

2ej. 188



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

EXPERIMENTACION
SOBRE CUBETAS
LANZADORAS

Fernando Uriarte Zazueta

TESIS PROFESIONAL

1986



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 está 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.

CONTENIDO

| | | Pág. |
|---------------|------------------------------|------|
| CAPITULO I. | INTRODUCCION | 1 |
| CAPITULO II. | ANTECEDENTES | 6 |
| 2.1 | Introducción | 7 |
| 2.2 | Diseño | 8 |
| 2.3 | Cubetas de Lanzamiento | 13 |
| 2.4 | Longitud de Lanzamiento | 18 |
| CAPITULO III. | MEDICIONES EXPERIMENTALES | 23 |
| 3.1 | Introducción | 24 |
| 3.2 | Análisis Dimensional | 26 |
| 3.3 | Descripción del Modelo | 39 |
| 3.4 | Procedimiento de Medición | 44 |
| 3.5 | Análisis de Medición | 49 |
| CAPITULO IV. | RECOMENDACIONES DE OPERACION | 60 |
| 4.1 | Resultados Experimentales | 61 |
| CAPITULO V. | CONCLUSIONES | 70 |
| | AGRADECIMIENTO | 74 |
| | REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | 75 |

CAPITULO I

CAPITULO I

INTRODUCCION

Quiero expresar al lector, al profesionista, y en particular al estudioso de la Ingeniería, que la causa que motivó la elaboración de este documento, fue el interés que despertó en mí el adecuado manejo de las aguas excedentes en Presas, cuyo origen se remonta a la antigua civilización egipcia.

Hace aproximadamente cinco mil años, los egipcios vieron la necesidad de encauzar o retener las aguas del Nilo, tanto para evitar su acción destructora durante las crecientes, como para su mejor aprovechamiento. De ahí que se construyera la primera Presa, que se llamó Sadd-El-Kafara, cuyo objetivo era abastecer de agua a los trabajadores de las canteras, que tenían encomendada la construcción de las pirámides.

Esta Presa, fue hecha de mampostería, pero desgraciadamente falló al primer año, y parece ser que la falla se debió a la falta de obra de excedencias, ya que en ese año se presentó una avenida que hizo que el agua pasara por encima de la cortina.

Se puede decir que las Obras Hidráulicas constituyen un conjunto de estructuras, construídas con el objeto de manejar el agua, cualquiera que sea su origen, con fines de almacenamiento o de defensa.

Las Obras Hidráulicas se pueden clasificar de acuerdo con estas intenciones (referencia No. 1):

Aprovechamiento.-

- a) Abastecimiento de agua a poblaciones.
- b) Riego.
- c) Producción de fuerza motriz.
- d) Navegación fluvial.
- e) Recreación.

Defensa.-

- a) Contra inundaciones.
- b) Contra azolves.

Los elementos que constituyen un aprovechamiento superficial son los siguientes:

- 1.- Area de Captación.
- 2.- Almacenamiento, formado por una Presa que consta de las siguientes partes: vaso, cortina, obra de desvío, obra de toma, y obra de excedencias.
- 3.- Derivación.
- 4.- Sistema de Conducción.
- 5.- Sistema de Distribución.
- 6.- Utilización directa del agua.
- 7.- Eliminación de volúmenes sobrantes.

En el presente estudio, nos enfocamos a analizar experimentalmente diversos aspectos de una de las partes de la Obra de Excedencias, como son las Cubetas Lanzadoras, dada la importancia que este tipo de estructura terminal está teniendo actualmente, debido a que su costo es reducido, en comparación con las otras estructuras terminales como son los tanques de amortiguamiento.

El trabajo, consta de los siguientes temas:

I.- Introducción

II.- Antecedentes, en el cual se explican los distintos tipos

de estructuras terminales, su funcionamiento, así como sus ventajas y desventajas.

III.- Mediciones Experimentales.- en este tema, se da una breve explicación acerca de la Teoría del Análisis Dimensional, la cual se utilizó para la determinación de los números adimensionales que intervienen en el problema de la longitud del chorro.

Este capítulo contiene también, el lugar y localización del modelo, así como la explicación del mismo, presentando un pequeño esquema del Sistema.

Así mismo, se explica el procedimiento que se utilizó para la realización de las mediciones. Y finalmente incluye el análisis de las mediciones, es decir, el procedimiento de cálculo y su memoria.

IV.- Recomendaciones de Operación.- Contiene los resultados experimentales, los cuales son presentados en forma de gráficas, con su respectiva explicación y funcionamiento.

V.- Conclusiones.-

Se presentan los comentarios finales del trabajo.

CAPITULO II

CAPITULO II

ANTECEDENTES

2.1 Introducción

La función de disipar la energía de las descargas de los vertedores, se cumple con una selección adecuada de la estructura terminal.

En el diseño de esta estructura, que generalmente es un tanque amortiguador o una cubeta, de una obra de excedencias de una presa es necesario calcular, con la mayor exactitud posible, los valores que puede alcanzar la energía cinética (carga de velocidad) de la corriente dentro de la estructura y en los límites de la obra. Sobre todo es de vital importancia determinar el valor correspondiente en la sección donde la corriente abandona la parte revestida de la estructura terminal para incorporarse nuevamente al cauce del río, lo cual debe hacerse con el mínimo de energía cinética, para que con ello se reduzca la erosión a la salida o en la descarga de la estructura.

En el diseño para el control de la erosión se confrontan numerosas variables en adición a las características físicas de los materiales que forman el lecho del cauce. Entre las variables que se pueden mencionar está la frecuencia e intensidad de las avenidas, el grado de protección que deberá preverse para avenidas poco frecuentes y el nivel del remanso aguas abajo que se presente para diferentes descargas.

Para obtener un grado de protección adecuado contra la erosión aguas abajo de la estructura terminal y en función de la naturaleza de los materiales que forman el lecho del cauce, poco erosionable o erosionable, el proyectista podrá optar por las siguientes protecciones o por una combinación de ellas (ref. 4).

2.2 Diseño

Suelo poco erosionable.-

Para estructuras cimentadas en roca, el método convencional de diseño consiste en la delineación del perfil de la estructura con un delantal curvo provisto de una cubeta que recircule el agua en la dirección de la corriente, en algunos diseños la parte final de la cubeta está a la misma elevación que el lecho del río y en otros se encuentra más arri

ba. Frecuentemente la tangente del perfil de la cubeta en su parte de aguas abajo es horizontal y en algunas ocasiones el delantal se extiende hasta una cierta distancia.

En otros diseños la tangente del extremo de aguas abajo de la cubeta presenta una ligera deflexión arriba de la horizontal. En estructuras de baja altura alojadas en roca sólida, los delantales curvos son omitidos.

La formación de un salto hidráulico al pie de la estructura requiere que el nivel del remanso sea tal que el salto se produzca; si el nivel del agua en la descarga es elevado, el salto se presenta sobre el talud de la estructura es decir se presenta un salto ahogado. Bajo esta condición la energía cinética de la corriente se reduce considerablemente logrando con ello que el poder erosivo de la corriente sea menor que el que se presenta cuando el nivel del remanso es bajo, es decir, en esta condición el salto es barrido.

Suelo erosionable.-

Para esta condición, el diseñador podrá optar por disipar la mayor parte de la energía antes de que la corriente abandone la parte revestida de la estructura terminal; por dirigir la corriente dentro del remanso, es decir que la corriente no choque directamente contra la masa de agua que se

tiene en la descarga; si algún grado de erosión es permitido.

La disipación de la mayor parte de la energía cinética, antes de que abandone la parte revestida de la estructura terminal, se logra si se forma el resalto hidráulico, añadiendo en algunos casos, obstáculos para confirmar el salto. Cuando el remanso es suficiente, se fuerza la formación del salto al pie de la obra de excedencias, mediante la construcción de un tanque amortiguador sobre el lecho del río, o abajo del mismo al excavarlo. Esto último se tiene que hacer cuando el nivel del remanso no es suficiente, pero ello encarece la obra.

Cuando el nivel del remanso es suficiente para formar el resalto hidráulico, y la corriente alcanza un valor alto en su energía cinética al pie de la obra de excedencias, es decir, lleva una velocidad muy alta. La estructura puede diseñarse colocando un delantal con pendiente longitudinal hacia aguas abajo, o con dientes para disipar la energía cinética de la corriente.

El dirigir la corriente dentro del remanso, es decir, que la corriente no se incorpore directamente al terreno natural, se logra al colocar un umbral en el extremo del tanque amortiguador, o mediante una cubeta ahogada para disipar

la energía cinética de la corriente. También en ocasiones se interponen obstáculos a la corriente (dientes) cuando la presa es de poca altura. Sin embargo, si la presa es de considerable altura, los efectos destructivos pueden imposibilitar el uso de obstáculos a la corriente para disipar su energía cinética, a pesar de que tales obstáculos sean muy efectivos en modelos hidráulicos.

Si algún grado de erosión es permitido, la corriente puede ser desviada mediante una cubeta deflectora, o utilizando un umbral en el extremo del tanque amortiguador.

Los diseños más conservadores contemplan un tipo de estructura terminal que garantiza la disipación de una gran parte de la energía cinética dentro de los límites de la obra, de tal manera que las fuerzas hidrodinámicas no sean capaces de arrastrar los materiales que forman el lecho del cauce.

Sin embargo, a pesar de que se tomen providencias en el diseño de los tanques amortiguadores, existe la posibilidad de que la erosión ocurra aguas abajo de la estructura. La forma y extensión de la erosión dependerá de la energía cinética de la corriente, de los dispositivos que se proyecten en el tanque amortiguador y de las propiedades de los materiales que formen el lecho del río.

Cuando la energía cinética de la corriente por disipar es muy alta, no es factible la construcción de un tanque a-^s mortiguador como estructura terminal, siendo su costo prohibitivo por las dimensiones requeridas para disipar la mayor parte de la energía cinética, por esta y otras razones, se hace necesario adoptar diseños menos conservadores.

Si existe la posibilidad de que la obra de excedencias descargue al río en forma directa, sin en el empleo de una estructura disipadora de energía, esto se logra mediante una cubeta de lanzamiento o salto de ský.

Las cubetas de lanzamiento, no son sustitutos de los disipadores de energía cinética de la corriente, ya que son incapaces de disiparla por sí misma; entre sus objetivos está el lanzar el flujo hasta un sitio donde no se produzcan daños, es decir, que no se ponga en peligro la seguridad de la presa ya sea planta hidroeléctrica o que tenga cualquier otro fin.

2.3 Cubetas de lanzamiento.-

Una cubeta de lanzamiento es una estructura que se coloca en el extremo de una obra de excedencias con la intención de que el agua que descarga al vertedor y que al pasar por la cubeta tiene mucha velocidad, sea lanzada libremente para que disipe su energía por choque.

