

01173  
2ej.  
1

División de Estudios de Posgrado  
Facultad de Ingeniería

"Características del Chorro Incipiente"

Jorge Isaac Hernández Gutiérrez

Tesis

Presentada a la División de Estudios de  
Posgrado de la

FACULTAD DE INGENIERIA

de la

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

como requisito para obtener

el grado de

MAESTRO EN INGENIERIA

(MECANICA)

CIUDAD UNIVERSITARIA

Diciembre de 1986

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## **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.

## I N D I C E

RESUMEN	1
CAPITULO I	
INTRODUCCION	
1.1 Chorro incipiente	3
1.2 Objetivo	3
1.3 Antecedentes	4
1.4 Nomenclatura	10
CAPITULO II	
EXPERIMENTACION	
2.1 Consideraciones generales	12
2.2 Equipo experimental	13
2.3 Dispositivos de filmación	16
2.4 Accesorios de medición	16
2.5 Alineación del equipo y accesorios	18
2.6 Procedimiento experimental	18
2.7 Método de medición	19
CAPITULO III	
RESULTADOS EXPERIMENTALES	
3.1 Filmaciones, mediciones y resultados	21
3.2 Graficación de los resultados	21

## CAPITULO IV

### PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

4.1 Parámetros adimensionales	28
4.2 Curvas de ajuste	31

## CAPITULO V

### INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

5.1 Evolución del chorro	38
5.2 Análisis de las curvas de ajuste	40

CONCLUSIONES	49
--------------	----

## RESUMEN

El objetivo de esta tesis es el estudio experimental de la evolución del chorro incipiente redondo, de agua sumergido en agua, sin flotación, con perfiles de velocidad desarrollados al final de la tubería de descarga y turbulento al llegar al estado permanente.

La energía requerida en la generación del chorro, se obtuvo conectando 2 recipientes con un desnivel entre sus superficies libres.

Para visualizar el flujo se coloreó el agua del chorro con permanganato de potasio, y se filmaron con una cámara de cine super 8, a 54 cuadros por segundo, 8 chorros con diferentes desniveles entre las superficies libres de los depósitos.

Se analizó cada cuadro de película y se obtuvieron el desplazamiento axial del frente del chorro, medido a partir del final de la tubería de descarga, el diámetro máximo del frente y el tiempo transcurrido desde el inicio del flujo. Con estas 3 variables: desplazamiento, diámetro y tiempo, se graficaron en planos desplazamiento-tiempo y diámetro-tiempo los resultados de cada chorro.

Mediante análisis dimensional, se encontraron los parámetros que hicieron coincidir las distribuciones de desplazamiento-tiempo y diámetro-tiempo, en 2 distribuciones únicas. Empleando mínimos cuadrados se ajustaron curvas a las 2 distribuciones anteriores.

La curva de ajuste de la distribución del desplazamiento contra tiempo, al derivarse con respecto al tiempo adimensional, dió la velocidad y aceleración del frente del chorro en forma adimensional. Con esta velocidad se definió un número de Reynolds local, y se construyó una curva para cada chorro en un plano adimensional desplazamiento-Reynolds local. También se obtuvo una curva única de distancia contra el cociente de los números de Reynolds local, y el resultante de considerar la velocidad dada por la carga total disponible.

Las curvas adimensionales de velocidad contra tiempo y diámetro contra tiempo, muestran claramente 3 puntos de quiebre máximo que limitan 4 zonas, en las que la evolución del chorro es completamente distinto. La primera zona se llamó inicial, y se caracteriza porque el fluido central del tubo de descarga se desplaza axialmente, sin que lo haga el que está cercano a la pared interna del tubo. La segunda recibió el nombre de adosada, y es donde el diámetro del chorro aumenta rápidamente sin apartarse del final del tubo de descarga, tomanando la forma de una cabeza de hongo. La tercera se designó como tubo-anular, y aquí se manifiesta el rápido desplazamiento axial del frente del chorro, y el lento crecimiento del diámetro. Se presentan una serie de anillos que avanzan hacia la cabeza del chorro. La cuarta se nombró zona de estructura deformada, y se distingue por manifestar configuraciones irregulares.

## CAPITULO I

### INTRODUCCION

A continuación se define el chorro incipiente, se establece el objetivo de este trabajo, y se analizan las investigaciones más importantes que existen hasta el momento sobre la región inicial de chorros, y sobre los chorros laminares.

#### 1.1 CHORRO INCIPIENTE

Se llamará chorro incipiente, al flujo creado al inicio de la transición de un chorro hacia su estado permanente, que puede o no ser turbulento.

#### 1.2 OBJETIVO

La finalidad de este trabajo es determinar la dinámica del frente del chorro, en su región inicial. El chorro es redondo, sumergido agua en agua, sin flotación, con flujo desarrollado al final de la tubería de descarga, y turbulento al llegar al estado permanente.

Cuando se habla de la transición y de la región inicial en chorros, es muy conveniente aclarar cada uno de estos términos.

En la mecánica de fluidos, la transición en chorros tiene 2 acepciones.

Una de ellas se aplica al cambio que sufre en el espacio un chorro turbulento desarrollado, ya que en uno de sus extremos el flujo es ordenado y en el otro desordenado. Al recorrerlo axialmente se distinguen diferentes estructuras, en forma tal que

se han definido 3 zonas, G. N. Abramovich (1963). La primera, en que existe flujo potencial en el centro del chorro, se acostumbra relacionar con la región laminar y se llama región inicial; la segunda es una región intermedia de transición; la última es una región de turbulencia desarrollada, que recibe el nombre de región principal.

La otra acepción se aplica al cambio de estados permanentes, cuando se varía el gasto del chorro. Dependiendo de los gastos se tendrán distintos flujos, partiendo desde los ordenados o laminares, hasta los desordenados o turbulentos.

En este trabajo, el término transitorio se empleará con un significado distinto a los anteriores, ya que no se tratarán las diferentes zonas de un flujo desarrollado, ni se verá el cambio de régimen que involucra un cambio de gasto, es decir, el estado final que alcanza el flujo. La transición corresponderá a la evolución sufrida por el chorro, durante sus primeros segundos de existencia.

El término región inicial, se usará para referirse a la zona de evolución del chorro, donde la configuración del flujo es simple, sin que ocurran variaciones bruscas o repentinas.

### 1.3 ANTECEDENTES

El estudio sobre la región inicial y los chorros laminares, se ha enfocado desde los puntos de vista teórico y experimental. Cada uno de estos enfoques considera los estados transitorio y permanente del campo de flujo, de los perfiles de velocidad, y de la transición de estados estables a inestables.

G. W. Rankin y K. Sridhar (1981), obtuvieron una solución aproximada para la región inicial de un chorro sumergido, laminar y en estado permanente, considerando que el flujo de la cantidad de movimiento es constante.

W. Schneider (1981), encontró una solución exacta de similitud de la Ecuación de Navier Stokes, para el flujo de la región inicial de un chorro turbulento en estado permanente. Su solución toma en cuenta las condiciones de no deslizamiento sobre las paredes cónicas, y de penetración en el eje del chorro. Sus resultados difirieron de los dados por las soluciones potencial y viscosa. También obtuvo (1985), combinando expansiones internas y externas con una escala múltiple de aproximación, el campo de flujo de un chorro sumergido en estado permanente, considerando la penetración de masa y cantidad de movimiento. Concluyó que el flujo axial de la cantidad de movimiento disminuye en un chorro axialsimétrico laminar o turbulento, al incrementarse la distancia desde el orificio de descarga del chorro.

G. K. Batchelor y A. E. Gill (1962), realizaron un análisis matemático de la estabilidad en flujos paralelos, axialsimétricos, no viscosos y permanentes; esto implica chorros con números de Reynolds altos y sin fronteras rígidas. Introdujeron perturbaciones infinitesimales para definir un número de Reynolds crítico, ó el modo de perturbación que crece más rápidamente a un determinado número de Reynolds. Concluyeron que la viscosidad ayuda a estabilizar el flujo.

A. E. Gill (1962), demostró teóricamente que una perturbación axialsimétrica no crece en un fluido ligeramente

viscoso. Encontró la velocidad y el número de onda de la perturbación, cuyos efectos no lineales produjeron su crecimiento.

M. P. du Plessis, R. L. Wang y S. Tsang (1973); determinaron los perfiles de velocidad de un chorro redondo, laminar, sumergido y en estado permanente. Hallaron que en la región inicial, la teoría de similaridad de Schlichting y la expresión analítica de Andrade y Tsien, no concordaron con sus resultados analíticos, ni con la experimentación.

B. Cantwell (1981), mediante consideraciones dimensionales, encontró una formulación auto-similar en el tiempo que determina el flujo laminar y no permanente de una fuente puntual con cantidad de movimiento constante. Concluyó que un chorro no limitado y con perfil de velocidad parabólico en la descarga, tiene una transición semejante a la del flujo de Couette, y ésta ocurre a los números de Reynolds específicos de 6.780 y 10.090.

C. Sozou y W. M. Pickering (1977), estudiaron el desarrollo del campo de flujo de un chorro en estado transitorio, que emana de una fuente puntual de fuerza constante dentro de un fluido infinito de densidad constante. Las fórmulas adimensionales se resolvieron por métodos numéricos iterativos. Encontraron que al aumentar la fuerza aplicada, el punto de estancamiento se mueve más rápido hacia el infinito y más pronto se alcanza el estado permanente. También determinaron (1979), el campo de flujo permanente, generado en un fluido incompresible dentro de una cubierta esférica, cuando se tiene una fuente puntual de fuerza constante actuando en el centro. El modelo matemático no lineal

que obtuvieron fué resuelto con métodos numéricos. C. Sozou (1979), halló por medio del principio de similitud, una solución analítica lineal para el desarrollo del campo de flujo, al aplicarse instantáneamente una fuerza puntual constante en un líquido infinito.

R. Peyret (1976), mediante métodos numéricos, obtuvo los campos de velocidad y temperatura de un chorro de densidad constante, laminar y en estado permanente, que descarga en un fluido estratificado en reposo.

A. Viilu (1962), experimentó con chorros de agua sumergidos en agua y en estado permanente. Los clasificó en 4 grupos de acuerdo a la configuración que tomaron. Otro objetivo de su investigación fué determinar el número de Reynolds de transición, para el cambio de un estado estable a uno inestable.

