t_1^2}{t_3}$$

$$- \frac{2V_1 t_1}{\sqrt{g} t_3} K t_0 \sqrt{\Delta H} - \frac{t_0^2}{t_3} K^2 \Delta H + \frac{2V_1^2 t_1}{g(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)} = 0$$

Dividamos ambos miembros entre  $t_1^2$  y consideremos que  $V_1^2 = F_1^2 g t_1$

Con ello se tiene :

$$\left( \frac{1}{4} + F_1^2 - \frac{\sqrt{1 + 8F_1^2}}{4} + \frac{2F_1^2}{\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{t_3}{t_1} \right)^2 - K^2 \frac{t_0}{t_1} \frac{\Delta H}{t_1} \cos \theta$$

$$- F_1^2 \left( \frac{t_1}{t_3} \right) - \frac{2V_1}{\sqrt{g} t_1 t_3} K t_0 \sqrt{\Delta H} - \frac{K^2 t_0^2}{t_1^2} \frac{\Delta H}{t_3} = 0 \quad (13)$$

Además  $\Delta H = H - t_2 - \frac{V_2^2}{2g}$  y siendo  $H = t_1 + \frac{V_1^2}{2g}$

Se tiene  $\Delta H = t_1 - t_2 + \frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g}$

pero:  $\frac{V_2^2}{2g} = \frac{V_1^2 t_1^2}{2g t_3^2}$

por lo cual  $\Delta H = t_1 - t_2 + \frac{V_1^2}{2g} \left( 1 - \frac{t_1^2}{t_3^2} \right) \quad (14)$

Si sustituimos (9) en (14) y simplificamos

$$\Delta H = \frac{1}{2} \left[ \frac{3 + F_1^2 - \sqrt{1 + 8F_1^2}}{2} - \frac{2F_1^2}{(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)^2} \right] \quad (15)$$

Al sustituir (15) en (13) y multiplicar por -1 resulta:

$$\begin{aligned} & \left( -\frac{1}{4} - F_1^2 + \frac{\sqrt{1 + 8F_1^2}}{4} - \frac{2F_1^2}{\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{t_3}{t_1} \right)^2 + F_1^2 \left( \frac{t_1}{t_3} \right) \\ & + K^2 \frac{t_0}{t_1} \left[ \frac{3 + F_1^2 - \sqrt{1 + 8F_1^2}}{2} - \frac{2F_1^2}{(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)^2} \right] \cos \theta \\ & + 2K \frac{t_0}{t_3} F_1 \left[ \frac{3 + F_1^2 - \sqrt{1 + 8F_1^2}}{2} - \frac{2F_1^2}{(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)^2} \right]^{1/2} \\ & + K^2 \frac{t_0}{t_1} \frac{t_0}{t_3} \left[ \frac{3 + F_1^2 - \sqrt{1 + 8F_1^2}}{2} - \frac{2F_1^2}{(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)^2} \right] = 0 \quad (16) \end{aligned}$$

Si se hace

$$-\alpha = \frac{\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1}{4} - F_1^2 - \frac{2F_1^2}{\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1}$$

al simplificar se obtiene que:

$$\alpha = \left( F_1^2 + \frac{1}{2} \right) \quad (17)$$

y si

$$\beta = \frac{3 + F_1^2 - \sqrt{1 + 8F_1^2}}{2} - \frac{2F_1^2}{(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)^2}$$

que puede también escribirse :

$$\beta = \frac{3(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)^2 + F_1^2(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)^2 - \sqrt{1 + 8F_1^2}(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)^2 - 4F_1^2}{2(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)^2}$$

Por otra parte :

$$(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)^2 = 2 + 8F_1^2 - 2\sqrt{1 + 8F_1^2} \quad (18)$$



que al sustituir en la expresión anterior resulta:

$$\beta = \frac{6 + 24 F_1^2 - 6\sqrt{1+8F_1^2} + 2F_1^2 + 8F_1^4 - 2F_1^2\sqrt{1+8F_1^2}}{2(\sqrt{1+8F_1^2}-1)^2} + \frac{-2\sqrt{1+8F_1^2} - 8F_1^2\sqrt{1+8F_1^2} + 2 + 16F_1^2 - 4F_1^4}{2(\sqrt{1+8F_1^2}-1)^2}$$

Al simplificar se obtiene:

$$\beta = \frac{8 + 38F_1^2 - 10F_1^2\sqrt{1+8F_1^2} - 8\sqrt{1+8F_1^2} + 8F_1^4}{2(\sqrt{1+8F_1^2}-1)^2}$$

Agrupando términos :

$$\beta = \frac{(4 + 5F_1^2)(2 + 8F_1^2 - 2\sqrt{1+8F_1^2}) - 4F_1^2 - 32F_1^4}{2(\sqrt{1+8F_1^2}-1)^2}$$

Al simplificar, tomando en cuenta (18) se tiene que:

$$\beta = 2 + \frac{5}{2} F_1^2 - \frac{2F_1^2 + 16F_1^4}{(\sqrt{1+8F_1^2}-1)^2} \quad (19)$$

Además, si se hace

$$\epsilon = \frac{t_3}{t_1} \\ \delta = \frac{t_0}{t_1}$$

BIBLIOTECA DE LA  
DIVISION DEL DOCTORADO

resulta que

$$\frac{t_0}{t_3} = \frac{\delta}{\epsilon} ; \frac{t_0}{t_1} \frac{t_0}{t_3} = \frac{\delta^2}{\epsilon}$$

Por lo tanto, la ecuación (16) puede escribirse en la forma :

$$\epsilon^3 + 2(K^2 \beta \delta \cos \theta - \alpha) \epsilon + 2(F_1^2 + 2KF_1 \beta^{1/2} \delta + K^2 \beta \delta^2) = 0 \quad (20)$$

La ecuación (20) es la que rige el fenómeno y en ella se observa la dependencia, del parámetro adimensional  $\epsilon$ , con los parámetros también adimensionales,  $F_1$  y  $\delta$ . En dicha ecuación, la raíz positiva de  $\epsilon$  puede obtenerse a partir de la fórmula de Tartaglia Cardano que es :

$$\epsilon = \left[ \left( \frac{q^2}{4} + \frac{P^3}{27} \right)^{1/2} - \frac{q}{2} \right]^{1/3} + \left[ - \left( \frac{q^2}{4} + \frac{P^3}{27} \right)^{1/2} - \frac{q}{2} \right]^{1/3} \quad (20)'$$

en la cual

$$\begin{aligned} P_0 &= 2(K^2\beta\delta \cos\theta - \alpha) \\ q &= 2(F_1^2 + 2K F_1 \beta^{1/2}\delta + K^2\beta\delta^2) \end{aligned}$$

o bien se puede despejar  $\delta$ , si se multiplica miembro a miembro la ecuación (19)

por  $\frac{\epsilon}{K^2\beta}$

$$\delta = -\left(\frac{\epsilon \cos\theta}{2} + \frac{F_1}{K\beta^{1/2}}\right) + \sqrt{\left(\frac{\epsilon \cos\theta}{2} + \frac{F_1}{K\beta^{1/2}}\right)^2 - \left(\frac{0.5\epsilon^3 + F_1^2 - \alpha\epsilon}{K^2\beta}\right)} \quad (21)$$

Conviene aclarar que en estas ecuaciones (20') y (21) debe usarse la raíz positiva de  $\beta$ , ya que esta proviene de la ecuación (15) y por razones físicas  $\sqrt{\Delta H}$  debe ser positiva, de acuerdo con la ecuación (12).

Límites de aplicación.- Por lo expresado en la deducción de la ecuación (20), ésta puede tabularse para cada combinación de valores de  $\delta$  y  $F_1$ , con lo cual es posible dibujar una familia de curvas cuyo parámetro sea  $\delta$  y que representarían la solución del problema.

Las limitaciones físicas pueden establecerse, como sigue. En primer lugar, se debe cumplir:

$$\begin{aligned} \delta &\geq 0 \\ F_1 &> 1 \\ \epsilon &> 0 \end{aligned}$$

pues por una parte, valores negativos para  $\delta$ ,  $F_1$ ,  $\epsilon$  no tienen sentido físico y por otra parte con valores de  $F_1$  dentro del rango  $0 < F_1 \leq 1$ , se caería en el caso de régimen tranquilo para el escurrimiento de aguas arriba, sin existir la posibilidad del resalto.

De acuerdo con esto, como límite superior de la ecuación (20) podemos fijar aquella para la cual  $\delta = 0$ , ó sea que  $t_0 = 0$ . Es decir, que para esta condición debiera presentarse el resalto claro, esto es que :

$$\epsilon = \frac{\sqrt{1+8F_1^2} - 1}{2}$$

por lo cual

$$F_1^2 = \frac{(2\epsilon + 1)^2 - 1}{8} \quad (22)$$

y al sustituir (22) en (17)

$$\alpha = \frac{\epsilon^2 + \epsilon + 1}{2} \quad (23)$$

Así en la ecuación (20) al hacer  $\delta=0$ , se obtiene:

$$\epsilon^3 - 2\alpha\epsilon + 2F_1^2 = 0$$

Esta ecuación debe verificarse al sustituir (22) y (23).

En efecto se tiene :

$$\epsilon^3 - \epsilon^3 - \epsilon^2 - \epsilon + \epsilon^2 + \epsilon = 0$$

Por otra parte, en la ecuación (20) puede asegurarse en primer lugar, que existe por lo menos una raíz real positiva en  $\epsilon$  ó bien  $\beta$ , con la posibilidad de que una ó dos de ellas sean negativas. Por lo dicho anteriormente, habrá que descartar entonces las negativas en el caso de que éstas existan.

Finalmente, los resultados experimentales indicarán cual debe ser la raíz correcta que debe utilizarse.

#### c) SISTEMATIZACION DEL CALCULO Y RESULTADOS

Con el fin de poder comprobar la teoría experimentalmente, hay que tabular la ecuación (20) para diferentes valores de  $F_1$ , con  $\delta$  como un parámetro.

Toda vez que la comprobación sólo es posible para el modelo particular ensayado, ya que la solución depende de la geometría del sifón (valores de  $\theta$  y  $K$ ), conviene señalar que los resultados que se obtengan en este inciso sólo valen para esta estructura.

A reserva de que posteriormente se aclare el parqué de la elección de la geometría del modelo, se indicarán los siguientes datos, que fueron utilizados para el

-C)-

cálculo de la constante K del sifón :  $\theta = 45^\circ$  ;  $\cos \theta = 0.7071$

Pérdida por entrada :  $h_e = 0.02 \frac{V_0^2}{2g}$

Pérdida por codos.- En el caso de codos de sección rectangular, pueden usarse los coeficientes de pérdida, obtenidos por Wirt (2), que dependen de las relaciones  $B/t_0$  y  $R/t_0$  para codos a  $90^\circ$  de acuerdo con la tabla siguiente:

$B/t_0$	6	6	6	3	3	3
$R/t_0$	1.67	1	0.67	1.67	1	0.67
$K_{c90^\circ}$	0.09	0.16	0.38	0.15	0.22	0.55

Para codos diferentes de  $90^\circ$  estos coeficientes se multiplican por la relación  $\alpha/90^\circ$ . Para el modelo:  $B/t_0$  es 10 y haciendo la extrapolación correspondiente:

	$R/t_0$	$\alpha$	$K_{c90^\circ}$	$\eta_c$	$K_c$
Codo 1	$\frac{32.55}{4} = 8.14$	$45^\circ$	0.02	0.5	0.01
Codo 2	$\frac{8}{4} = 2$	$180^\circ$	0.04	2	0.08

$$h_c = 0.09 \frac{V_0^2}{2g} \quad 0.09$$

En estos cálculos  $R$  = Radio del codo;  $\alpha$  = ángulo central  $t_0$  = mínima dimensión transversal el plano del codo y  $B$  = ancho del conducto.

Pérdida por fricción.- Se usará la fórmula de Manning:  $h_f = \frac{29L n^2}{r^{4/3}} \frac{V_0^2}{2g}$  en donde  $L$  longitud del sifón,  $r$  radio hidráulico y  $n$  coeficiente de rugosidad.

$$L = 3.94 + 0.255 + 0.251 = 4.446 \text{ m}$$

$$r = \frac{t_0}{2} = 0.02 \text{ m} ; r^{4/3} = 0.00542$$

$$n = 0.007 ; n^2 = 0.000049$$

$$h_f = \frac{19.62 \times 4.446 \times 0.000049}{0.00542} \frac{V_0^2}{2g}$$

$$h_f = 0.79 \frac{V_0^2}{2g}$$

La suma de pérdidas por fricción y menores es :

$$\Sigma h = (0.02 + 0.09 + 0.79) \frac{V_0^2}{2g}$$

$$\Sigma h = k_1 \frac{V_0^2}{2g} = 0.90 \frac{V_0^2}{2g}$$

En donde  $k_1 = 0.90$  es el coeficiente de pérdida por fricción y menores .

Al establecer el Teorema de Bernoulli para el sifón, se tendría :

$$\Delta H = \Sigma h + \frac{|\Delta \vec{V}|^2}{2g}$$

en la que  $\frac{|\Delta \vec{V}|^2}{2g}$  representa la pérdida de carga por salida. La diferencia vectorial  $\Delta \vec{V}$  debe determinarse como se indica en la figura 6, ó sea que vale :

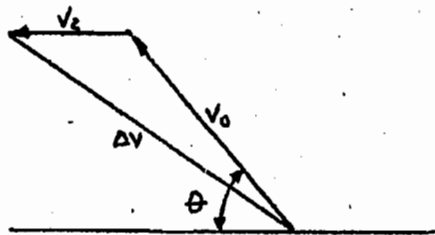


FIG. 6.

$$\frac{|\Delta \vec{V}|^2}{2g} = \frac{V_0^2}{2g} + \frac{V_2^2}{2g} + 2 \frac{V_0 V_2}{2g} \cos \theta$$

y por tanto

$$\Delta H = (1 + k_1) \frac{V_0^2}{2g} + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{2 V_0 V_2 \cos \theta}{2g}$$

Por otra parte, para cada condición de funcionamiento, se deberá tener una relación de tipo

$$p = \frac{V_2}{V_0}$$

Con lo cual la expresión anterior se podría escribir como sigue:

$$\Delta H = (1 + k_1) \frac{V_0^2}{2g} + p^2 \frac{V_0^2}{2g} + 2 p \frac{V_0^2}{2g} \cos \theta$$

Al agrupar términos :

$$\Delta H = (k_1 + 1 + p^2 + 2 p \cos \theta) \frac{V_0^2}{2g}$$

Al despejar  $V_0$  se tendría :

$$V_0 = \sqrt{\frac{2}{1 + k_1 + p^2 + 2 p \cos \theta}} \sqrt{g} \sqrt{\Delta H}$$

con lo cual

$$q_0 = K \sqrt{g} t_0 \sqrt{\Delta H} \quad (25)$$

en donde

$$K = \sqrt{\frac{2}{1 + k_1 + p^2 + 2p \cos \theta}} \quad (26)$$

La ecuación (26) permite determinar el valor de K, conocidos los coeficientes de pérdida por fricción, menores, el ángulo  $\theta$  y la relación de velocidades  $p$  que cambiará con las condiciones hidráulicas del fenómeno.

Supongamos que como una primera aproximación  $V_2$  fuera despreciable respecto de  $V_0$ , ello ocasionaría que  $p = 0$  y por lo tanto al sustituir  $k_1 = 0.90$  se tendría que  $K = 1.025$ . Con ello se queda del lado inseguro al imponer al sifón una eficiencia superior a la verdadera, lo cual sería en detrimento de la aproximación de la teoría.