Este tipo de lanzamiento es satisfecho por cubetas con geometrías muy diversas, sin embargo, para que la obra de excedencias esté segura, debe tenerse la precaución de que la posible erosión que se produzca en la zona de disipación de energía no ponga en peligro la estabilidad de la obra de excedencias, lo cual podría ocurrir si la erosión recula y deja sin apoyo alguna parte del vertedor, y sobre todo si no se ha proyectado algún apoyo que prevea la posible erosión que recula.

Una cubeta de lanzamiento deberá proyectarse siempre tomando en cuenta todo el rango de gastos de descarga, ya que para cada gasto la zona de disipación de energía es diferente.

Es recomendable que, sobre todo para vertedores sin control, la cubeta se diseñe de manera que para aún gastos

muy pequeños, ésta trabaje precisamente como cubeta de lanzamiento, esto es, que lance el chorro a una cierta distancia del pie de ella misma.

Habrà de todas maneras, si el labio deflector tiene un ángulo positivo, un gasto para el cual la cubeta se ahogue, este gasto deberá ser tal que la energía del agua no arrastre el material del pie del deflector y no produzca socavación.

Una cubeta de lanzamiento debe colocarse lo más bajo que permitan las restricciones de velocidad con peligro de cavitación en la rápida y de los tirantes aguas abajo de la cubeta que impidan su descarga libre (ref. 3).

De acuerdo con lo señalado, las cubetas de lanzamiento son también diseñadas para dispersar el flujo y evitar en lo posible daños en las mallas y/o en el fondo del cauce.

La trayectoria del flujo lanzado, conocida comunmente como chorro, es modificada para que su incidencia sobre la superficie del remanso produzca las condiciones de flujo más favorables al comportamiento del cauce.

Cuando las profundidades del remanso son las adecuadas

para producir un salto hidráulico se utilizan las cubetas ahogadas, que disipan gran parte de la energía cinética de la corriente al deflectar hacia aguas arriba el flujo.

El funcionamiento hidráulico de este tipo de vertedor se manifiesta por la formación de dos remolinos o vórtices, uno en la superficie moviéndose en el sentido contrario a las manecillas del reloj, situado dentro de la región que queda arriba de la cubeta, y el otro es un remolino sobre el piso que se mueve en el sentido de las manecillas del reloj, y que se encuentra situado aguas abajo de la cubeta.

La selección del tipo de estructura terminal es función de la elevación que se tenga al final del canal de descarga y del nivel del agua del río en la zona de la descarga. Cuando el nivel del agua en el río queda siempre sobre los conjugados de las elevaciones al final de la descarga, se utilizan cubetas ahogadas, en caso contrario cuando los conjugados quedan por abajo se utilizan las cubetas de lanzamiento que es el motivo del presente trabajo.

El empleo de las cubetas de lanzamiento en rápidas, como alternativa de los tanques amortiguadores, se ha visto limitado por la incertidumbre de su comportamiento y efecto hidráulico en la erosión del suelo. Particularmente en aquellos suelos fáciles de erosionar, que bajo ciertas circunstancias, podría poner en peligro la estabilidad de la misma estructura, o de otras que estén cercanas. A continuación se presentan una serie de aspectos que conviene se tomen en cuenta para el diseño.

-Características hidráulicas en la Cubeta.

Una vez conocida la geometría de una cubeta, se pueden determinar sus características hidráulicas, basándonos en un método matemático, que transformado a un programa de computadora, permite verificar a bajo costo y en corto tiempo, diferentes alternativas para el diseño. Ello facilita la selección preliminar de una ó más alternativas, para ser ensayadas en modelos hidráulicas, haciendo el menor número de modificaciones, con el consiguiente ahorro de tiempo.

Las características hidráulicas que se pretenden conocer, estarán en función de calcular la distribución de velocidades al paso de un gasto con un tirante dado y, como consecuencia de esta distribución de velocidades, valuar las pre-

siones que se ejercen en la cubeta.

La obtención de las presiones es muy importante para el diseño de las cubetas de lanzamiento, pero su determinación no es el objetivo de este trabajo por lo cual solamente son mencionadas.

- Riesgos de erosión por cavitación.

Un factor que limita el diseño, y que representa un problema grave para la operación y mantenimiento de la cubeta es la erosión de las superficies expuestas a flujo de alta velocidad, la cual se presenta aguas abajo de cualquier obstáculo al flujo o por presiones próximas a la de vaporización; ambas son asociadas a una separación del flujo de la frontera que lo confina. Las causas principales corresponden a:

- a) Las formas irregulares de las superficies, malos acabados, salientes y fisuras.
- b) Elementos estructurales tales como ranuras, juntas de dilatación, deflectores, bloques, cambios de sección o de dirección, etc.
- c) Materiales inadecuados.

Otras causas serían la erosión química o mecánica, acción del hielo o una geometría inadecuada de sus fronteras.

2.4 Longitud de Lanzamiento.-

Cuando la descarga de las obras de excedencia pueden hacerse directamente al río, con frecuencia el chorro se proyecta lejos de la estructura por medio de una cubeta de lanzamiento. El agua en estas estructuras sale como un chorro libre y cae en el cauce a una cierta distancia de la estructura terminal.

La trayectoria del chorro es función de la energía cinética del flujo y del ángulo de lanzamiento con que el chorro sale de la estructura terminal.

La longitud de lanzamiento teórica del chorro que sale de la estructura se determina a partir de la trayectoria parabólica que describe un proyectil que es lanzado con una velocidad inicial V y forma un ángulo α con la horizontal las diferencias en las expresiones está en los parámetros empleados como datos iniciales.

El Bureau of Reclamation obtiene la trayectoria del chorro, al tomar como origen de las coordenadas al labio de la cubeta.

$$Y = X \tan \alpha - \frac{X^2}{K [4(d+h_v) \cos^2 \alpha]}$$

donde:

X e Y coordenadas

K Factor para compensar la reducción de la velocidad del chorro por la resistencia del aire, turbulencias internas y desintegración.

h_v Carga de velocidad.

d Tirante del flujo.

El valor teórico de K es igual a 0.9.

El alcance horizontal del chorro al nivel de la salida se obtiene haciendo "Y" igual a cero, de esta forma :

$$X = 2 K (d + h_v) \operatorname{sen} 2 \alpha$$

el valor máximo de "X" será igual a :

$$X_{\text{máx}} = 2K (d+h_v)$$

cuando $\alpha = 45^\circ$

Para calcular la longitud de lanzamiento del flujo, medida a partir de la estructura terminal, se pueden aplicar las siguientes expresiones propuestas por diferentes investigadores soviéticos (ref. 5).

a) VIZGO calcula teóricamente la distancia relativa de lanzamiento (λ_0).

$$\lambda_0 = \frac{L_v}{z_0} = 2 \cos \alpha \left(m_v \operatorname{sen} \alpha + \sqrt{m_v \left(1 - m_v \cos^2 \alpha + \frac{d}{2z_0} \cos \alpha \right)} \right)$$

donde:

d tirante del flujo

L_v Longitud de vuelo del flujo, en m.

m_v parámetro $m_v = h_v/z_0$

z_0 Distancia entre el nivel de aguas máximas y el nivel del remanso al pie de la estructura en m.

La expresión no considera las pérdidas de energía, ni el comportamiento del lanzamiento real del chorro en el ai-

re respecto a la trayectoria ideal supuesta.

b) KISELIOV propone la siguiente expresión

$$L_v = 2\psi_1^2 n_k T \cos \alpha \left(\sin \alpha + \sqrt{\sin^2 \alpha + \frac{d \cos^2 \alpha + 2T(1-n_k)}{2\psi_1^2 n_k T}} \right)$$

donde:

L_v Longitud de vuelo del flujo.

n_k Parámetro $n_k = T_1 / T$

T_1 Distancia entre el nivel de aguas máximas y el fondo del cauce.

T Distancia entre el nivel de aguas máximas y el labio de la cubeta de lanzamiento.

d Tirante del flujo.

ψ_1 Coeficiente de velocidad; considera las pérdidas de energía desde la cresta vertedora hasta la cubeta de lanzamiento.

El USBR toma en cuenta el comportamiento real del chorro en el aire respecto a la trayectoria ideal asumida, afec

tando a ésta por un coeficiente K_1

$$L_v(\text{real}) = K_1 L_v(\text{teórica})$$

Existen distintos estudios que analizan diferentes aspectos sobre el chorro lanzado los cuales se mencionarán de una manera muy superficial, que son:

Ancho máximo del lanzamiento del chorro.- que se produce cuando el chorro penetra en el remanso formado aguas abajo de la estructura terminal.

Angulo de entrada del chorro en la superficie del agua.-

Velocidad de entrada del chorro en la superficie del agua.-

Aireación del chorro.- Para reducir los efectos del chorro en el cauce, conviene que el chorro disipe su energía, es decir, que se produzca la desintegración y aireación del chorro a efecto de que se produzcan pérdidas de energía debidas a la fricción interna y resistencia del aire.

CÁPITULO III

CAPITULO III

MEDICIONES EXPERIMENTALES

3.1 Introducción

La experimentación es un arte que sólo se puede dominar practicándola. Aún así, es necesario conocer y entender los principios básicos, así como una serie de recomendaciones derivadas de la experiencia.

En 1638, Galileo Galilei presenta en su trabajo "Diálogos de Dos Ciencias Nuevas", la primera experiencia acerca de la importancia de las escalas. Y fue el primero en demostrar que la escala lineal no necesariamente rige a todas las demás características, y que es función directa de las unidades de referencia. Por ejemplo, el volumen es el cubo de la dimensión de longitud, etc.

| ESCALAS | | | |
|---------|-------|-------|-------|
| LONG. | AREA | VOL. | PESO |
| L | L^2 | L^3 | L^3 |
| 2 | 4 | 8 | 8 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |

A partir de entonces la experimentación sufre un giro importante gracias a las aportaciones de diversos investigadores entre los cuales están:

- John Smeaton en 1759 construye el primer modelo hidráulico para probar la eficiencia de un molino.
- En 1770 el francés Borda introduce las leyes de pérdidas.
- La investigación sigue su curso y así encontramos a Ferdinand Reech en 1852 y a fines del siglo XIX a Reynolds y Froude entre otros.

3.2 Análisis Dimensional

El análisis dimensional es una técnica que proporciona información acerca del fenómeno en estudio, utilizando las dimensiones de las variables que intervienen en el problema.

En ingeniería es frecuentemente utilizado en la verificación de fórmulas y en la transformación de un sistema de unidades a otro.

Otro uso que se verá a continuación, permite reducir el número de variables de un problema simplificándolo en forma importante.

3.2.1 Unidades de Referencia.

Las unidades de referencia más usuales son:

En sistema absoluto $M = \text{Masa}$; $L = \text{Longitud}$ y $T = \text{Tiempo}$; o en forma equivalente en el sistema gravitacional $F = \text{Fuerza}$; donde F y M están ligadas por la 2a. Ley de Newton.