A. J. Reynolds (1962), trabajó con chorros en estado permanente y encontró 5 tipos de chorros rectilíneos. El también trató de obtener el número de Reynolds de transición.

K. J. McNaughton y C. G. Sinclair (1966), experimentaron en chorros permanentes y los clasificaron en 4 grupos. Hallaron una ecuación que permite conocer la longitud de los chorros laminares.

S. C. Crow y F. H. Champagne (1971), estudiaron experimentalmente el patrón ordenado de escala mayor, en la región productora de ruido del chorro. Entre otras cosas, visualizaron el flujo de un chorro laminar sumergido en estado permanente, y no coincidieron con las observaciones reportadas por A. J. Reynolds.

E. Zauner (1985), investigó experimentalmente el campo de flujo de la recirculación de un chorro permanente laminar. Visualizó el efecto de la viscosidad y de las paredes sólidas en el campo de flujo.

G. W. Rankin, K. Sridhar, M. Arulraja y K. R. Kumar (1983), determinaron experimentalmente las distribuciones de velocidad, en la región de desarrollo de un chorro permanente laminar, con perfil de velocidad completamente desarrollado al final de la tubería de descarga.

L. Boguslawski y Cz. O. Popiel (1979), encontraron experimentalmente en la región inicial las distribuciones de velocidad radial y axial, para chorros en estado permanente con números de Reynolds mayores a 1000.

P. H. Oosthuizen (1983), llevó a cabo mediciones cuidadosas de las distribuciones de velocidad axial, de presión estática sobre el eje del chorro, de los niveles de turbulencia, y de los espectros de frecuencia en la región inicial de chorros circulares en estado permanente, con números de Reynolds de 1500 a 5000.

S. Abramovich y A. Solan (1973), estudiaron experimentalmente el estado inicial transitorio de un chorro laminar sumergido. Determinaron la velocidad axial del frente del chorro, empleando anemometría de hilo caliente. La velocidad y la distancia se adimensionalizaron en la siguiente forma:

$$R_1 = U_0 d/\nu \quad (1.1)$$

$$U_1^* = U_{mx}/U_{mo} \quad (1.2)$$

$$X_1^* = X/(d \sqrt{R_1}) \quad (1.3)$$

$$T_1^* = 2 T v \sqrt{R_1}/d^2 \quad (1.4)$$

donde:

$U_0$  es la velocidad media de descarga

$U_{mx}$  es la velocidad máxima del frente del chorro en la distancia  $X$

$U_{mo}$  es la velocidad máxima permanente en la descarga ( $X=0$ )

$X$  es la distancia axial medida a partir de la descarga

$d$  es el diámetro del tubo

$T$  es el tiempo

$v$  es la viscosidad cinemática

Los rangos de  $R_1$  y  $X/d$  considerados, van de 80-500 y de 0-40 respectivamente. Presentaron curvas de  $U_1^*$  contra  $X_1^*$  y de  $T_1^*$  contra  $X_1^*$ . Hallaron que en el eje, la velocidad de avance del frente es aproximadamente la mitad de la velocidad de un elemento de fluido en estado permanente.

E. Rincón, M Sen y J. G. Cervantes (1982), investigaron experimentalmente las características del frente del chorro sumergido, adimensionalizando en la siguiente forma:

$$R_2 = v d/v \quad (1.5)$$

$$X_2^* = X/d R_2^{0.225} \quad (1.6)$$

$$T_2^* = T v R_2^{0.45}/d^2 \quad (1.7)$$

donde:

$v$  es la velocidad del frente del chorro en la zona

turbulenta.

Encontraron que la transición del flujo laminar a turbulento ocurre cuando:

$$X_2^* = 0.98 \quad (1.8.a)$$

$$T_2^* = 0.085 \quad (1.8.b)$$

Hallaron que el frente del chorro se acelera en la zona laminar, mientras que en la zona turbulenta se mantiene constante. También obtuvieron distribuciones del área transversal del chorro contra tiempo. El rango de los números de Reynolds que se consideraron fué de 947-2 420, y el de  $X/d$  fué de 0-19. Encontraron que la velocidad en la zona turbulenta es aproximadamente un 20 % menor a la media de descarga.

Considerando los rangos de los números de Reynolds en estos 2 últimos artículos y la forma en que adimensionalizaron, no se puede hacer una comparación de sus resultados, ya que para el primero los números de Reynolds de los chorros en estudio fueron de 0-800, y para el segundo los Reynolds variaron de 1 136-2 904, haciendo uso de la disminución del 20 % de la velocidad permanente en la zona turbulenta, con respecto a la media de descarga.

En este trabajo los rangos de los números de Reynolds y de la distancia adimensional  $X/d$ , fueron de 7 411-13 904 y de 0-7.5.

#### 1.4 NOMENCLATURA

- A\* aceleración adimensional del frente del chorro
- d diámetro de la tubería de descarga

$\frac{d(\ )}{d(\ )}$  derivación

D diámetro máximo del frente del chorro  
D\* diámetro máximo adimensional del frente del chorro  
g aceleración gravitacional terrestre  
H desnivel entre las superficies libres de los depósitos  
M<sub>1</sub> flujo de la cantidad de movimiento en el frente del chorro  
M<sub>t</sub> flujo de la cantidad de movimiento en la tubería  
Re número de Reynolds en la tubería de descarga, para flujo en estado permanente  
R<sub>1</sub> número de Reynolds en el frente del chorro  
R<sub>t</sub> número de Reynolds teórico en la tubería de descarga  
T tiempo transcurrido desde el inicio del flujo  
T\* tiempo adimensional transcurrido desde el inicio del flujo  
U velocidad dada por la carga total disponible  
U<sub>m</sub> velocidad media de descarga  
U\* velocidad adimensional del frente del chorro  
X desplazamiento axial del frente del chorro  
X\* desplazamiento axial adimensional del frente del chorro  
μ viscosidad dinámica  
ν viscosidad cinemática  
π 3.1416...  
Π parámetro adimensional  
ρ densidad

## CAPITULO II

### EXPERIMENTACION

En este capítulo se mencionan las condiciones observadas en el diseño del equipo experimental y en la selección del método de medición. Se describe el procedimiento experimental seguido y el método de medición del desplazamiento axial, diámetro y tiempo del frente del chorro.

#### 2.1 CONSIDERACIONES GENERALES

En el diseño del equipo experimental, se tuvo en cuenta que el chorro incipiente redondo en estudio fué:

- 1) de agua sumergido en agua
- 2) sin flotación
- 3) con perfil de velocidad desarrollado al final de la tubería de descarga
- 4) turbulento al alcanzar el estado permanente

Para satisfacer la primera condición, se debió tener un tanque con dimensiones tales, que sus paredes estuvieran lo suficientemente alejadas del flujo para no alterarlo.

Con respecto a la segunda condición, tanto la densidad del chorro como su temperatura, no debieron cambiar notablemente de las del medio donde se desarrolló el chorro.

En cuanto a la tercera condición, la longitud de la tubería de descarga debió ser suficiente, para permitir que el flujo se desarrollara.

En relación a la cuarta condición, debieron tenerse desniveles entre las superficies libres de los depósitos, capaces de crear chorros turbulentos en estado permanente.

Tomando en cuenta que el lapso y espacio en estudio fueron pequeños, se debió seleccionar una técnica de medición que no perturbara el flujo, y fuera capaz de proporcionar la suficiente información confiable, tanto cualitativa como cuantitativamente. Se decidió filmar el chorro coloreado con permanganato de potasio, y cuantificar las variables distancia y tiempo mediante una retícula horizontal que pasó por el eje de la tubería, junto con la rapidez de avance de la película de la cámara de cine. Considerando que el tiempo de avance de la película entre cuadros es fijo, resulta importante filmar la mayor cantidad de cuadros en un mismo lapso para obtener la mayor información posible.

## 2.2 EQUIPO EXPERIMENTAL

El equipo donde se llevó a cabo la experimentación se muestra en la Fig. 2.1. Consistió en los depósitos A y B de secciones circular y rectangular respectivamente, conectados por una tubería de cobre. La tubería estuvo interrumpida por una válvula solenoide, que sirvió para controlar la generación del chorro. El depósito A se apoyó en una base que lo elevó, con el fin de obtener los desniveles entre las superficies libres de los depósitos, capaces de generar chorros turbulentos en estado permanente. Cada depósito contó con un tubo de nivel y un tubo piezométrico, que sirvieron para determinar estos desniveles.

La tubería de cobre se apoyó en 3 soportes con movimiento en los planos vertical y horizontal, para lograr su alineamiento y nivelación correctas. El tramo final de la tubería atravesó al depósito B y se alojó en él. En este tubo se colocó un foco piloto conectado al interruptor de la válvula solenoide, en forma tal que al actuarse la válvula el foco se prendió y al dejarla de actuar se apagó. El circuito eléctrico se muestra en la Fig. 2.2.

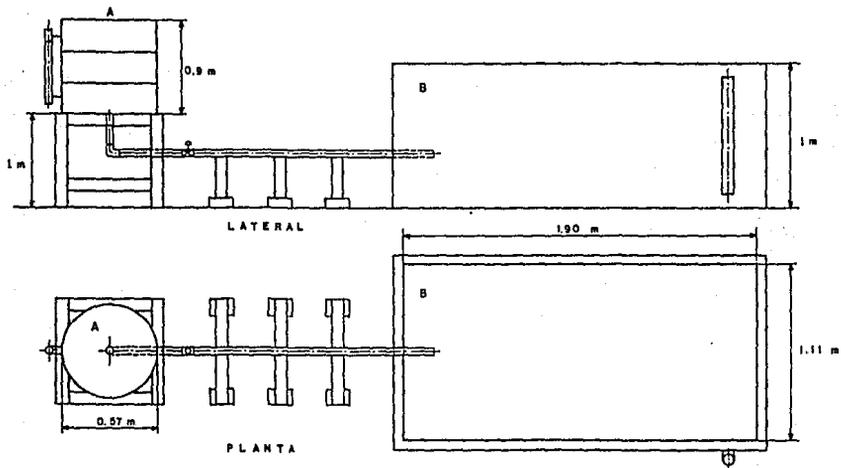


Fig. 2.1 Equipo experimental

El tanque A tuvo un diámetro de 0.57 m., una altura de 0.9 m., y su capacidad fué de  $0.213 \text{ m}^3$ . Por lo que corresponde al B tuvo un ancho de 1.11 m., un largo de 1.9 m., una altura de 1.0 m. y su volumen fué de  $2.09 \text{ m}^3$ .