Por otra parte, el tratar de introducir a  $p$  como una variable, los cálculos resultarían muy complicados al tabular.

Para evitar estas complicaciones, se puede hacer las siguientes consideraciones. En forma aproximada, se puede escribir que :

$$V_0 = \sqrt{2g} \sqrt{\Delta H} \quad (27)$$

$$V_1 = \sqrt{2g} \sqrt{H} \quad (28)$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{t_2}{t_1} \quad (29)$$

Por una parte, de (27) y (28) se tendría :

$$\frac{V_0}{V_1} = \sqrt{\frac{\Delta H}{H}} \quad (30)$$

Multiplicando miembro a miembro (29) y (30)

$$\frac{V_0}{V_2} = \frac{t_2}{t_1} \sqrt{\frac{\Delta H}{H}}$$

o sea que :

$$p = \frac{t_2}{t_1} \sqrt{\frac{\Delta H}{H}} \quad (31)$$

De acuerdo con la ecuación (31), la relación  $\frac{\Delta H}{H}$  es función exclusivamente de

$F_1$  y ésta se encuentra tabulada para el rango de  $F_1$  más usual (3), como aparece en la tabla I que sigue y con la cual se han calculado los valores de  $p$ .

TABLA I

$F_1$	$t_2/t_1$	$\Delta H/H$	$\sqrt{\Delta H/H}$	$t_2/\sqrt{\Delta H/H}$	$p$
1	1.00	0	0	0	$\infty$
2	2.37	0.098	0.313	0.740	1.350
3	3.77	0.272	0.521	1.97	0.508
4	5.18	0.398	0.630	3.24	0.307
5	6.59	0.492	0.701	4.62	0.216
6	8.00	0.564	0.751	6.01	0.166
7	9.41	0.623	0.790	7.44	0.134
8	10.82	0.6685	0.819	8.86	0.113
9	12.24	0.706	0.840	10.28	0.098
10	13.65	0.7345	0.859	11.70	0.086

Como puede verse, los valores de  $p$  cambian desde 0.508 a 0.086 dentro del rango de  $F_1$  entre 3 y 10. Por lo tanto si se usa  $p$  un valor medio constante de 0.25 y con  $k_1 = 0.93$ , se tendría errores con  $p = 0$  y  $p = 0.5$  en más o menos como sigue :

BIBLIOTECA DE LA  
DIVISION DEL DOCTORADO

Si  $p = 0.25$

$K = 0.93$

Si  $p = 0$

$K = 1.025$

$$e = \frac{0.095}{0.93} \times 100 = 10\%$$

Si  $p = 0.5$

$K = 0.836$

$$e = \frac{0.094}{0.93} \times 100 = 10\%$$

Con el fin de observar con que valor de  $K$  se ajustan más los resultados teóricos con los experimentales, se tabuló la ecuación (20) para  $K = 0.93$  ( $p = 0.25$ ) y con  $K = 1.025$  ( $p = 0$ ) y con los resultados se dibujó la familia de curvas (cuyo parámetro es  $\delta$ ), que se muestra en la figura 7, las cuales representan la solución particular para la estructura estudiada en el mo

(3) Hydraulika de J, Smetana Ed. C.S.A.V. 1957. Tomo 2 pag 82

delo. Los ensayos que se hagan para el modelo, estarán pues dirigidos a verificar los cálculos teóricos, sin olvidar las hipótesis que se han hecho.

d.- CRITERIO DE DISEÑO

Con el fin de que la teoría expuesta en los incisos anteriores pueda ser utilizada en la práctica por un proyectista que se enfrente a problemas similares, es conveniente señalar los pasos que pueden seguirse en el cálculo .

Con referencia a la fig b, en general, se tendrán como datos los siguientes:

- $Q_3$  = gasto total en la estructura
- H = energía total antes del salto
- $t_3$  = tirante en el canal de salida
- $V_3$  = Velocidad en el canal de salida

y como incógnita principalmente la dimensión  $t_0$  del conducto.

Los pasos a seguir pueden resumirse como sigue:

- 1.- Calcúlese, con la geometría del sifón, el coeficiente de pérdida  $k_1$
- 2.- Considérese una repartición de gastos, de modo que se cumpla que  $Q_3 = Q_0 + Q_2$
- 3.- Con la fórmula :  $H = t_1 + \frac{Q_1^2}{2g t_1^2}$  calcúlese  $t_1$  y  $V_1 = \frac{Q_1}{t_1}$
- 4.- Con  $t_1$  y  $V_1$  determínese  $t_2 = \frac{t_1}{2} (\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)$   
Con éste :  $v_2 = \frac{Q_2}{t_2}$  y  $\frac{V_2^2}{2g}$
- 5.- Puede ahora calcularse  $\Delta H = H - t_2 - \frac{V_2^2}{2g}$
- 6.- Si se considera primero que  $p = 0$  puede calcularse K con la fórmula (26)

$$K = \sqrt{\frac{2}{1.0000 + k_1}}$$

- 7.- Con la ecuación (7) se puede calcular  $t_0$

$$t_0 = \frac{Q_0}{K \sqrt{g} \sqrt{\Delta H}}$$

y también

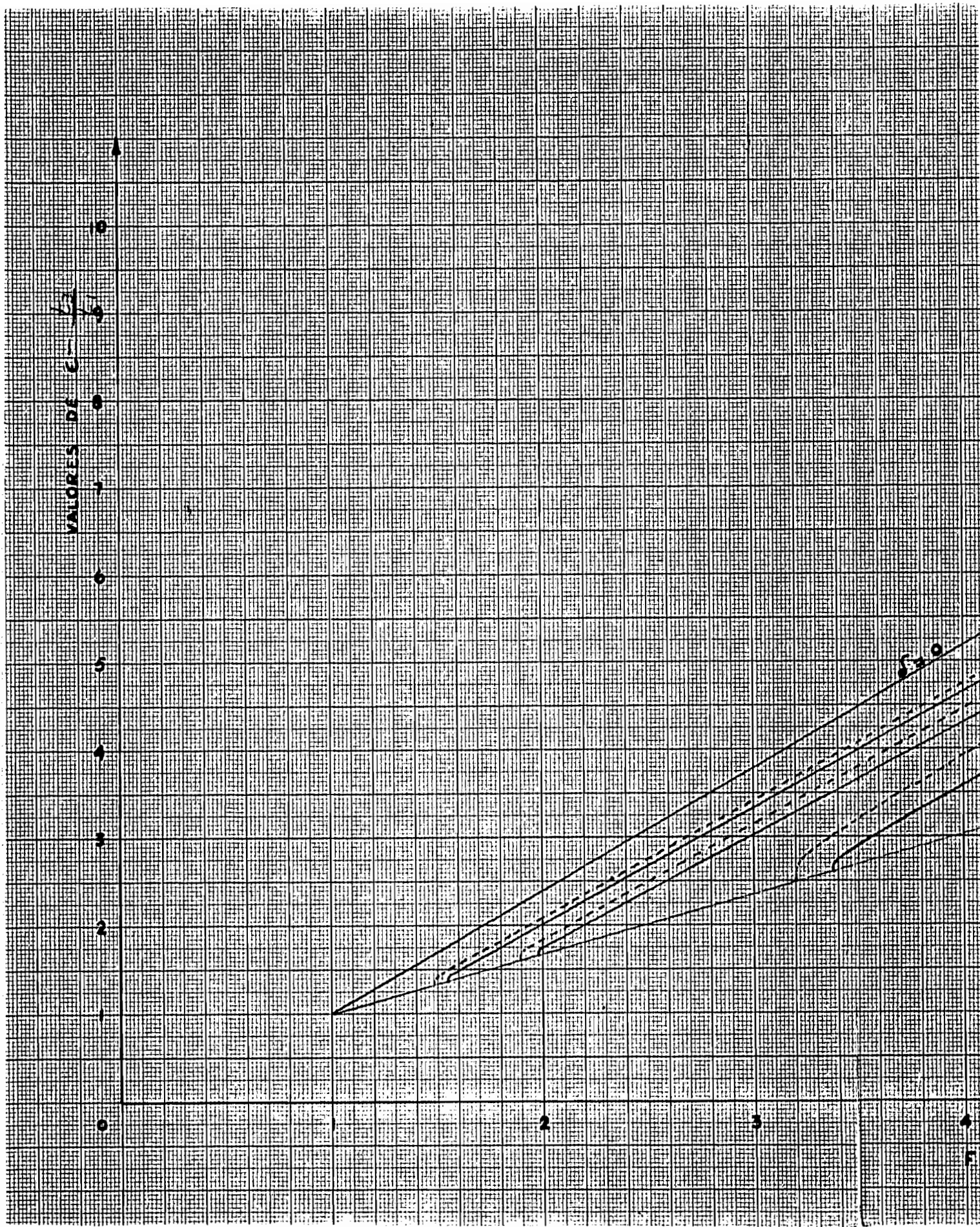
$$V_0 = \frac{Q_0}{t_0}$$



9.- Finalmente de la ecuación (8) puede calcularse un nuevo  $q_2$  ...

$$q_2 = \frac{g(t_2^2 - t_3^2)}{2(v_3 - v_2)} - \frac{q_0(v_0 \cos \theta + v_3)}{(v_3 - v_2)}$$

10.- Este valor de  $q_2$  debe ser igual al que se impuso en el paso 2. De otra manera con este  $q_2$  se considera una nueva repartición de gastos y se repiten los pasos del 2 a 9 hasta que tal cosa suceda.





