

500045

ESTRUCTURAS COHERENTES EN CHORROS CIRCULARES.

por

EDUARDO A. RINCON MEJIA

D.E.P.F.I., U.N.A.M.

Mayo de 1980

MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA



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 esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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



DEPFI

T. UNAM  
1981  
RIN



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

570981  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
SECCION DE INGENIERIA MECANICA

Dr. E. Chicurel  
Coordinador,  
Sección de Ingeniería Mecánica

TEMA DE EXAMEN DE MAESTRIA

ALUMNO: Eduardo Rincón Mejía

TEMA: Estructuras Coherentes en Chorros Circulares.

El alumno tiene que hacer una investigación bibliográfica sobre el tema así como hacer algunos experimentos y presentar resultados que muestren las características de estas estructuras.

PLAZO MAXIMO: Treinta días naturales

PROFESOR: Dr. Mihir Sen

*Mihir Sen*

México, D. F., a 6 de abril de 1981

*Tema iniciado el día 15 de abril*

*E. Chicurel*

# CONTENIDO .

	Página.
RESUMEN -----	1.
CAPITULO I.	
Introducción. -----	2.
CAPITULO II.	
Estructuras coherentes en chorros circulares.--	6.
2.1. Geometría de chorros axisimétricos.--	6.
2.1.1. Geom. de chorros simples. -----	6.
2.1.2. Geom. de chorros anulares. ----	7.
2.1.3. Geom. de chorros axiales. -----	10.
2.2. Estructuras coherentes en chorros axisimétricos. -----	11.
2.2.1. Chorros axisimétricos simples.--	11.
2.2.2. Chorros anulares. -----	21.
2.2.3. Chorros coaxiales. -----	22.
CAPITULO III.	
Estudio visual elemental de chorros axisimé- tricos. -----	24.
3.1. Técnicas propuestas para la visualiza- ción del chorro. -----	24.
3.2. Dispositivos para generar chorros. ---	27.
3.3. Empleo de la técnica del siluetógrafo--	29.
3.4. Empleo de colorantes. -----	30.
CAPITULO IV.	
Resultados. -----	33.
4.1. Siluetogramas. -----	33.
4.2. Geometría de los chorros. -----	33.

4.3. Visualización de chorros lamina- res inestables. -----	35.
4.4. Visualización de anillos vorticosos.-	35.

CAPITULO V.

Conclusiones. -----	53.
Referencias. -----	54.

## R E S U M E N .

Se hace una investigación bibliográfica sobre estructuras coherentes en chorros axisimétricos y se describen los dispositivos utilizados para efectuar un estudio visual de chorros axisimétricos de agua descargando en agua, cuyos resultados preliminares son también presentados.

## C A P I T U L O I .

### I N T R O D U C C I O N .

La idea que generalmente se ha tenido de la turbulencia es la de caos y desorden. Se ha considerado que la característica esencial de un flujo turbulento es que cantidades tales como los componentes de la velocidad, la presión, la densidad, etc. fluctúan de una manera meramente aleatoria, tanto en el tiempo como en el espacio y en consecuencia, el fenómeno de la turbulencia ha sido descrito en términos de la teoría estadística, esto, es, mediante funciones de distribución de probabilidad, de correlación, etc. Sin embargo, en los últimos años se fue haciendo cada vez más evidente que los flujos turbulentos con cortante (capas de mezcla, chorros, estelas, etc.) contenían estructuras cuya descripción era mucho más determinista de lo que se había pensado, al grado que en la actualidad la existencia de estructuras coherentes en dichos flujos es un hecho universalmente aceptado. Un gran número de investigadores sobre estructuras coherentes han presentado trabajos sobre el tema en simposiums y Encuentros llevados a cabo en diversas partes del mundo, como fueron: el "Simposium sobre ruido aerodinámico" efectuado en la Universidad de Loughborough en 1973; el "Encuentro sobre mecanismos del ruido" de la AGARQ, efectuado en Bruselas en 1973; el "Coloquio sobre estructuras coherentes en flujos turbulentos", efectuado en la Universidad de Southampton en 1974, en el cual participaron alrededor de 100 investigadores de la turbulencia y se hizo una revisión muy completa del avance en el conocimiento del tema hasta esas fechas. Posteriormente se han efectuado otras reuniones, por ejemplo, en la Universidad del Estado de Michigan, en julio y agosto de 1979, siendo el tema central el de "estructuras coh



rentes en capas límite turbulentas" y en La Hogue, Holanda, en -  
septiembre de 1979, tratándose también de capas límite.

La existencia de movimientos organizados en ciertos flujos -  
turbulentos, por ejemplo, la separación periódica de vórtices de  
trás de un cilindro circular a números de Reynolds superiores a-  
 $10^6$ , ya era bien conocida desde hace relativamente mucho tiempo.  
Sin embargo, estos patrones organizados no habían sido considerados  
como característicos de una turbulencia "bien desarrollada",  
sino más bien como casos especiales ligados a sus orígenes geométr  
tricos. Así Hinze, (1975) se refiere a estos flujos como "pseudo  
turbulentos".

Las técnicas de visualización del flujo han mostrado la existen  
tencia de estructuras coherentes\* en capas de mezcla, estelas, capa  
pas límites, etc., aún en flujos que habían sido previamente estu  
diados mediante las técnicas de medición estadística donde lapre  
sencia de estas estructuras pasó desapercibida. De hecho, suex  
istencia fue casualmente descubierta en capas de mezcla por --  
Brown y Roshko (1971, independientemente de otros) al querer estu  
diar efectos de densidad no uniforme. Citando las palabras de  
Roshko (1976): "Por ésto fue más bien sorprendente que los silueto  
gramas revelaran la presencia de grandes estructuras bien defini  
das, las cuales tienen la apariencia de olas rompiendo o vórtici

\*Entendiéndose por estructuras coherentes, cualquier patrón espacial  
y/o temporalmente orgnizado, esto es, que retiene sus identi  
dades durante períodos de tiempo que son grandes comparados con  
las escalas de tiempo del flujo, en observaciones hechas en un -  
punto fijo; o bien, cualquier patrón cuya naturaleza pueda ser --  
bien identificada de entre la maraña de movimientos superpuestos  
en un flujo turbulento, aún cuando no exhiban ningún tipo de peri  
odicidad.

ces, superpuestos sobre una turbulencia de más fina escala..... El número de Reynolds es  $8.5 \times 10^5$ , comparable a los más altos - valores en las investigaciones previas bien conocidas de capas - de mezcla turbulentas. Así pues, estos flujos con grandes estruc- turas organizadas, corresponden en todo aspecto a lo que clásica- mente han sido llamadas capas de mezcla turbulentas. Sus campos- de velocidades medias, los esfuerzos cortantes de Reynolds calcu- lados de ellas y las correspondientes rapidezces de crecimiento, - concuerdan con lo que ya se sabía de estos flujos. De hecho, son los mismos flujos, pero la existencia de las estructuras organi- zadas no había sido reconocida previamente<sup>o</sup>.

La razón por la cual estas estructuras no habían sido identi- ficadas a través de técnicas de medición estadísticas, se debió, en parte, a que éstas únicamente proporcionan información cuanti- tativa sobre valores medios (en tiempo) de las propiedades, de - manera que los detalles de tales estructuras se perdían, ya que- los patrones repetitivos no eran lo suficientemente periódicos - como para ser claramente identificados. Más aún, la interpreta- ción de los resultados desde un punto de vista clásico, conduci- ría a conclusiones diametralmente opuestas a las que se obten- - drían considerando un movimiento más determinístico. Por ejemplo, la envolvente de las gráficas de una correlación espacio-tempo- - ral, que desde un punto de vista clásico ha sido interpretado co- mo representativa del decaimiento de los grandes remolinos, podría ser en realidad una curva de esperanza de vida de los mismos .

(Roshko 1976, p. 4)

Otro inconveniente de estas técnicas es que los sensores uti- lizados perturbaban al flujo borrando parte de la coherencia.

El estudio de las estructuras coherentes ha requerido el de-

desarrollo de nuevas técnicas de medición, las cuales generalmente se efectúan con apoyo de la visualización del flujo. Estas técnicas comprenden desde "muestreos condicionados", que consisten en la posibilidad de identificar de alguna manera el arribo de una estructura y así medir únicamente cuando ésta se encuentra sobre el sensor, eliminándose de este modo partes no deseadas que "ensuciarían" la señal. Incluso se han hecho programas de computadora para reconocer señales y efectuar promedios de ensamble de ellas para obtener las características de las estructuras, (Eckelmann 1978). Nuevas mejoras son logradas con el empleo de anemómetros de rayo laser (Lau et al 1979, Pfeifer 1979, entre otros), con lo cual se eliminan las perturbaciones en el campo de flujo que se producían al introducir en él sensores de hilo caliente. Otras aplicaciones distintas del rayo laser son hechas por Kalghatgi (1980), y por Perry y Lim (1978). Dahan et al (1978) utilizan un radiómetro para medir las emisiones infrarrojas de chorros calientes.

Praturi y Brodkey (1978), investigan las capas límite turbulentas fotografiando los movimientos de pequeñas partículas trazadoras con una cámara rápida estereoscópica moviéndose con el flujo.

Se han desarrollado también técnicas de medición de la velocidad de flujo en canales de flujo de líquidos y gases, que consisten en la utilización de sensores de hilo caliente, que se colocan en el flujo y se miden las variaciones de resistencia eléctrica que se producen al ser calentados por el flujo.

## C A P I T U L O    I I .

### ESTRUCTURAS COHERENTES EN CHORROS CIRCULARES.

En este capítulo se hace primeramente una descripción elemental de la geometría de los chorros circulares turbulentos, con objeto de localizar las regiones del mismo en las cuales se han identificado estructuras coherentes.

Posteriormente se hace una breve reseña histórica de las investigaciones en las que se detectaron patrones organizados en chorros circulares, y en seguida, se resumen y comentan algunas de las más significativas, otras son meramente citadas y las más, simplemente aparecen como referencias al final de este reporte.

2.1.- GEOMETRIA DE CHORROS AXISIMETRICOS.- Se hace una descripción de chorros axisimétricos, clasificándolos en chorros axisimétricos simples, anulares y coaxiales.

2.1.1.- GEOMETRIA DE CHORROS CIRCULARES SIMPLES.- Se produce un chorro circular simple, cuando un fluido es descargado desde una tobera u orificio de sección transversal circular. La descarga puede hacerse sobre un medio fluido (no necesariamente en reposo, aunque quizá la mayoría de los tratados así lo consideren), o bien, en el "vacío", o como en el caso de los propulsores espaciales.

Considerando que la velocidad del fluido descargado es uniforme al comenzar la descarga, y que ésta se hace sobre un medio fluido (chorro inmerso), el chorro empieza a arrastrar partes del medio fluido incorporándolo a su flujo (proceso de entrainment) con lo cual se produce un aumento en su sección transversal y del gasto del chorro, al tiempo que disminuye su velocidad.

A la región inicial del chorro limitada por la zona de mezcla se le llama "núcleo potencial".

La parte del chorro limitada por los planos paralelos -- que contienen a la sección de descarga de la tobera y al extremo del núcleo potencial, respectivamente, se le llama "región inicial". Una cierta distancia corriente abajo empieza la llamada "región principal", en la cual se ha observado "similaridad" en los perfiles de velocidad y también en los de intensidad de turbulencia. Las superficies  $\bar{U}/\bar{U}_m = \text{cte.}$ , donde  $\bar{U}$  es la velocidad media en un punto de una sección transversal y  $\bar{U}_m$  es la velocidad-media máxima en esa misma sección (que se presenta en su intersección con el eje de simetría), son conos cuyos vértices convergen en un punto conocido como "polo" u origen virtual. La posición axial del polo se encuentra corriente arriba de la salida de la tobera. Más aún, la velocidad media máxima en cada sección transversal es inversamente proporcional a su distancia axial -- del polo (Abramovich 1963).