Las variables que intervienen en un problema se clasifican en dos tipos: variables dependientes y variables independientes.

La variable dependiente es la que interesa determinar; en Hidráulica es común que esta sea la velocidad o la presión, o alguna variable derivada de estas dos como: empuje, gasto, etc.

Las variables independientes intervienen en un problema y en función de las cuales interesa determinar la variable dependiente. En hidráulica son variables que generalmente describen la geometría del flujo o representan las propiedades del fluido.

Como ejemplo:

$$V = \sqrt{2gH}$$

donde: V variable dependiente
 2 parámetro
 g Aceleración de la gravedad = cte.
 H Variable Independiente

y se puede escribir como: $V = f (g,H)$

El teorema básico que permite reducir el número de variables de un problema es el teorema de Buckingham-Vashy que se enuncia:

"Una ecuación dimensionalmente homogénea en donde intervienen m variables y cuyo rango de la matriz de exponentes sea r , podrá expresarse como una combinación de $m - r$ productos adimensionales".

Es decir :

Sea una función de m variables X_i

$$f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_m) = 0 \quad \text{----- (A)}$$

y r es el rango de la matriz de exponentes de las X_i ;

Existirá otra función:

$$f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{m-r}) = 0 \quad \text{----- (B)}$$

Donde las \uparrow ; serán productos adimensionales.

Para pasar de la ecuación (A) a la (B) se procede:

- 1.- Se forma la matriz de exponentes y se determina su rango.

Para el ejemplo $r = 3$

- 2.- Se construye un sistema de ecuaciones utilizando como coeficientes los exponentes de la matriz, para el ejemplo:

$$x_1 + x_3 = 0$$

$$x_1 + x_2 - 3x_3 + x_4 = 0$$

$$- 2x_1 - x_2 = 0$$

- 3.- Se encontrarán $(m - r)$ soluciones al sistema planteado; cada solución mostrará las exponen-

nentes a los que hay que elevar las variables originales (V asociada a X_1 , F asociada a X_2 , etc.) para obtener un producto adimensional.

Como el sistema es generalmente indeterminado, (más incógnitas que ecuaciones) es necesario asignar valores a algunas variables y es conveniente seguir ciertos criterios que permitan encontrar productos adimensionales significativos.

3.2.3 Criterios Para Formar Productos Adimensionales.

- a) Primera regla.- Hacer que la variable dependiente aparezca en el numerador de un solo producto adimensional, de preferencia elevada a la primera potencia y no aparezca en ningún otro producto.

Excepción importante es la velocidad que, debido al papel central que juega en los problemas, aparece frecuentemente en la variable dependiente y en las independientes.

b) Segunda regla.- Intentar formar productos adimensionales ya conocidos como por ejemplo: No. de Reynolds, No. de Froude, etc.

c) Tercera regla.- Formar productos adimensionales como cocientes de variables de iguales dimensiones.

$$\frac{x}{h}, \quad \frac{y}{h}, \quad \text{etc.}$$

Para el ejemplo:

$$m = 4 \text{ variables } \text{ y } r = 3$$

Por lo tanto existen, $m-r = 1$ producto adimensional.

- De la primera regla $X_1 = 1$ por lo que el sistema será:

$$X_3 = -1$$

$$X_2 - 3X_3 + X_4 = -1$$

$$X_2 = -2$$

Cuya solución es $X_1 = 1; X_2 = -2; X_3 = -1; X_4 = -2$

Por lo que el producto buscado será:

$$\pi_1 = \frac{F}{\rho v^2 L^2}$$

Y aplicando la segunda regla queda:

El Número de Euler, ya que como se puede observar:

$$E = \tau^{-1/2} ; \text{ por lo tanto}$$

$$E = \frac{v}{\sqrt{\Delta P/\rho}}$$

Siguiendo este mismo procedimiento, obtendremos los productos adimensionales de las variables que intervienen en el caso de la longitud del chorro, objeto de este estudio.

3.2.4 Longitud Del Chorro.

Las variables que intervienen en la longitud del chorro que es lanzado por una cubeta, son las siguientes:

$$L = f (q, r, y, g, \alpha)$$

Donde:

L Longitud del chorro, en m.

q Gasto por unidad de ancho, en $m^2/\text{seg.}$

r Radio de curvatura de la cubeta, en m.

y Tirante del flujo en la cubeta, en m.

g Aceleración de la gravedad = cte. En $m/\text{seg.}^2$

α Angulo de lanzamiento del chorro, en ° (grados).

que es:

$$2X_1 + X_2 + X_3 + X_4 = 0$$

$$-X_1 + 2X_4 = 0$$

Asignando $X_1 = 1$; $X_2 = -1$ y resolviendo,

$$X_1 = 1 ; X_2 = -1 ; X_3 = -1/2 ; X_4 = -1/2$$

Por lo tanto, el número adimensional queda:

$$\pi_4 = \frac{q}{r \sqrt{gy}}$$

Por lo tanto, la función transformadora es:

$$f = \left[\alpha, \frac{L}{r}, \frac{L}{Y}, \frac{q}{r gy} \right]$$

Y con lo cual, se procederá a procesar los resultados.

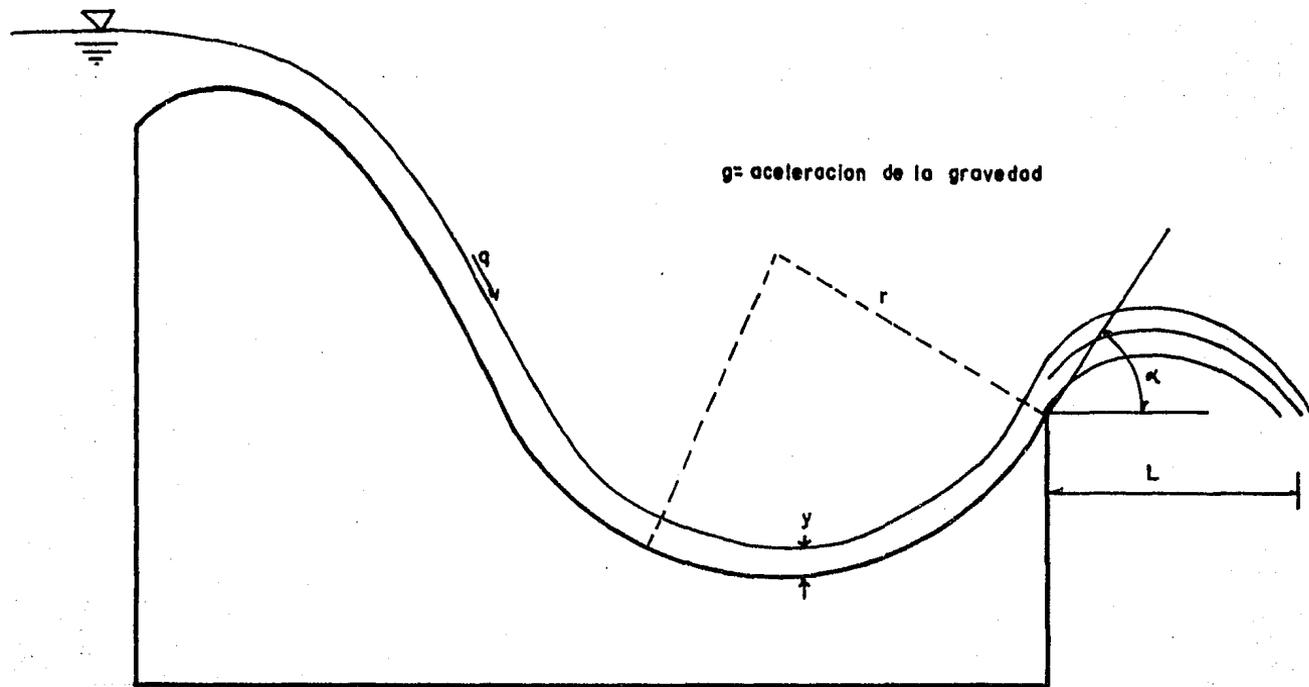


FIG. 3.1 Variables que intervienen en la longitud del chorro

3.3 Descripción Del Modelo.

- Lugar y localización.

El lugar en el que se encuentra ubicado el modelo, es el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, de la U.N.A.M.

El Laboratorio está situado en la planta baja del edificio principal de dicha Facultad.

Dentro del Laboratorio, existen distintos modelos, entre los cuales se encuentra el que se va a explicar a continuación, que fue en el que se realizaron todas las mediciones.

El modelo es un cimacio tipo Creager, sobre un canal cuyas dimensiones se darán a conocer más adelante.

Dicho modelo se construyó con el objeto de realizar diversas investigaciones de tipo experimental, entre las cuales se encuentra este trabajo.

A continuación se describen las partes que constituyen el "modelo" (denominación adoptada para referirnos a todo el conjunto, que está formado por: cimacio tipo Creager, canal, tanques de almacenamiento, tuberías y bombas).

- Tanques de Almacenamiento.-

El modelo está compuesto de dos tanques de almacenamiento, siendo sus dimensiones las siguientes:

0.9 m de ancho; 4.22 m de largo; y 0.95 m de altura.

Los tanques tienen una función muy importante: permiten que el "modelo" sea independiente, con la ventaja de aprovechar el agua almacenada y, una vez utilizada, se recircula con la ayuda de bombas autónomas.

- Canal Plint.-

En la composición del "modelo", el canal es parte fundamental, ya que en él se encuentra el cimacio.

Dicho canal tiene las siguientes medidas:

0.20m de ancho ; 13 m de longitud ; y 0.5m de altura.

En la figura 3.4 , se presenta un pequeño esquema de la instalación.

El sistema cuenta con un par de bombas, las cuales levantan el agua de los tanques hasta el canal, estos a su vez, se encuentran interconectadas por dos tuberías de fierro galvanizado, una bomba para cada tanque, con una tubería de 0.12m., de diámetro, estas tuberías, convergen en otra de 0.20m., de diámetro, que es la que va a dar al canal.

Una vez que el agua empieza a subir al canal, va ganando altura, hasta que comienza a verter por el cimacio, posteriormente es lanzada por la cubeta y regresada nuevamente al tanque de almacenamiento, de esta manera el agua se está utilizando continuamente.

El cimacio de tipo Creager, es una estructura de madera, y en la parte final, al pie del cimacio, tiene una cubeta de lanzamiento, la cual para este trabajo fue neces-

sario modificar, ya que se tenfan que hacer mediciones para distintos ángulos de salida.

Para hacer la modificación se utilizó un plástico, que tenía el mismo radio de curvatura que el original, que es de 12.7 cm.

La primera medición se hizo con un ángulo de salida de 45°, después, para hacer la siguiente medición, que fue con un ángulo de 40°; hubo necesidad de cortar el plástico a una medida tal que diera los 40°, y así sucesivamente, para 30°, 20°, y 10°.