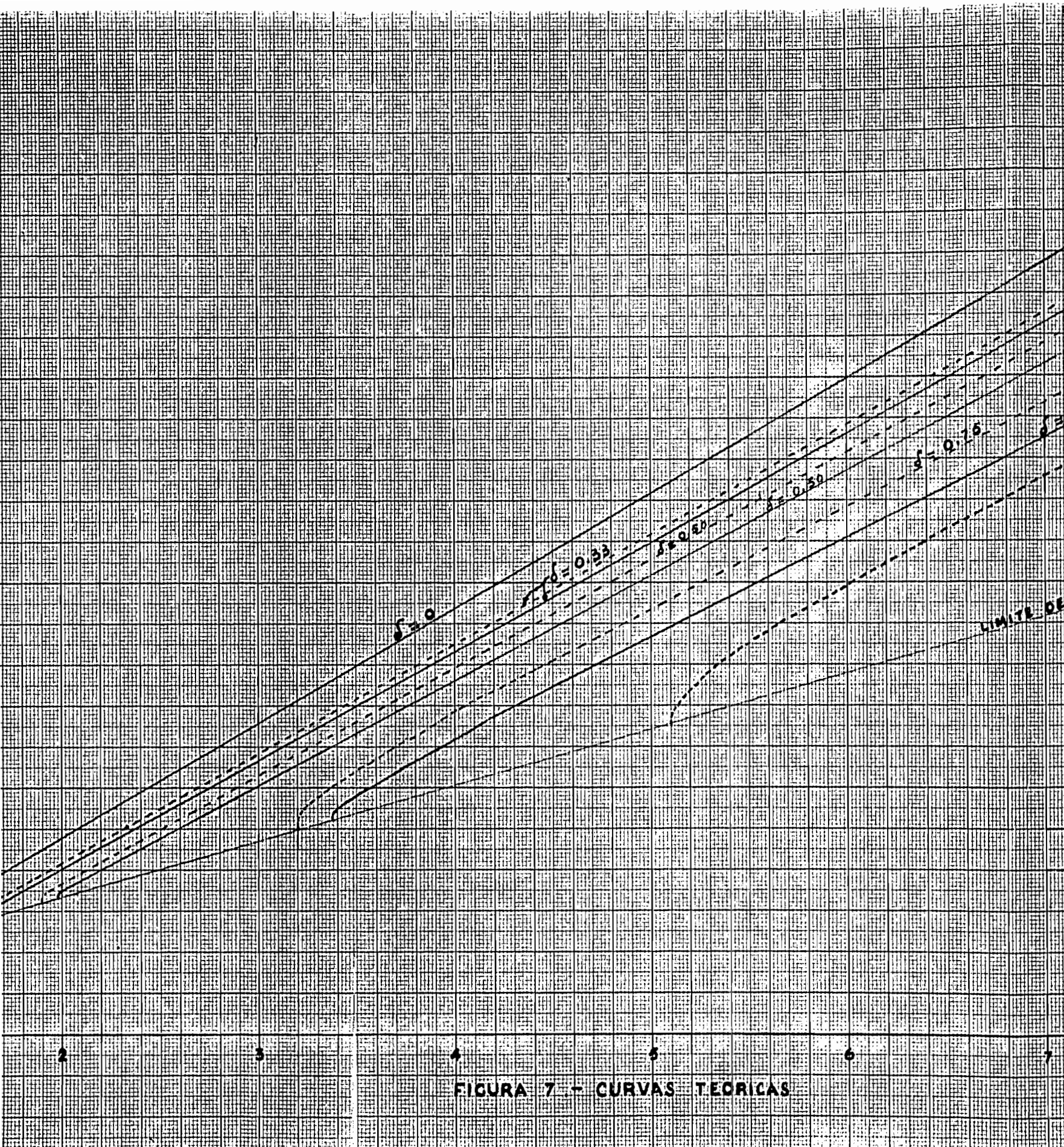


FIGURA 7 - CURVAS TEORICAS



9

8

7

6

5

4

CDN K = 0.95

CDN K = 1.025

$$\rho = \frac{V_1}{V_2}$$

LIMITE DE APLICACION

$\rho = 1.00$

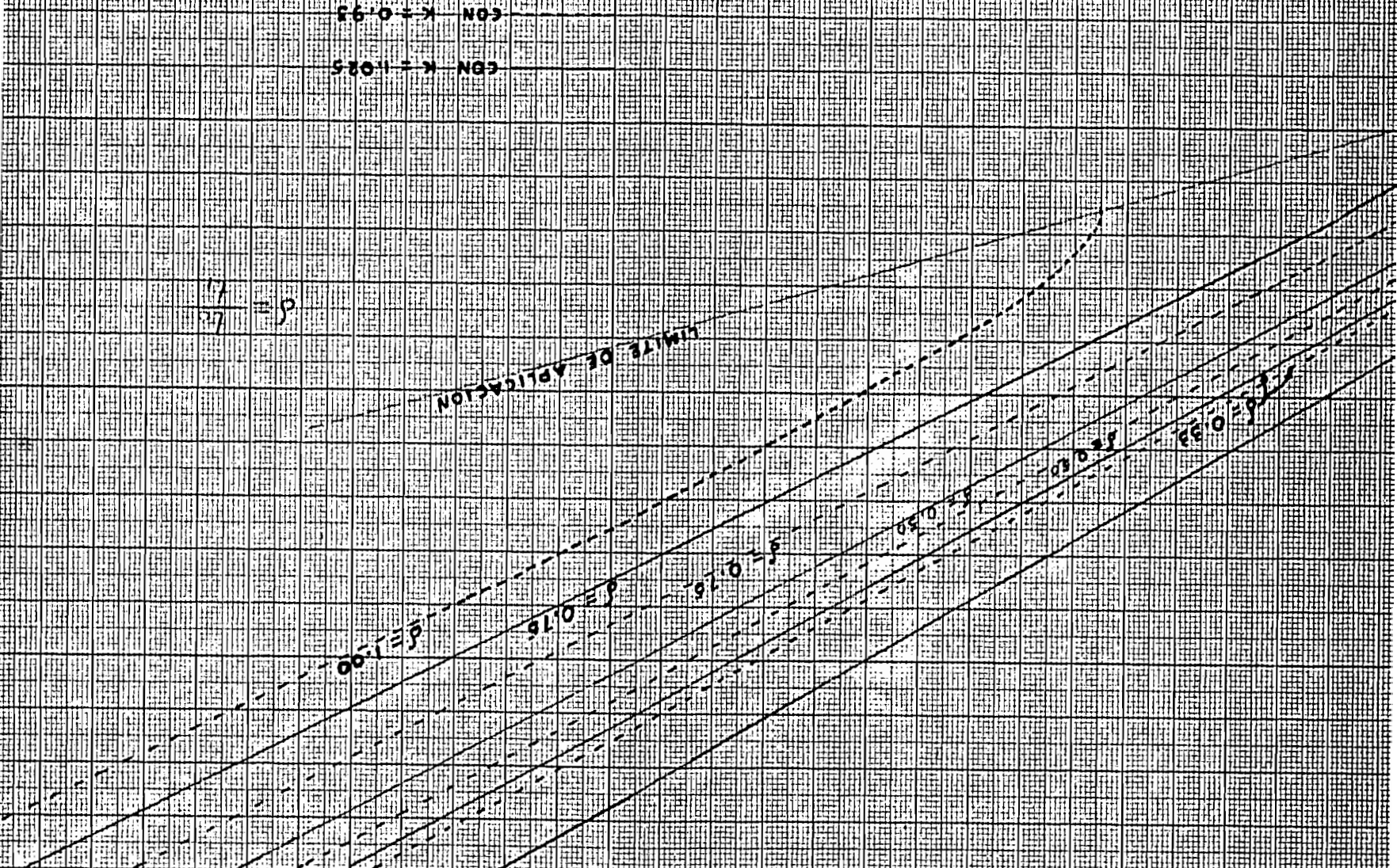
$\rho = 0.75$

$\rho = 0.50$

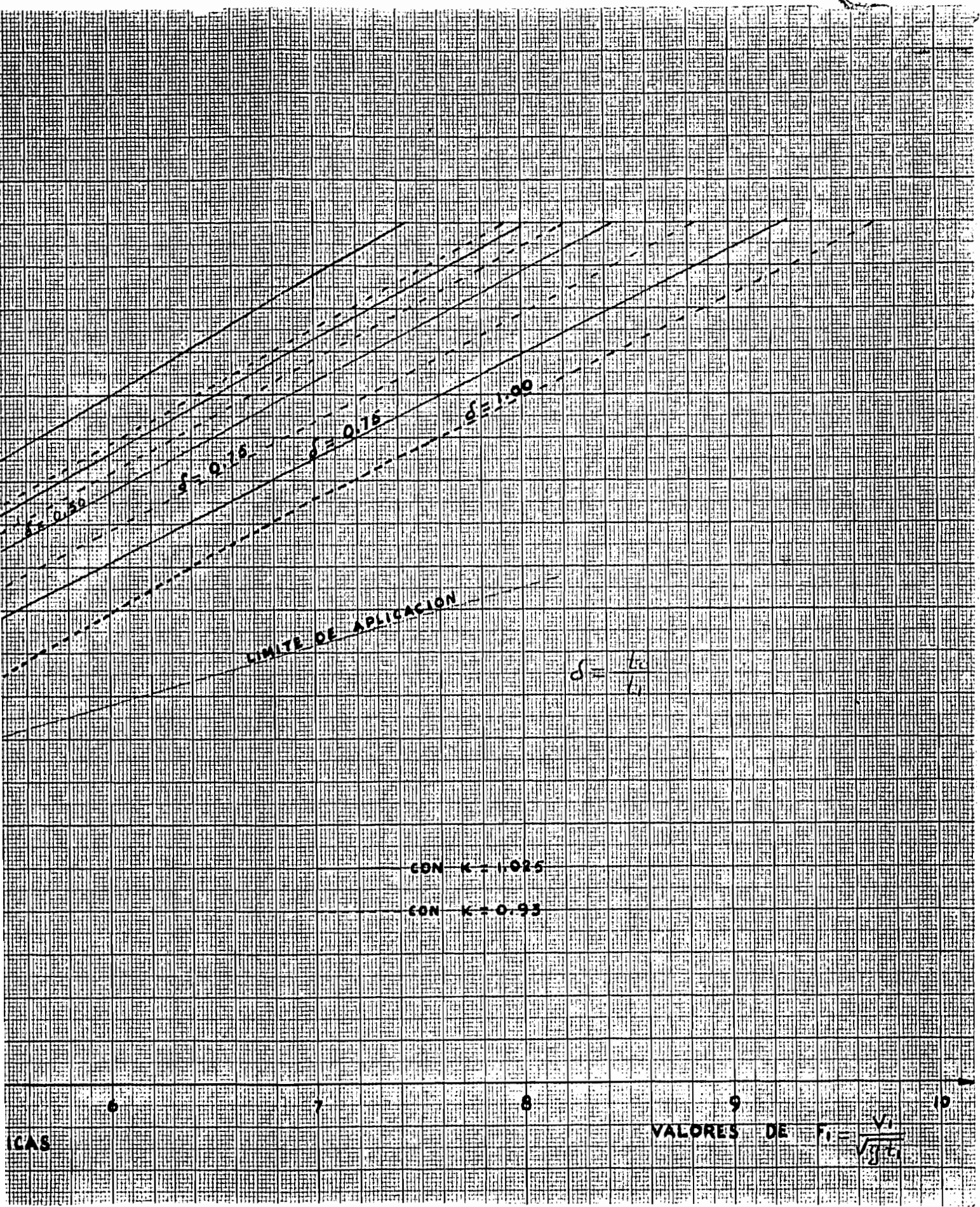
$\rho = 0.25$

$\rho = 0.10$

$\rho = 0.05$







CAPITULO III  
ESTUDIO EXPERIMENTAL

a) SELECCION Y DISEÑO DEL MODELO

Con el fin de hacer la verificación experimental, se pensó en un modelo que tuviera la suficiente flexibilidad para comprobar la serie de hipótesis hechas en la teoría. Dicho modelo consistió de los siguientes elementos:

Un tanque de dimensiones suficientes para realizar una tranquilización efectiva del chorro descargado por una tubería proveniente del tanque de carga constante del Laboratorio y que a la vez alimentara a un canal en el cual se produjera el salto.

Una compuerta, deslizante con la cual se hiciera la alimentación hacia el canal, descargando un chorro con números de Froude dentro del rango especificado, los cuales podrían variarse mediante una graduación fácil de su abertura.

Un canal de pendiente nula con un sifón por debajo de su plantilla y con una de las paredes transparentes.

Una compuerta de tipo vasculante en el extremo aguas abajo del canal, que sirviera para fijar el tirante  $t_2$  después del salto.

Un vertedor rectangular para medir los gastos.

Las dimensiones del modelo deberían ser tales que permitieran cubrir el mismo rango de valores en  $\delta$ ,  $\epsilon$  y  $F_1$  elegido, por otra parte quedarían supeditadas a las posibilidades de las instalaciones del Laboratorio y finalmente a obtener la máxima economía.

En el Laboratorio era posible proporcionar un gasto máximo de 300 lt/seg y un tanque alimentador aproximadamente de 2.00 m de altura.

Con el rango de  $\delta$  comprendido entre 0 y 2, se calculó la magnitud que debía tener  $t_1$  para diferentes valores de  $t_0$  (ambos en m). como aparece en la tabla siguiente:

$\delta \backslash t_0$	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06
0.5	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12
1.00	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06
1.50	0.013	0.02	0.027	0.033	0.04
2.00	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03

Obsérvese que los valores de  $t_0$  por debajo de la línea gruesa, son todos inferiores a 2 cm y resultarían muy difíciles de medir. Así, para cubrir el rango de valores elegido para  $\delta$  y por razones de economía, el valor de  $t_0$  se eligió de 0.04 m.

Además, con el fin de que la sección rectangular no fuese tan estrecha, de modo que la proximidad de las paredes afectara el escurrimiento, se pensó en que el ancho del canal debería ser de 0.40 m. Con esto al tener que  $F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g t_1}}$  la velocidad antes del salto, es:  $V_1 = F_1 \sqrt{g t_1}$  y el gasto:

$$Q_2 = 0.40 t_1 V_1 = 0.40 \sqrt{g} F_1 t_1^{3/2}$$

$$Q_2 = 1.25 F_1 t_1^{3/2} \quad (34)$$

Por otra parte, al considerar que en forma aproximada el gasto en el sifón es constante y de magnitud  $Q_0 = 0.30 Q_2$ , se tendrá entonces que  $Q_3 = 1.3 Q_2 \dots (35)$

Además, de la fórmula de orificios, puede calcularse en forma aproximada la carga necesaria para descargar el gasto  $Q_2$  con la fórmula

$$y_1 = \frac{Q_2^2}{0.40^2 \cdot 2g b^2 C_d^2} = 0.319 \left( \frac{Q_2}{C_d b} \right)^2 \quad (36)$$

en la cual  $y_1$  es el desnivel entre la superficie del agua en el tanque alimentador,  $b$  la abertura de la compuerta y  $C_d$  el coeficiente de descarga que depende de la relación  $y_1/b$  según las experiencias de Ippen (4)

Finalmente, al considerar que el coeficiente de contracción  $\mu$ , del chorro descargado por la compuerta es casi constante (5) y de magnitud igual a 0.607, se pueden calcular los valores de  $b$  para el rango de  $\delta$  elegido, entre 0.50 y --

(4) Engineering Hydraulics de H. Rouse Ed. J. Wiley & Sons pag 537

(5) pag 50 de la referencia 4

1.00, con la fórmula :

$$b = \frac{t_0}{\mu \delta} \quad (37)$$

Con el uso de las fórmulas (34) a (37), se calcularán entonces  $b$ ,  $Q_2$ ,  $y_1$  y  $Q_3$  (en sistema M.K.S.) como aparecen en la tabla II, al variar  $F_1$  de 1 a 10. - Como puede verse de la tabla II, la altura del tanque de 2.00 m y la abertura de compuerta, limita el rango de experimentación a aquellos valores de  $F_1$  comprendidos entre las dos líneas gruesas, pues es factible proporcionar la totalidad de los gastos, ya que el máximo es de 221 lt/s para  $\delta = 0.50$  y  $F_1 = 6$ .

Por último, calculemos los tirantes  $t_2$  que determinarán la altura de los muros en la zona del salto. Para esto haremos uso de los valores  $\frac{t_2}{t_1}$  indicados en la Tabla I y los máximos de  $F_1$  que pueden proporcionarse según la Tabla II

$$\delta = 0.50 ; F_1 = 6 ; \frac{t_2}{t_1} = 8$$

$$t_2 = 8 t_1 = 8 \times 0.08 = 0.64 \text{ m}$$

$$\delta = 0.75 ; F_1 = 8 ; \frac{t_2}{t_1} = 10.82$$

$$t_2 = 10.82 t_1 = 10.82 \times 0.053 = 0.575 \text{ m}$$

$$\delta = 1.00 ; F_1 = 9 ; \frac{t_2}{t_1} = 12.24$$

$$t_2 = 12.24 t_1 = 12.24 \times 0.04 = 0.489 \text{ m}$$

Como puede verse, el cálculo para  $\delta = 0.50$  determina el tirante  $t_2$  mas grande y que es de 0.64 m, por lo cual se eligió en la zona transparente del muro una altura de 0.74 m. medida desde el piso del canal.

Las dimensiones del modelo elegidas de esta manera, se indican en el plano-anexo.

#### b.- MEDICIONES REALIZADAS Y APARATOS PARA EJECUTARLAS.

Ciclo de ensayos número 1.- Con el fin de conocer, en cada una de las pruebas del modelo, la repartición del gasto unitario total  $q_3$  en los gastos también unita-



TABLA II

F <sub>i</sub>	$\delta = 0.50$			$\delta = 0.75$			$\delta = 1.00$		
	$t_1 = 0.08 ; b = 0.132$			$t_1 = 0.0533 ; b = 0.088$			$t_1 = 0.040 ; b = 0.066$		
	Q <sub>2</sub>	y <sub>1</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>2</sub>	y <sub>1</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>2</sub>	y <sub>1</sub>	Q <sub>3</sub>
1	0.028	0.05	0.037	0.022	0.04	0.002	0.010	0.03	0.013
2	0.057	0.24	0.074	0.031	0.16	0.040	0.020	0.12	0.026
3	0.085	0.46	0.111	0.046	0.34	0.060	0.030	0.24	0.039
4	0.114	0.75	0.148	0.062	0.50	0.081	0.040	0.38	0.052
5	0.142	1.10	0.185	0.077	0.74	0.100	0.050	0.55	0.065
6	0.170	1.58	0.221	0.093	1.02	0.121	0.060	0.77	0.078
7	0.199	2.13	0.259	0.108	1.40	0.141	0.070	1.05	0.091
8	0.227	2.72	0.295	0.124	1.83	0.161	0.080	1.36	0.104
9	0.255	3.44	0.332	0.139	2.30	0.181	0.090	1.73	0.117
10	0.284	4.24	0.369	0.154	2.85	0.200	0.100	2.13	0.130

rios  $q_0$  y  $q_2$ , se pensó que un primer ciclo de ensayos consistiría en hacer el tarado de la compuerta que alimenta el canal. Para ello, se creyó prudente ob- turar el sifón y con una abertura de compuerta fija, determinar la curva de gas- tos del orificio. Esto es, obtener para cada carga  $Y_1$  el gasto que circularía en el modelo, con descarga libre. A partir de estos resultados, podrían obtenerse una curva de coeficientes de descarga  $C_d$  contra relaciones  $H/b$ , similar a la de Ippen (referencia 2). Con esta gráfica y la fórmula 36 se podría saber para cada condición de carga  $Y_1$  y abertura de compuerta  $b$ , el gasto  $q_2$ , incluso tra- bajando el sifón. Con esto quedaría hecha automáticamente la repartición de gas- tos, al trabajar tanto el orificio como el sifón, ya que se tendrían conocidas las magnitudes  $Y_1$  y  $b$  y con éstas el gasto  $q_2$ . Conocido además el gasto total  $q_3$ , por la diferencia  $q_3 - q_2$  se puede calcular el gasto  $q_0$ . Para efectuar es- te ciclo de ensayos, era necesario medir la carga  $Y_1$  y para ello se usaron 4 limnómetros de gancho, dispuestos en el tanque de alimentación.

Ciclo de ensayos número 2: De acuerdo con lo indicado en el inciso "a", los valores de  $\delta$  podrían obtenerse en el modelo, simplemente al graduar la abertura de la compuerta. De este modo, lo más conveniente era fijar un gasto constante en el modelo y con este fijo, dar las aberturas que se expresan en la Tabla II con lo cual se obtenían las  $\delta$  desde 0.50 a 1.00. Fijado un gasto, con cada abertura se medirían la carga  $Y_1$  sobre el orificio y del producto  $H^2/b$  el tirante  $t_1$ . Además, con la compuerta de aguas abajo se forzaría el tirante  $t_3$  necesario para que el salto se formara, el cual también se midió. Con ello, al conocer  $Y_1$  y el gasto total  $q_3$ , para cada abertura se encontraría  $q_2$  de los resul- tados del ciclo anterior y de aquí,  $F_1$  y además  $\epsilon$  para cada valor de  $\delta$ .

#### c.- RESULTADOS DE LAS MEDICIONES

Se realizó el ciclo de ensayos número 1 y se obtuvo una curva de coeficien- tes de descarga  $C_d$  de la fórmula (36) para aberturas de compuerta de 0.05 m y 0.10 m y se muestra en la figura 8. Con esta curva, fue posible determinar el- gasto  $q_2$ , aún funcionando el sifón, al conocer para cada condición de abertura- de compuerta el valor de  $Y_1$ .