En la figura 2.1.1. se esquematiza un chorro circular -- simple.

2.1.2.- GEOMETRIA DE CHORROS ANULARES.- En estos chorros, la sección transversal de la tobera en la salida del chorro es un ánulo. Ko y Chan (1978), han separado a los chorros anulares en tres zonas: una zona inicial de mezclado, una zona intermedia y una zona completamente desarrollada (ver figura 2.1.2.a). La zona inicial de mezclado se extiende desde el plano que contiene la salida del chorro hasta el plano paralelo que contiene al extremo del núcleo potencial. En la zona intermedia, el chorro anular básico se intersecta con el eje central, ésto es, la-

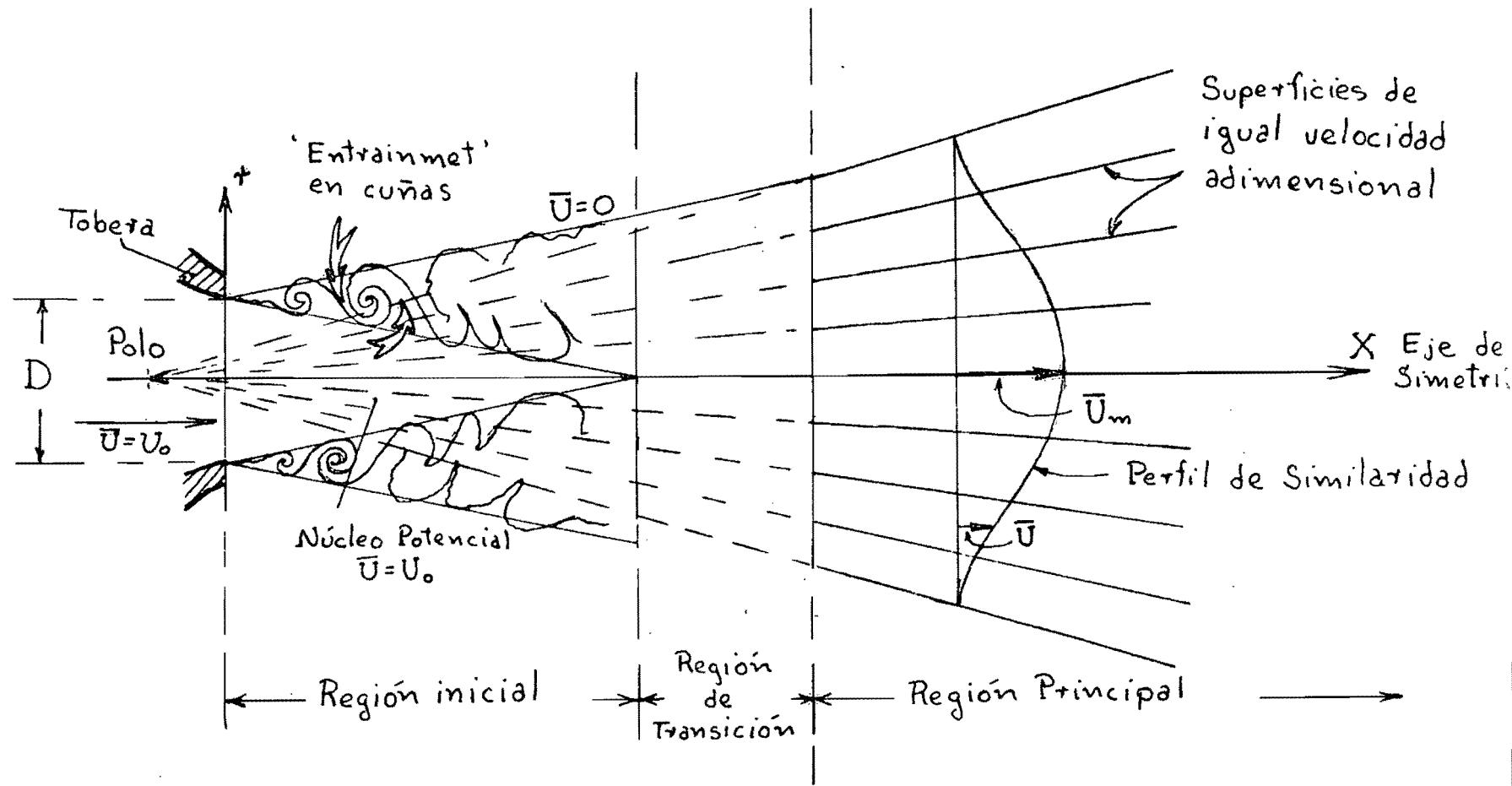


FIGURA 2.1.1. CHORRO CIRCULAR SIMPLE.

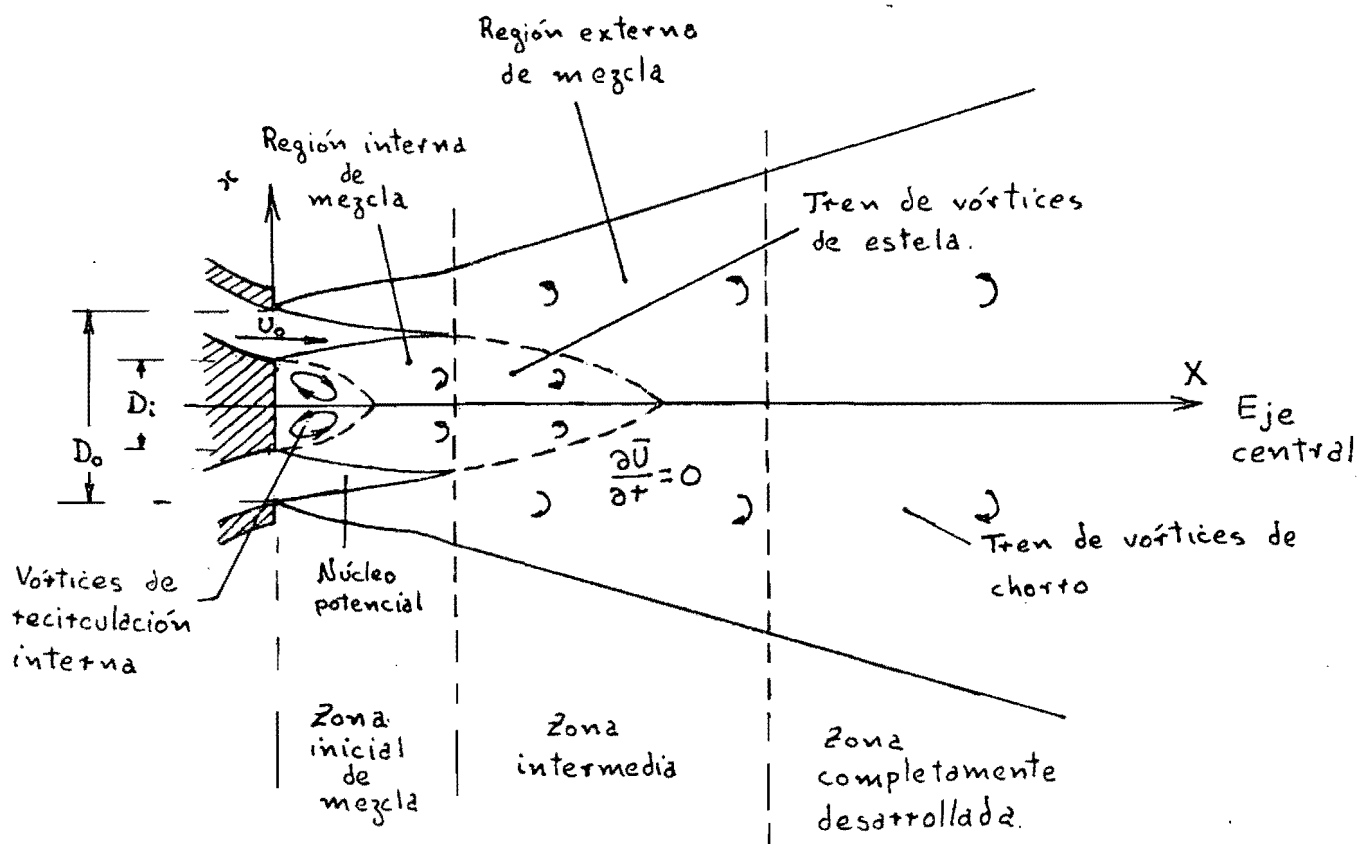


FIGURA 2.1.2.a. ESQUEMA DE UN CHORRO ANULAR BASICO, SEGUN CHAN Y KO (1978).

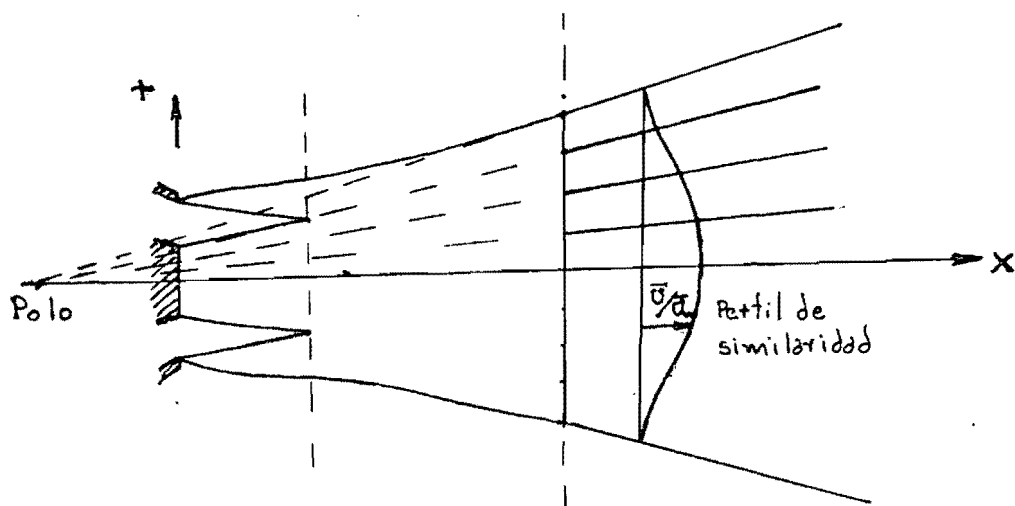


FIGURA 2.1.2.b. ESQUEMA DE LA ZONA COMPLETAMENTE DESARROLLADA DE UN CHORRO ANULAR.

superficie en la cual  $\frac{\partial \bar{U}}{\partial r} = 0$  intersecta al eje central. Poco más lejos corriente abajo, el chorro es completamente desarrollado.- Para chorros anulares cónicos o elipsoidales, la zona completamente desarrollada empieza a una distancia de alrededor de cinco diámetros exteriores de la salida de tobera corriente abajo.

La zona completamente desarrollada de chorros anulares, sean básicos, cónicos o elipsoidales, se comporta como región principal de un chorro simple (ver figura 2.1.2.b).

2.1.3.- CHORROS COAXIALES.- Estos son chorros que presentan un eje común. Los sistemas más simples constan de sólo dos chorros, aunque pueden constituirse de tres o más de ellos.

La figura 2.1.3., esquematiza un sistema de dos chorros coaxiales. Estos chorros han sido estudiados por Kwan y Ko(1976, 1977).