La longitud de la tubería de cobre a partir de la válvula solenoide fué de 2.815 m., con un diámetro interno de 1.42 cm.

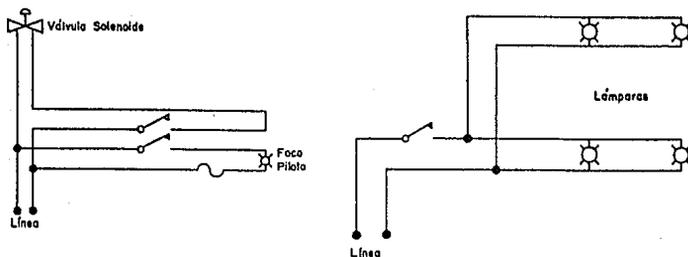


Fig. 2.2 Instalación eléctrica

De esta forma el equipo experimental cumplió con las 4 condiciones mencionadas en el punto anterior, teniéndose:

1) Las paredes laterales del tanque B se encontraron a 37 diámetros del eje del chorro. Longitudinalmente la pared trasera estuvo a 17 diámetros del final de la tubería de descarga, y la delantera a 116 diámetros.

2) Se agregaron 20 g. de permanganato de potasio a 218 l. de agua, resultando una densidad que fué propiamente la del agua. Por lo que respecta a la temperatura, el agua que se empleó reposó cuando menos 3 horas, alcanzándose a equilibrar con el medio.

3) La longitud de la tubería fué de 198 diámetros, mayor a la requerida para que el flujo laminar se desarrolle, R. W. Fox y

A. T. McDonald (1978).

4) Los desniveles entre las superficies libres de los depósitos, fueron mayores a 0.25 m. y menores a 0.9 m., suficientes para crear chorros turbulentos cuyos números de Reynolds variaron entre 7 411 y 13 904, tomando como longitud y velocidad características el diámetro del tubo y la velocidad media de descarga.

### 2.3 DISPOSITIVOS DE FILMACION

Se usó una cámara de cine super 8 con un avance de película de 54 cuadros por segundo. Se sostuvo con un trípode, en cuya construcción se hicieron coincidir en un mismo plano vertical, el centro del lente de la cámara y el eje de la tubería. Mediante 4 lámparas se iluminó el interior del depósito B, como lo muestra la Fig. 2.3. Las paredes internas de este tanque se pintaron de color blanco, para tener un mayor contraste con el color morado del chorro.

### 2.4 ACCESORIOS DE MEDICION

En el tramo final del tubo de cobre se introdujo un tubo, cuyo diámetro interno coincidió con el diámetro externo del tubo de cobre, soldado al extremo de una placa; en el otro extremo la placa se soportó por 2 tornillos largos, como se ilustra en la Fig. 2.4. La soldadura entre la placa y su soporte tubular, se realizó en forma tal que la línea de centros de la placa coincidiera con el eje de la tubería de cobre. La placa tuvo un ancho de 0.305 m. y un largo de 0.7 m. Sobre ésta se colocó la retícula con que se midieron las distancias axiales y normales al

eje, diámetro, en un plano horizontal que contuviera al eje de la tubería.

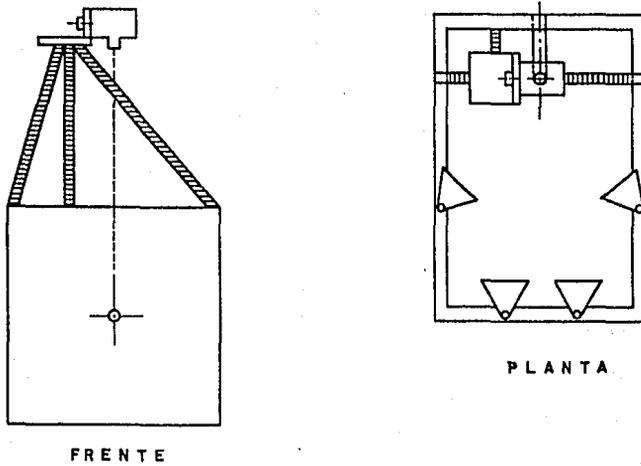


Fig. 2.3 Dispositivos y accesorios de filmación

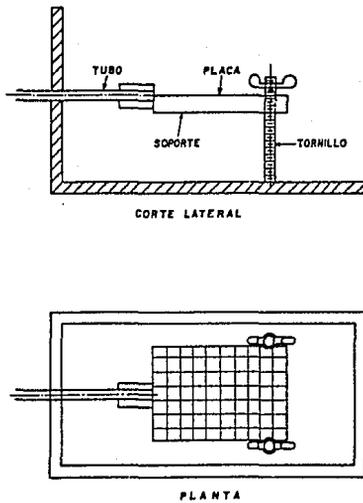


Fig. 2.4 Placa con retícula

## 2.5 ALINEACION DEL EQUIPO Y ACCESORIOS

Para alinear y nivelar el tubo de cobre se emplearon 2 hilos colocados por encima y a un costado del tubo. El primero se empleó para alinearlo en un plano vertical, y el segundo lo niveló sobre un plano horizontal. La horizontalidad de los hilos se checó con un nivel de burbuja. Las bases del tubo se movieron para que éste estuviera paralelo a ambos hilos, consiguiéndose con esto su colocación correcta.

La nivelación del tramo de tubo dentro del depósito B se hizo con un nivel de burbuja, ya que así lo permitió su corta longitud.

Para nivelar a la placa con retícula se empleó un nivel de burbuja colocado sobre la placa, una vez que estuvo insertada en el tubo de cobre. En caso de estar desnivelada, se corrigió su posición moviendo los tornillos del otro extremo de la placa.

La alineación de la cámara se hizo con un nivel de burbuja, para que el eje de la lente quedara vertical y la cámara de cine se mantuviera perpendicular a la placa con retícula.

## 2.6 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Antes de realizar la filmación se cuidó tener:

- 1) El agua del depósito A coloreada con permanganato de potasio
- 2) El tanque B lleno de agua limpia
- 3) La tubería de cobre alineada y nivelada
- 4) La placa con retícula nivelada
- 5) La cámara alineada

- 6) Las mangueras de los piezómetros purgadas
- 7) La base de los piezómetros alineada
- 8) La válvula solenoide conectada a la línea de corriente
- 9) Las lámparas conectadas a la línea de corriente

Posteriormente se purgó la tubería de cobre y se esperó a que el agua estuviera inmóvil en ambos tanques. Se actuó el interruptor de las lámparas de iluminación, se puso en operación la cámara y se filmó la retícula. Se extrajo la placa con retícula y se esperó a que el agua quedara inmóvil nuevamente. Se registraron las alturas de los niveles en ambos depósitos y se empezó la filmación de un chorro. Primero se puso en acción la cámara de cine, después el interruptor de las lámparas, y finalmente el de la válvula solenoide. Al actuar la válvula se encendió el foco piloto. Se filmó un campo que abarcó la zona de interés; una vez que el frente del chorro salió de esta región se dejó de actuar la cámara de cine, después la válvula y al último las lámparas. Se tomaron las alturas finales de los piezómetros. Se esperó a que el agua quedara inmóvil, para iniciarse otra secuencia de filmación, y así sucesivamente, hasta tener el número total de chorros deseados.

## 2.7 METODO DE MEDICION

Una vez revelada la película, se proyectó la retícula y cada uno de los cuadros de los chorros filmados para reproducirlos en papel. La reproducción de la retícula se colocó sobre un vidrio esmerilado, con iluminación por debajo. A continuación se sobrepusieron una a una las copias de los chorros, con el fin de

determinar las longitudes deseadas. El tiempo correspondiente a cada cuadro, se obtuvo asignándole al inicio de cada chorro el tiempo cero, el cual se conoció al encenderse el foco piloto, y al saberse que el avance de la película fué de 54 cuadros por segundo. A cada cuadro le correspondió un tiempo que fué múltiplo de  $1/54$  de segundo. La Fig. 2.5 muestra al vidrio esmerilado con iluminación.

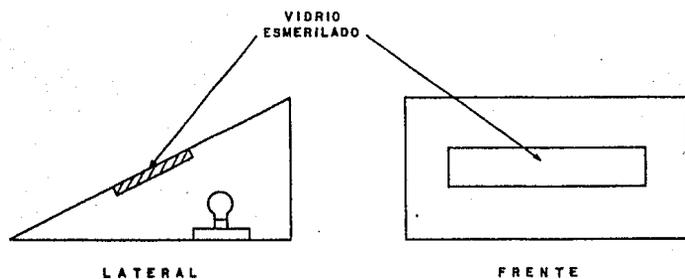


Fig. 2.5 Vidrio con iluminación

## CAPITULO III

### RESULTADOS EXPERIMENTALES

En esta parte se presentan las distribuciones del desplazamiento y diámetro del frente del chorro, contra tiempo. Igualmente se muestra la distribución del promedio del desnivel entre las superficies libres, contra la velocidad media de descarga del equipo experimental.

#### 3.1 FILMACIONES, MEDICIONES Y RESULTADOS

Se filmaron 8 chorros con las características mostradas en la Tabla 3.1, y en la Fig. 3.1 se dibujaron los diferentes perfiles que fué tomando un chorro al paso del tiempo, tal y como fueron copiados en hojas de papel, al proyectarse la película filmada. Empleando el método de medición ya descrito, se obtuvieron para cada cuadro el tiempo y las distancias correspondientes al desplazamiento y diámetro del frente del chorro, medidos en un plano horizontal que contuvo al eje de la tubería, como se ilustra en la Fig. 3.2.

#### 3.2 GRAFICACION DE LOS RESULTADOS

Con el trio de datos de cada uno de los cuadros analizados, se graficaron las distribuciones del desplazamiento axial contra tiempo, y del diámetro contra tiempo para cada uno de los chorros, resultando las gráficas de las Figs. 3.3 a 3.6.