Con este antecedente, se hizo el ciclo de ensayos número 2, en la forma antes indicada y los resultados se muestran en la figura 9.

Debe hacerse notar, que también se determinó la curva experimental para  $\delta = 0.33$ , además de las curvas  $\delta = 0.50$  y  $\delta = 0.75$ .

BIBLIOTECA DELLA  
DIVISIONE DEL DOPPIO DEFIENDO

$C_1$

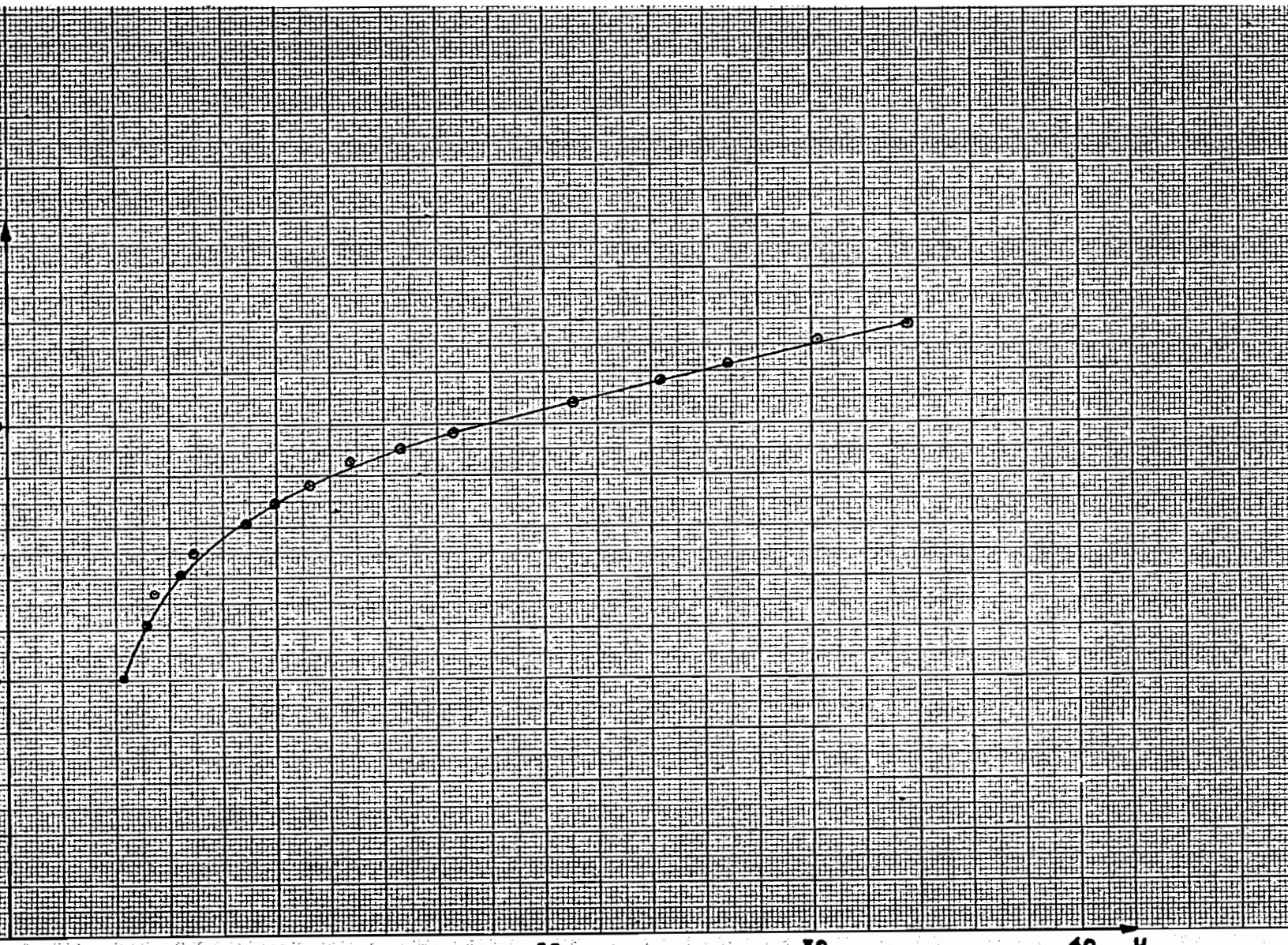


FIGURA 8

## CAPITULO IV

## CONCLUSIONES

## a.- CONFRONTACION DE RESULTADOS TEORICOS Y EXPERIMENTALES.

La serie de puntos obtenidos experimentalmente, se dibujaron sobre un sistema de ejes idéntico al de la figura 7 y se obtuvieron así, las curvas cuyo parámetro es  $\delta$  que se muestran en la figura 9. Al comparar dichas curvas con las obtenidas teóricamente, presentadas en la figura 7, se encontró que estas se ajustaban mejor a las curvas teóricas para  $K = 1.025$  que con las correspondientes a  $K = 0.93$ .

Ello significa entonces que los resultados de la teoría antes expuesta son mejores a medida que crece el valor de  $K$ , de modo entonces que en gran parte las discrepancias pueden corregirse al considerar al sifón con una eficiencia superior a la que se calcule teóricamente, mediante un incremento del valor de  $K$ .

Esto justifica entonces, lo indicado en el inciso "d Criterio de Diseño" del Capítulo II, al asegurar que en el cálculo de  $K$ , sea más conveniente utilizar  $p = 0$ .

Además, como se había encontrado en el cálculo de las curvas teóricas, que con  $\delta = cte.$  para cada  $F_1$ ,  $\epsilon$  tenía 3 raíces reales, 2 positivas y una negativa, siendo la adecuada, la menor de las positivas. El modelo comprobó dicho resultado.

Finalmente, dentro del rango elegido para  $F_1$  y con valores de  $\delta$  mayores de 0.75, las experiencias en el modelo demostraron que el resalto que se producía era ahogado, aún en condiciones tan adversas como la de imponer tirantes  $t_3$  inferiores al crítico, con lo cual el número de soluciones para  $\epsilon$ , tendía a infinito. Resultados semejantes muestra la teoría, al no existir solución en  $\epsilon$ , dentro del mismo rango de  $F_1$  con  $\delta$  mayor que 1.00.

## b.- LIMITACIONES DE LA TEORIA Y SU EXPLICACION.

Las discrepancias observadas en la figura 9, entre las curvas experimentales y las teóricas, se pueden justificar ya que en las ecuaciones fundamentales explicadas en el capítulo II, se consideró que los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$ , que toman en cuenta el efecto de distribución de velocidades y que afectan así mismo el término de la velocidad media, valían 1.00.

Esto habíu sido ya observado en experiencias en las que se producía el salto hidráulico, entre las cuales se puede mencionar las realizadas por Forster y Skrinde (6) al estudiar la formación del salto hidráulico, forzado por un escalón aguas abajo.

Se concluye pues que la teoría expuesta es válida en el caso de que  $0 \leq \delta \leq 0.5$  y el límite inferior indicado en la figura 9.

Sin embargo, a medida que el valor de  $\delta$  se aproxima a 0.75, las discrepancias son mayores al acercarse a la zona de ahogamiento. Ello se debe principalmente a que en estas condiciones el sifón se vuelve muy eficiente formando el salto hidráulico sin formar el tirante  $t_2$ ; esto significa que en estas condiciones el escurrimiento aguas abajo no tiene influencia en la formación del salto.

#### c.- POSIBILIDADES DE APLICACION

La estructura estudiada ha demostrado ser más eficiente y económica que un tanque amortiguador común y corriente. Esto puede observarse a través de una comparación de las curvas experimentales de la figura 9 con las obtenidas para tanques con escalón aguas abajo (7), ya que en el caso que nos ocupa la excavación para alojar el sifón, sería inferior que la correspondiente al tanque. Todavía más, la estructura estudiada sólo es un caso muy particular de las diversas soluciones que se pueden ocurrir en base al mismo funcionamiento.

Esto abre un campo de aplicación y de estudio muy amplio que tal vez pronto pudiera emprenderse.

Finalmente se desea indicar que la teoría propuesta para resolver, con el empleo de las ecuaciones de continuidad y del impulso, problemas como el tratado en la tesis, se obtienen resultados que concuerdan de modo aceptable con las experiencias con cierto margen de seguridad. No se pretende con esta afirmación impugnar por una teoría absolutamente general para la resolución de todos los problemas del resalto, sino dar un criterio de cálculo racional a quienes enfren

(6) Control of the Hydraulic Jump by Sills Transactions de la A.S.C.E. Vol 115, 1950 Pag 975.

41

ten problemas similares.

Ing. Gilberto Sotelo Avila

México, D, F, agosto de 1961.