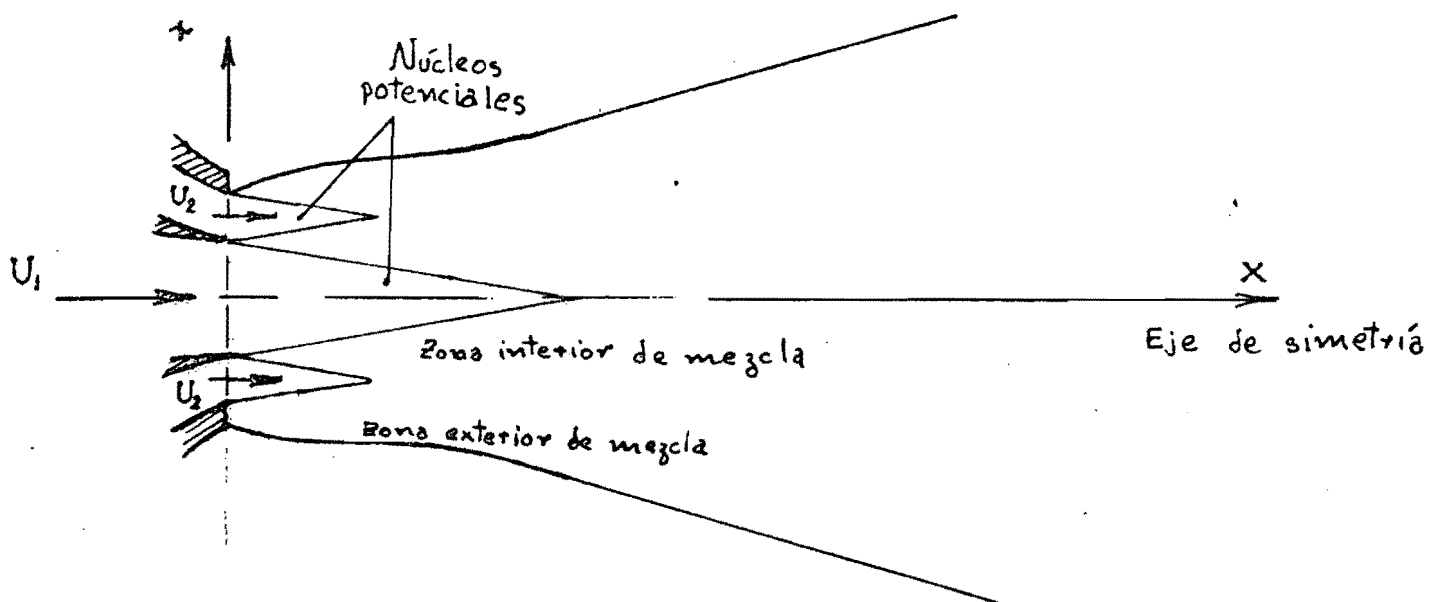


FIGURA 2.1.3.



## 2.2.- ESTRUCTURAS COHERENTES EN CHORROS AXISIMETRICOS.

2.2.1.- CHORROS AXISIMETRICOS SIMPLES.- La primera identificación reportada de una estructura organizada en un chorro turbulento, fue realizada por Mollo-Christensen (1967), en un estudio experimental del campo de presión cercano al chorro. El observó que las fluctuaciones de presión fuera de un chorro completamente turbulento venían en "paquetes de onda" (wave packets), más o menos bien definidos, aún cuando el chorro se hubiera sometido a oscilaciones esporádicas. Por medio de correlaciones espacio-temporales de las fluctuaciones de la presión, encontró que una perturbación (o remolino) era convectada corriente abajo por una distancia considerable y decaía lentamente. Antes había observado también, junto con otros investigadores (Mollo-Christensen, Koplín & Martuccelli 1964), la existencia de un pico en el espectro del ruido del chorro, en un número de Strouhal, basado en la velocidad media en la salida, diámetro en la salida y la frecuencia, de alrededor de 0.3, dependiendo el valor exacto de  $N_{St}$  del ángulo con el eje del chorro. La existencia de dicho pico sugería que una estructura de onda podía ser responsable de gran parte del sonido emitido. Estimulados por estas experiencias, Crow y Champagne (1971), emprendieron estudios más detallados del movimiento de remolinos (eddys) de gran escala en chorros. En sus experimentos, una perturbación con cierta frecuencia se introducía dentro del chorro y la evolución de la perturbación a lo largo del chorro era seguida midiendo las fluctuaciones de la velocidad. Fue encontrado en el chorro un sistema de ondas, dependiendo la longitud de onda de la frecuencia, a la cual se forzaba al chorro y de la velocidad de éste. La amplitud de la onda alcanzaba un máximo y luego decaía gradualmente corriente abajo,

en concordancia con las observaciones de Mollo-Christensen.

Varias investigaciones más se hicieron con el propósito de aclarar la naturaleza física de la estructura de gran escala en la región de la capa de mezcla de un chorro circular. La inestabilidad inicial de la capa cortante laminar cerca de la tobera es bien explicada, tanto analítica como experimentalmente (Michalke y Freymuth 1966). Para bajos números de Reynolds, cuando otros modos de inestabilidad pueden ocurrir, esta inestabilidad resulta en una migración de vorticidad que forma concentraciones periódicas, circunferencialmente coherentes en la capa cortante, dando la apariencia de un "enrollamiento" de la capa cortante laminar formando una calle de anillos vorticosos periódicos (este fenómeno fue también observado en el estudio visual efectuado por el autor del presente reporte).

Hace casi una década, Lau, Fisher & Fuchs (1972), sugerían que la estructura básica de un chorro circular turbulento, consistía esencialmente de un arreglo de vórtices, casi igualmente espaciados moviéndose corriente abajo en la región de mezcla del chorro, similares a los anillos vorticosos formados desde la inestabilidad inicial.

Pocos años más tarde, Lau y Fisher (1975), reforzaban su anterior sugerencia, mostrando la existencia de una estructura ordenada en un chorro sin forzar, usando una técnica de "muestreo condicionado", encontrando que los remolinos de gran escala tenían una estructura "como de onda" (wavelike), concluyendo que el cuerpo principal del flujo parecía estar construido alrededor de una estructura consistente en un arreglo axial de vórtices espaciados unos de otros una distancia de alrededor de un diámetro y cuarto.

Se sugiere que el borde guía de cada vórtice induce una --- transferencia de fluido de alta velocidad hacia el lado de baja- velocidad de la capa de mezcla, mientras que el otro borde guiado causa una transferencia de fluido de baja velocidad hacia el nú- cleo potencial del chorro. Cualitativamente, ésto cuenta tanto - para el esfuerzo de Reynolds y para la naturaleza de picos de la señal observada (usando sensores de hilo caliente), en particular, en el lado del núcleo potencial de la capa de mezcla.

Sin embargo, estos resultados estaban en discrepancia con - los argumentos de Laufer (1973), quien argüía que la estructura- básica de un chorro circular turbulento consistía de una calle - de anillos vorticosos interactuantes entre sí y coalescentes. Más aún, Davies y Yule (1975), puntualizan que la evidencia que sos- tiene la existencia de anillos vorticosos en chorros turbulentos, no es conclusiva, ya que aún cuando ciertas características de - los datos obtenidos por "muestreo condicionado" en la capa de mez- cla turbulenta podían ser consistentes con las esperadas para -- anillos vorticosos clásicos, otras no lo eran. Mencionan además- que "las grandes estructuras organizadas en chorros circulares - turbulentos difieren fundamentalmente de los anillos vorticosos- laminares más cercanos a la tobera desde la cual se desarrollan. En particular, poseen una estructura tridimensional fuerte pero- relativamente bien ordenada, la cual incluye chorros de mezcla - distribuidos circunferencialmente".

Anteriormente, Fuchs (1972) ya había mostrado que la estruc- tura de los remolinos de gran escala de un chorro axisimétrico, - era bastante complicada. Efectuando correlaciones espaciales cir- cunferencialmente alrededor del chorro, descompuso el espectro - de potencia de las fluctuaciones de la presión en componentes de

Fourier de números de onda azimutales, mostrando que dominan los componentes de bajo orden. Esto sugería que los remolinos no sólo se trasladaban como una onda plana a lo largo del chorro, sino -- que lo harían también en espiral alrededor del chorro al mismo -- tiempo. Este comportamiento fue también observado por Browan y -- Laufer en 1975.

A. J. Yule (1978), hace una investigación de la región final de transición y la de turbulencia en la capa de mezcla de un chorro circular para varios números de Reynolds usando técnicas de visualización del flujo y sensores de hilo caliente. En ésta describe la interacción y coalescencia de anillos vorticosos en la región de transición. Esta región se caracteriza por el crecimiento de la tridimensionalidad del flujo debido a una onda de inestabilidad en los núcleos de los anillos vorticosos formados en la salida de la tobera. Este tipo de inestabilidad en el núcleo de anillos vorticosos ha sido investigada para anillos formados por un impulso del fluido por Widnall y Sullivan (1973) y fue observada también en el estudio visual efectuado por el autor del presente reporte. La fusión de estos vórtices distorsionados produce -- grandes remolinos los cuales pueden permanecer coherentes aún más allá del extremo de la región del núcleo potencial del chorro --- (ver figura 2.2.). Estos remolinos difieren considerablemente de los anillos vorticosos ya que carecen de coherencia circunferencial, ésto es, son tridimensionales, y contienen estructuras irregulares de pequeña escala. Sin embargo, su estructura resulta similar en sección transversal a la de un anillo vorticoso cuando son promediados.

La dinámica de estructuras coherentes en el campo cercano de un chorro circular, ha sido explorada experimentalmente por -----

Hussain et al (1980), introduciendo el apareamiento de vórtices estables a través de excitaciones controladas y aplicando técnicas de promedios de fase. Fueron efectuadas mediciones utilizando sensores de hilo caliente en un chorro de aire circular a un número de Reynolds de  $3.2 \times 10^4$  excitados a un número de Strouhal de 0.85. Es encontrado que la contribución a los esfuerzos de Reynolds de la estructura coherente es mucho más grande que la debida a los pequeños remolinos para  $0 < \frac{x}{D} < 3$ , siendo D el diámetro de la salida de la tobera y X la distancia medida corriente abajo desde la salida de la tobera, pero que estas dos son comparables cerca del extremo del núcleo potencial del chorro.

Para efectuar diversos análisis cuantitativos de estructuras coherentes en los campos de flujo ha sido necesario introducir en éstos sensores que en mayor o menor grado, perturban al flujo en estudio. Estos sensores (hilo caliente, microfónos, etc.) tienen la desventaja adicional de no poder ser empleados en flujos a muy altas temperaturas o velocidades. Un problema mayor ha resultado ser la necesidad de discriminar entre las pérdidas reales en la coherencia de remolinos y las pérdidas aparentes en coherencia introducidas por efectos de "phase scambing" que ensucian las correlaciones multipuntuales. Por todo lo anterior, resultan especialmente convenientes las técnicas experimentales que emplean rayos laser. Pfeifer (1979), describe cómo pueden ser usados los métodos de la anemometría con rayos laser en el estudio de estructuras coherentes. Usando esta técnica encontró estructuras coherentes en el núcleo potencial de un chorro circular turbulento. La longitud de éstas eran del orden del diámetro de la tobera. Kalghatgi (1980), efectuó un estudio de las estruc