Con el fin de conocer el comportamiento del equipo

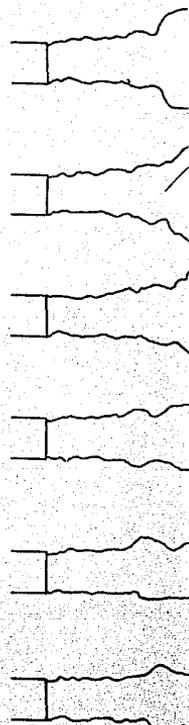
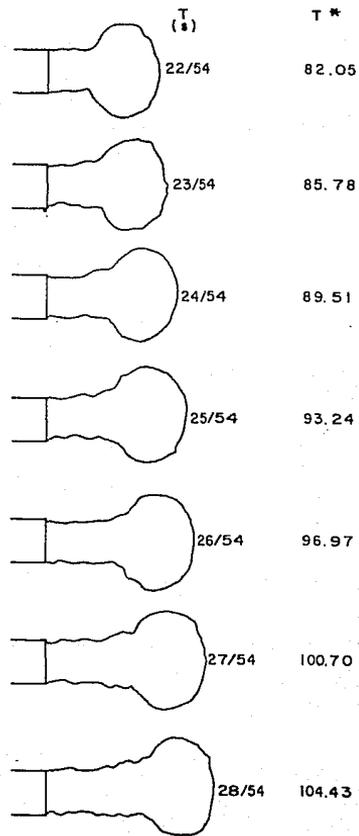
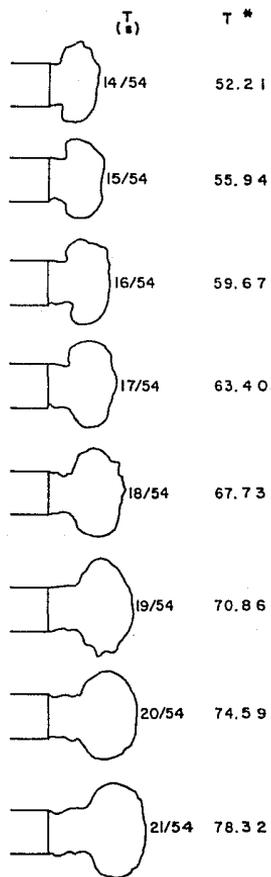
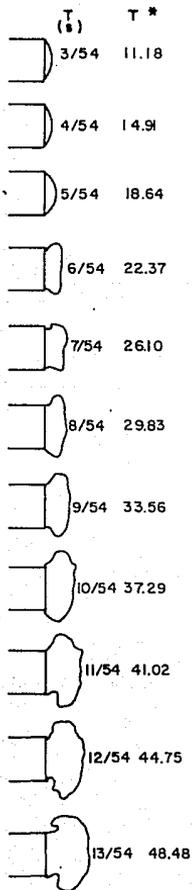
experimental en estado permanente, se dejó que el nivel del agua del tanque A disminuyera 1 cm., pudiéndose evaluar la velocidad media de descarga y el promedio del desnivel de las superficies libres de los 2 tanques. Esto se hizo para 9 casos, cuyos resultados se muestran en la Tabla 3.2 y están graficados en la Fig. 3.6.

Tabla 3.1 Características de los chorros filmados

CHORRO No.	H (m)	No. CUADROS	NOMBRE
1	0.7715	65	CH1
2	0.632	75	CH2
3	0.5845	80	CH3
4	0.537	82	CH4
5	0.49075	89	CH5
6	0.422	90	CH6
7	0.309	90	CH7
8	0.2605	90	CH8

Tabla 3.2 Datos experimentales de la respuesta del equipo

CASO	$U_m$ (m/s)	H (m)
1	1.0094	0.8122
2	0.9495	0.7453
3	0.8290	0.6077
4	0.7207	0.4930
5	0.6896	0.4404
6	0.64	0.3884
7	0.5333	0.2701
8	0.4712	0.2229
9	0.4102	0.1703



T*	T (s)	T*	T (s)	T*
82.05	29/54	108.16	35/54	130.54
85.78	30/54	111.89	36/54	134.27
89.51	31/54	115.62	37/54	138.00
93.24	32/54	119.35	38/54	141.73
96.97	33/54	123.08	39/54	145.46
100.70	34/54	126.81	40/54	149.19
104.43				

T \*

130.54

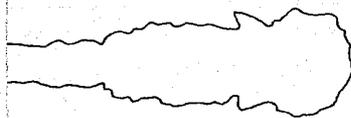
134.27

138.00

141.73

145.46

149.19



T  
(a)

41/54



42/54



43/54



44/54



45/54



46/54

T \*

152.92

156.65

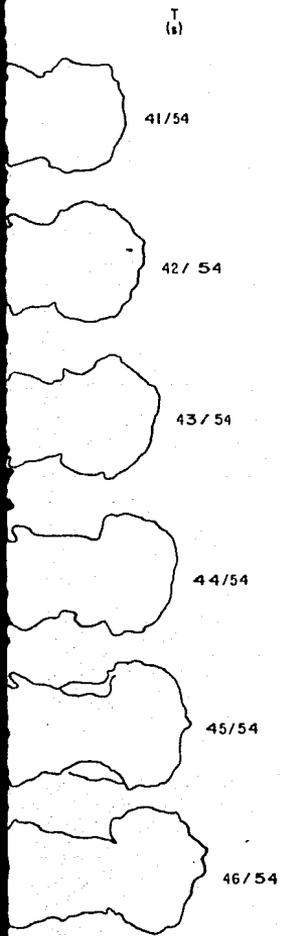
160.38

164.11

167.84

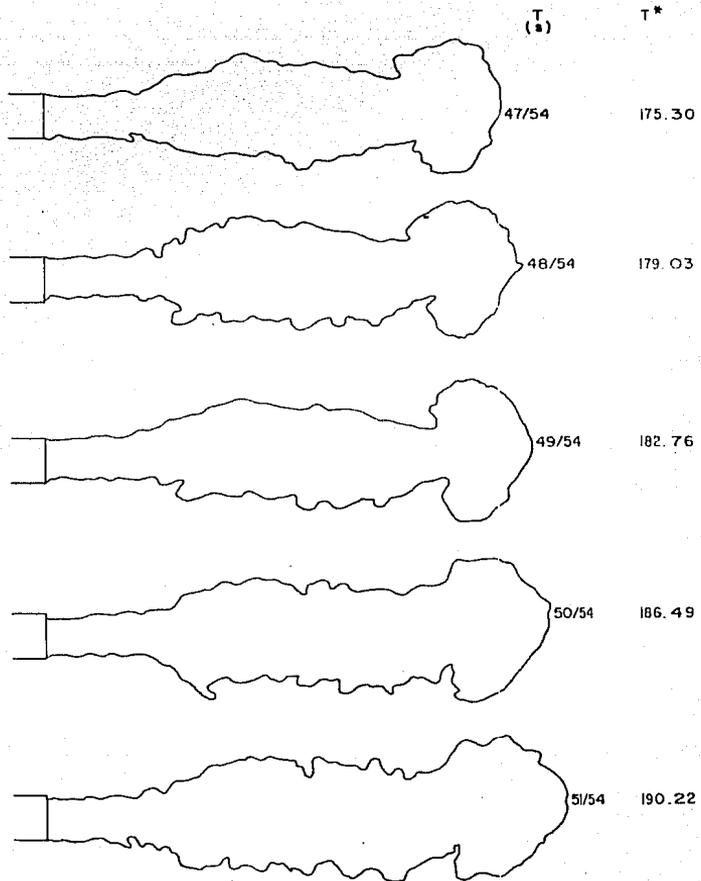
171.57





T\*

152.92  
156.65  
160.38  
164.11  
167.84  
171.57



**Fig. 3.1 Perfiles de un chorro incipiente  
con un desnivel de 0.422 m.**

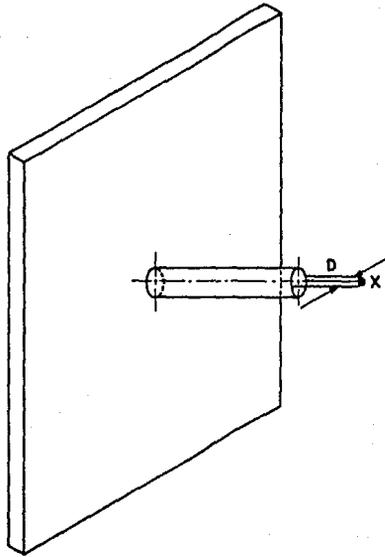


Fig. 3.2 Longitudes medidas en el frente del chorro

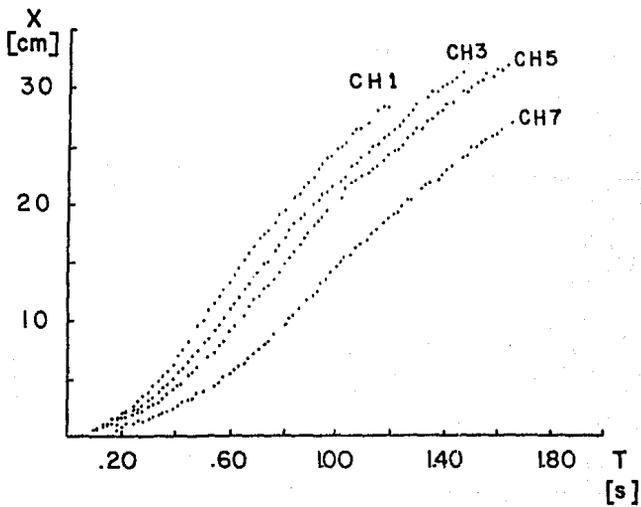


Fig. 3.3 Distribuciones de desplazamiento axial contra tiempo para el frente de los chorros nones

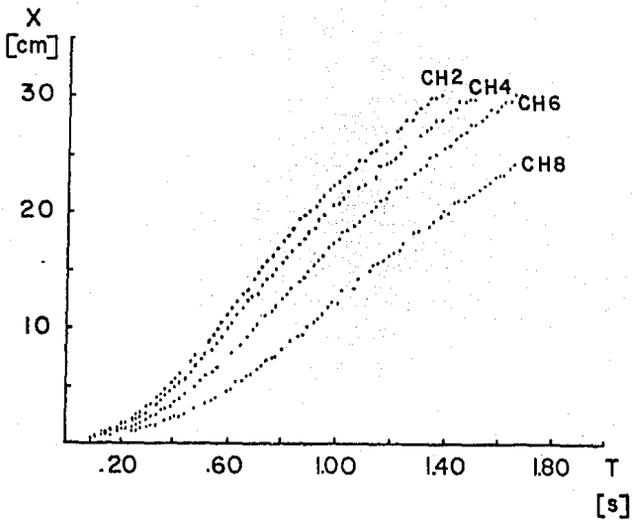


Fig. 3.4 Distribuciones del desplazamiento axial contra tiempo para el frente de los chorros pares