BIBLIOTECA DE LA  
DIVISION DEL DOCTORADO



FOTO 8 Vista General de la Modelo

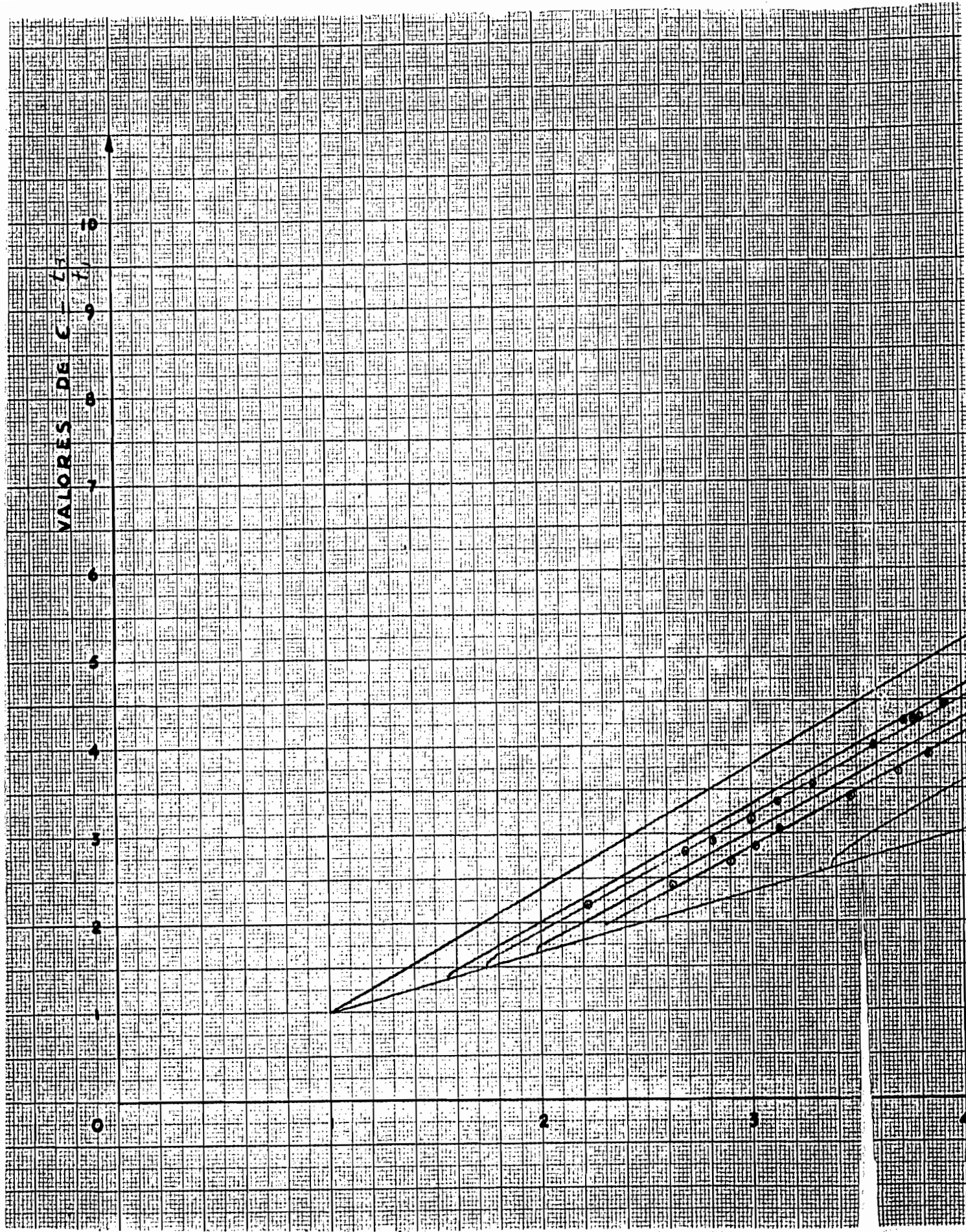


FOTO 9  $\delta=0.33$ ,  $F_1=3.65$ ,  $\epsilon=3.3'$



FOTO 10  $\delta=0.5$ ,  $F_1=...$ ,  $\epsilon=...$





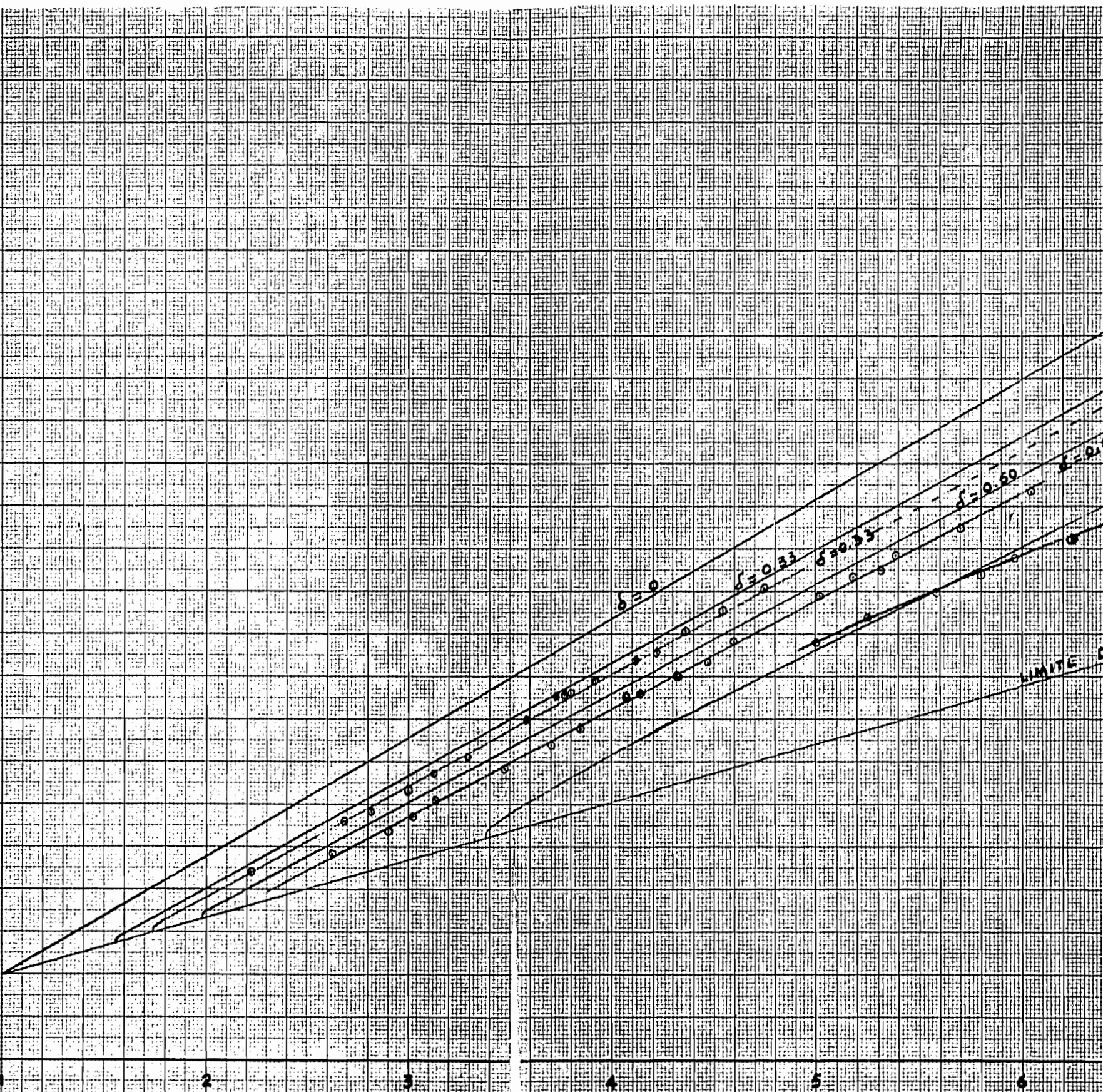


FIGURA 9 - CURVAS TEORICAS Y EXPERI



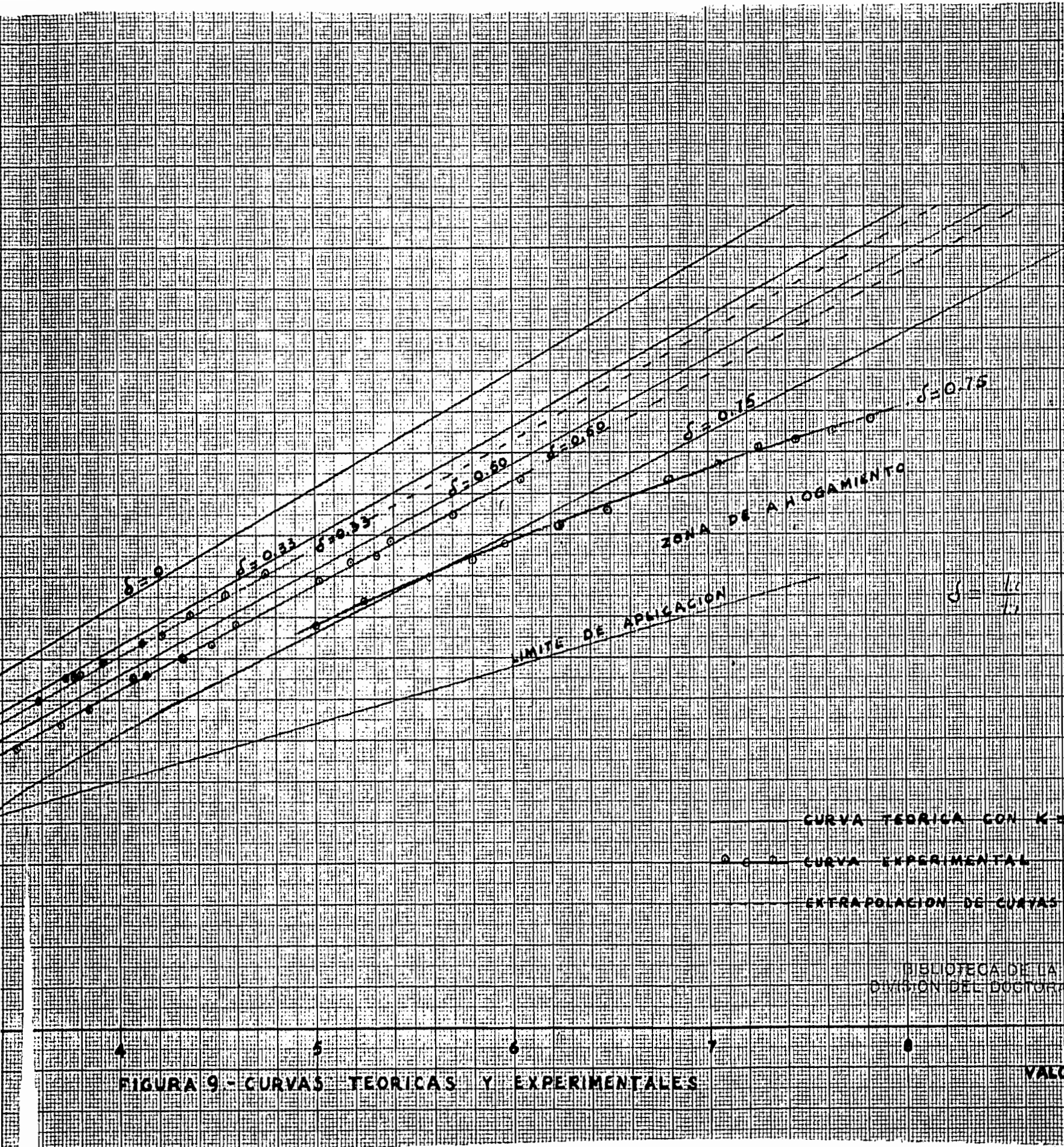
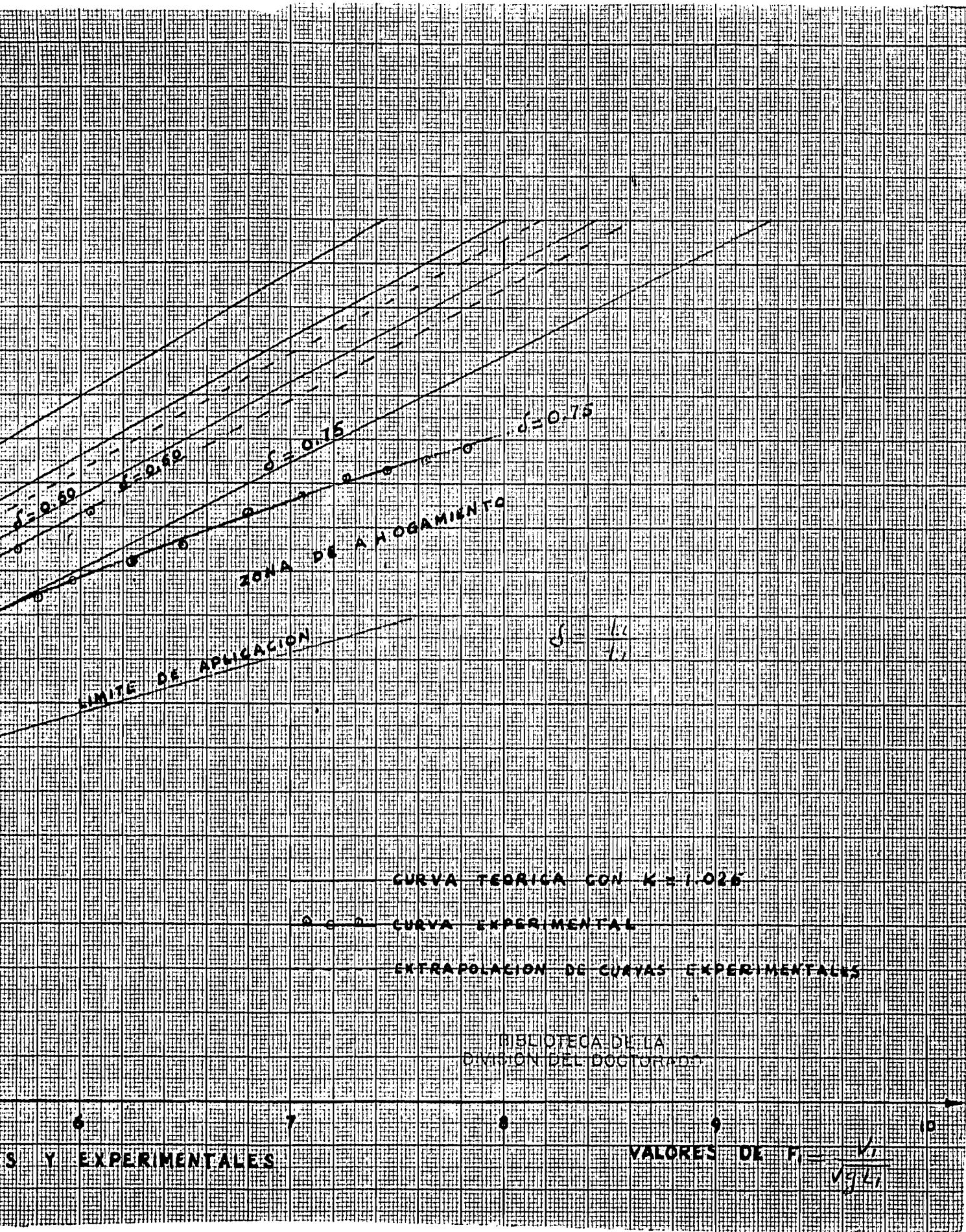
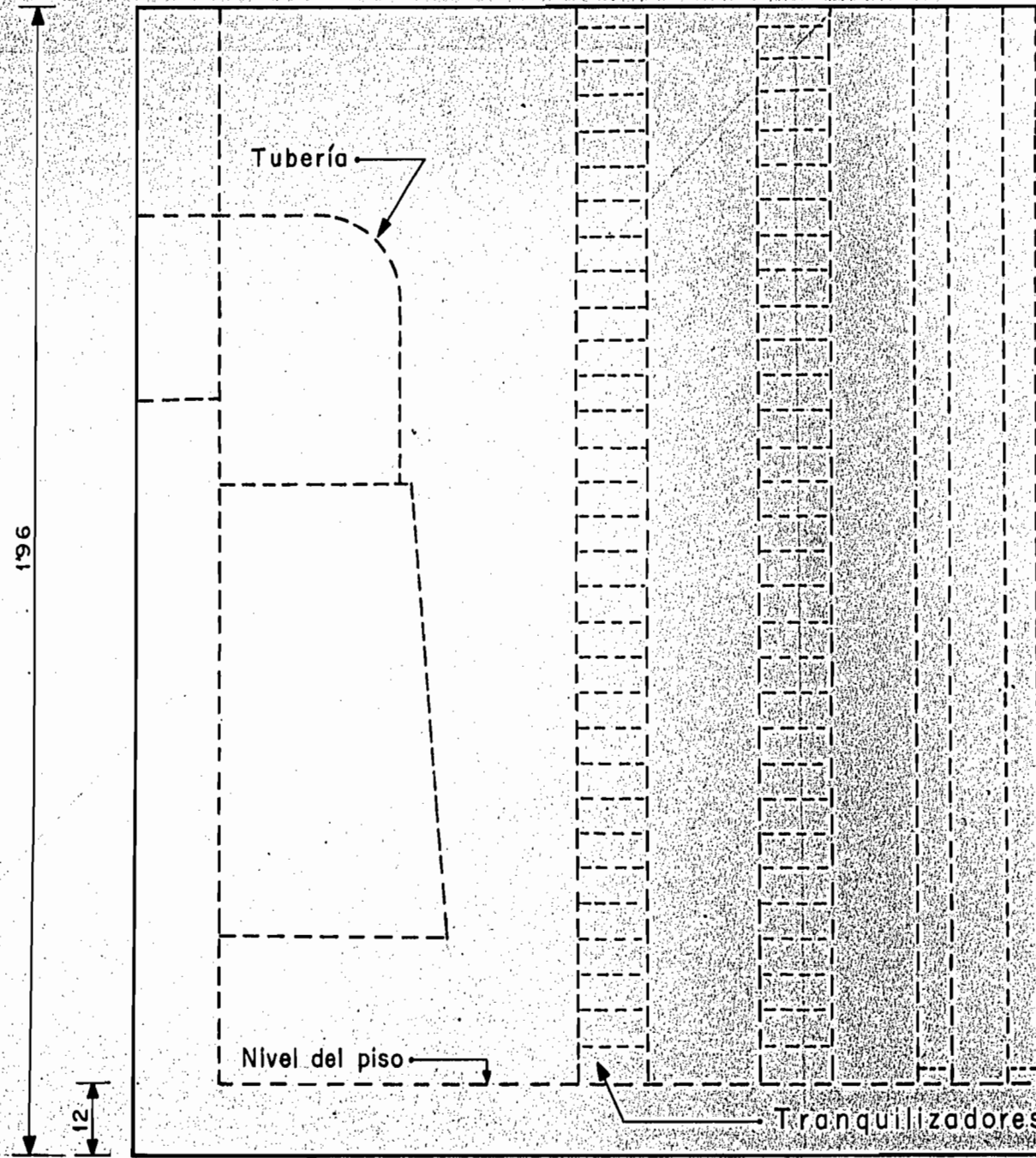