- Características Hidráulicas.-

La ecuación del cimacio es:

$$y = \frac{x^{1.85}}{2H_d^{0.55}}$$

Donde H_d , es la carga de diseño = 4.5cm.

La longitud de la cresta vertedora es igual a 0.20m.

El radio de curvatura $r = 0.127\text{m}$.

Angulo de salida = 10° , 20° , 30° , 40° , y 45° .

El paramento vertical $P = 0.3335\text{ m}$.

El gasto de diseño $Q_d = 4.16\text{ Lts./seg}$.

3.4 Procedimiento De Medición.

Para hacer las mediciones en el modelo se procedió de la siguiente manera:

- Prender la bomba que eleva el agua al modelo.

- Se abría la válvula que alimenta al sistema.

Como se observa en la fig. 3.2 , para gastos pequeños se forma un salto hidráulico en la cubeta, y el agua empieza a chorrear al pie del modelo, esto en prototipo se debe de evitar lo más posible ya que ocasionaría socavación en la parte inferior, y esto puede poner en peligro la estructura.

Se sigue abriendo poco a poco la válvula, midiendo se la carga sobre el vertedor (con el limnómetro, a una distancia considerable de la cresta vertedora), hasta que llega un momento en el cual el agua empieza a despegarse, como se ve en la fig. 3.3 , en ese momento se mide la carga sobre el vertedor, el tirante del flujo y la

longitud del chorro, a una distancia máxima medida sobre el eje X , cuyo origen se tomó donde empieza a despegar el agua, y a la altura del fondo de la cubeta, con esa primera medición, se determina el gasto de despegue para el ángulo que se está midiendo, la primera medición se hizo para un ángulo de salida de 45°

Después de haber hecho las primeras medidas. se abre otro poco la válvula, es decir, se aumenta el gasto, para lo cual aumentan el tirante, la carga y la longitud del chorro, se deja que se estabilice el flujo, y una vez estabilizado, se vuelven a realizar las mediciones, del tirante, la carga y la longitud del chorro.

Este procedimiento se repite varias veces, hasta tener un número aceptable de datos (que se pueda formar bien la curva que relaciona al gasto, al radio de curvatura y al tirante con la longitud del chorro).

Después de haber hecho la última medición, se cierra un poco la válvula, y se espera a que se estabilice de nuevo el flujo, es decir se empieza a disminuir el

gasto, una vez estabilizado el flujo, se hacen de nuevo las mediciones, pero ahora de regreso.

El procedimiento se continúa de la misma forma, hasta llegar a un gasto en el cual el flujo deje de despegar y se forme de nuevo esa especie de charco en la cubeta como sucedía antes del despegue.

El procedimiento que se acaba de enunciar es el que se realizó para los distintos ángulos.

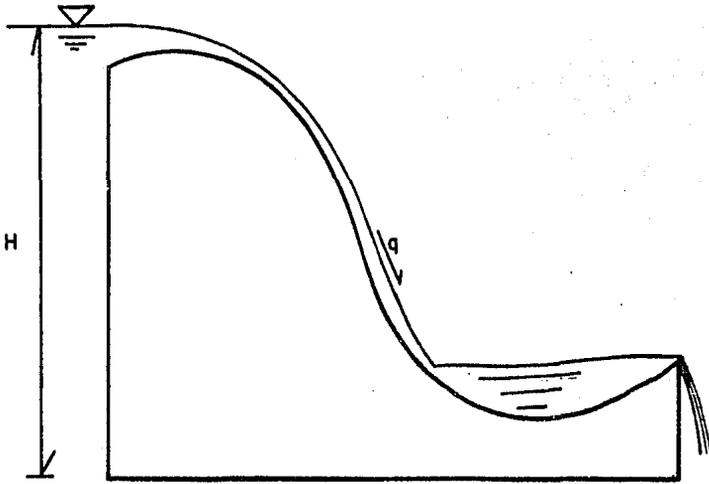


FIG. 3.2

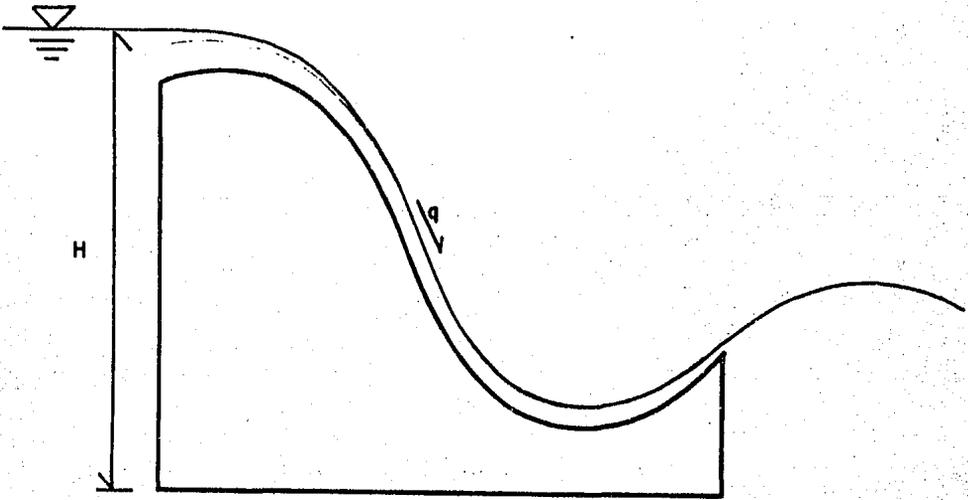


FIG. 3.3

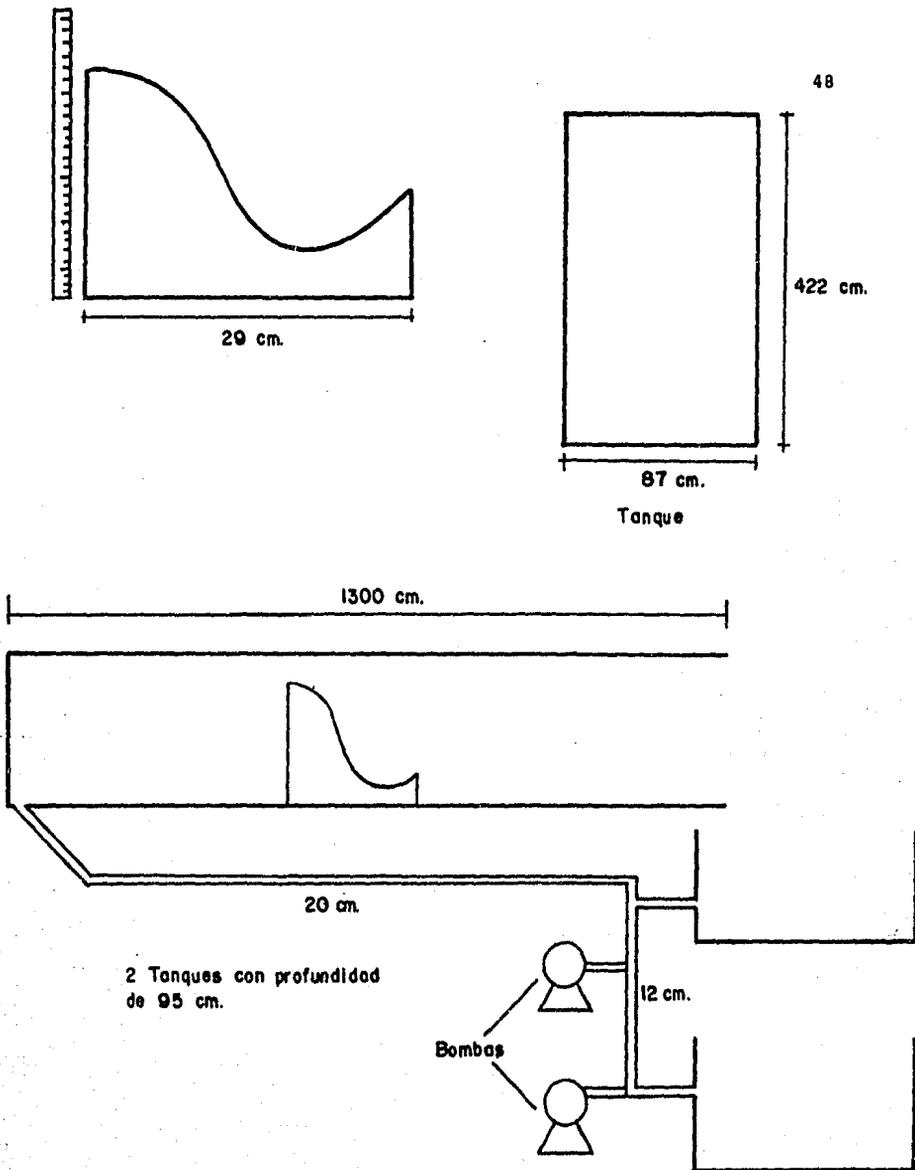


FIG. 3.4 Esquema del Sistema

3.5 Análisis De Medición.

Después de haber efectuado las mediciones, el siguiente paso fue realizar los cálculos necesarios para la obtención de algunas de las variables que intervienen en el problema de la longitud del chorro, como son; velocidad, área, gasto unitario, etc.

A continuación se presenta el procedimiento de cálculo que se siguió:

3.5.1 Procedimiento De Cálculo.

Con los datos obtenidos de las mediciones, que fueron H = carga; Y = tirante; y L = longitud del chorro, se obtuvo lo siguiente:

Determinación del gasto.-

Se utilizó la fórmula

$$Q = C L H_V^{3/2}$$

Donde:

- Q Gasto total, en m^3/seg .
- L Longitud de la cresta vertedora, en este modelo
L = 0.2 m.
- H_V Carga neta sobre el vertedor, la cual es igual a la carga total medida sobre el vertedor, menos la tara.
- C Coeficiente de gasto, cuya determinación se explica a continuación.

Determinación del coeficiente de gasto.-

El coeficiente de gasto se determina mediante la utilización de unas gráficas, las cuales fueron tomadas de la referencia No. 2.

Para poder utilizar estas gráficas, es necesario tener los valores de :

H_d Carga de diseño del vertedor.

P Paramento vertical.

H_v Carga neta sobre el vetedor.

Entrando a la primera gráfica por el eje de las abscisas con el valor de la relación:

$$\frac{P}{H_d}$$

Hasta cruzar con una línea curva, la cual al salir por el eje de las ordenadas nos dá el valor de C_0 .

A la segunda gráfica, se entra por el eje de las abscisas con el valor de la relación entre;

$$\frac{H_v}{H_d}$$

El cual al cortar con una línea curva, y salir por el eje de las ordenadas nos da el valor de ;

$$\frac{C}{C_0} ;$$

De aquí, se despeja el valor de C , y se utiliza el valor de C_0 de la primera gráfica.