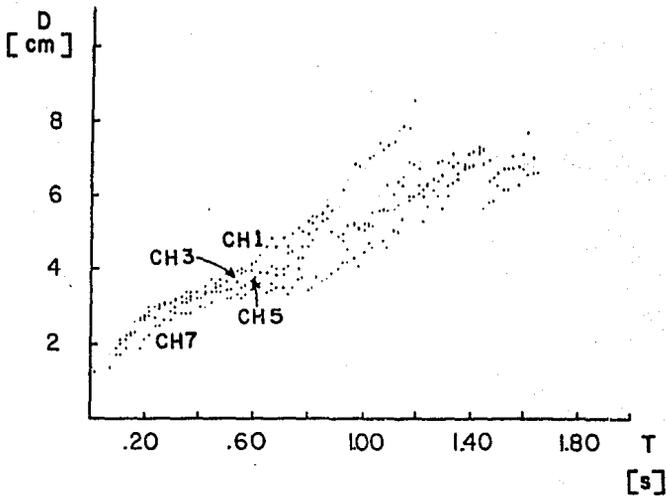


Fig. 3.5 Distribuciones del diámetro máximo contra tiempo para el frente de los chorros ones

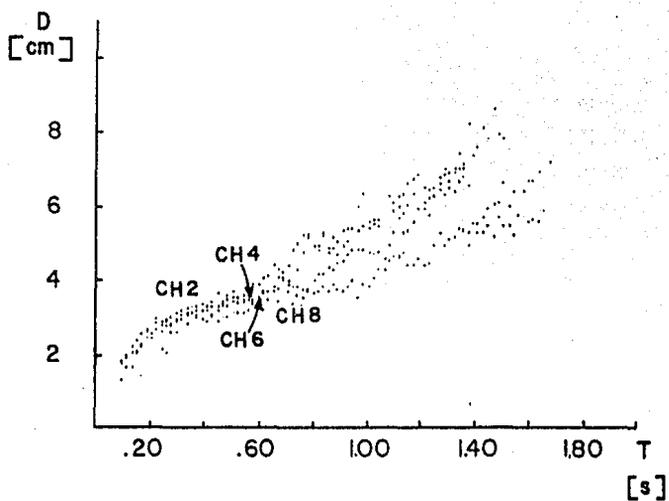


Fig. 3.6 Distribuciones del diámetro máximo contra tiempo para el frente de los chorros pares

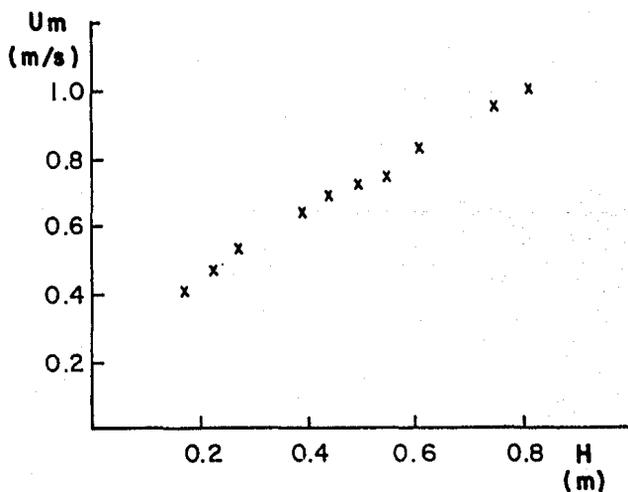


Fig. 3.7 Distribución de la velocidad media de descarga contra el desnivel

Al examinar las distribuciones resultantes de la experimentación, se observó que en los planos X-T se cumple:

1) A mayor desnivel, el frente del chorro alcanza mayores distancias en un mismo tiempo.

2) Al inicio del flujo la rapidez de avance del frente es menor, aumentando posteriormente.

Para los planos D-T se verifica:

1) A mayor desnivel, el frente del chorro alcanza mayores diámetros en un mismo tiempo.

2) Al inicio del flujo la rapidez de crecimiento del diámetro es mayor, y disminuye posteriormente.

## CAPITULO IV

### PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

A continuación se indica como se encontraron las distribuciones adimensionales unificadas de desplazamiento contra tiempo y diámetro contra tiempo, del frente del chorro incipiente. Haciendo uso de la física del problema y empleando mínimos cuadrados, se obtuvieron sus correspondientes curvas de ajuste. Para el desnivel entre las superficies libres contra la velocidad media de descarga, también se ajustó una curva.

#### 4.1 PARAMETROS ADIMENSIONALES

Con análisis dimensional se encontraron los parámetros, que expresan la dinámica del frente del chorro incipiente. Para el caso general de un chorro de líquido sumergido en líquido, como el mostrado en la Fig. 4.1, intervienen los siguientes parámetros:

Parámetros del sistema:  $\rho_1, \mu_1, \rho_2, \mu_2, d$

VARIABLES del sistema:  $U$

Parámetros del medio:  $g$

VARIABLES investigadas:  $X, D, T$

donde:

los subíndices 1 y 2 corresponden a los depósitos A y B

$U$  es una velocidad característica del chorro.

Este caso el chorro en estudio es:

- 1) de agua sumergido en agua
- 2) sin flotación

por lo que la densidad y la viscosidad cinemática son las mismas en ambos depósitos, teniéndose finalmente:

Parámetros del sistema:  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $d$

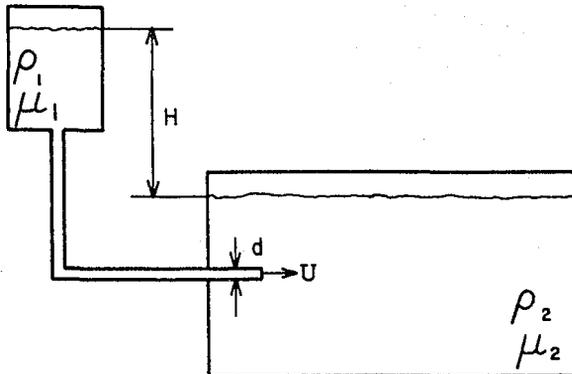


Fig. 4.1 Variables consideradas en la experimentación

La velocidad característica que se consideró, es la dada por la carga total disponible:

$$U = \sqrt{2 g H} \quad (4.1)$$

Empleando a  $U$ ,  $d$  y  $\mu$  como variables básicas en el análisis dimensional, se encontraron los siguientes parámetros adimensionales:

$$\Pi_1 = X/d \quad (4.2.a)$$

$$\Pi_2 = D/d \quad (4.2.b)$$

$$\Pi_3 = U T/d \quad (4.2.c)$$

$$\Pi_4 = U d \mu/\rho \quad (4.2.d)$$

Al considerar los 3 primeros parámetros adimensionales, se obtuvieron las gráficas de las Figs. 4.2 y 4.3, donde se empleó:

$$X^* = X/d \quad (4.3.a)$$

$$D^* = D/d \quad (4.3.b)$$

$$T^* = U T/d \quad (4.3.c)$$

En ambas gráficas pudo observarse que hay regiones de mayor y menor dispersión. En términos generales se puede decir que para valores de  $T^*$  menores a 160, todos los puntos experimentales caen en distribuciones bien definidas, una para  $X^*$  contra  $T^*$  y otra a  $D^*$  contra  $T^*$ .

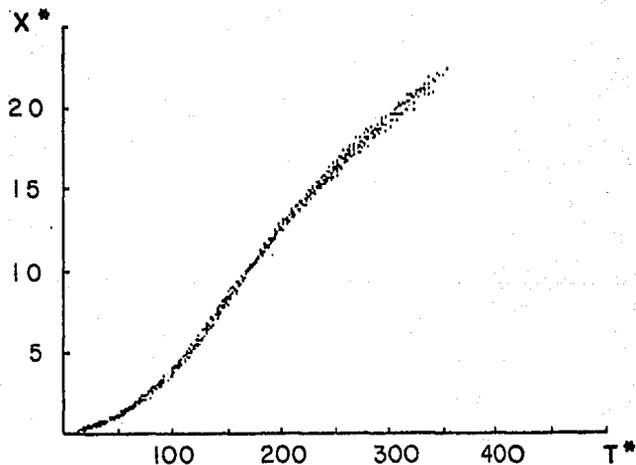


Fig. 4.2 Distribución de los datos experimentales de  $X^*$  contra  $T^*$

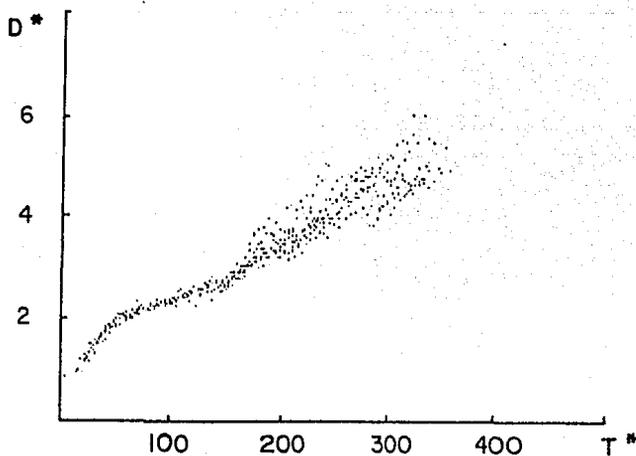


Fig. 4.3 Distribución de los datos experimentales de  $D^*$  contra  $T^*$

Por lo que respecta a la relación (4.2.d), se definió como:

$$R_t = U d \mu / \rho \quad (4.3.d)$$

Tuvo un valor para cada chorro.

#### 4.2 CURVAS DE AJUSTE

Una vez obtenidas las distribuciones experimentales de  $X^*$  contra  $T^*$  y  $D^*$  contra  $T^*$ , se les ajustaron curvas usando mínimos cuadrados.