 Fluido rotacional

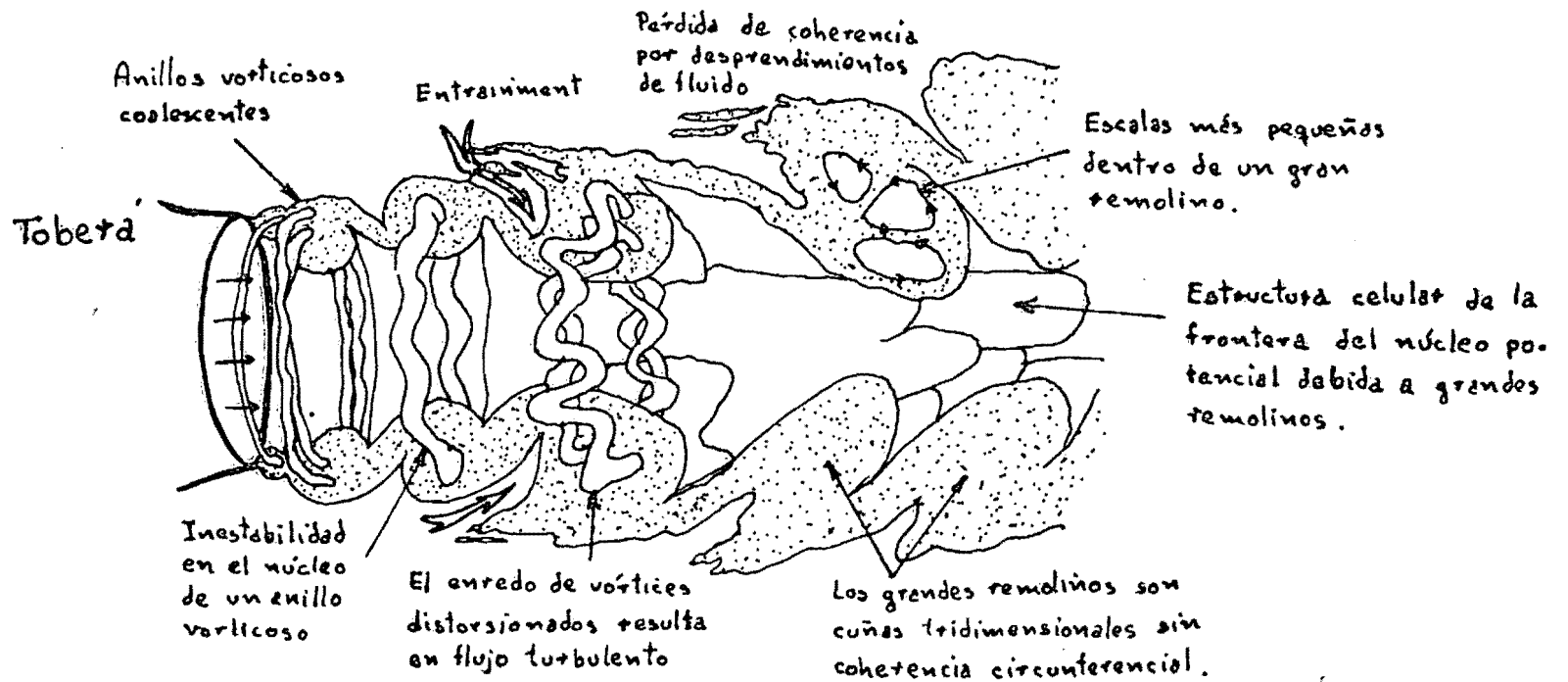


FIGURA 2.2.- ESTRUCTURA FISICA DE UN CHORRO TRANSICIONAL, SEGUN YULE (1978).

turas coherentes en chorros axisimétricos usando la deflexión de rayos laser causados por gradientes de la densidad en el flujo - en los primeros 6 diámetros de cinco chorros circulares. El sistema óptico que empleó consistía de un laser He-Ne de 4MW, cuyo rayo era separado en cinco rayos paralelos alineados en un mismo plano paralelo al eje del chorro. La deflexión de cada rayo era medida por un correspondiente detector cuya señal era proporcional a la deflexión. Correlacionando estas señales encontró, entre otras cosas, que el espaciamento  $\Delta$  entre estructuras coherentes en la capa de mezcla, se incrementaba linealmente con la distancia X corriente abajo desde la salida de la tobera. Más aún, la pendiente de la recta obtenida al graficar  $\frac{\Delta}{D}$  contra  $\frac{X}{D}$ , en donde D es el diámetro de la tobera en la salida, era la misma que la encontrada por Brown y Roshko (1974) para capas de mezcla bidimensionales, y que  $\Delta$  era comparable para todos los chorros para un valor de X dado.

El estudio de las estructuras coherentes en chorros turbulentos ha recibido una gran atención de los investigadores debido en gran parte, al papel que éstas desempeñan en la producción de ruido en el chorro. Un conocimiento más profundo de estas estructuras podría quizá conducir a un método implícito para predecir el ruido, más aún, para controlarlo. Así pues, muchos estudios se han realizado en este sentido, algunos de los cuales son referidos más adelante.

En las primeras investigaciones sobre el ruido aerodinámico, el modelo teórico de turbulencia isótropa fue el más obvio en ser introducido para tratar la radiación de sonido desde turbulencia libre. Cuando fueron observadas por primera vez estructu-

ras coherentes en chorros turbulentos (ver Mollo-Christensen --- 1967), los investigadores fueron renuentes a aceptarlas como una eficiente fuente de sonido. Después de <sup>que</sup> Brown y Roshko (1971) mostraron que estructuras ordenadas podían existir también en capas de mezcla bidimensionales, algunos investigadores empezaron a -- pensar en términos de grandes remolinos en lugar de los pequeños, pero con las mismas técnicas estadísticas. Actualmente es evidente que las estructuras coherentes están involucradas en la producción del ruido del chorro. Bonnet y Fischer (1979), en un intento por establecer la conexión entre estructuras azimutalmente-coherentes y el ruido, se hicieron medidas de correlación cruzada circunferencialmente, tanto en el campo de presión cercano como en el lejano, infiriendo de la coherencia observada la existencia de una fuente azimutalmente coherente. El campo de sonido generado por un anillo simple con varios tipos de coherencia azimutal es considerado teóricamente.

El ruido producido por la interacción flujo medio-turbulencia en un chorro circular subsónico, ya había sido investigado teóricamente y expandido en constituyentes azimutales de las --- fluctuaciones turbulentas de la presión por Fuchs et al en varios estudios. En uno de ellos (Michalke y Fuchs 1975), se encuentra que los constituyentes azimutales de más bajo orden son las más eficientes fuentes de sonido. En base a medidas de correlación de la presión, los constituyentes son determinados a bajos números de Mach del chorro, y se encuentra que, para valores del número de Strouhal comprendidos entre 0.2 y 1, los primeros 3 o 4-constituyentes dominan claramente sobre el resto. Además, en concordancia con Yule (Davies y Yule 1975), es mostrado que un modelo de anillo vorticoso estrictamente axisimétrico para la estruc



tura coherente de la turbulencia es inapropiado. En un estudio -- posterior (Armstrong, Michalka y Fuchs 1977), los resultados es--  
pectrales indicaban que estructuras coherentes de gran escala, per--  
sistían en números de Mach aún superiores a 0.8 en el relevante -  
rango de números de Strouhal, comprendidos entre 0.1 y 2.0. Una -  
continuación de esta investigación, fue publicada un año después--  
(Fuchs y Michel 1978), y en ella se hace una comparación de las es--  
tructuras espacio-tiempo de los campos de presión cercanos y leja--  
nos. Fuchs y Armstrong, discuten en 1978, un modelo de estructuras  
coherentes para el ruido generado por turbulencia en oposición al  
modelo convencional de pequeños remolinos. Al considerar un aco--  
plamiento directo de modos turbulentos y acústicos, ocurren cier--  
tos mecanismos de interferencia de ondas casi determinísticos los  
cuales fueron ignorados por muchas de las teorías aeroacústicas -  
existentes. La introducción de un parámetro adicional de escala, -  
el cual aparece como el producto del número de Strouhal por el nú--  
mero de Mach conocido como el número de Helmholtz, es esencial --  
cuando se derivan empíricamente las leyes espectrales adimensiona--  
lizadas para el ruido aerodinámico.

Morris (1977), desarrolló un modelo para la estructura cohe--  
rente de gran escala de chorros axisimétricos subsónicos y super--  
sónicos. En su artículo, una fluctuación en el flujo del chorro -  
es considerada como separable en una componente media (en tiempo),  
una componente periódica "como de onda", y una componente aleato--  
ria de pequeña escala. Esta última es vista como el mecanismo tan--  
to conductor como disipativo de la componente "como de onda". Un  
modelo de balance de energía es desarrollado en el cual se exami--  
na el intercambio de energía entre el flujo medio y el movimiento

de gran escala. Examina el efecto que la amplitud de fluctuación de la componente como de onda, tiene sobre su propio desarrollo y sobre el desarrollo del flujo medio. Examina también un modelo para el mecanismo por medio del cual, los componentes localmente -- subsónicos de la estructura como de onda, pueden radiar ruido al campo lejano del chorro. También se discute el método para calcular el ruido irradiado. Esta manera de descomponer las fluctuaciones de la presión, es adoptada por Gatski y Thomas (1979), en su estudio sobre la producción de sonidos debido a estructuras coherentes de gran escala. En éste, el efecto de la estructura de gran escala sobre el flujo, es aislado efectuando promedios espaciales y de fase a las ecuaciones diferenciales gobernantes y tomando a la turbulencia de pequeña escala inicialmente en equilibrio energético con el flujo medio. La evolución temporal subsecuente del flujo es computada de las ecuaciones energéticas para las diferentes escalas componentes. Es aplicada entonces la teoría de Lighthill a la región, con el campo de flujo como la fuente y un observador localizado fuera del campo de flujo en una región de velocidad uniforme. Para aislar las fluctuaciones de la presión debidas a la estructura de gran escala y aislar también al proceso dinámico responsable, es efectuado un promedio en fase. La variación de la raíz media cuadrática con la distancia de la fuente es computada para determinar la ubicación del campo acústico lejano y la rapidez de decaimiento, y además, los espectros para varias ubicaciones en el campo acústico son computados y analizados. También son incluidos los efectos de variar el crecimiento y decaimiento de la perturbación de gran escala sobre el sonido producido.

El uso de radiómetros de infrarrojos para estudiar el campo de temperatura turbulento con un chorro caliente localmente subso

nico es referido por Dahan (1977). El análisis de la señal infrarroja muestra la existencia, dentro de una cierta amplitud de banda, de movimientos organizados sobre longitudes importantes. (estructuras de gran escala). Se desarrolló un procedimiento para analizar las señales basado en el análisis de las relaciones espectrales entre señales infrarrojas y señales de presión tomadas en el campo cercano o bien en el lejano, haciendo posible una evaluación cuantitativa de la eficiencia acústica de estas estructuras. Una descripción de los movimientos coherentes en términos de ondas inestables por una teoría linealizada de las inestabilidades espaciales concordó "razonablemente" con los resultados experimentales.

2.2.2.- CHORROS ANULARES.- En la figura 2.1.2. se ilustra la geometría de chorros anulares, mostrándose su zona inicial de mezclado, su zona intermedia y su zona completamente desarrollada. Esta división se basó en las similitudes de los perfiles de velocidad e intensidad de turbulencia en estas tres zonas. Se ha encontrado que estos perfiles concuerdan muy bien con los obtenidos en chorros simples. Chan y Ko (1978), describen en detalle los resultados espectrales en la región externa de mezcla de tres chorros anulares, encontrando que ésta podría ser considerada como el resultado del corte con el aire ambiente de un chorro simple que tuviera un diámetro  $D_0$  en la salida igual al diámetro externo del chorro anular y la misma velocidad media de salida  $U_0$ . Reportan haber encontrado en esta zona estructuras coherentes consistentes en un arreglo de vórtices toroidales convectándose corriente abajo. La existencia de estas supuestas estructuras, que parecen concordar con las reportadas por Lau y Fisher-

(1975) para chorros circulares simples, estaría sujeta a las mismas objeciones hechas por Yule (1978), entre otros.

En un estudio más reciente (Ko y Chan, 1979), fueron medidas las propiedades medias y fluctuantes en la región interna de chorros anulares cónicos y básicos, encontrando en los primeros que, además de los vórtices en la región externa de mezcla, otro tren de vórtices en la región interna, debido a la estela formada por la capa límite sobre la superficie del cono interno de la tobera. En chorros anulares básicos se encontró un tren de vórtices de estela en la región interna de recirculación y otro tren de vórtices de chorro fue encontrado en la región interna de mezcla. Ambos tipos de vórtices en la región interna parecen decaer rápidamente en una distancia igual al diámetro externo  $D_0$  corriente-abajo. Las perturbaciones asociadas con los vórtices de estela en la región interna parecen existir en la región externa de mezcla, resultando en otro tren de vórtices observado en la capa de mezcla externa en adición a los vórtices existentes en chorros simples.