Determinación Del Area Hidráulica.-

El área hidráulica se determina multiplicando el tirante del flujo, por el ancho de la plantilla;

$$A = b Y$$

Determinación De La Velocidad.-

Para la obtención de la velocidad se utilizó la ecuación de continuidad:

$$Q = V A ; \text{ por lo tanto } V = \frac{Q}{A}$$

Donde:

V Velocidad, en m/seg.

Q Gasto total, en m³/seg.

A Area hidráulica, en m².

El gasto unitario q , se obtiene dividiendo el gasto total, entre el ancho de la plantilla;

$$q = \frac{Q}{b}$$

3.5.2 Memoria De Cálculo.-

Siguiendo el procedimiento explicado anteriormente, se hicieron todos los cálculos que veremos a continuación:

La presentación de los cálculos, se hace mediante tablas, y contienen los resultados de todas las mediciones, para gasto creciente en la primera parte, y luego de regreso, es decir, para gasto decreciente, en la segunda parte.

Se elaboró una tabla, para cada ángulo de salida, para 10° , 20° , 30° , 40° y 45° .

RESULTADO DE LOS CALCULOS ELABORADOS PARA

UN ANGULO DE SALIDA $\alpha = 10^\circ$

| H. (cm) | H/ Hd | C/ C0 | Q lt/s | Y (cm) | A ₂ (m ²) | V m/s | q r/jgy | L cm | L/ r | L/ Y |
|------------|----------|----------|-----------|-----------|-------------------------------------|----------|------------|---------|---------|---------|
| 0.45 | 0.10 | 0.821 | 0.108 | 0.15 | 0.0003 | 0.36 | 0.035 | 3 | 0.236 | 20 |
| 0.75 | 0.166 | 0.841 | 0.23 | 0.15 | 0.0003 | 0.79 | 0.077 | 5 | 0.394 | 33.32 |
| 1.55 | 0.344 | 0.89 | 0.74 | 0.20 | 0.0004 | 1.87 | 0.21 | 8.5 | 0.669 | 42.5 |
| 2.45 | 0.544 | 0.93 | 1.55 | 0.36 | 0.0007 | 2.159 | 0.32 | 10 | 0.787 | 27.77 |
| 3.45 | 0.766 | 0.965 | 2.69 | 0.6 | 0.0012 | 2.24 | 0.43 | 12 | 0.945 | 20 |
| 4.65 | 1.033 | 1.007 | 4.40 | 0.90 | 0.0018 | 2.44 | 0.58 | 15 | 1.181 | 16.6 |
| 5.55 | 1.23 | 1.032 | 5.88 | 1.05 | 0.002 | 2.80 | 0.72 | 17.5 | 1.378 | 16.66 |
| 6.35 | 1.411 | 1.051 | 7.33 | 1.40 | 0.0028 | 2.61 | 0.77 | 17 | 1.339 | 12.14 |
| 7.1 | 1.577 | 1.07 | 8.82 | 1.60 | 0.0032 | 2.75 | 0.87 | 17.5 | 1.378 | 10.93 |
| REGRESO | | | | | | | | | | |
| 6.35 | 1.411 | 1.051 | 7.33 | 1.40 | 0.0028 | 2.61 | 0.778 | 17 | 1.339 | 12.14 |
| 5.6 | 1.24 | 1.033 | 5.96 | 1.1 | 0.0022 | 2.71 | 0.715 | 17.5 | 1.378 | 15.9 |
| 5.0 | 1.111 | 1.014 | 4.94 | 0.95 | 0.0019 | 2.60 | 0.63 | 17 | 1.339 | 17.89 |
| 4.05 | 0.9 | 0.988 | 3.51 | 0.75 | 0.0015 | 2.34 | 0.509 | 14 | 1.102 | 18.62 |
| 2.95 | 0.65 | 0.948 | 2.09 | 0.35 | 0.0008 | 2.61 | 0.416 | 13 | 1.024 | 37.14 |
| 2.15 | 0.477 | 0.916 | 1.259 | 0.28 | 0.0005 | 2.24 | 0.299 | 12 | 0.945 | 42.85 |
| 1.35 | 0.30 | 0.88 | 0.60 | 0.20 | 0.0004 | 1.50 | 0.169 | 7 | 0.651 | 35 |
| 0.75 | 0.166 | 0.841 | 0.238 | 0.15 | 0.0003 | 0.793 | 0.077 | 6 | 0.472 | 40 |
| 0.55 | 0.122 | 0.831 | 0.147 | 0.15 | 0.0003 | 0.49 | 0.048 | 3 | 0.236 | 20 |
| 0.35 | 0.077 | 0.814 | 0.073 | 0.15 | 0.0003 | 0.244 | 0.023 | 2 | 0.157 | 13.33 |

Tabla No. 3.1

RESULTADO DE LOS CALCULOS ELABORADOS PARA

UN ANGULO DE SALIDA $\alpha = 20^\circ$

| H cm | H/Hd | C/C0 | Q lt/s | Y cm | λ (m ²) | V m/s | $\frac{g}{r \cdot gy}$ | L cm | $\frac{L}{r}$ | $\frac{L}{Y}$ |
|---------|-------|-------|-----------|---------|--------------------------------|----------|------------------------|---------|---------------|---------------|
| 0.55 | 0.122 | 0.831 | 0.147 | 0.2 | 0.0004 | 0.369 | 0.0415 | 5 | 0.394 | 25 |
| 1.45 | 0.322 | 0.887 | 0.67 | 0.25 | 0.0005 | 1.35 | 0.169 | 12 | 0.945 | 48 |
| 2.05 | 0.455 | 0.914 | 1.169 | 0.35 | 0.0007 | 1.67 | 0.248 | 19 | 1.486 | 54.28 |
| 2.65 | 0.588 | 0.94 | 1.768 | 0.45 | 0.0009 | 1.96 | 0.33 | 25 | 1.969 | 55.55 |
| 3.35 | 0.744 | 0.962 | 2.57 | 0.63 | 0.0012 | 2.04 | 0.40 | 29 | 2.283 | 46.03 |
| 3.95 | 0.877 | 0.982 | 3.36 | 0.75 | 0.0015 | 2.24 | 0.48 | 32 | 2.520 | 42.66 |
| 4.55 | 1.011 | 1.00 | 4.23 | 0.9 | 0.0018 | 2.35 | 0.56 | 35 | 2.756 | 38.88 |
| 5.05 | 1.12 | 1.018 | 5.03 | 1.04 | 0.0020 | 2.42 | 0.62 | 37 | 2.913 | 35.57 |
| 5.75 | 1.27 | 1.037 | 6.23 | 1.23 | 0.0024 | 2.53 | 0.706 | 39.5 | 3.11 | 32.11 |
| 6.25 | 1.38 | 1.043 | 7.10 | 1.40 | 0.0028 | 2.53 | 0.75 | 39.5 | 3.11 | 28.21 |
| 6.85 | 1.52 | 1.062 | 8.30 | 1.65 | 0.0033 | 2.51 | 0.81 | 39 | 3.071 | 23.63 |
| 7.65 | 1.7 | 1.075 | 9.91 | 2.0 | 0.004 | 2.48 | 0.88 | 39 | 3.071 | 19.5 |
| REGRESO | | | | | | | | | | |
| 7.05 | 1.56 | 1.068 | 8.71 | 1.70 | 0.0034 | 2.56 | 0.84 | 40 | 3.15 | 23.53 |
| 6.65 | 1.477 | 1.058 | 7.91 | 1.55 | 0.0031 | 2.55 | 0.798 | 40 | 3.15 | 25.8 |
| 5.95 | 1.322 | 1.04 | 6.58 | 1.28 | 0.0025 | 2.57 | 0.73 | 40 | 3.15 | 31.25 |
| 4.95 | 1.10 | 1.013 | 4.86 | 1.00 | 0.002 | 2.43 | 0.61 | 39 | 3.071 | 39 |
| 4.25 | 0.944 | 0.995 | 3.80 | 0.80 | 0.0016 | 2.37 | 0.53 | 35 | 2.756 | 43.75 |
| 3.35 | 0.744 | 0.962 | 2.57 | 0.60 | 0.0012 | 2.14 | 0.41 | 30 | 2.362 | 50 |
| 2.65 | 0.588 | 0.94 | 1.768 | 0.45 | 0.0009 | 1.96 | 0.33 | 25 | 1.868 | 55.55 |
| 1.95 | 0.433 | 0.91 | 1.08 | 0.33 | 0.0006 | 1.63 | 0.23 | 18.5 | 1.457 | 56.06 |
| 1.35 | 0.30 | 0.88 | 0.60 | 0.25 | 0.0005 | 1.20 | 0.15 | 14 | 1.102 | 56 |
| 1.05 | 0.23 | 0.861 | 0.40 | 0.21 | 0.0004 | 0.96 | 0.11 | 11 | 0.866 | 52.38 |
| 0.55 | 0.122 | 0.831 | 0.147 | 0.20 | 0.0004 | 0.36 | 0.04 | 3 | 0.236 | 15 |