A la distribución del desplazamiento contra tiempo se le ajustó un polinomio de la forma:

$$X^* = \sum_{i=0}^n b_i T^{*i} \quad (4.4)$$

donde  $n$  es el grado del polinomio. Al derivarse con respecto al tiempo, se obtuvo la velocidad adimensional:

$$U^* = dX^*/dT^* \quad (4.5.a)$$

$$= \sum_{i=1}^n i b_i T^{*(i-1)} \quad (4.5.b)$$

derivándose nuevamente con respecto al tiempo, se tuvo la aceleración adimensional:

$$A^* = dU^*/dT^* \quad (4.6.a)$$

$$= \sum_{i=2}^n i(i-1) b_i T^{*(i-2)} \quad (4.6.b)$$

De la física del problema se debieron satisfacer las siguientes condiciones:

$$1) X^* = 0 ; T^* = 0 \quad (4.7.a)$$

$$2) U^* = 0 ; T^* = 0 \quad (4.7.b)$$

$$3) A^* > 0 ; T^* = 0 \quad (4.7.c)$$

$$4) D^* \geq 1 ; T^* \geq 0 \quad (4.7.d)$$

por lo que en el polinomio debió cumplirse:

$$b_0 = 0 \quad (4.8.a)$$

$$b_1 = 0 \quad (4.8.b)$$

resultando:

$$X^* = \sum_{i=2}^n b_i T^{*i} \quad (4.9.a)$$

$$U^* = \sum_{i=2}^n i b_i T^{*(i-1)} \quad (4.9.b)$$

$$A^* = \sum_{i=2}^n i (i-1) b_i T^{*(i-2)} \quad (4.9.c)$$

Aplicando mínimos cuadrados a la Ec. (4.9.a) y variando  $n$  entre 2 y 10, se tuvo que el mejor ajuste fué para un polinomio de noveno grado. El parámetro para seleccionar el mejor ajuste, estuvo dado por la suma mínima del cuadrado de las diferencias de ordenada, entre la curva de ajuste y los puntos experimentales. Los coeficientes de este ajuste fueron:

$$\begin{aligned} b_2 &= 7.4634 \times 10^{-4} \\ b_3 &= -8.6832 \times 10^{-6} \\ b_4 &= 5.3762 \times 10^{-8} \\ b_5 &= 2.6858 \times 10^{-10} \\ b_6 &= -4.8959 \times 10^{-12} \\ b_7 &= 2.3231 \times 10^{-14} \\ b_8 &= -4.7995 \times 10^{-17} \\ b_9 &= 3.7382 \times 10^{-20} \end{aligned} \quad (4.10)$$

En la Fig. 4.4 se graficaron los puntos experimentales y la correspondiente curva de ajuste.

Con respecto a la distribución del diámetro contra tiempo, en la Fig. 4.3 se observó que existen 2 puntos de quiebre, que definieron 3 zonas limitadas por:

$$1) \quad 0 \leq T^* \leq 48 \quad (4.11.a)$$

$$2) \quad 48 < T^* \leq 160 \quad (4.11.b)$$

$$3) \quad T^* > 160 \quad (4.11.c)$$

Recordando que este estudio está limitado a la región inicial, se consideraron sólo las 2 primeras zonas y tuvo que ajustarse nuevamente el polinomio de la Ec. (4.9.a), cuando  $T^*$  varió entre 0 y 160. Los coeficientes obtenidos son:

$$\begin{aligned}
 b_2 &= 1.2642 \times 10^{-3} \\
 b_3 &= -3.4127 \times 10^{-5} \\
 b_4 &= 4.6815 \times 10^{-7} \\
 b_5 &= -1.5848 \times 10^{-9} \\
 b_6 &= -2.2942 \times 10^{-11} \\
 b_7 &= 2.5531 \times 10^{-13} \\
 b_8 &= -9.3676 \times 10^{-16} \\
 b_9 &= 1.1313 \times 10^{-18}
 \end{aligned}
 \tag{4.12}$$

En la Fig. 4.5 se dibujaron los puntos experimentales y la curva de ajuste.

Para la distribución adimensional del diámetro contra tiempo, se ajustaron rectas usando mínimos cuadrados. Los coeficientes de la primera recta resultaron:

$$\begin{aligned}
 c_0 &= 0.6144 \\
 c_1 &= 2.7948 \times 10^{-2}
 \end{aligned}
 \tag{4.13}$$

y los de la segunda:

$$\begin{aligned}
 d_0 &= 1.5799 \\
 d_1 &= 7.8367 \times 10^{-3}
 \end{aligned}
 \tag{4.14}$$

En la Fig. 4.6 se muestran los puntos experimentales junto con las rectas de ajuste.

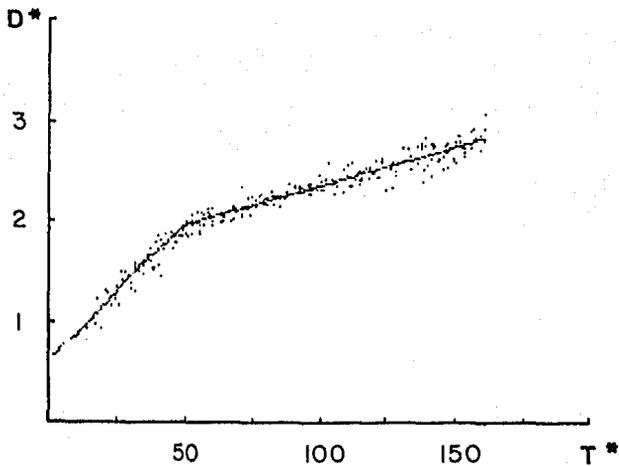


Fig. 4.6 Distribución de los datos experimentales y rectas de ajuste de  $D^*$  contra  $T^*$  en la región inicial

Con respecto a la curva de ajuste del desnivel contra la velocidad media de descarga, también se ocuparon mínimos cuadrados, seleccionándose un polinomio de sexto grado cuyos coeficientes fueron:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= 3.8639 \\
 a_2 &= -13.4803 \\
 a_3 &= 38.2828 \\
 a_4 &= -70.1882 \\
 a_5 &= 70.8356 \\
 a_6 &= -28.7098
 \end{aligned}
 \tag{4.15}$$

La Fig. 4.7 contiene la curva de ajuste con los puntos experimentales.

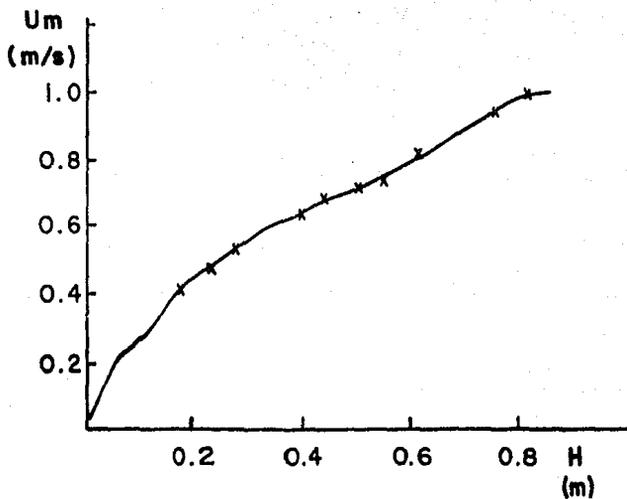


Fig. 4.7 Distribución de los datos experimentales y la curva de ajuste para  $U_m$  contra  $H$

## CAPITULO V

### INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

En esta parte se describe la evolución del chorro, se analizan las curvas de ajuste de  $X^*$  contra  $T^*$ ,  $D^*$  contra  $T^*$ , y se relacionan con los perfiles que toma un chorro al evolucionar. Se obtienen las gráficas de  $X^*$  contra  $R_1$  y  $X^*$  contra  $U^* D^*$ .

#### 5.1 EVOLUCION DEL CHORRO

El fluido de la tubería al estar en desequilibrio con el fluido exterior, ocasionado por el desnivel de las superficies libres de los tanques, comienza a desplazarse en el agua inmóvil en que está inmersa la tubería. La fricción que actúa entre la pared interna de la tubería y el fluido inmediato a ella, impide su movimiento, mientras que el fluido localizado en el eje de la tubería, comienza a desplazarse debido a que se ejerce un menor esfuerzo sobre él. El frente del fluido que recientemente ha salido del tubo es frenado por el fluido quieto del medio. Al continuar saliendo fluido del centro de la tubería, por efecto de su viscosidad tiende a arrastrar fluido cada vez más cercano a la pared del tubo, como se observa en los perfiles de la Fig. 3.1, cuyos tiempos van de 3/54 a 5/54. Al vencerse la fricción existente entre la pared y el fluido inmediato, éste sale y se pone en contacto con el agua en reposo, aplicándosele en la parte interna un esfuerzo en la dirección del movimiento del fluido adyacente, simultáneamente, en la parte externa actúa otro

esfuerzo en la dirección opuesta, debido a que el fluido del medio está en reposo, dando como resultado una rotación del fluido que comienza a desplazarse a distancias mayores al radio de la tubería, tomando entonces el chorro la forma de una cabeza de hongo. Del fluido que continúa saliendo, parte es arrastrado por el fluido que está rotando, pudiendo así expandirse; el resto hace que el chorro se alargue sin que la cabeza se desprege de la tubería, como se muestra en los perfiles cuyos tiempos van de 6/54 a 12/54. Este comportamiento también se observa en unas fotografías de J. Okabe y S. Inoue (1961). A partir de ese momento el fluido que sale de la tubería, hace que la cabeza se desprege y se cree una zona tubular entre la tubería de descarga y la cabeza, según puede verse en los perfiles con tiempos 13/54 a 16/54. Posteriormente, el fluido recién salido tiene una menor dificultad para avanzar, ya que la cabeza le ha abierto camino, y alcanza velocidades mayores a las del frente, siendo entonces frenado, originándose un anillo que tiene suficiente energía para avanzar hacia la cabeza e introducirse en ella, como lo muestran los perfiles con tiempos 17/54 a 19/54. La longitud del chorro y el diámetro de la cabeza continúan aumentando, por lo que el último fluido salido después de dilatarse, tiene que recorrer distancias cada vez mayores para alcanzar la cabeza. Esto se sucede una serie de veces, como puede observarse en los perfiles cuyos tiempos van de 20/54 a 31/54, hasta que finalmente un anillo ya no puede alcanzar la cabeza y se detiene, sin que hagan lo mismo los anillos inmediatos a la cabeza, que terminan por penetrar en ella, creándose una estrangulación entre la cabeza y

el anillo estático, según lo muestran los perfiles con tiempos 32/54 a 34/54. El fluido de la región tubular al continuar penetrando en la región frontal a partir del anillo estático, hace que la estrangulación desaparezca y se unan el anillo estático y la parte posterior de la cabeza, creándose una nueva estrangulación en el frente, como se observa en los perfiles con tiempos 35/54 a 38/54. El fluido de la región tubular continúa penetrando en la región frontal haciendo que la estrangulación desaparezca, y se inicie una transición a configuraciones complejas, de acuerdo a lo mostrado por los perfiles con tiempos mayores a 39/54.