FIGURA 9.- CURVAS TEORICAS Y EXPERIMENTALES





# TANQUE DE ALIMENTACION



TANQUE DE ALIMENTACION

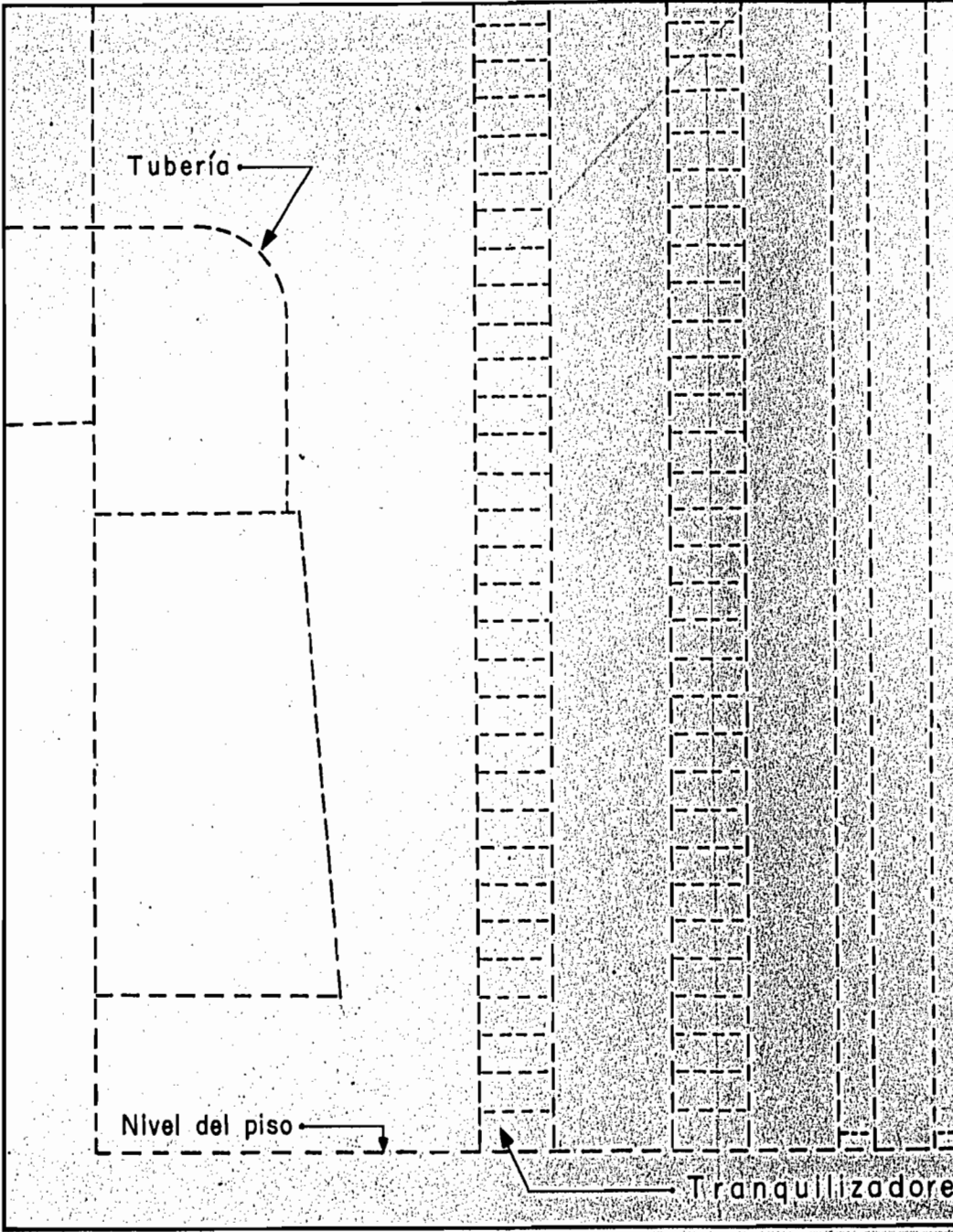
196

Tubería

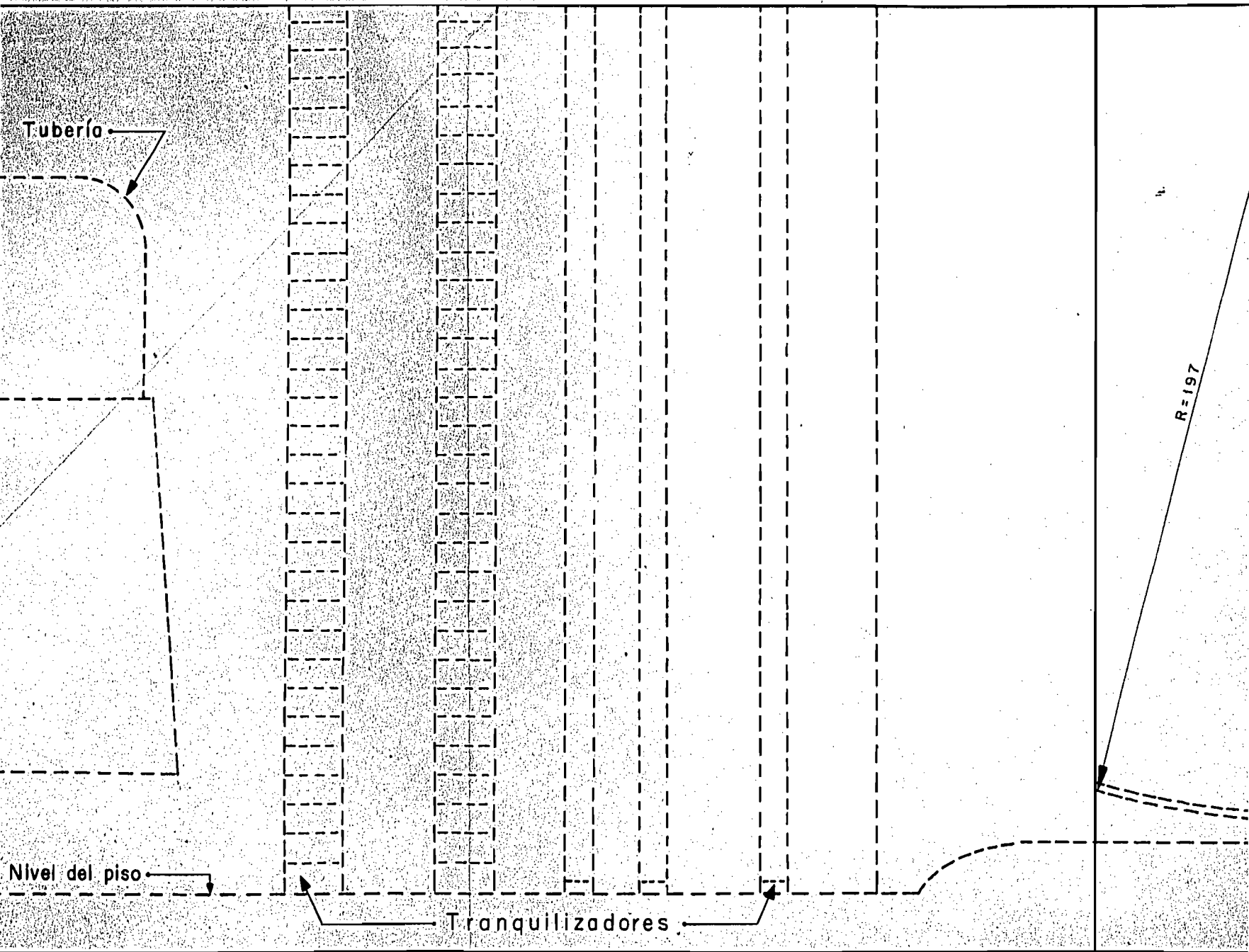
Nivel del piso

12

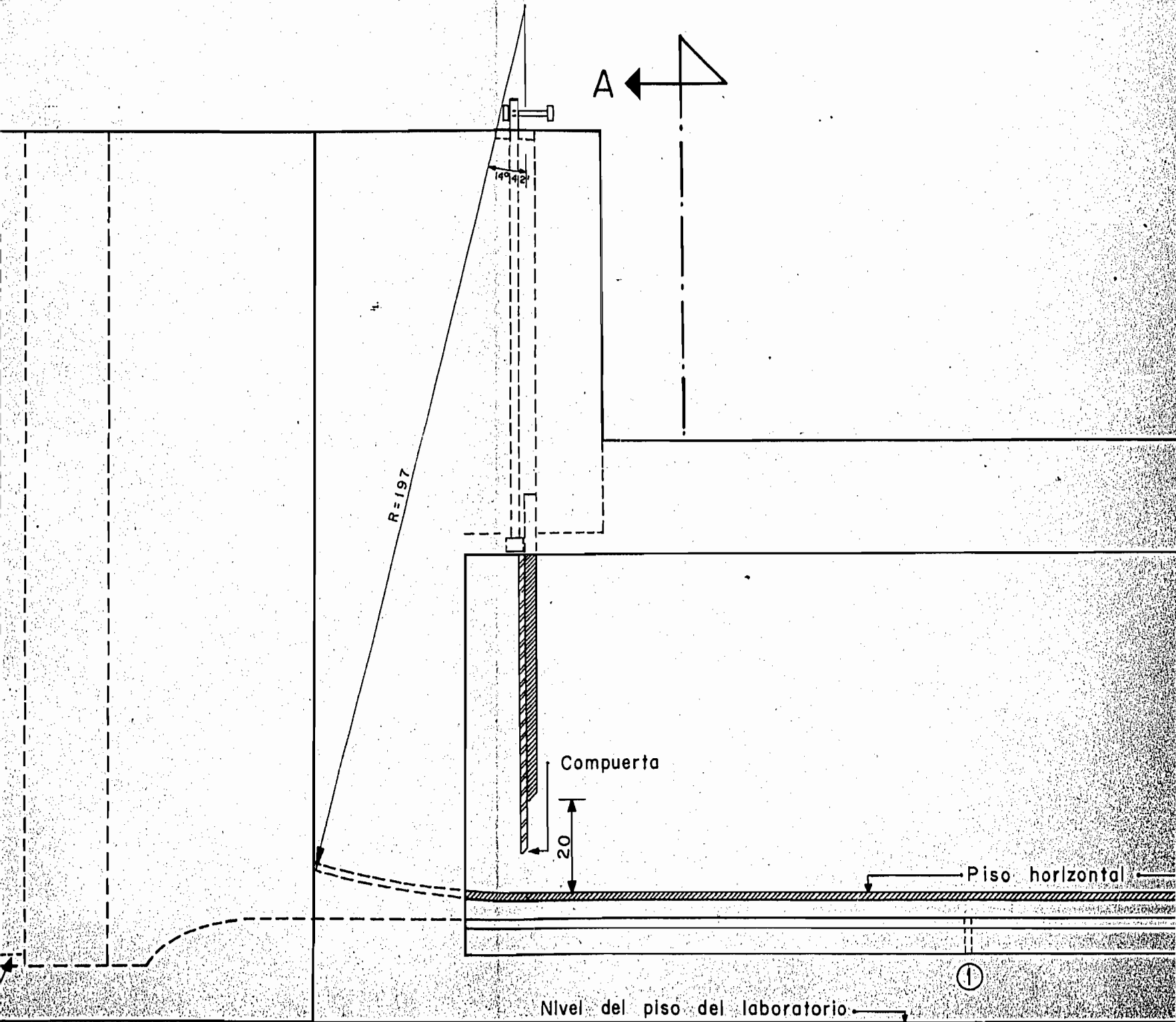
Tranquillizadore



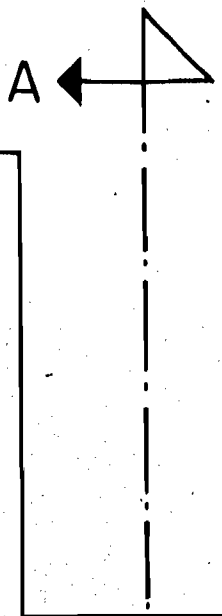
# TANQUE DE ALIMENTACION



4.7

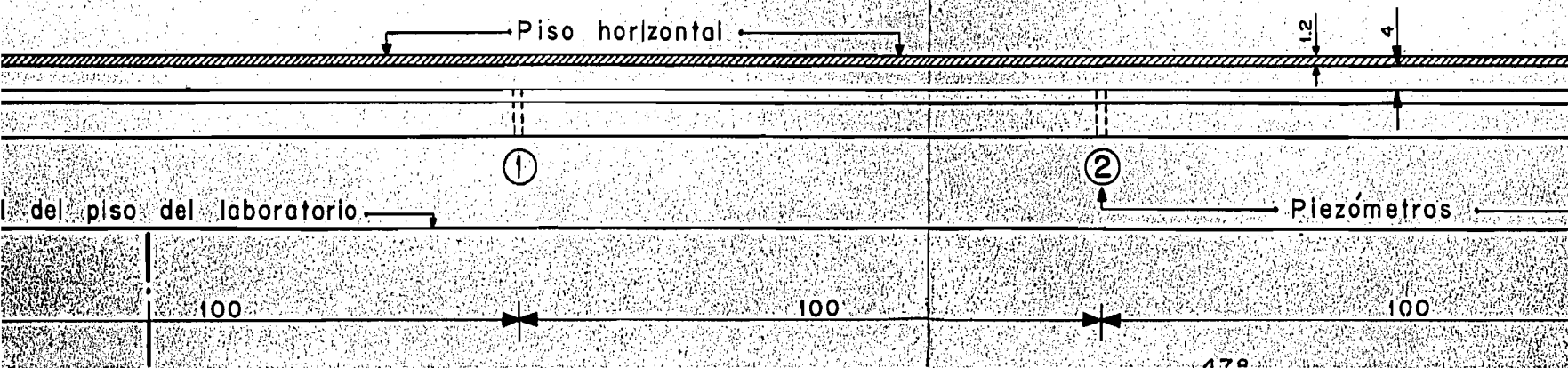