Tabla No. 3.2

RESULTADO DE LOS CALCULOS ELABORADOS PARA

UN ANGULO DE SALIDA $\alpha = 30^\circ$

| H (cm) | H/ Hd | C/ C0 | Q lt/s | Y cm | A ₂ (m ²) | V m/s | q r \sqrt{gy} | L cm | $\frac{L}{r}$ | $\frac{L}{Y}$ |
|-----------|----------|----------|-----------|---------|-------------------------------------|----------|--------------------|---------|---------------|---------------|
| 1.0 | 0.222 | 0.858 | 0.394 | 0.28 | 0.0005 | 0.748 | 0.078 | 9.0 | 0.71 | 32 |
| 1.2 | 0.266 | 0.868 | 0.487 | 0.28 | 0.0005 | 0.887 | 0.118 | 12.0 | 0.94 | 42.8 |
| 1.5 | 0.333 | 0.885 | 0.708 | 0.3 | 0.0006 | 1.188 | 0.162 | 18.0 | 1.31 | 60 |
| 1.85 | 0.411 | 0.906 | 0.993 | 0.38 | 0.0007 | 1.307 | 0.202 | 20.5 | 1.61 | 53.9 |
| 2.35 | 0.522 | 0.927 | 1.456 | 0.49 | 0.0009 | 1.479 | 0.261 | 23.5 | 1.85 | 48 |
| 2.85 | 0.63 | 0.945 | 1.982 | 0.59 | 0.0011 | 1.679 | 0.324 | 29.5 | 2.32 | 50 |
| 3.35 | 0.74 | 0.963 | 2.574 | 0.66 | 0.0013 | 1.95 | 0.398 | 34.5 | 2.7 | 52.27 |
| 3.9 | 0.86 | 0.982 | 3.297 | 0.87 | 0.0017 | 1.89 | 0.444 | 40 | 3.15 | 45.9 |
| 4.43 | 0.984 | 0.998 | 4.057 | 0.97 | 0.0019 | 2.69 | 0.517 | 45 | 3.54 | 46.39 |
| 5.21 | 1.157 | 1.02 | 5.288 | 1.2 | 0.0024 | 2.20 | 0.606 | 49.5 | 3.89 | 41.25 |
| 6.05 | 1.344 | 1.04 | 6.74 | 1.45 | 0.0029 | 2.32 | 0.703 | 52.5 | 4.13 | 36.2 |
| 6.75 | 1.50 | 1.06 | 8.104 | 1.75 | 0.0035 | 2.31 | 0.77 | 54.5 | 4.25 | 37.14 |
| 8.45 | 1.877 | 1.085 | 11.61 | 2.65 | 0.0053 | 2.19 | 0.89 | 57 | 4.41 | 21.5 |
| 10.4 | 2.311 | 1.1 | 16.08 | 3.9 | 0.0078 | 2.06 | 1.023 | 57.5 | 4.44 | 14.74 |
| REGRESO | | | | | | | | | | |
| 9.5 | 2.111 | 1.1 | 14.04 | 3.4 | 0.0068 | 2.064 | 0.957 | 56.5 | 4.44 | 16.61 |
| 7.41 | 1.646 | 1.068 | 9.392 | 2.1 | 0.0042 | 2.23 | 0.81 | 53 | 4.37 | 26.19 |
| 6.8 | 1.511 | 1.061 | 8.20 | 1.77 | 0.0035 | 2.31 | 0.77 | 53.5 | 4.29 | 30.22 |
| 5.11 | 1.135 | 1.015 | 5.111 | 1.18 | 0.0023 | 2.16 | 0.59 | 49 | 3.85 | 41.52 |
| 4.1 | 0.911 | 0.99 | 3.58 | 0.88 | 0.0017 | 2.03 | 0.48 | 42.5 | 3.42 | 48.29 |
| 3.5 | 0.777 | 0.97 | 2.769 | 0.73 | 0.0014 | 1.89 | 0.407 | 39 | 3.11 | 53.42 |
| 3.15 | 0.7 | 0.959 | 2.337 | 0.64 | 0.0012 | 1.82 | 0.367 | 33.5 | 2.63 | 52.3 |
| 2.55 | 0.566 | 0.937 | 1.66 | 0.53 | 0.001 | 1.56 | 0.286 | 26.5 | 2.08 | 50 |
| 2.29 | 0.508 | 0.92 | 1.39 | 0.46 | 0.0009 | 1.51 | 0.257 | 23.5 | 1.85 | 51 |
| 1.7 | 0.377 | 0.893 | 0.863 | 0.35 | 0.0007 | 1.23 | 0.183 | 20 | 1.57 | 57.14 |
| 1.35 | 0.30 | 0.88 | 0.601 | 0.26 | 0.0005 | 1.155 | 0.148 | 17 | 1.33 | 65.38 |
| 1.05 | 0.233 | 0.865 | 0.405 | 0.25 | 0.0005 | 0.85 | 0.101 | 13 | 1.02 | 52 |
| 0.95 | 0.211 | 0.857 | 0.345 | 0.25 | 0.0005 | 0.69 | 0.086 | 8 | 0.62 | 32 |
| 0.85 | 0.188 | 0.85 | 0.29 | 0.23 | 0.0004 | 0.63 | 0.076 | 6.5 | 0.51 | 26 |
| 0.75 | 0.166 | 0.841 | 0.238 | 0.20 | 0.0004 | 0.59 | 0.066 | 5.5 | 0.43 | 22 |

Tabla No. 3.3

RESULTADO DE LOS CALCULOS ELABORADOS PARA

UN ANGULO DE SALIDA $\alpha = 40^\circ$

| H (cm) | H/ Hd | C/ C0 | Q lt/s | Y cm | A ₂ (m ²) | V m/s | q r/99 | L cm | L F | L Y |
|-----------|----------|----------|-----------|---------|-------------------------------------|----------|-----------|---------|--------|--------|
| 1.45 | 0.322 | 0.877 | 0.67 | 0.25 | 0.0005 | 1.35 | 0.169 | 22 | 1.732 | 88 |
| 1.85 | 0.411 | 0.902 | 0.98 | 0.30 | 0.0006 | 1.649 | 0.227 | 28 | 2.205 | 93.3 |
| 2.45 | 0.544 | 0.93 | 1.55 | 0.45 | 0.0009 | 1.727 | 0.29 | 36 | 2.835 | 80 |
| 3.15 | 0.70 | 0.958 | 2.33 | 0.55 | 0.0011 | 2.12 | 0.395 | 44.5 | 3.504 | 81 |
| 3.85 | 0.855 | 0.98 | 3.22 | 0.75 | 0.0015 | 2.15 | 0.46 | 47.5 | 3.740 | 63.3 |
| 4.65 | 1.033 | 1.007 | 4.40 | 0.93 | 0.0018 | 2.36 | 0.57 | 54 | 4.252 | 58.06 |
| 5.25 | 1.16 | 1.021 | 5.35 | 1.05 | 0.0021 | 2.549 | 0.65 | 56 | 4.409 | 53.3 |
| 5.85 | 1.30 | 1.04 | 6.41 | 1.25 | 0.0025 | 2.56 | 0.72 | 58 | 4.567 | 46.4 |
| 6.35 | 1.411 | 1.051 | 7.33 | 1.43 | 0.0028 | 2.563 | 0.77 | 58 | 4.567 | 40.56 |
| 6.85 | 1.522 | 1.061 | 8.29 | 1.58 | 0.0031 | 2.62 | 0.83 | 60 | 4.724 | 37.97 |
| 7.35 | 1.633 | 1.071 | 9.30 | 1.80 | 0.0036 | 2.58 | 0.87 | 59 | 4.646 | 32.77 |
| 7.95 | 1.766 | 1.080 | 10.55 | 2.05 | 0.0041 | 2.57 | 0.92 | 59 | 4.646 | 28.78 |
| 8.75 | 1.944 | 1.086 | 12.25 | 2.45 | 0.0049 | 2.50 | 0.98 | 59 | 4.646 | 24.08 |
| REGRESO | | | | | | | | | | |
| 8.15 | 1.811 | 1.083 | 10.98 | 2.28 | 0.0045 | 2.41 | 0.91 | 58 | 4.567 | 25.4 |
| 7.45 | 1.655 | 1.072 | 9.50 | 1.85 | 0.0037 | 2.56 | 0.87 | 59 | 4.646 | 31.89 |
| 6.85 | 1.522 | 1.061 | 8.29 | 1.65 | 0.0033 | 2.51 | 0.81 | 58.5 | 4.606 | 35.45 |
| 5.90 | 1.311 | 1.04 | 6.49 | 1.25 | 0.0025 | 2.599 | 0.73 | 59 | 4.646 | 47.2 |
| 4.75 | 1.055 | 1.008 | 4.55 | 0.95 | 0.0019 | 2.39 | 0.58 | 55 | 4.331 | 57.89 |
| 4.05 | 0.90 | 0.988 | 3.51 | 0.80 | 0.0016 | 2.19 | 0.49 | 49 | 3.858 | 61.25 |
| 3.25 | 0.722 | 0.96 | 2.45 | 0.58 | 0.0011 | 2.114 | 0.40 | 46 | 3.622 | 79.31 |
| 2.45 | 0.544 | 0.93 | 1.55 | 0.43 | 0.0008 | 1.808 | 0.29 | 40 | 3.15 | 93.02 |
| 1.70 | 0.377 | 0.895 | 0.86 | 0.32 | 0.0006 | 1.35 | 0.192 | 28 | 2.205 | 87.5 |
| 1.40 | 0.311 | 0.882 | 0.637 | 0.25 | 0.0005 | 1.27 | 0.16 | 22 | 1.732 | 88 |
| 1.25 | 0.277 | 0.87 | 0.53 | 0.25 | 0.0005 | 1.06 | 0.13 | 17 | 1.339 | 68 |
| 1.15 | 0.255 | 0.865 | 0.46 | 0.24 | 0.0004 | 0.968 | 0.119 | 15 | 1.181 | 62.5 |

Tabla No. 3.4

RESULTADO DE LOS CALCULOS ELABORADOS PARA

UN ANGULO DE SALIDA $\alpha = 45^\circ$

| H (cm) | H/Hd | C/CO | Q lt/s | Y cm | A ₂ (m ²) | V m/s | $\frac{Q}{r\sqrt{gy}}$ | L cm | $\frac{L}{Y}$ | $\frac{L}{\bar{Y}}$ |
|-----------|-------|-------|-----------|---------|-------------------------------------|----------|------------------------|---------|---------------|---------------------|
| 1.75 | 0.38 | 0.895 | 0.903 | 0.25 | 0.0006 | 1.505 | 0.207 | 25 | 1.969 | 100 |
| 2.45 | 0.544 | 0.93 | 1.555 | 0.40 | 0.0008 | 1.94 | 0.309 | 40 | 3.15 | 100 |
| 3.55 | 0.788 | 0.972 | 2.834 | 0.70 | 0.0014 | 2.02 | 0.42 | 46 | 3.622 | 65.71 |
| 4.65 | 1.033 | 1.007 | 4.40 | 0.92 | 0.0018 | 2.39 | 0.57 | 50 | 3.937 | 54.34 |
| 5.35 | 1.188 | 1.025 | 5.53 | 1.15 | 0.0023 | 2.40 | 0.648 | 55 | 4.331 | 47.82 |
| 5.65 | 1.255 | 1.035 | 6.06 | 1.25 | 0.0025 | 2.42 | 0.681 | 58 | 4.567 | 46.4 |
| 6.1 | 1.355 | 1.042 | 6.84 | 1.40 | 0.0028 | 2.444 | 0.727 | 60 | 4.724 | 42.85 |
| 6.75 | 1.5 | 1.06 | 8.10 | 1.65 | 0.0033 | 2.456 | 0.79 | 60 | 4.724 | 36.36 |
| 7.15 | 1.58 | 1.07 | 8.92 | 1.85 | 0.0037 | 2.41 | 0.82 | 62 | 4.882 | 33.51 |
| 8.25 | 1.83 | 1.085 | 11.20 | 2.35 | 0.0047 | 2.38 | 0.91 | 63 | 4.961 | 26.8 |
| 8.6 | 1.911 | 1.086 | 11.94 | 2.5 | 0.005 | 2.38 | 0.949 | 64 | 5.039 | 25.6 |
| REGRESO | | | | | | | | | | |
| 7.75 | 1.722 | 1.079 | 10.15 | 2.05 | 0.0041 | 2.47 | 0.89 | 62 | 4.882 | 30.24 |
| 7.35 | 1.633 | 1.071 | 9.30 | 1.88 | 0.0037 | 2.47 | 0.85 | 61 | 4.803 | 32.44 |
| 6.95 | 1.54 | 1.062 | 8.48 | 1.73 | 0.0034 | 2.45 | 0.81 | 60 | 4.724 | 34.68 |
| 6.65 | 1.477 | 1.057 | 7.9 | 1.60 | 0.0032 | 2.47 | 0.78 | 59 | 4.646 | 36.87 |
| 6.15 | 1.366 | 1.045 | 6.95 | 1.40 | 0.0028 | 2.48 | 0.738 | 58 | 4.567 | 41.42 |
| 5.25 | 1.166 | 1.021 | 5.35 | 1.1 | 0.0022 | 2.43 | 0.64 | 55 | 4.331 | 50 |
| 4.75 | 1.055 | 1.008 | 4.55 | 0.93 | 0.0018 | 2.44 | 0.59 | 55 | 4.331 | 59.14 |
| 4.15 | 0.922 | 0.99 | 3.65 | 0.75 | 0.0015 | 2.43 | 0.53 | 51 | 4.016 | 68 |
| 3.15 | 0.70 | 0.958 | 2.33 | 0.55 | 0.0011 | 2.12 | 0.39 | 46 | 3.622 | 83.6 |
| 2.65 | 0.588 | 0.94 | 1.768 | 0.45 | 0.0009 | 1.96 | 0.33 | 42 | 3.307 | 93.3 |
| 1.85 | 0.411 | 0.902 | 0.98 | 0.25 | 0.0005 | 1.97 | 0.24 | 40 | 3.150 | 160 |
| 1.75 | 0.388 | 0.895 | 0.903 | 0.25 | 0.0005 | 1.80 | 0.227 | 32 | 2.52 | 128 |
| 1.55 | 0.344 | 0.89 | 0.748 | 0.25 | 0.0005 | 1.49 | 0.188 | 23 | 1.811 | 92 |
| 1.35 | 0.30 | 0.88 | 0.601 | 0.20 | 0.0004 | 1.5 | 0.169 | 19 | 1.496 | 95 |