2.2.3.- CHORROS AXISIMÉTRICOS COAXIALES.- Al igual que en chorros turbulentos axisimétricos simples y anulares, también en chorros coaxiales se han detectado estructuras organizadas, así, Kwan y Ko (1976) sugerían que existían estructuras coherentes en la forma de dos arreglos diferentes de vórtices en la región inicial de chorros coaxiales.

En otro artículo de los mismos autores (Kwan y Ko 1976), hacen un estudio detallado de la región inicial de chorros coaxiales y de las estructuras coherentes de gran escala encontradas dentro de esta región. Los chorros coaxiales investigados tenían una relación de áreas de 2.67 y fueron medidos a tres diferentes

relaciones de velocidades. Proponen un modelo simple en términos de dos arreglos de anillos vorticosos en la región de mezcla de los chorros y su uso es justificado por comparaciones con resultados experimentales, consistentes en espectros de señales medidas con sensores de hilo caliente y micrófonos.

Una investigación realizada posteriormente por los mismos autores (Kwan y Ko 1977), se hizo con el fin de obtener una mayor información acerca de las características de los vórtices en chorros coaxiales. Un análisis detallado de las correlaciones de las fluctuaciones de la presión, medidas en uno y dos puntos indican el efecto combinado de los dos trenes de vórtices sobre los correlogramas. Más aún, el análisis hace posible<sup>que</sup> la relación de fase entre las fluctuaciones de la presión y las de los componentes axial y radial de la velocidad, sea obtenida. De los resultados de las correlaciones, las características de fase obtenidas dentro de la región inicial entera de chorros coaxiales son encontradas concordantes con los resultados obtenidos para chorros simples.

Perry y Lim (1978), sugieren que el estudio de las estructuras perfectamente coherentes que se forman en chorros confluyentes laminares para valores del número de Reynolds comprendidos entre 300 y 1000, pueden dar algún conocimiento acerca del movimiento de gran escala en flujos completamente turbulentos.

## C A P I T U L O    I I I .

### ESTUDIO VISUAL ELEMENTAL DE CHORROS AXISIMETRICOS.

Siendo evidente la existencia de diversos tipos de estructuras coherentes en diversos flujos turbulentos, se tenía la esperanza de detectar algún patrón organizado, sujeto a ser estudiado en chorros circulares de agua inmersos en agua. Con este fin, se diseñaron y construyeron los dispositivos para generar dichos chorros y se efectuó el experimento en base a la visualización del flujo. La razón para utilizar agua obedeció principalmente a que es un fluido barato, fácil de obtener y de manejar.

En este capítulo se mencionan primeramente las técnicas de visualización propuestas para el experimento y en seguida se hace una descripción de los dispositivos experimentales empleados y la manera en que se llevó a cabo el experimento.

3.1.- TECNICAS PROPUESTAS PARA LA VISUALIZACION DEL CHORRO.-  
Para obtener información tanto cuantitativa como cualitativa acerca de la naturaleza de los chorros, se pensó en fotografiar y -- filmar la evolución de los patrones que se observaran mediante alguna técnica sencilla.

Quizá la más simple de todas ellas sea el uso de un trazador consistente en un colorante diluido en el chorro, lográndose así una buena visualización de las partes exteriores del mismo, pudiéndose filmar y fotografiar fácilmente. El gran inconveniente de este método resultó ser la contaminación del agua en la cual se descarga el chorro, la cual tenía que ser renovada después de unas cuantas pruebas. Se pensó entonces en métodos más "limpios"; Uno de ellos fue el empleo de las burbujas de hidrógeno que se forman en el cátodo al efectuarse la electrólisis del agua. Se construyó entonces un circuito muy elemental, que pudiera utili-

zar la corriente eléctrica doméstica. Este circuito se representa en la figura 3.1.1. El inconveniente de este método resultó ser que, debido a la simplicidad del circuito, se tenía poco control sobre la emisión de las burbujas, resultando escasas e irregulares, muy difíciles de fotografiar. Una mejora del circuito seguramente habría dado mucho mejores resultados.

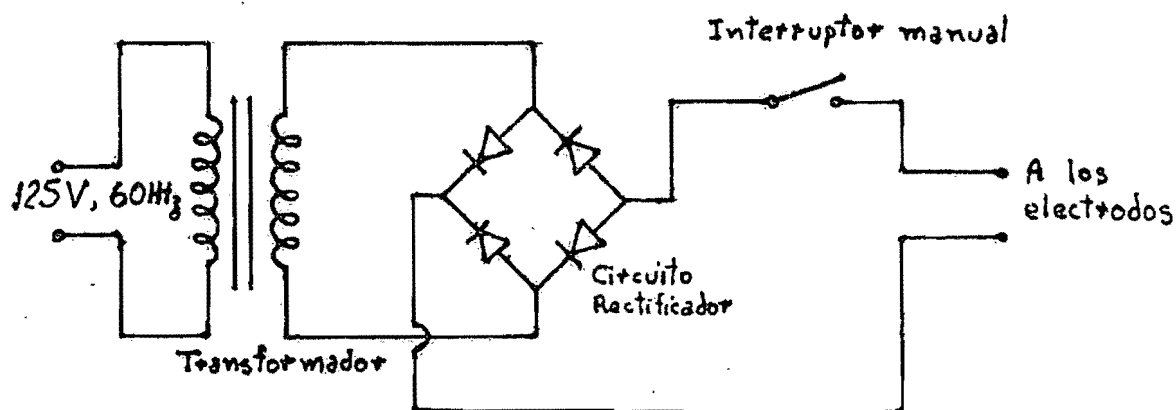


FIGURA 3.1.1. CIRCUITO PARA GENERAR BURBUJAS.

Paralelamente a la construcción del circuito, se pensó en utilizar un método óptico, en particular el "siluetógrafo" (shadowgraph) o el "estrioscopio". Ambos métodos se basan en la deflexión  $\epsilon$  que sufre un rayo de luz al atravesar un campo de flujo en donde existen gradientes de la densidad, siendo el primero sensible a las derivadas de segundo orden de la densidad, en tanto que el segundo lo es para las de primer orden. Debido a su extrema sencillez, se intentó aplicar la técnica del siluetógrafo. Se requería para esto, inducir de algún modo, una diferencia entre la densidad del agua del chorro y el agua en el que éste se descarga. Esto podía lograrse fácilmente disolviendo una pequeña cantidad de alguna sal, lo cual acarrearía nuevamente un problema de contaminación. Se optó entonces por calentar el agua del chorro a una temperatura alrededor de  $20^{\circ}$  C superior a la --

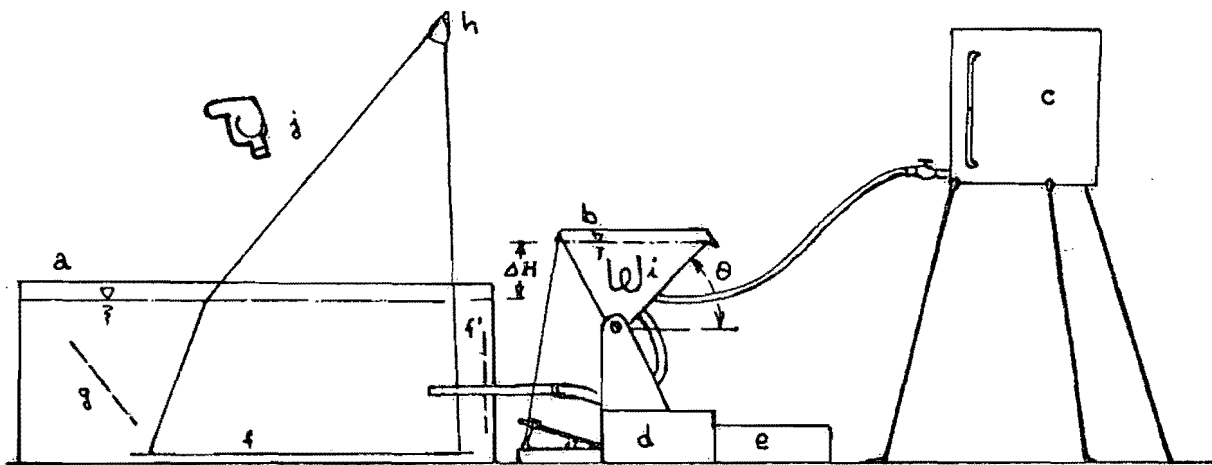


FIGURA 3.2.1. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.

- a Tanque de pruebas.
- b Tanque basculante para el control de la velocidad del chorro.
- c Depósito elevado para alimentación del tanque basculante.
- d Soporte del tanque basculante.
- e Recipiente de excesos de agua.
- f y f' Pantallas.
- g Espejo.
- h Lámpara.
- i Calentador de inmersión.
- j Cámara de cine.



del agua de la sección de pruebas. Con esta técnica se logró una buena visualización del fenómeno pudiendo fotografiarse y aún -- filmarse los patrones del flujo observados.

3.2.- DISPOSITIVOS PARA GENERAR CHORROS.- Para generar los chorros fueron propuestos varios sistemas. Casi todos ellos basados en recipientes con superficies libres a distinto nivel. Se consideró que las dimensiones fueran las apropiadas para permitir una buena visualización e instrumentación. También fue tomado en cuenta que el chorro quedara suficientemente alejado de paredes que pudieran afectarlo.

En la figura 3.2.1., se esquematiza el dispositivo que se -- construyó finalmente para generar los chorros turbulentos. Este sistema está constituido por los siguientes elementos: un tanque de pruebas marcado con la letra a en la figura. Sus dimensiones exteriores son 2.40 X 1.20 X 0.9 m., en él descarga el chorro desde un tubo de cobre de 62.5 cm. de largo y 1.42 cm. de -- diámetro. El agua del chorro proviene del tanque basculante, el cual es alimentado desde un depósito elevado (o con una simple -- manguera) con un gasto igual o ligeramente mayor al del chorro -- en la salida del tubo. Si el gasto con que este tanque es alimen-- tado sobrepasa al del chorro, el exceso de agua es vertido al re-- cipientes de excesos colocado a un lado de éste, de tal manera -- que la diferencia  $\Delta H$  entre los niveles de las superficies li-- bres del tanque de pruebas y del tanque basculante se mantenga -- prácticamente constante.

La placa 3.2.2. muestra una fotografía del tanque de pruebas y del tanque basculante montado sobre su soporte.

Ahora bien,  $\Delta H$  puede ajustarse a valores en el intervalo de 0 a 30 cm, haciendo variar el ángulo  $\theta$  de  $15^\circ$  a  $45^\circ$ . En la fi

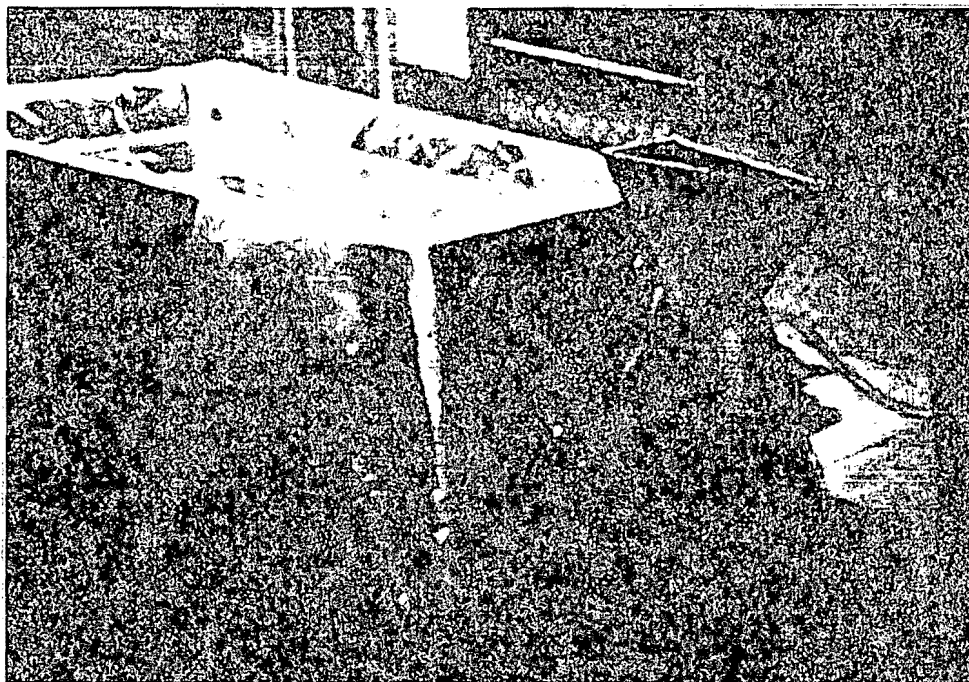


FIGURA 3.2.2. TANQUE DE PRUEBAS Y TANQUE BASCULANTE.