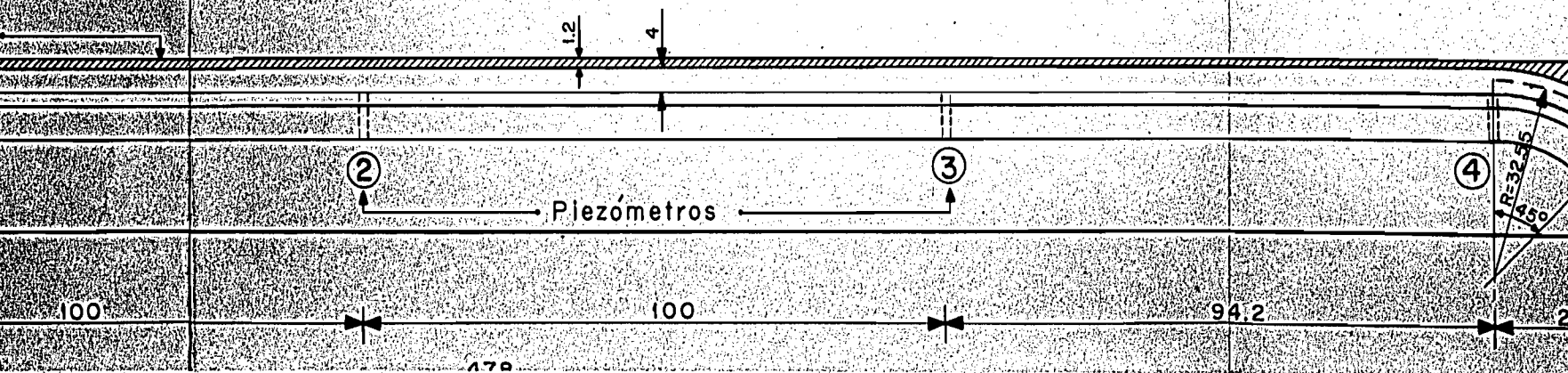


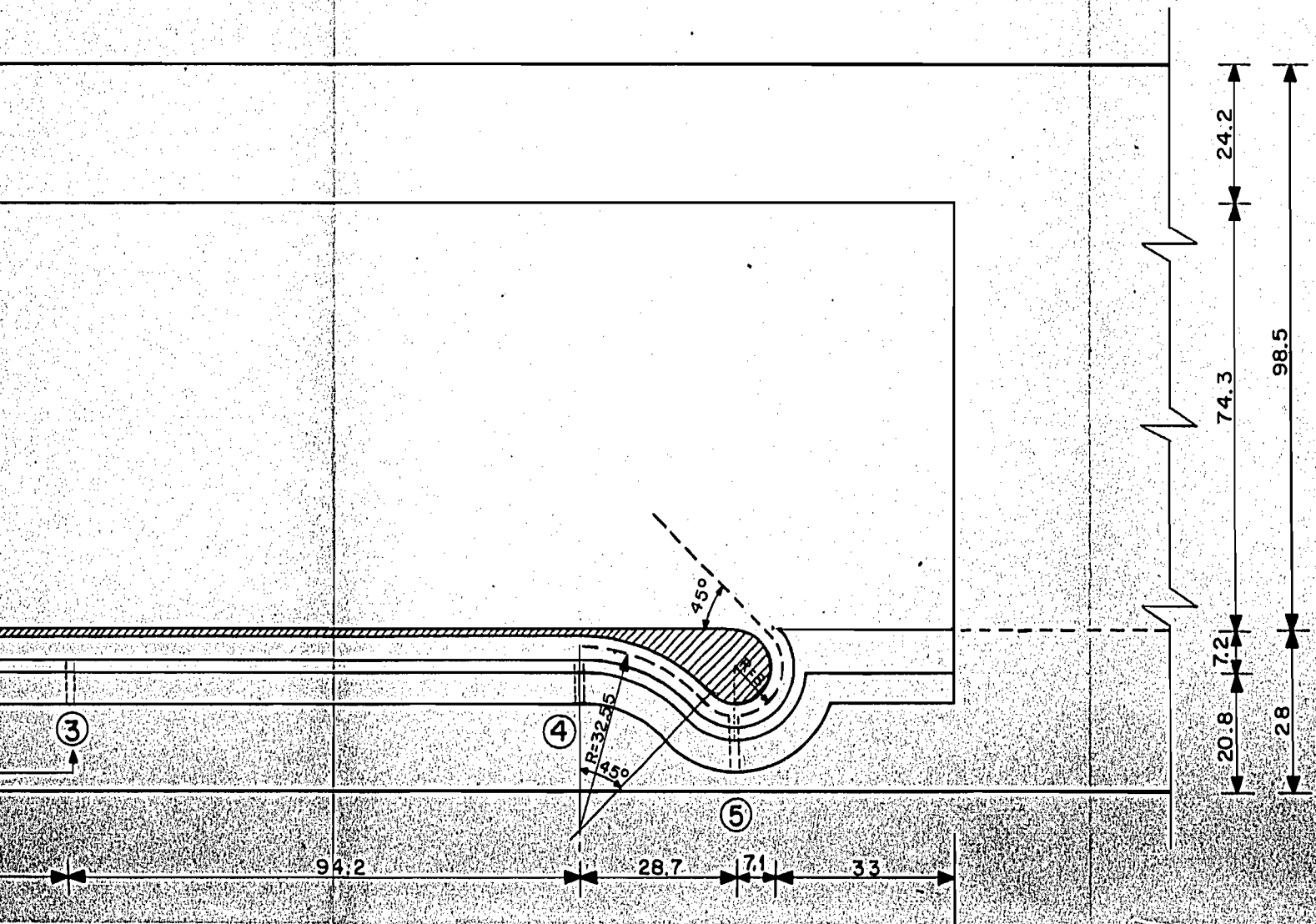
PARED TRANSPARENTE

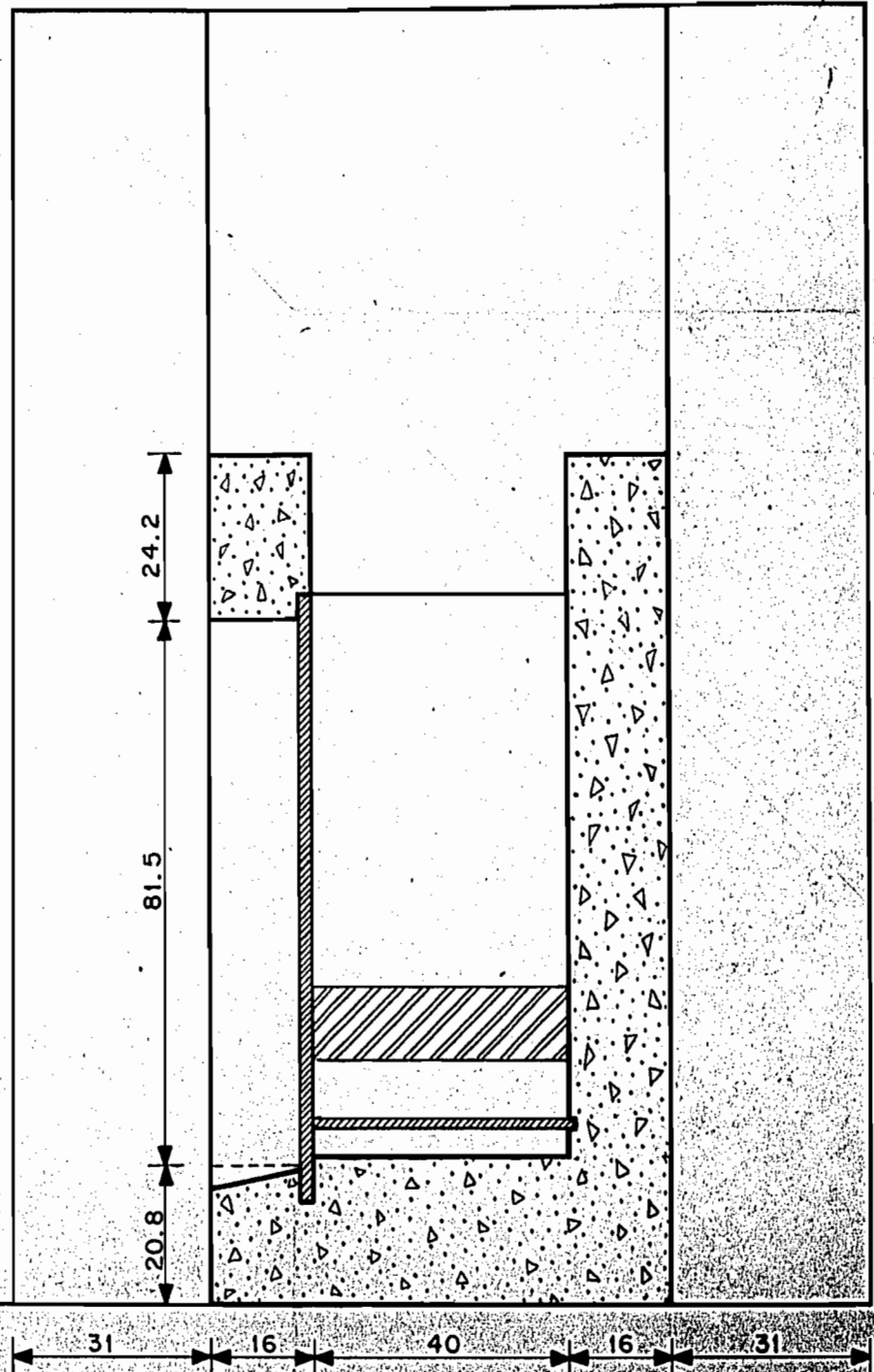
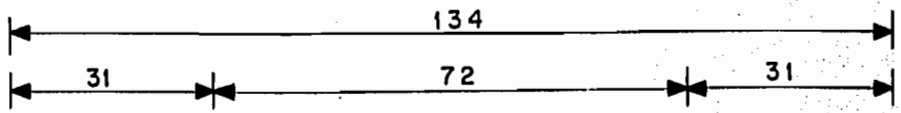
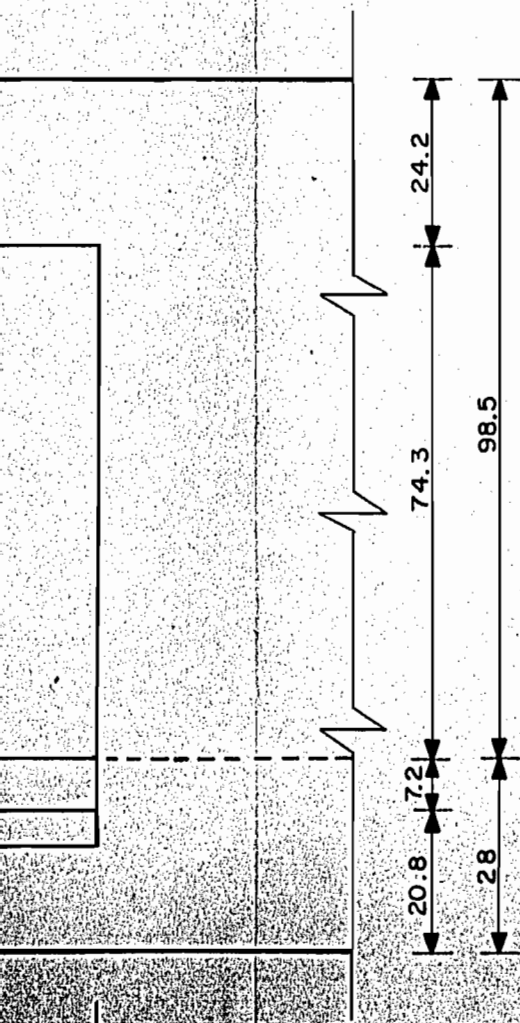
puerta

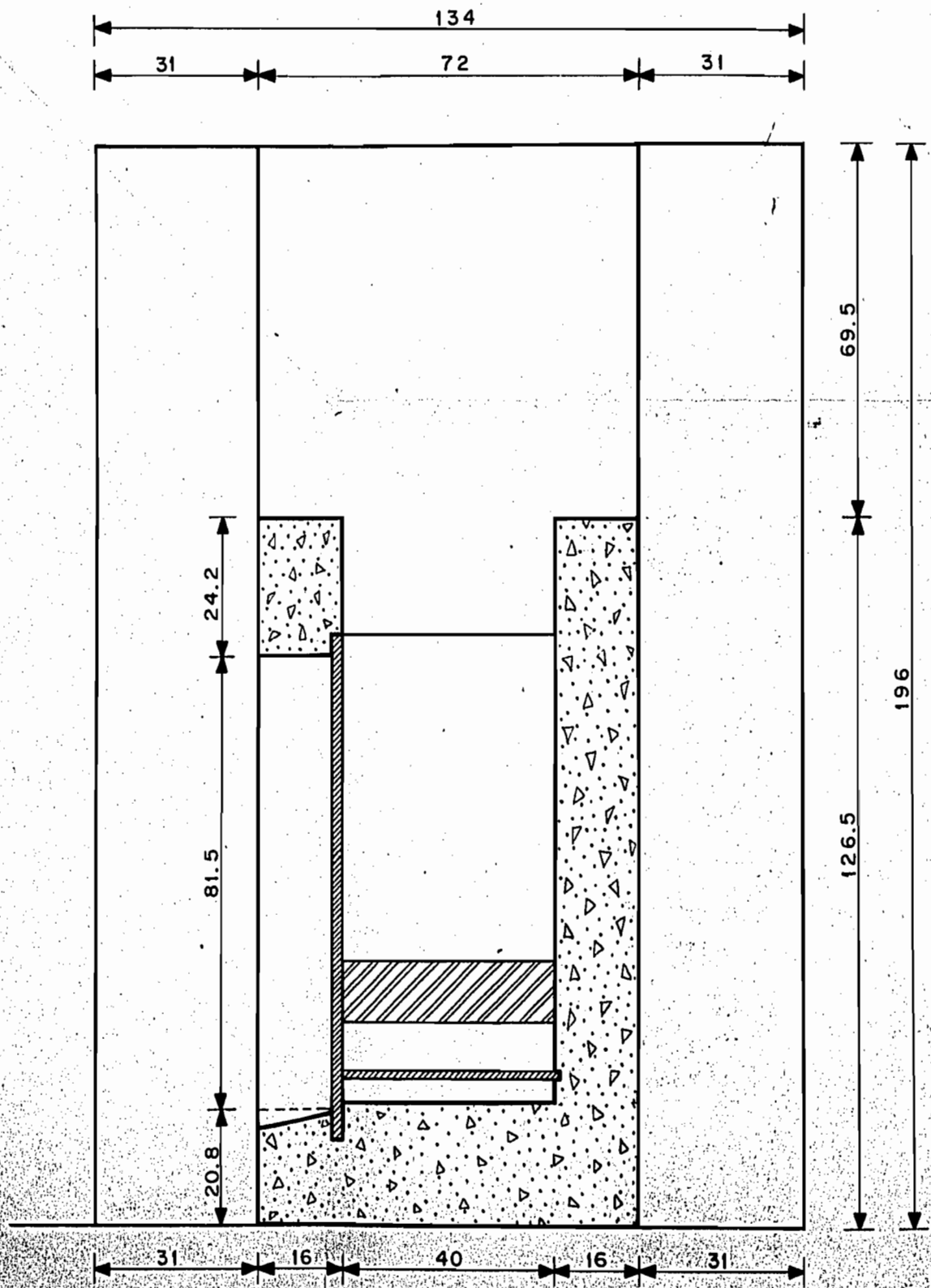


PARED TRANSPARENTE

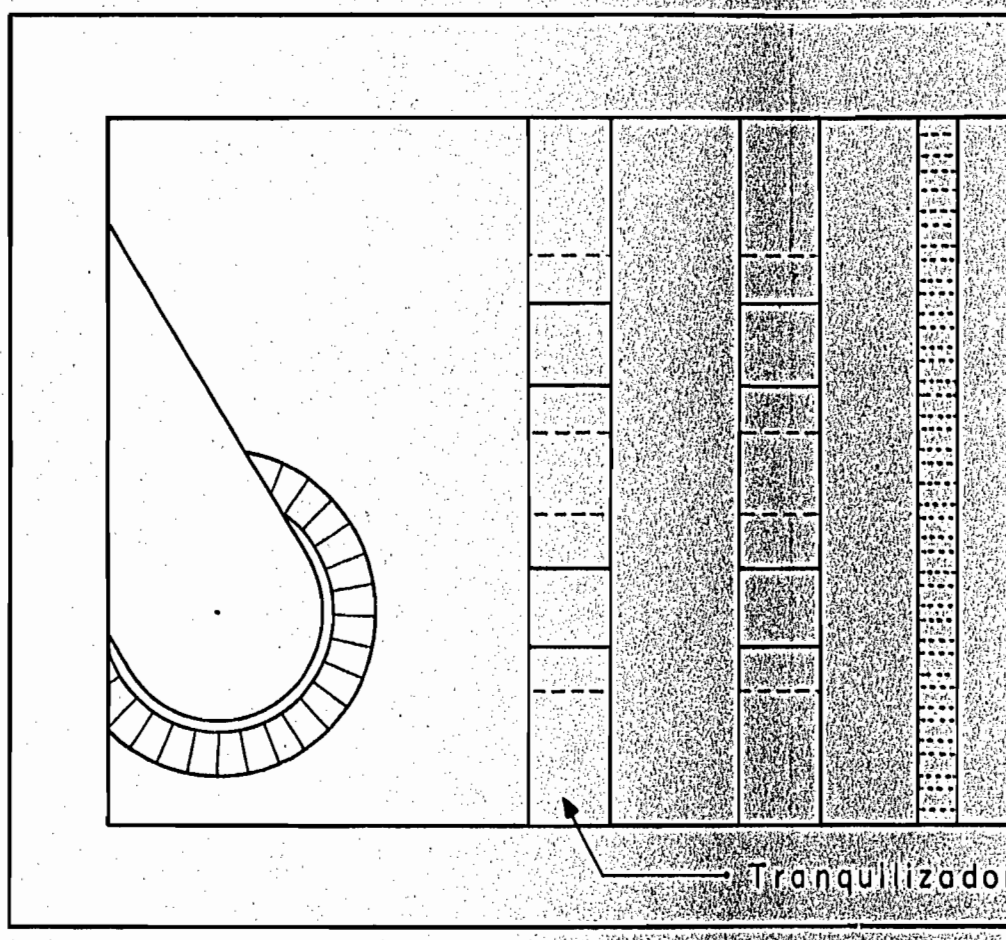
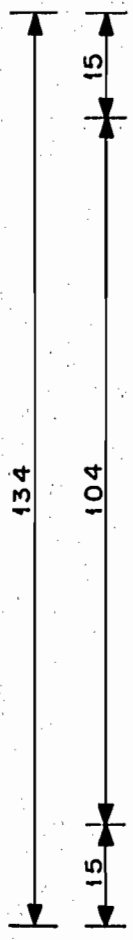