Tabla No. 3.5

CAPITULO IV

CAPITULO IV

RECOMENDACIONES DE OPERACION.

4.1 Resultados Experimentales.

Con los valores medidos, y el Análisis Dimensional elaborado, se procesaron los datos para obtener las curvas adimensionales que permitieron describir el fenómeno.

En una primera etapa se enfocó a los gastos mínimos de despegue. Es decir, los gastos para los cuales el flujo comienza a ser lanzado por la cubeta.

Como se puede intuir, el hecho de tener cierto ángulo en la cubeta, con un radio de curvatura, genera un cierto volumen estancado para gastos pequeños, que para barrerlo o despegarlo, es necesario aumentar la cantidad de movimiento, es

decir, aumentar el gasto.

Los valores presentados en la Gráfica No. 1 confirman - esta hipótesis.

La explicación de la Gráfica No. 1, es la siguiente:

Con el ángulo de salida α , conocido, se entra por el - eje de las ordenadas, por el lado derecho, cruza con una curva, la cual sale por el eje de las abscisas con el valor del número adimensional

$$\frac{q}{r \sqrt{gy}}$$

Es decir, conocido el ángulo de salida α , el radio - de curvatura (r), y el tirante (Y), se puede determinar el -- gasto de despegue.

Con el mismo valor de α , pero ahora por el lado iz- - quierdo, se corta con la curva, que al salir por el eje de -- las abscisas, nos da el valor del número adimensional:

$$\frac{L}{r}$$

Lo que quiere decir, que conocido el ángulo de salida - y el radio de curvatura (r), podemos determinar la longitud del chorro.

Este primer resultado experimental, permite analizar - para qué gasto, la cubeta lanzadora trabaja ya como tal, y la longitud que el flujo alcanza para el gasto mínimo.

Con los valores procesados, se presenta en la Tabla No. 4.1 el resumen de los valores experimentales.

En la Gráfica No. 2, se muestran las curvas ajustadas a los valores medidos, y como se puede observar, existe un fenómeno de histéresis. Es decir, los valores van variando en función de la dirección del gasto, ya sea creciente o decreciente.

En esta gráfica se encuentran los valores de todas las mediciones para los distintos ángulos de salida. La utilidad de esta gráfica estriba en que se puede determinar la longitud del chorro (L) para cualquier gasto, conociendo el tirante (Y), y el radio de curvatura (r).

En la Gráfica No. 3, la cual lleva en el eje de las abs cisas el número adimensional:

$$\frac{q}{r \sqrt{gy}}$$

y en el eje de las ordenadas:

$$\frac{L}{r}$$

se confirma el fenómeno de histéresis. En esta gráfica se puede apreciar mejor, ya que únicamente contiene el --gasto de despegue, y el gasto en el cual deja de despegar, - formando de nuevo el estancamiento.

En la tabla No. 4.2, se presentan algunos valores obte nidos teóricamente, que se incluyen en la Gráfica No. 2, com parándose de esta forma, con los valores medidos.

| | $\alpha = 10^\circ$ | | $\alpha = 20^\circ$ | | $\alpha = 30^\circ$ | | $\alpha = 40^\circ$ | | $\alpha = 45^\circ$ | |
|---------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|------------------------|
| | $\frac{L}{r}$ | $\frac{q}{r\sqrt{gy}}$ |
| GASTO CRECIENTE ↓ | 0.236 | 0.035 | 0.394 | 0.0415 | 0.71 | 0.078 | 1.732 | 0.169 | 1.969 | 0.207 |
| | 0.394 | 0.077 | 0.945 | 0.169 | 0.94 | 0.118 | 2.205 | 0.227 | 3.15 | 0.309 |
| | 0.669 | 0.21 | 1.486 | 0.248 | 1.31 | 0.162 | 2.835 | 0.29 | 3.622 | 0.42 |
| | 0.787 | 0.32 | 1.969 | 0.33 | 1.61 | 0.202 | 3.504 | 0.395 | 3.937 | 0.57 |
| | 0.945 | 0.43 | 2.283 | 0.40 | 1.85 | 0.261 | 3.740 | 0.46 | 4.331 | 0.648 |
| | 1.181 | 0.58 | 2.520 | 0.48 | 2.32 | 0.324 | 4.252 | 0.57 | 4.567 | 0.681 |
| | 1.378 | 0.72 | 2.756 | 0.56 | 2.7 | 0.398 | 4.409 | 0.65 | 4.724 | 0.727 |
| | 1.339 | 0.77 | 2.913 | 0.62 | 3.15 | 0.444 | 4.567 | 0.72 | 4.724 | 0.79 |
| | 1.378 | 0.87 | 3.11 | 0.706 | 3.54 | 0.517 | 4.567 | 0.77 | 4.882 | 0.82 |
| | | | 3.11 | 0.75 | 3.89 | 0.606 | 4.724 | 0.83 | 4.961 | 0.91 |
| | | 3.071 | 0.81 | 4.13 | 0.703 | 4.646 | 0.87 | 5.039 | 0.949 | |
| | | 3.071 | 0.88 | 4.25 | 0.77 | 4.646 | 0.92 | | | |
| | | | | 4.41 | 0.89 | 4.646 | 0.98 | | | |
| | | | | 4.44 | 1.023 | | | | | |
| REGRESO | | | | | | | | | | |
| GASTO DECRECIENTE ↓ | 1.339 | 0.778 | 3.15 | 0.84 | 4.44 | 0.957 | 4.567 | 0.91 | 4.882 | 0.89 |
| | 1.378 | 0.715 | 3.15 | 0.798 | 4.37 | 0.81 | 4.646 | 0.87 | 4.803 | 0.85 |
| | 1.339 | 0.63 | 3.15 | 0.73 | 4.29 | 0.77 | 4.606 | 0.81 | 4.724 | 0.81 |
| | 1.102 | 0.509 | 3.071 | 0.61 | 3.85 | 0.59 | 4.646 | 0.73 | 4.646 | 0.78 |
| | 1.024 | 0.416 | 2.756 | 0.53 | 3.42 | 0.48 | 4.331 | 0.58 | 4.567 | 0.738 |
| | 0.945 | 0.299 | 2.362 | 0.41 | 3.11 | 0.407 | 3.858 | 0.49 | 4.331 | 0.64 |
| | 0.651 | 0.169 | 1.868 | 0.33 | 2.63 | 0.367 | 3.622 | 0.40 | 4.331 | 0.59 |
| | 0.472 | 0.077 | 1.457 | 0.23 | 2.08 | 0.286 | 3.15 | 0.29 | 4.016 | 0.53 |
| | 0.236 | 0.048 | 1.102 | 0.15 | 1.85 | 0.257 | 2.205 | 0.192 | 3.622 | 0.39 |
| | 0.157 | 0.023 | 0.866 | 0.11 | 1.57 | 0.183 | 1.732 | 0.16 | 3.307 | 0.33 |
| | | 0.236 | 0.04 | 1.33 | 0.148 | 1.339 | 0.13 | 3.150 | 0.24 | |
| | | | | 1.02 | 0.101 | 1.181 | 0.119 | 2.52 | 0.227 | |
| | | | | 0.62 | 0.086 | | | 1.811 | 0.188 | |
| | | | | 0.51 | 0.076 | | | 1.496 | 0.169 | |
| | | | | 0.43 | 0.066 | | | | | |

Tabla 4.1

RESUMEN DE VALORES EXPERIMENTALES

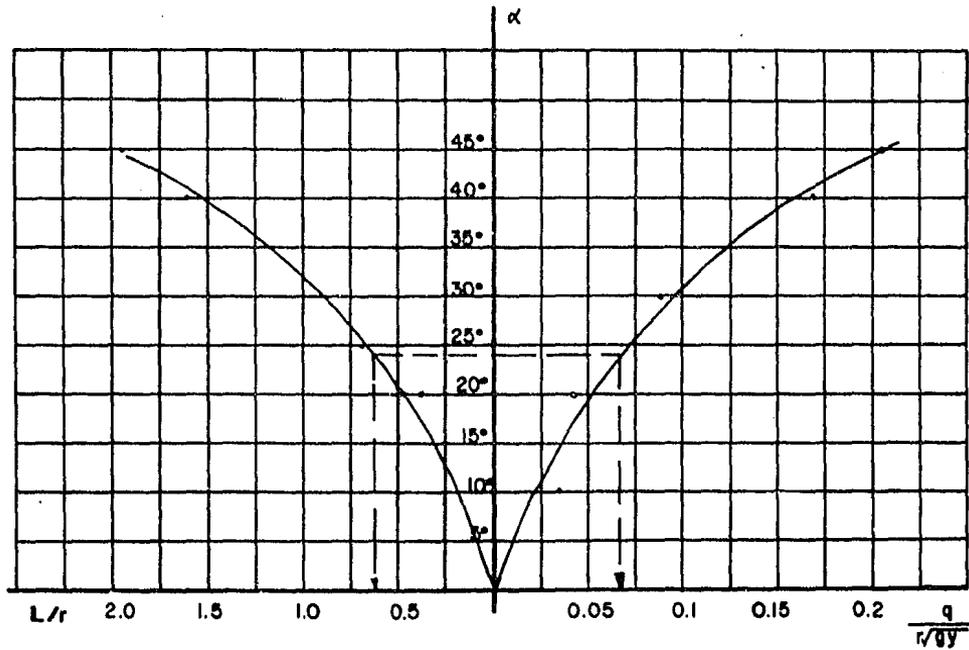
| $\alpha = 10^\circ$ | | | | |
|---------------------|----------|-----------|---------------------|--------------------------|
| Y (m) | V m/s | L (cm) | $\frac{L}{\bar{r}}$ | $\frac{g}{r \text{ gy}}$ |
| 0.0020 | 1.87 | 11 | 0.87 | 0.21 |
| 0.002 | 1.50 | 7 | 0.56 | 0.169 |
| 0.0075 | 2.34 | 17 | 1.38 | 0.55 |
| $\alpha = 20^\circ$ | | | | |
| Y (m) | V m/s | L (cm) | $\frac{L}{\bar{r}}$ | $\frac{g}{r \text{ gy}}$ |
| 0.009 | 2.35 | 34 | 2.64 | 0.56 |
| 0.014 | 2.53 | 39.3 | 3.09 | 0.75 |
| 0.006 | 2.14 | 28 | 2.18 | 0.41 |
| $\alpha = 40^\circ$ | | | | |
| Y (m) | V m/s | L (cm) | $\frac{L}{\bar{r}}$ | $\frac{g}{r \text{ gy}}$ |
| 0.003 | 1.64 | 25 | 1.95 | 0.227 |
| 0.0093 | 2.36 | 52 | 4.1 | 0.57 |
| 0.0165 | 2.51 | 59 | 4.71 | 0.81 |