Figura 3.2.3. se muestra al tanque en dos posiciones distintas. Para medir  $\Delta H$  se implementó el dispositivo mostrado en la figura 3.2.4., que funciona como un manómetro diferencial.

La velocidad en la salida del chorro es entonces controlada, variando  $\Delta H$  según convenga.

Con este dispositivo se logra la generación de chorros circulares simples.

La introducción de un cilindro de madera torneado, dentro del tubo de cobre, permitió obtener también chorros anulares.

La figura 3.2.5. siguiente, muestra la manera en que el cilindro quedaba colocado dentro del tubo.

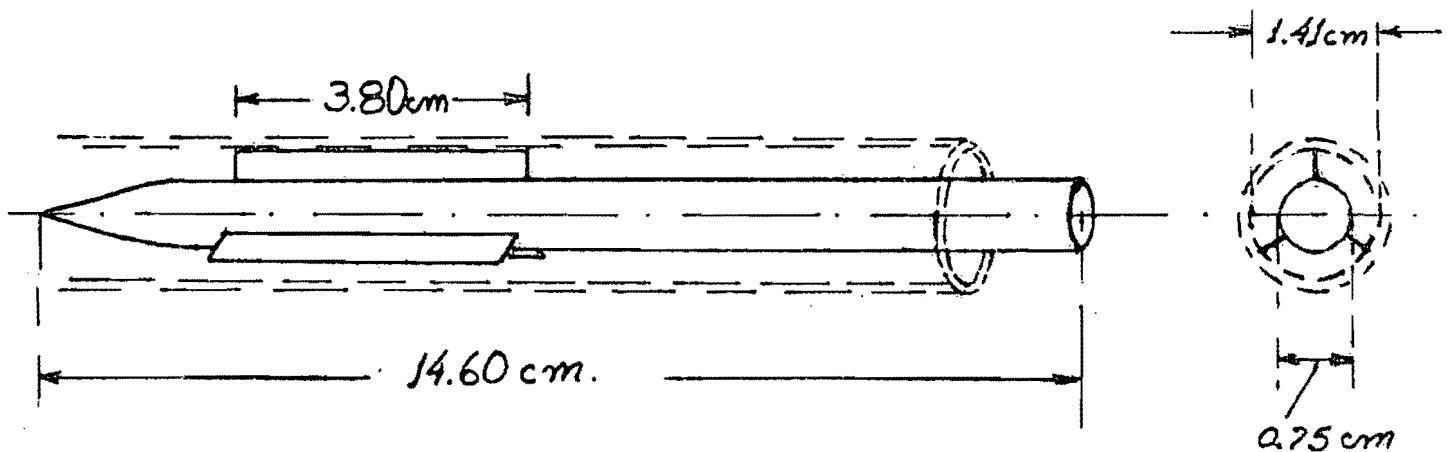


FIGURA 3.2.5.

3.3.- EMPLEO DE LA TECNICA DEL SILUETOGRAFO EN EL EXPERIMENTO.- La visualización usando la técnica del "siluétografo", se logró colocando en el fondo de la sección de pruebas una pantalla de poliestireno cuyas dimensiones eran de 1.90 X 1.15 m. Dos pantallas más pequeñas fueron colocadas: una sobre una de las paredes laterales del tanque, y otra perpendicularmente al tubo de descarga, quedando atravesada por éste, como se muestra en la figura 3.2.6.

La diferencia entre la densidad del agua contenida en el tanque de pruebas y la del chorro, necesaria para la visualización, se indujo, como se mencionó antes, calentando el agua contenida en el tanque basculante por medio de dos calentadores de inmersión, cada uno con una potencia de 750 Watts.

Colocando una fuente luminosa como se muestra en la figura 3.2.1. se proyectaba sobre la pantalla horizontal un patrón claramente observable.

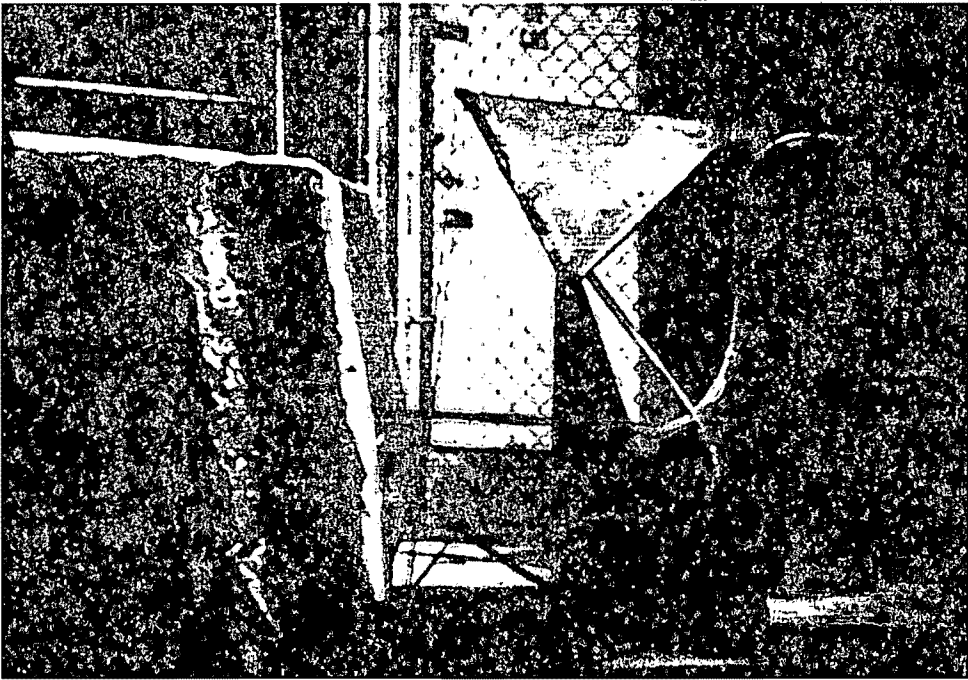
Con ayuda de un espejo se lograron proyecciones sobre las pantallas lateral y transversal.

Las proyecciones sobre la pantalla transversal resultaban de

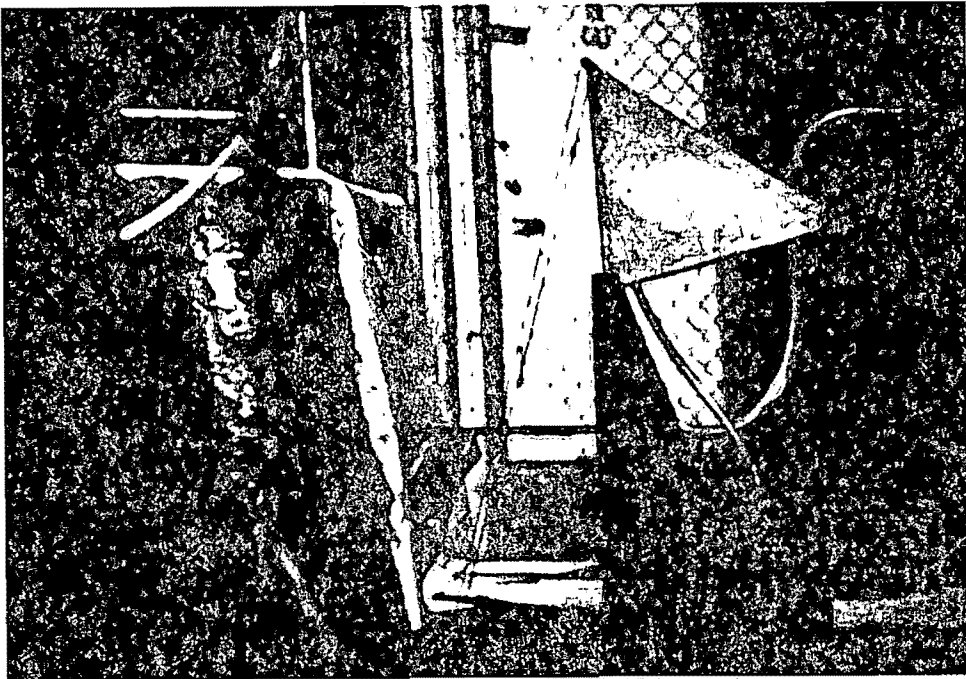
gran interés, ya que si se lograra calentar sólo una del chorro, se podría seguir la evolución de una "rebanada" del mismo, la cual proporcionaría información que difícilmente podría ser obtenida de las proyecciones horizontal o lateral. Desgraciadamente sólo pudo obtenerse patrones correspondientes al chorro calentado en su totalidad.

Todos estos patrones fueron fotografiados y filmados con película super 8 a 18 y 48 marcos por segundo, para chorros a distintos números de Reynolds.

3.4.- EMPLEO DE COLORANTES.- A pesar de los inconvenientes que presenta el uso de tintes, se emplearon soluciones de permanganato de potasio para visualizar el flujo y obtener fotografías y películas de chorros circulares simples y anulares. También se fotografiaron con esta técnica, el crecimiento de inestabilidades en chorros laminares, y la evolución de anillos vorticosos simples e interactuantes.



a



b

FIGURA 3.2.3.

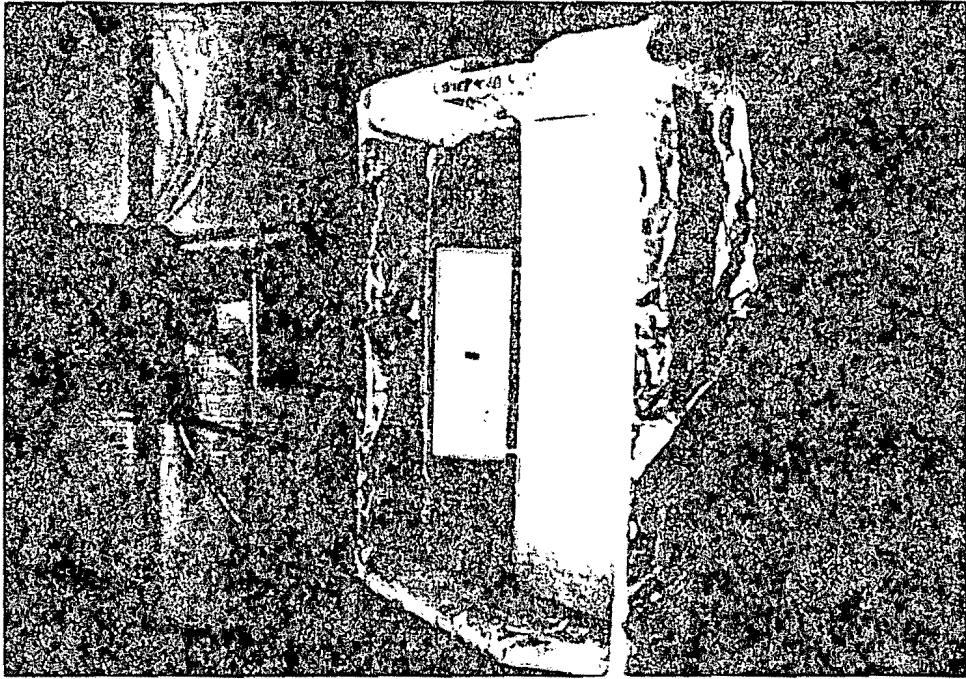


FIGURA 3.2.6.