## 5.2 ANALISIS DE LAS CURVAS DE AJUSTE

Como se mencionó en el capítulo anterior, las condiciones que satisface el chorro incipiente están dadas por:

$$1) X^* = 0 ; T^* = 0 \quad (4.7.a)$$

$$2) U^* = 0 ; T^* = 0 \quad (4.7.b)$$

$$3) A^* > 0 ; T^* = 0 \quad (4.7.c)$$

$$4) D^* \geq 1 ; T^* \geq 0 \quad (4.7.d)$$

Dibujando  $D^*=1$  en la Fig. 4.6 hasta intersectarse con la primera recta de ajuste, se obtuvo la gráfica de la Fig. 5.1 donde se encuentran 3 zonas acotadas por:

$$\begin{aligned} 1) \quad & 0 \leq T^* \leq 13.8 \\ 2) \quad & 13.8 < T^* \leq 48 \\ 3) \quad & 48 < T^* \leq 160 \end{aligned} \quad (5.1)$$

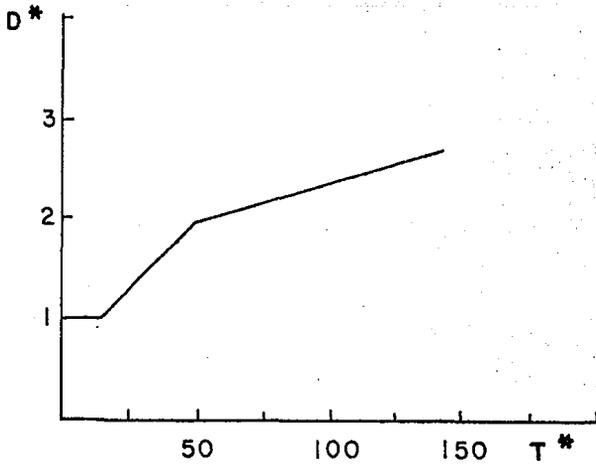


Fig. 5.1 Rectas de ajuste de  $D^*$  contra  $T^*$  en la región inicial

Al graficarse la Ec. (4.9.a) con los coeficientes de (4.12), se obtuvo la Fig. 5.2. Las curvas adimensionales de velocidad contra tiempo y aceleración contra tiempo, que fueron resultado de aplicar las Ecs. (4.9.b) y (4.9.c) con los coeficientes de (4.12), se muestran en las Figs. 5.3 y 5.4.

En la curva de la Fig. 5.3 se distinguen 3 puntos característicos de curvatura máxima, cuyas magnitudes se midieron gráficamente, dando lugar en la región inicial a las siguientes 3 zonas, cuyos límites son:

- 1)  $0 \leq T^* \leq 12.3$
- 2)  $12.3 < T^* \leq 48$  (5.2)
- 3)  $48 < T^* \leq 141.7$

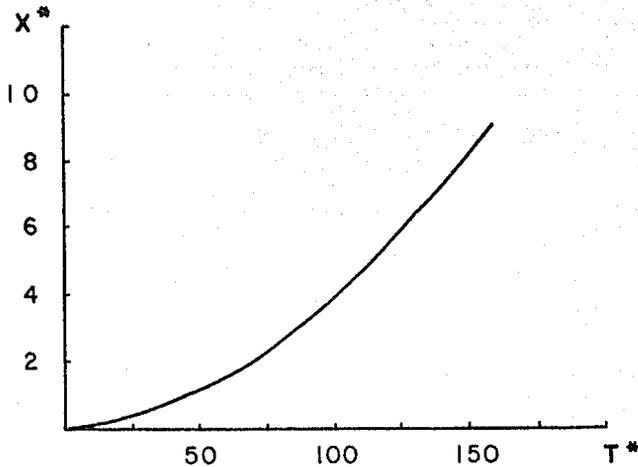


Fig. 5.2 Polinomio de ajuste de  $X^*$  contra  $T^*$  en la región inicial

Al compararse los límites dados por (5.1) y (5.2), se puede observar que hay una gran semejanza entre ellos. La diferencia en los límites mayores de la primera zona, es en parte, ocasionada por el error que se tiene al medir directamente de la gráfica. El límite superior de la tercera zona dado por (5.1) se presta a dudas, ya que cuando  $T^*=160$  existe una mayor dispersión, como se puede observar en las Figs. 4.2 y 4.3. Considerando esto, finalmente, los límites de las 3 zonas son:

- 1)  $0 \leq T^* \leq 13.8$
  - 2)  $13.8 < T^* \leq 48$
  - 3)  $48 < T^* \leq 141.7$
- (5.3)

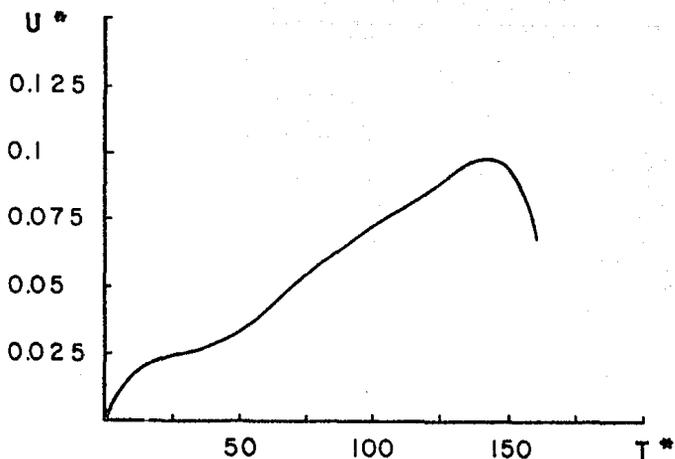


Fig. 5.3 Curva resultante de  $U^*$  contra  $T^*$  en la región inicial

Relacionando los límites de estas 3 zonas con los perfiles de la Fig. 3.1, se encuentra:

- 1) La primera zona abarca hasta el perfil con tiempo  $4/54$
- 2) La segunda zona comprende de los perfiles cuyos tiempos van de  $5/54$  a  $13/54$
- 3) La tercera zona considera los perfiles con tiempos  $14/54$  a  $38/54$

De los perfiles de la primera zona, se puede observar que es donde el fluido sale de la tubería y se desplaza axialmente, sin que el fluido inmediato a la pared del tubo lo haga. A esta zona se le llamó naciente.

De los perfiles de la segunda zona, se ve que es la región

donde el chorro toma la configuración de cabeza de hongo, sin despegarse de la tubería, es decir, aumenta grandemente su diámetro y no avanza mucho axialmente, como puede apreciarse en las Figs. 5.1 y 5.2. Esta zona se ha definido como adosada.

Los perfiles de la tercera zona corresponden a la región donde aumenta grandemente el desplazamiento del chorro, sin hacerlo así su diámetro, y se inicia la generación de una serie de anillos. Dicha zona se ha llamado tubo-anular.

Los perfiles posteriores a esta zona comienzan a tomar geometrías irregulares, por lo que se llamó zona de estructura deformada.

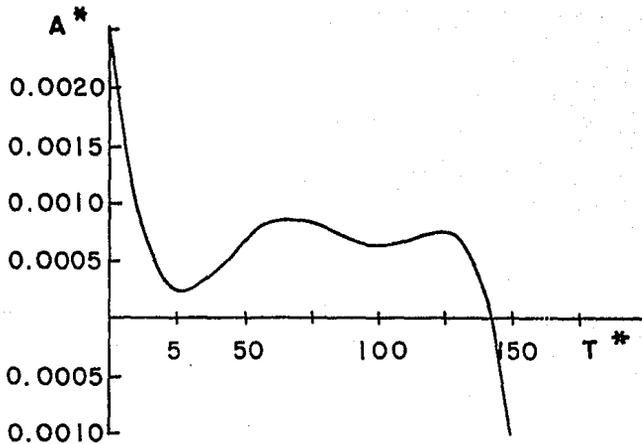


Fig. 5.4 Curva resultante de  $A^*$  contra  $T^*$  en la región inicial

El que el final de la primera zona no coincida con el perfil

con tiempo 5/54, el que el inicio de la segunda zona no coincide con el perfil cuyo tiempo es 12/54, es debido a que se han empleado las curvas de correlación, que consideran a todos los puntos experimentales. A pesar de estas pequeñas diferencias, la congruencia entre las curvas adimensionales de desplazamiento contra tiempo, velocidad contra tiempo, diámetro contra tiempo y los perfiles de la Fig. 3.1, justifican la determinación de las 3 zonas, cuyos límites están dados por (5.3).

Por otro lado al sustituir a (4.3.a) y (4.3.c) en (4.5.a) se encontró:

$$U^* = d(X/d)/d(T \sqrt{2gH} / d) \quad (5.4.a)$$

Para un chorro  $d$  y  $\sqrt{2gH}$  son constantes, por lo que:

$$U^* = (1/\sqrt{2gH}) (d(X)/d(T)) \quad (5.4.b)$$

$$U^* = (1/\sqrt{2gH}) u \quad (5.4.c)$$

Definiendo un número de Reynolds local para el frente del chorro se tuvo:

$$R_1 = u D/\nu \quad (5.5.a)$$

Empleando (5.4.c) en (5.5.a):

$$R_1 = d \sqrt{2gH} U^* D^*/\nu \quad (5.5.b)$$

La Ec. (5.5.b) es el producto de 3 términos:

- 1)  $d/\nu$ , que es constante en este caso
- 2)  $\sqrt{2gH}$ , la velocidad dada por la carga total disponible,

diferente para cada chorro

- 3)  $U^* D^*$ , que da un valor único para cada tiempo  $T^*$  por ser el producto de curvas, que son funciones unívocas del tiempo  $T^*$

Graficando  $X^*$  contra  $R_1$  se obtuvieron las curvas de la Fig. 5.5, una para cada chorro. La curva de la derecha correspondió al mayor desnivel, y fué decreciendo monotónicamente hacia la izquierda. También se graficó  $X^*$  contra  $U^* D^*$  y se obtuvo una curva única, como se muestra en la Fig. 5.6.