* LOS VALORES DE (L) FUERON OBTENIDOS TEORICAMENTE
UTILIZANDO LA FORMULA:

$$X = 2K (d + hv) \text{ Seno } 2\alpha$$

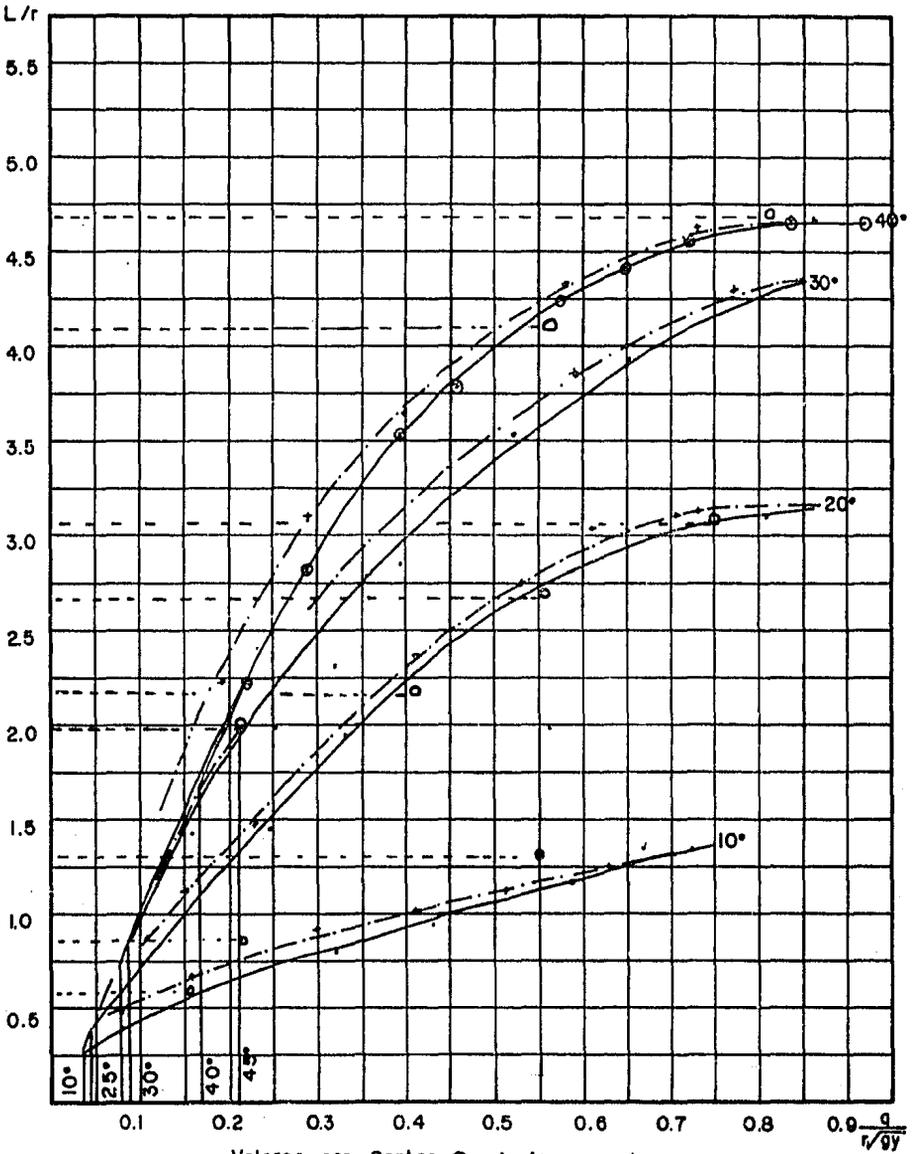
Tabla No. 4.2

GRAFICA I



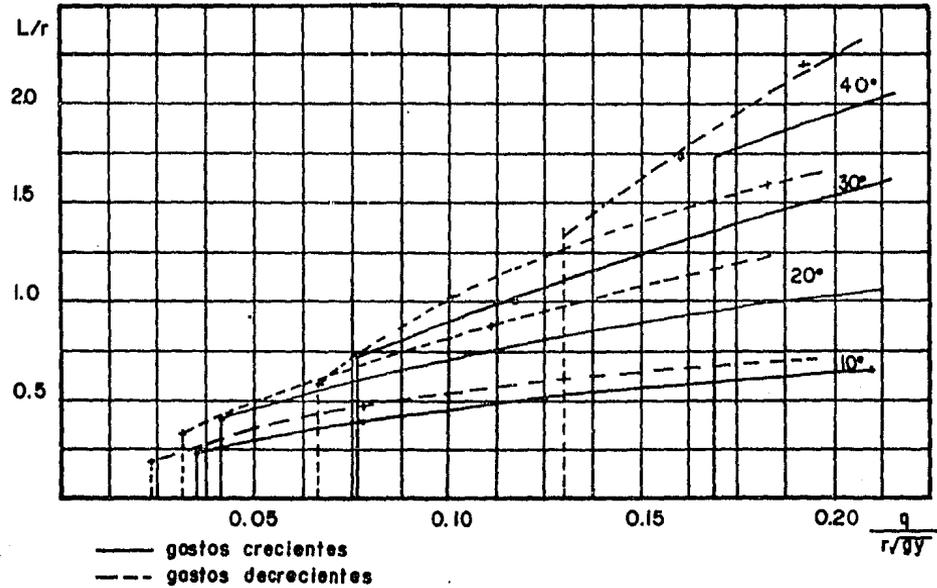
— Curva Ajustada
• Valores Medidos

GRAFICA 2



———— . Valores con Gastos Crecientes - - - - - ◻ Valores Teóricos
 - . - . - . + Valores con Gastos Decrecientes

GRAFICA 3



Gastos de Despegue y
Gastos de Regreso

CAPITULO V

CAPITULO V

CONCLUSIONES

Se ha llegado a la etapa final del estudio. Corresponde ahora, sintetizar los aspectos más relevantes acerca de la "Experimentación sobre Cubetas Lanzadoras".

Después de haber consultado los antecedentes acerca -- del tema, se observa que en las fórmulas teóricas en donde -- se calcula la longitud del chorro, no se toma en cuenta el -- fenómeno de histéresis, el cual, después de haber analizado las mediciones, podemos decir que se presenta, y se evidencia detalladamente en la Figura No. 3.

Como vemos, el fenómeno de histéresis es muy notorio, y su consideración en el aspecto del diseño, puede ser importa

tante, dado que se deben de tomar en cuenta todo el rango de gastos, ya que para cada gasto, existe su respectiva longitud.

Si se toma como longitud mínima la que ocurre con el - gasto de despegue, se puede incurrir en un error. Esto se ve rifica en la Gráfica No. 3, en donde se aprecia que para gas tos menores al de despegue, el flujo sigue siendo lanzado.

Para una mejor explicación, presentaremos a continua-- ción un breve ejemplo:

Suponiendo un ángulo de salida $= 40^\circ$

$$r = 10$$

$$Y = 2 \text{ m}$$

y utilizando la Gráfica No. 3, resulta que el gasto unitario de despegue $q = 7.5 \text{ m}^2/\text{s}$, y el gasto en el que - deja de lanzar el flujo la cubeta es de : $q = 5.75 \text{ m}^2/\text{s}$. Así mismo, la longitud del chorro es en el primer caso : $L = 17 \text{ m}$ y en el segundo caso: $L = 13$.

Esta diferencia de longitud puede ser importante, en - un momento dado, sobre todo, si se diseñó la estructura disi padora de energía de tal forma para que la longitud del cho-

ro fuera la del gasto de despegue.

Cabe subrayar, que aún asumiendo cierto error de medición intrínseco a la dificultad de medir y a la apreciación de la misma medición, los resultados siguen presentando sistemáticamente el fenómeno indicado.

Un aspecto que quisiera comentar, es la conveniencia de presentar los resultados en forma adimensional, ya que de esta manera pueden ser utilizados para cualquier gasto, no importando su magnitud.

Por otro lado, cabe mencionar ventajas que tienen los "modelos", entre ellas la de trabajar a escalas reducidas, - permitiendo con ello, simular cualquier tipo de fenómeno.

Espero que este trabajo, se sume a la escasa información que sobre la materia se tiene, y, que los resultados alcanzados en el estudio, puedan servir para futuras investigaciones.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi agradecimiento muy vivo, al Ing. Luis Fco. León, por las atenciones recibidas durante los estudios profesionales y en el desarrollo del presente trabajo.

Aprovecho el motivo de estas líneas para manifestar a los docentes, mi profunda gratitud, porque siempre me brindaron su enseñanza, su orientación y su consejo, en particular al Ing. Francisco Torres H.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Comisión Federal de Electricidad. MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES, HIDROTECNIA, HIDRAULICA, OBRAS DE EXCEDENCIA. México, D.F. 1983.

Creager, W.P. Justin, J.D., Hinds, J. ENGINEERING FOR DAMS John Wiley & Sons, Inc., Vol. 1, 1950.

Ministerio de Educación Superior de Cuba. INGENIERIA HIDRAULICA. La Habana. Vol. III, Septiembre de 1984.

Torres H., F. OBRAS HIDRAULICAS. Editorial Limusa. México, D.F. 1983.

U.S.B.R. DISEÑO DE PRESAS PEQUEÑAS. USA. 1973.