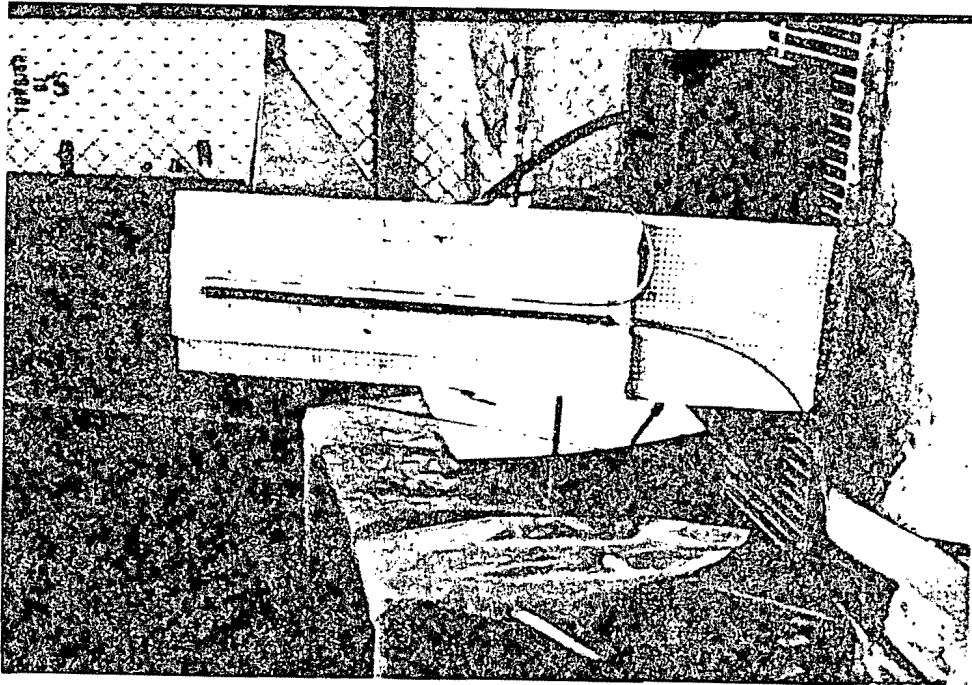


FIGURA 3.2.4.

## C A P I T U L O    I V .

### R E S U L T A D O S .

Se presentan los resultados obtenidos de la visualización de chorros y anillos vorticosos mediante las técnicas del silueto--grafo y colorantes.

4.1.- SILUETOGRAMAS.- Mediante el empleo de la técnica del siluetógrafo se lograron obtener fotografías como las mostradas en las figuras 4.1.1., 4.1.2. y 4.1.3, en las que se observan pro--yecciones de los patrones correspondientes a un chorro turbulen--to sobre las pantallas horizontal y lateral.

La evolución de estos patrones, fue filmada con películas super 8 a velocidades de disparo del obturador de 18 y 48 marcos - por segundo. De un examen preliminar de las películas no fue muy evidente la presencia de estructuras coherentes, salvo los cono--cidos grandes remolinos convectándose corriente abajo. Un estu--dio marco por marco de las películas seguramente proporcionaría mejores resultados.

4.2.- GEOMETRIA DE LOS CHORROS.- En las figuras 4.2. se gra--fica la anchura  $\rho$  del chorro, adimensionalizada con el diámetro D del tubo, para distintas distancias X, medidas desde la salida del tubo, corriente abajo, adimensionalizadas también con el diá--metro del tubo,

Estas gráficas corresponden a chorros circulares simples y anuulares a varios números de Reynolds, basados en el diámetro D - del tubo en el caso de chorros simples, y en  $D_e = \sqrt{D^2 - D_i^2}$  para chorros anulares, siendo  $D_i$  el diámetro interior del ánulo.

Estas gráficas fueron construídas midiendo a incrementos ---igualce de X, la correspondiente anchura del chorro, limitada -- por la interfase claramente visible del chorro coloreado y el --

agua del tanque de pruebas.

El ajuste aproximado de los puntos en rectas, muestra en todas las gráficas la existencia de dos regiones bien definidas. Esto sugiere que la primera de ellas comprenda las regiones inicial y de transición y la segunda sea la región principal, citadas en la literatura clásica sobre chorros (ver por ejemplo Abramovich 1963). Esta clasificación se hizo en base a los resultados de mediciones hechas con sensores de hilo caliente en chorros de aire. De ser así, se tendría que el llamado "polo" del chorro, se encontraría una cierta distancia corriente abajo de la salida de la tobera, localizada en las gráficas por el punto de intersección de la recta punteada con el eje horizontal, de lo comúnmente reportado. Este resultado no concuerda con lo reportado en la literatura clásica, en la que se ubica este polo en una posición corriente arriba de la salida de la tobera. Esto se observa tanto en chorros simples como en anulares y quizá se deba a que, o bien la zona delimitada por la recta punteada no corresponda a la región de similitud, o bien a que la velocidad del chorro no sea suficientemente grande aún cuando los valores de los números de Reynolds calculados para estos chorros corresponden a los encontrados para chorros turbulentos. Un estudio menos superficial utilizando anemometría y mediciones de intensidades de turbulencia, aclararía este comportamiento.

En todas las figuras,  $\bar{U}_0$  es la velocidad media en la salida del tubo,  $D$  es el diámetro interno del tubo = 1.41 cm.,  $D_1$  es el diámetro del cilindro de madera = 0.75 cm. y  $\nu$  es la viscosidad cinemática del agua del chorro.

En la figura 4.4.4. se muestra una fotografía de una sección transversal de la región inicial de un chorro, visualizada por -



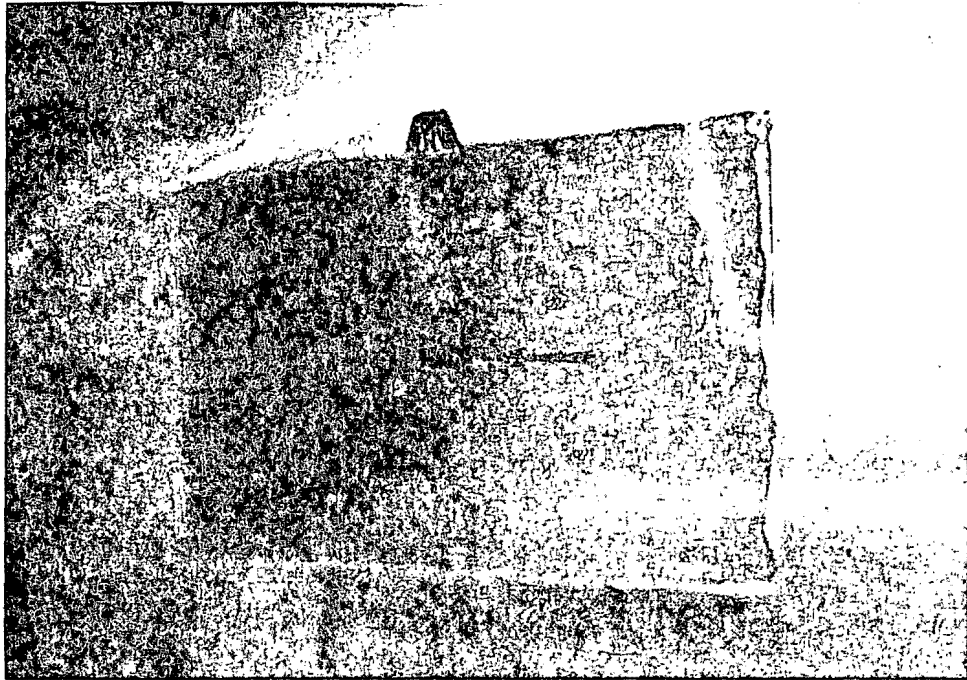


FIGURA 4.4.4.

un tinte. Se observan los chorros de mezcla circunferenciales - reportados por Yule (1978).

4.3.- VISUALIZACION DE CHORROS INESTABLES.- En la figura -- 4.3., se muestran chorros laminares en los cuales el crecimiento de ondas de inestabilidad conduce finalmente a un flujo turbulento.

En la figura 4.3 a se muestra un patrón de inestabilidad - en un chorro, similar al reportado por Crow y Champagne 1971, para chorros a números de Reynolds del orden de  $10^2$ . La diferencia de densidad del agua pintada con la del tanque produce la - flotación que se observa en estas figuras.

4.4.- VISUALIZACION DE ANILLOS VORTICOSOS.- El crecimiento de la tridimensionalidad de la estructura de los chorros circulares en sus regiones iniciales, es atribuido a una onda de --- inestabilidad en los núcleos de los anillos vorticosos formados

en la salida de la tobera (Vule 1978).

En la figura 4.4.1.a., se muestran anillos vorticosos aislados que exhiben diferentes grados de avance de la inestabilidad de sus núcleos. Estos anillos terminan por romperse, perdiendo gran parte de su coherencia. Un estudio de este tipo de inestabilidad es presentado por Widnall y Sullivan (1973).

La interacción entre los anillos vorticosos es preponderante en el desarrollo de chorros circulares turbulentos. De acuerdo con Laufer (1973), su estructura básica estaría constituida de una calle de estos anillos vorticosos interactuantes y coalescentes entre sí. Vule (1978) menciona que los grandes remolinos que mantienen su coherencia largas distancias corriente abajo, son producidos por la fusión de estos anillos vorticosos distorsionados por la onda de inestabilidad.

La figura 4.4.2. muestra a dos anillos vorticosos contiguos al comienzo de su interacción. Se observó que el resultado de estas interacciones resultaban en ocasiones en un tercer anillo vorticoso más grande e inestable que los primeros. Otras veces el resultado fue el "rompimiento" de ambos en turbulencia.

En la figura 4.4.3., se muestra un tren de anillos vorticosos.