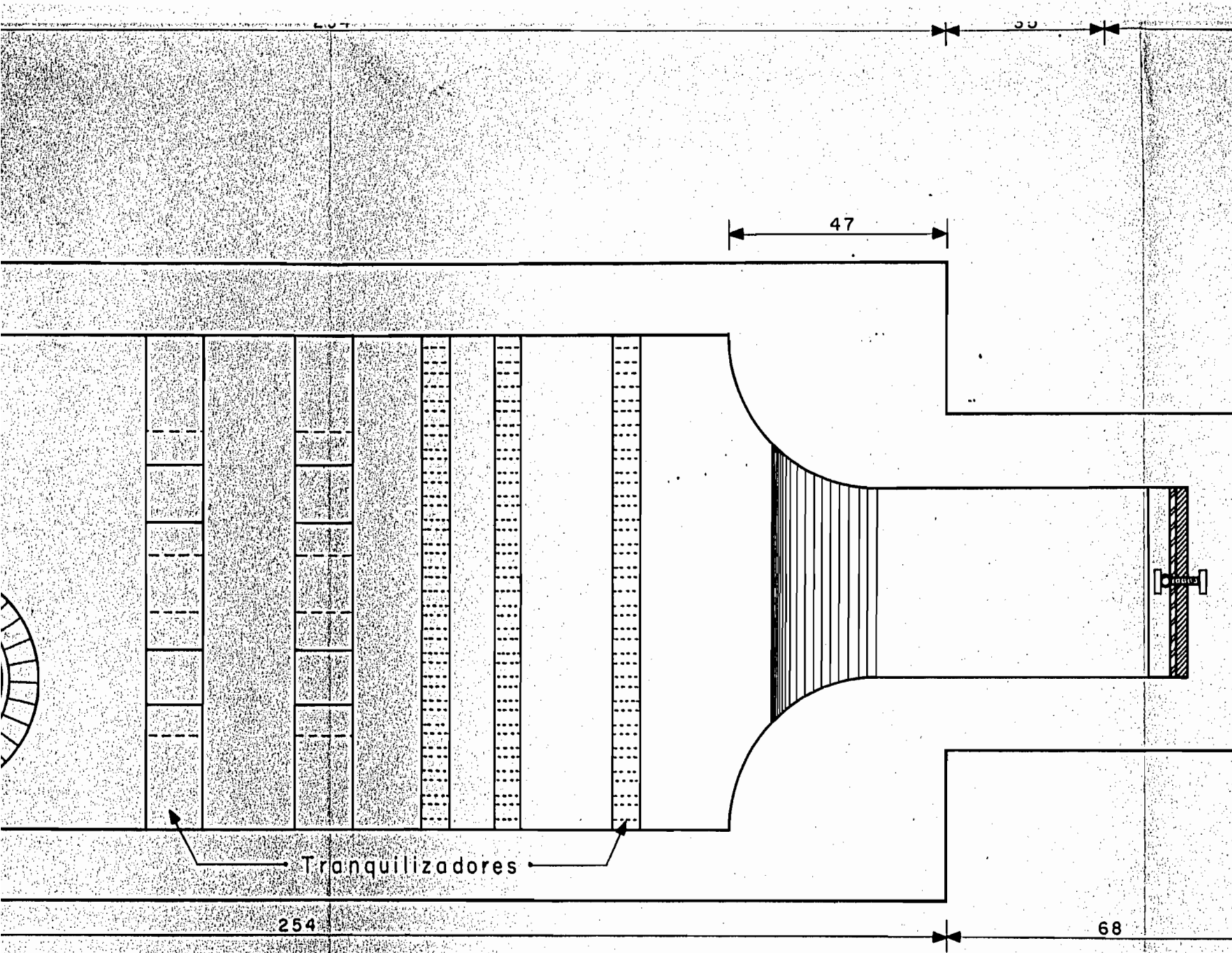


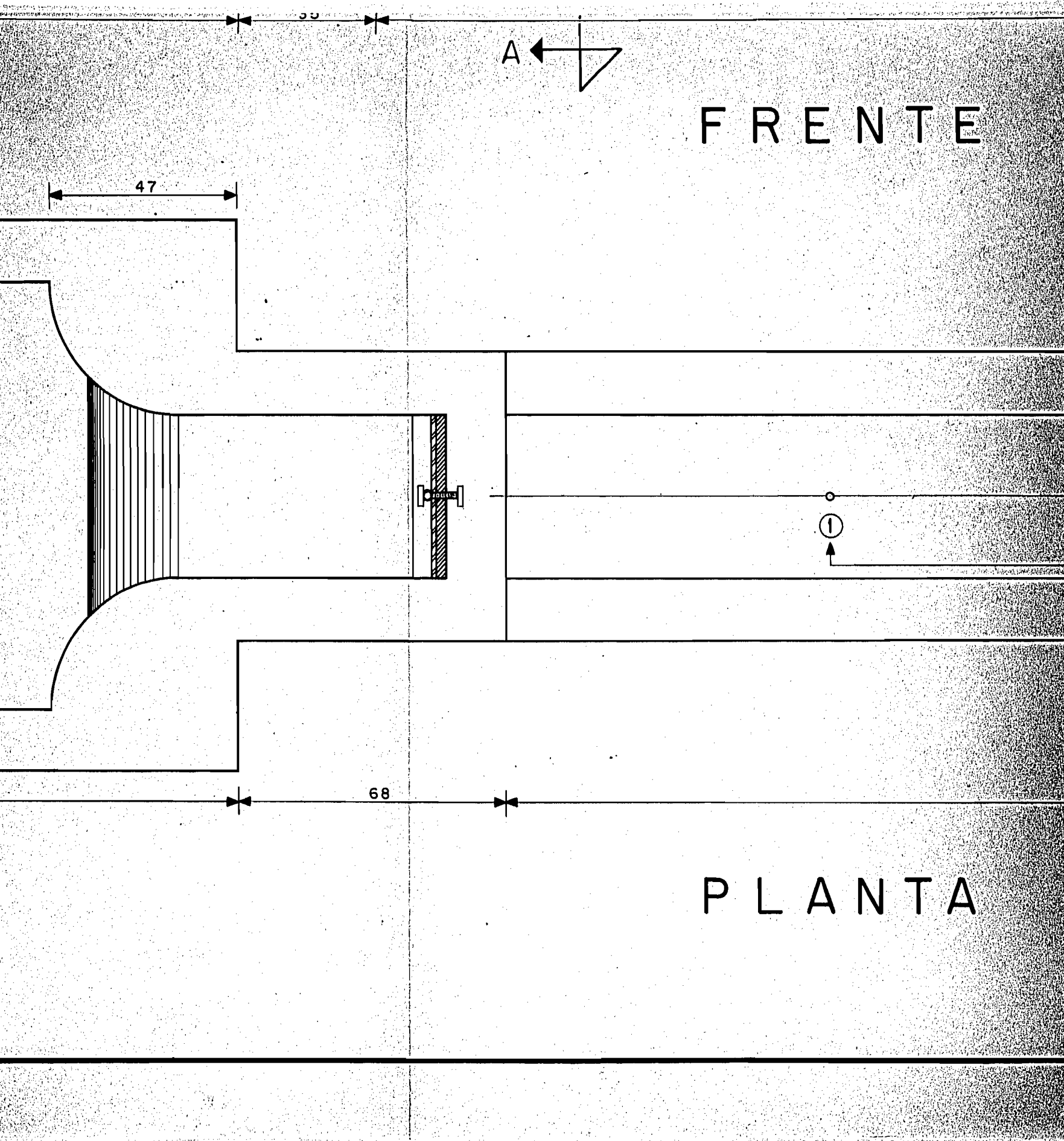






254



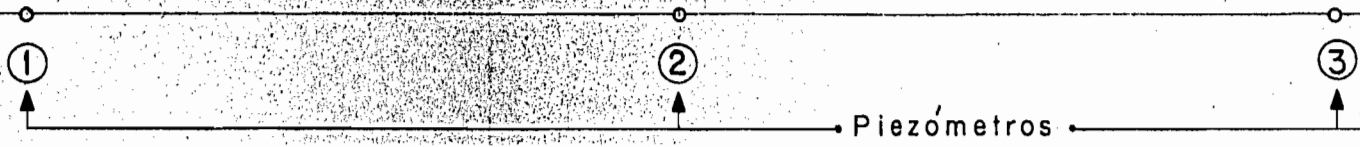


FRENTE

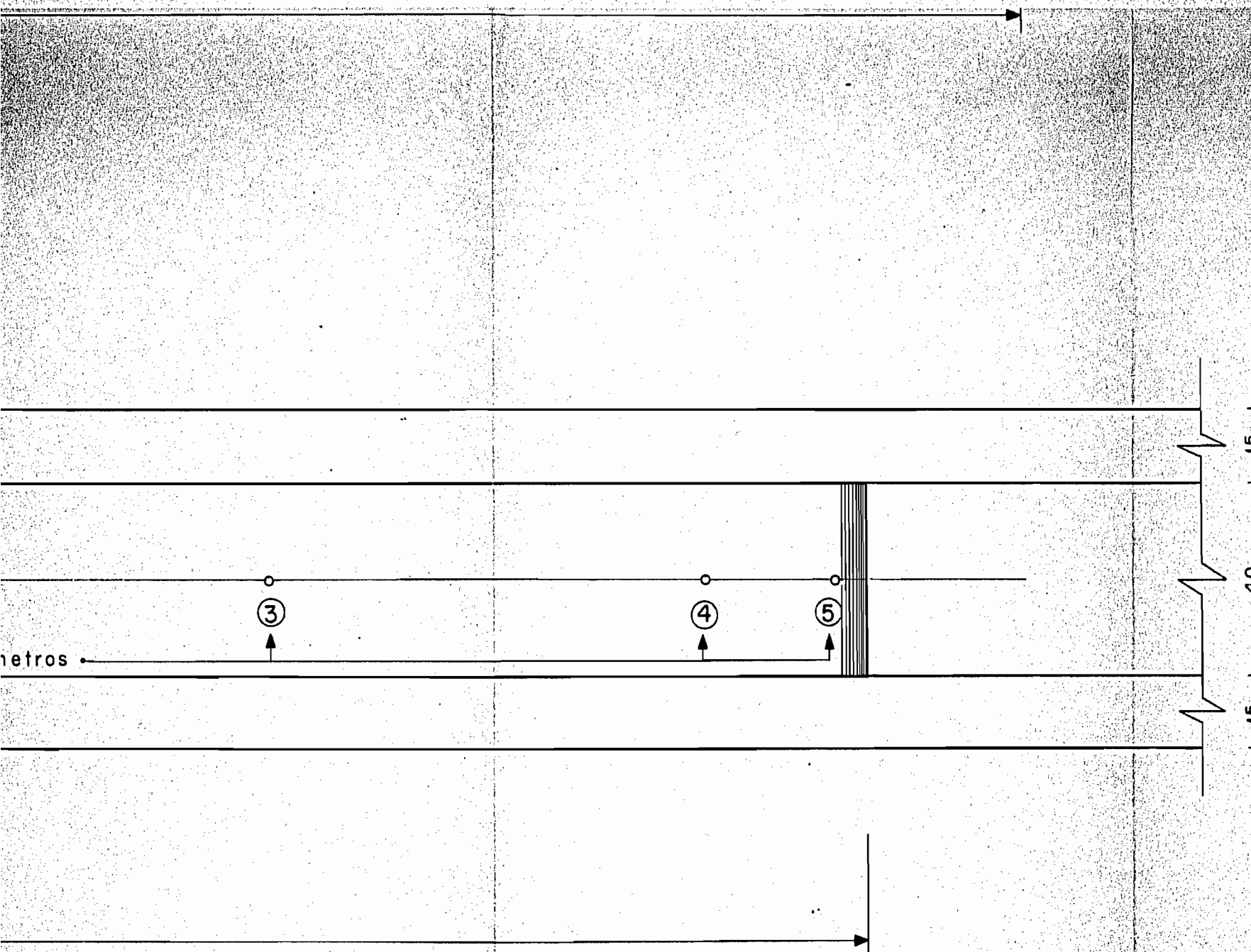
PLANTA



RENTE



LANTA



metros

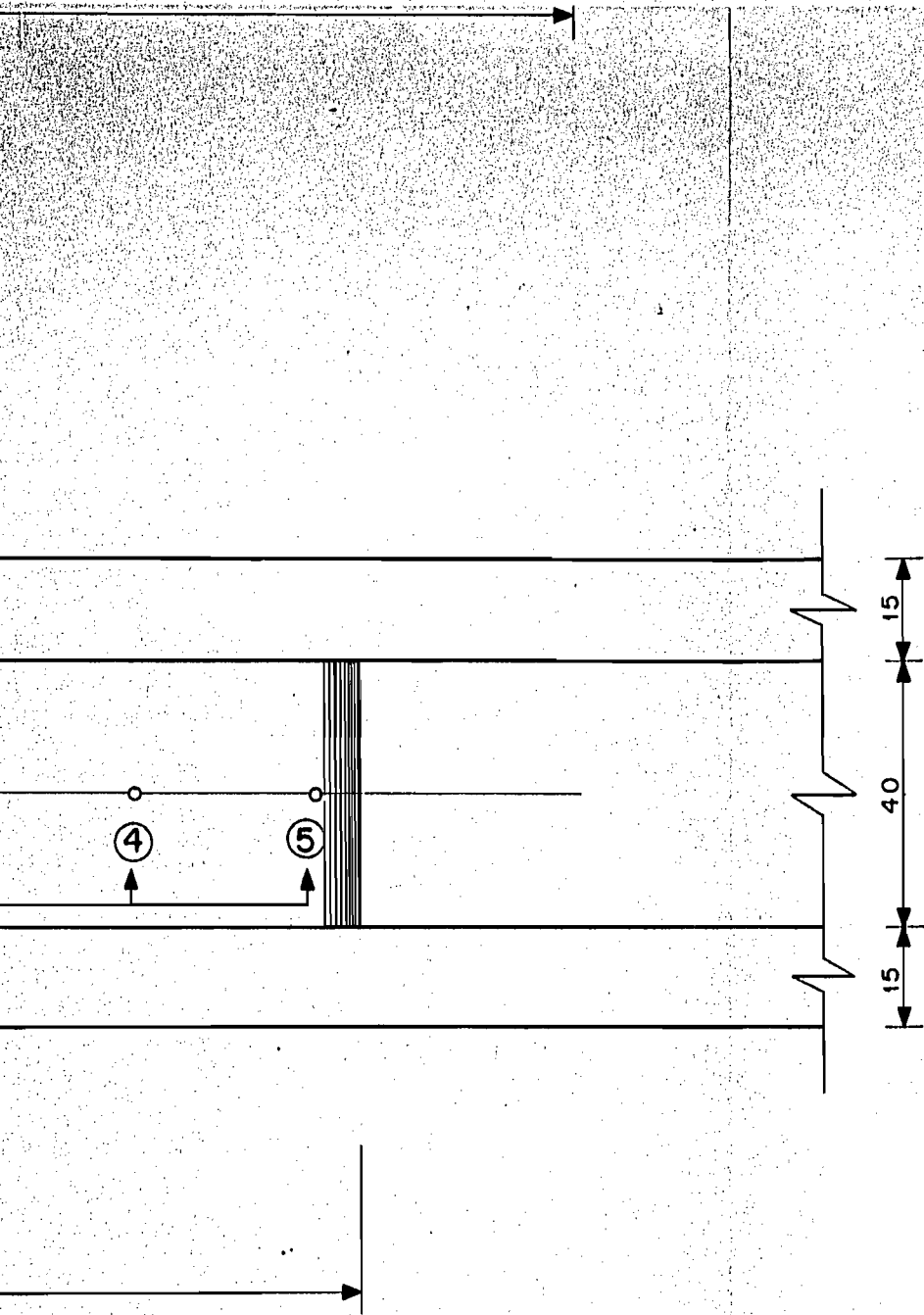
3

4

5

MO  
ENERG

CORTI



NOTA : Acotaci

ESCALA

U N A  
INSTITUTO DE IN  
SECCION DE HIDR

MODELO PARA EL ESTUDIO DE LA  
ENERGIA MEDIANTE LA CREACION DE  
DIMENSIONES GENE

# CORTE A-A

NOTA : Acotaciones en centímetros

ESCALA 1:10



BIBLIOTECA DE LA  
DIVISION DEL DOCTORADO

**U N A M**  
**INSTITUTO DE INGENIERIA**  
**SECCION DE HIDRAULICA**

**MODELO PARA EL ESTUDIO DE LA AMORTIGUACION DE LA  
ENERGIA MEDIANTE LA CREACION DE UNA BARRERA HIDRAULICA**  
**DIMENSIONES GENERALES**

CORTE A-A

NOTA: Acotaciones en centímetros

ESCALA 1:10

BIBLIOTECA DE LA  
DIVISION DEL DOCTORADO

U N A M  
TUTO DE INGENIERIA  
CCION DE HIDRAULICA  
ESTUDIO DE LA AMORTIGUACION DE LA  
A CREACION DE UNA BARRERA HIDRAULICA  
DIMENSIONES GENERALES