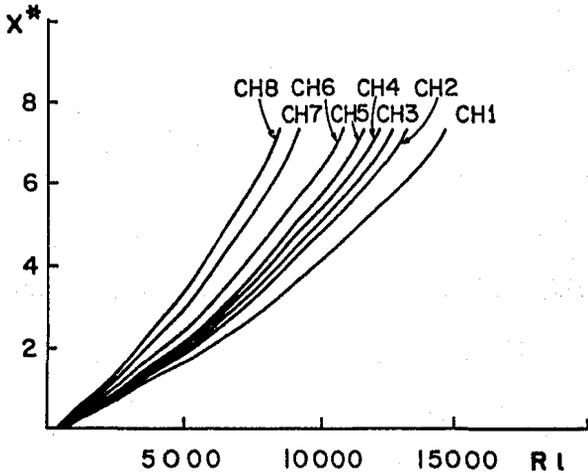


Fig. 5.5 Distribuciones resultantes de  $X^*$  contra  $R_1$

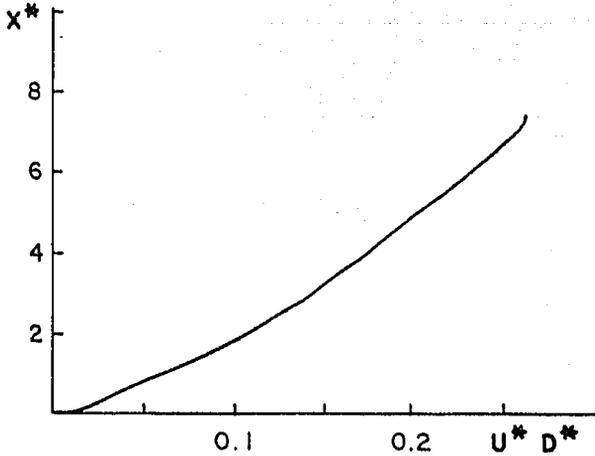


Fig. 5.6 Distribución resultante de  $X^*$  contra  $U^* D^*$

Como:

$$R_t = \sqrt{2gH} \quad d/\nu \quad (4.3.d')$$

Empleando (4.3.d') en (5.5.b) se encontró:

$$U^* D^* = R_1/R_t \quad (5.6)$$

Al calcular el flujo de la cantidad de movimiento en la tubería de descarga y en el frente del chorro se obtuvo:

$$M_t = \pi \rho U^2 d^2/4 \quad (5.7.a)$$

$$M_1 = \pi \rho u^2 D^2/4 \quad (5.7.b)$$

cuyo cociente es:

$$M_1/M_t = (u/U)^2 (D/d)^2$$

$$= ( U^* D^* )^2$$

por lo que:

$$U^* D^* = \sqrt{M_1/M_t} \quad (5.8)$$

Concluyendo, el cociente de los números de Reynolds local y el resultante de considerar la velocidad dada por la carga total disponible, es igual a la raíz cuadrada del cociente de los flujos de la cantidad de movimiento del frente del chorro y el de la tubería de descarga. Este cociente tiene un valor único para cada  $X^*$  ó  $T^*$ .

CONCLUSIONES

Adimensionalizando en la región inicial el desplazamiento axial, el diámetro y el tiempo del frente del chorro incipiente redondo, en la siguiente forma:

$$X^* = X/d$$

$$D^* = D/d$$

$$T^* = \sqrt{2gH} T/d$$

Para chorros con Re de 7 411- 13 904, se obtuvo:

- I) Al graficarse los puntos experimentales en planos  $X^*$  contra  $T^*$  y  $D^*$  contra  $T^*$ , dieron distribuciones únicas.
- II) Al derivarse la curva de ajuste de  $X^*$  contra  $T^*$ , se obtuvieron las curvas de  $U^*$  contra  $T^*$  y  $A^*$  contra  $T^*$ .
- III) Al analizarse las curvas de  $D^*$  contra  $T^*$  y  $U^*$  contra  $T^*$ , se obtuvieron 3 zonas, cumpliéndose:
  - 1)  $0 \leq X^* \leq 0.17$  ;  $D^* = 1$  ;  $0 \leq T^* \leq 13.8$
  - 2)  $0.17 < X^* \leq 1.125$  ;  $1 < D^* \leq 1.96$  ;  $13.8 < T^* \leq 48$
  - 3)  $1.125 < X^* \leq 7.5$  ;  $1.96 < D^* \leq 2.69$  ;  $48 < T^* \leq 141.7$
- IV) Al relacionar estos límites con los perfiles de evolución del chorro, y las distribuciones de  $X^*$  contra  $T^*$  y  $D^*$  contra  $T^*$ , se halló:
  - 1) En la zona naciente, el fluido del chorro avanzó axialmente, sin que el fluido cercano a la pared interna del tubo de descarga lo hiciera.

- 2) En la zona adosada, el diámetro del chorro aumentó rápidamente sin apartarse del tubo, tomando la configuración de una cabeza de hongo.
- 3) En la zona tubo-anular, el chorro se desplazó rápidamente en la dirección axial, mientras que su diámetro creció más lentamente. Se presentaron una serie de dilataciones.
- 4) En la zona de estructura deformada, el chorro comienza a tomar configuraciones irregulares, que pueden ser de carácter turbulento.

V) Al emplearse el número de Reynolds local definido como:

$$R_1 = u D/\nu$$

y el número de Reynolds teórico, obtenido por análisis dimensional y expresado como:

$$R_t = \sqrt{2gH} d/\nu$$

se obtuvieron:

- 1) Una curva de  $X^*$  contra  $R_1$  para cada chorro
- 2) Una curva única de  $X^*$  contra  $R_1/R_t$ . Se encontró que el cociente de estos números de Reynolds es igual a la raíz cuadrada del cociente de los flujos de la cantidad de movimiento del frente del chorro y de la tubería. Tiene un valor fijo para cada  $X^*$  ó  $T^*$ .

## REFERENCIAS

1. Abramovich G. N. The Theory of Turbulent Jets. The Massachusetts Institute of Technology. 1963. Estados Unidos Americanos.
2. Abramovich S. y Solan A. "The initial development of a submerged laminar round jet". Journal of Fluid Mechanics. Vol. 59, parte 4, págs. 791-801. 1973. Inglaterra.
3. Batchelor G. K. y Gill A. E. "Analysis of the stability of axisymmetric jets". Journal of Fluid Mechanics. Vol. 14, págs. 529-551. 1962. Inglaterra.
4. Boguslawski L. y Popiel Cz. O. "Flow structure of the free round turbulente jet in the initial region". Journal of Fluid Mechanics. Vol. 90, págs. 531-539. 1979. Inglaterra.
5. Cantwell B. J. "Transition in the axisymmetric jet". Journal of Fluid Mechanics. Vol. 104, págs. 369-386. 1981. Inglaterra.
6. Crow S. C. y Champagne F. H. "Orderly structure in jet turbulence". Journal of Fluid Mechanics. Vol. 48, parte 3, págs. 547-591. 1971. Inglaterra.
7. du Plessis M. P., Wang R. L. y Tsang S. "Development of a submerged round laminar jet from an initially parabolic profile". Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. Transactions of the ASME. Págs. 148-154. 1973. Estados Unidos Americanos.

8. Fox R. W. y McDonald A. T. Introduction to Fluid Mechanics. John Wiley & Sons. 1978. Estados Unidos Americanos.
9. Gill A. E. "On the occurrence of condensations in steady axisymmetric jets". Journal of Fluid Mechanics. Vol. 14, págs. 557-567. 1962. Inglaterra.
10. McNaughton K. J. y Sinclair C. G. "Submerged jets in short cylindrical flow vessels". Journal of Fluid Mechanics. Vol. 25, parte 2, págs. 367-375. 1966. Inglaterra.
11. Okabe J. y Inoue S. "The generation of vortex rings". Reportes del Research Institute for Applied Mechanics. Vol. VIII, No. 32, págs. 91-102. 1961. Japón.
12. Oosthuizen P. H. "An experimental study of low Reynolds number turbulent circular jet flow". ASME. 83-FE-36, 8 págs. 1983. Estados Unidos Americanos.
13. Peyret R. "Unsteady evolution of a horizontal jet in a stratified fluid". Journal of Fluid Mechanics. Vol. 78, parte 1, págs. 49-63. 1976. Inglaterra.
14. Pickering W. M. y Sozou C. "The round laminar jet in a spherical envelope". Journal of Fluid Mechanics. Vol. 94, págs. 1-12. 1979. Inglaterra.
15. Rankin G. W. y Sridhar K. "Developing region of laminar jets with parabolic exit velocity profiles". ASME. 81-FE-3, 6 págs. 1981. Estados Unidos Americanos.
16. Rankin G. W., Sridhar K., Arulraja M. y Kumar K. R. "An experimental investigation of laminar axisymmetric submerged jets". Journal of Fluid Mechanics. Vol. 133,

- págs. 217-231. 1983. Inglaterra.
17. Reynolds A. J. "Observations of a liquid into liquid jet". Journal of Fluid Mechanics. Vol. 14, págs. 552- 556. 1962. Inglaterra.
  18. Rincón E., Sen M. y Cervantes J. G. "Visual observations of an incipient round jet". 16th. Southeastern Seminar of the Thermal Sciences. Vol. 1, págs. 135-140. Abril de 1982. Miami, Estados Unidos Americanos.
  19. Schneider W. "Flow induced by jets and plumes". Journal of Fluid Mechanics. Vol. 108, págs. 55-65. 1981. Inglaterra.
  20. Schneider W. "Decay of momentum flux in submerged jets". Journal of Fluid Mechanics. Vol. 154, págs. 91-110. 1985. Inglaterra.
  21. Sozou C. y Pickering W. M. "The round laminar jet: the development of the flow field". Journal of Fluid Mechanics. Vol.80, parte 4, págs. 673-683. 1977. Inglaterra.
  22. Sozou C. "Development of the flow field of a point force in an infinite fluid". Journal of Fluid Mechanics. Vol. 91, parte 3, págs. 541-546. 1979. Inglaterra.
  23. Viilu A. "An experimental determination of the minimum Reynolds number for instability in a free jet". Journal of Applied Mechanics. Transactions of the ASME. Vol. 29, págs. 506-508. 1962. Estados Unidos Americanos.
  24. Zauner E. "Visualization of the viscous flow induced by a round jet". Journal of Fluid Mechanics. Vol. 154, págs. 111-119. 1985. Inglaterra.