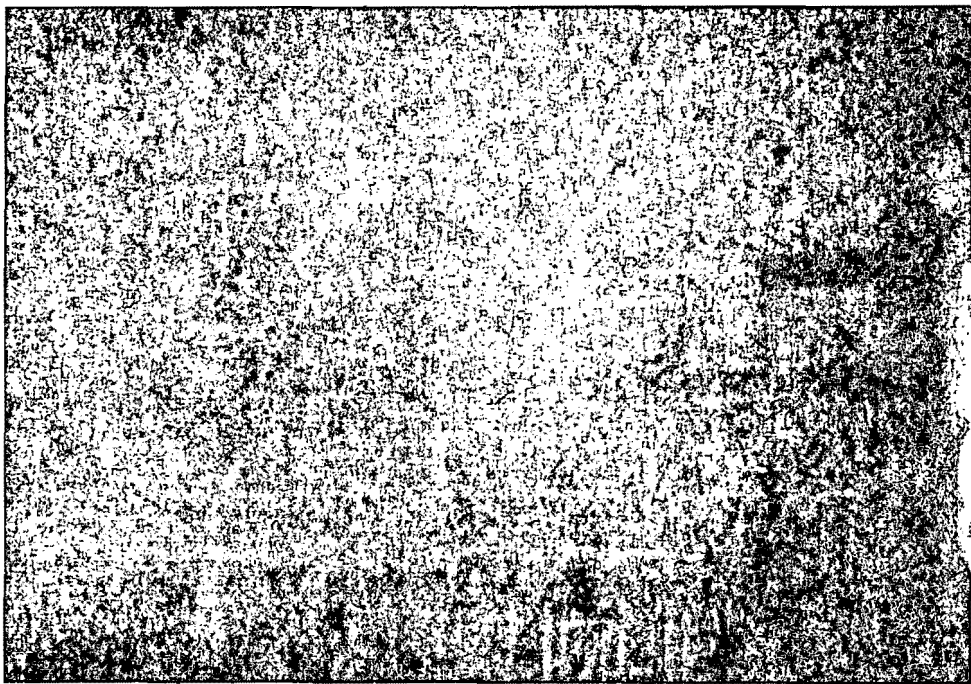


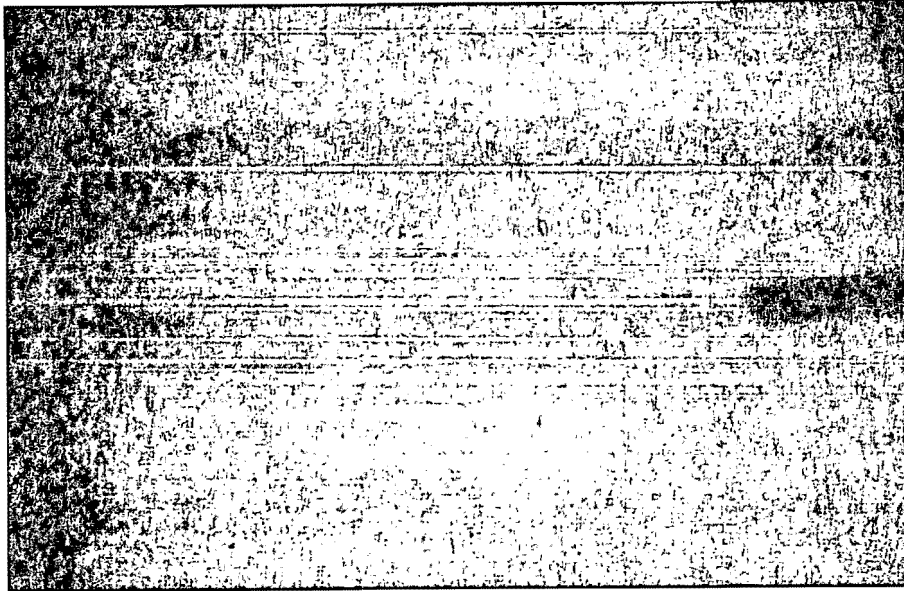
FIGURA 4.1.1.a. FASE INICIAL DE UN CHORRO TURBULENTO.



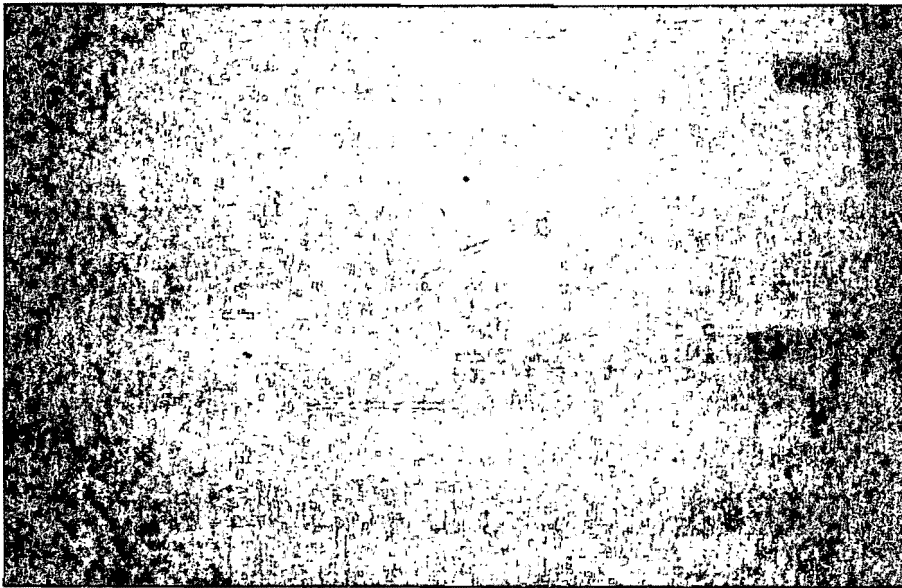
FIGURA 4.1.1.b. CHORRO TURBULENTO DESARROLLADO.



FIGURA 4.1.2. PATRONES PROYECTADOS SOBRE LA PANTALLA LATERAL.

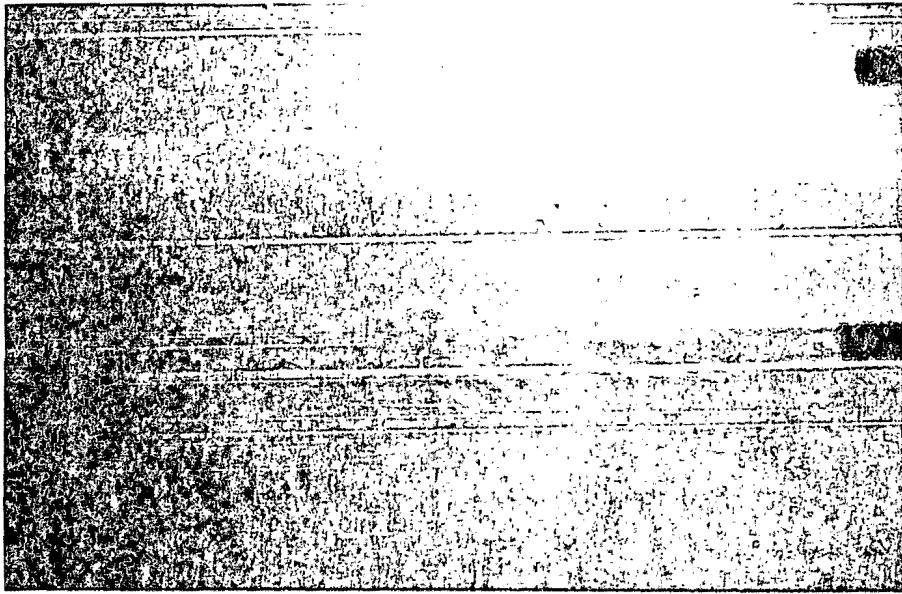


a

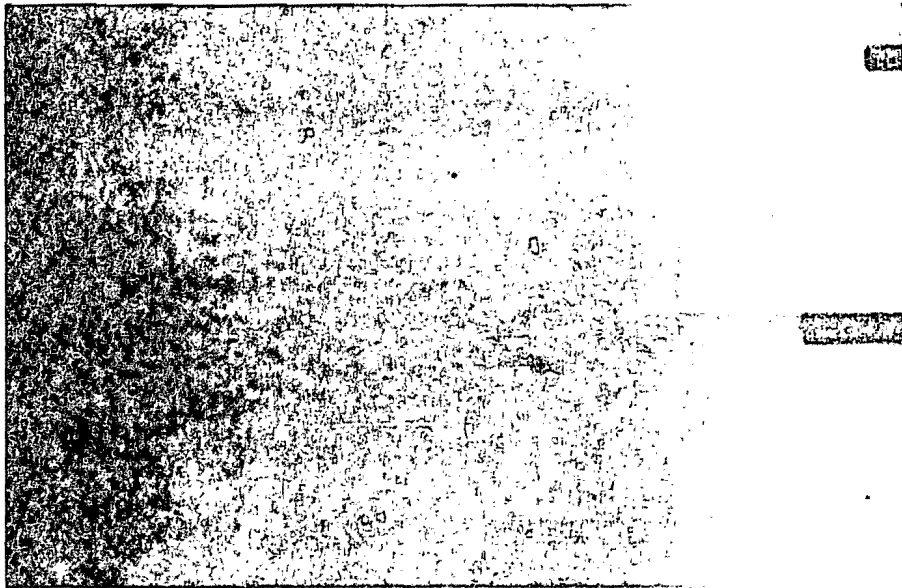


b

FIGURA 4.1.3. ETAPAS SUCESIVAS EN EL DESARROLLO DE UN CHORRO TURBULENTO.



c



d

FIGURA 4.1.3.

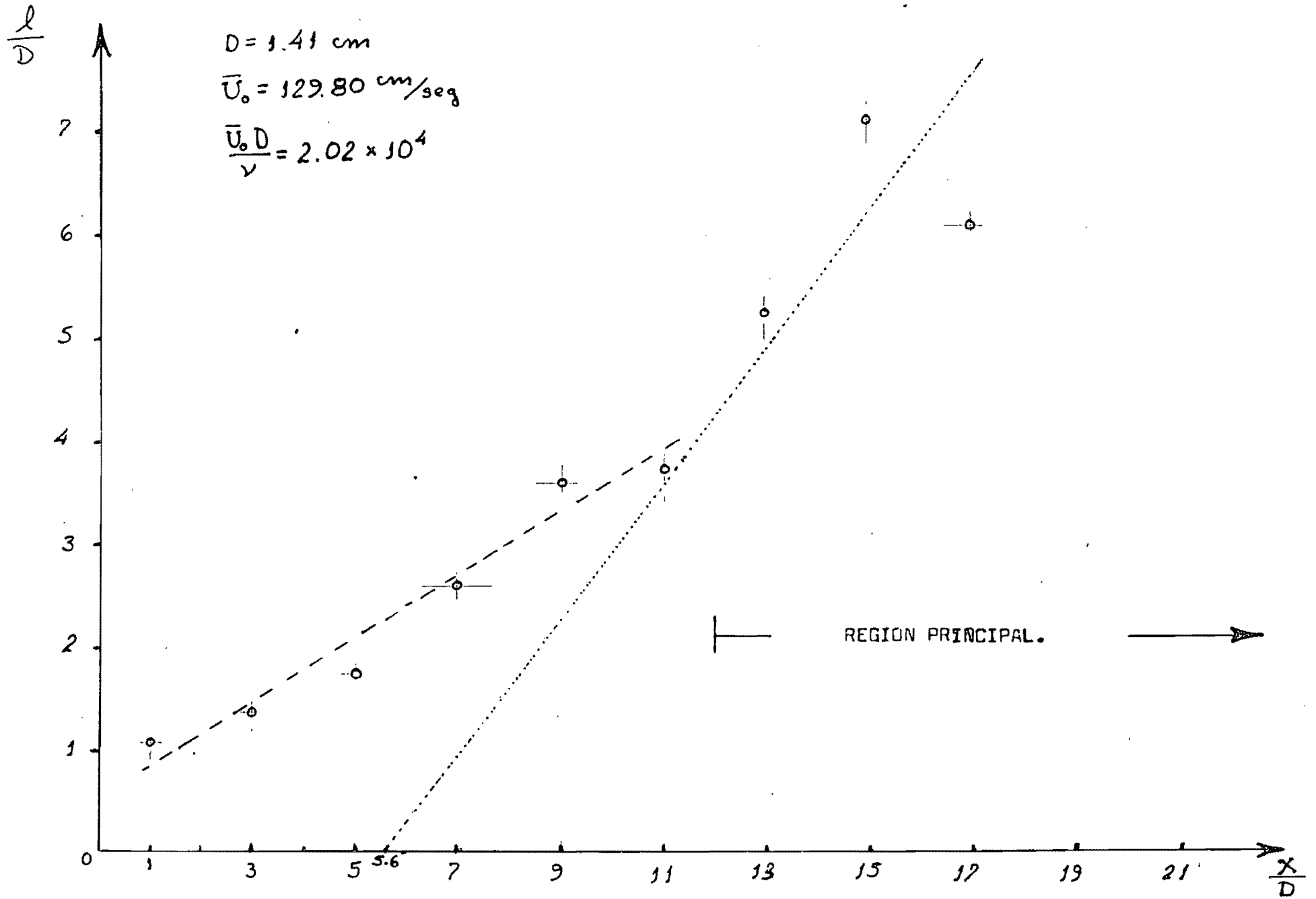


FIGURA 4.2.1.b. GRAFICA CORRESPONDIENTE A UN CHORRO CIRCULAR SIMPLE.

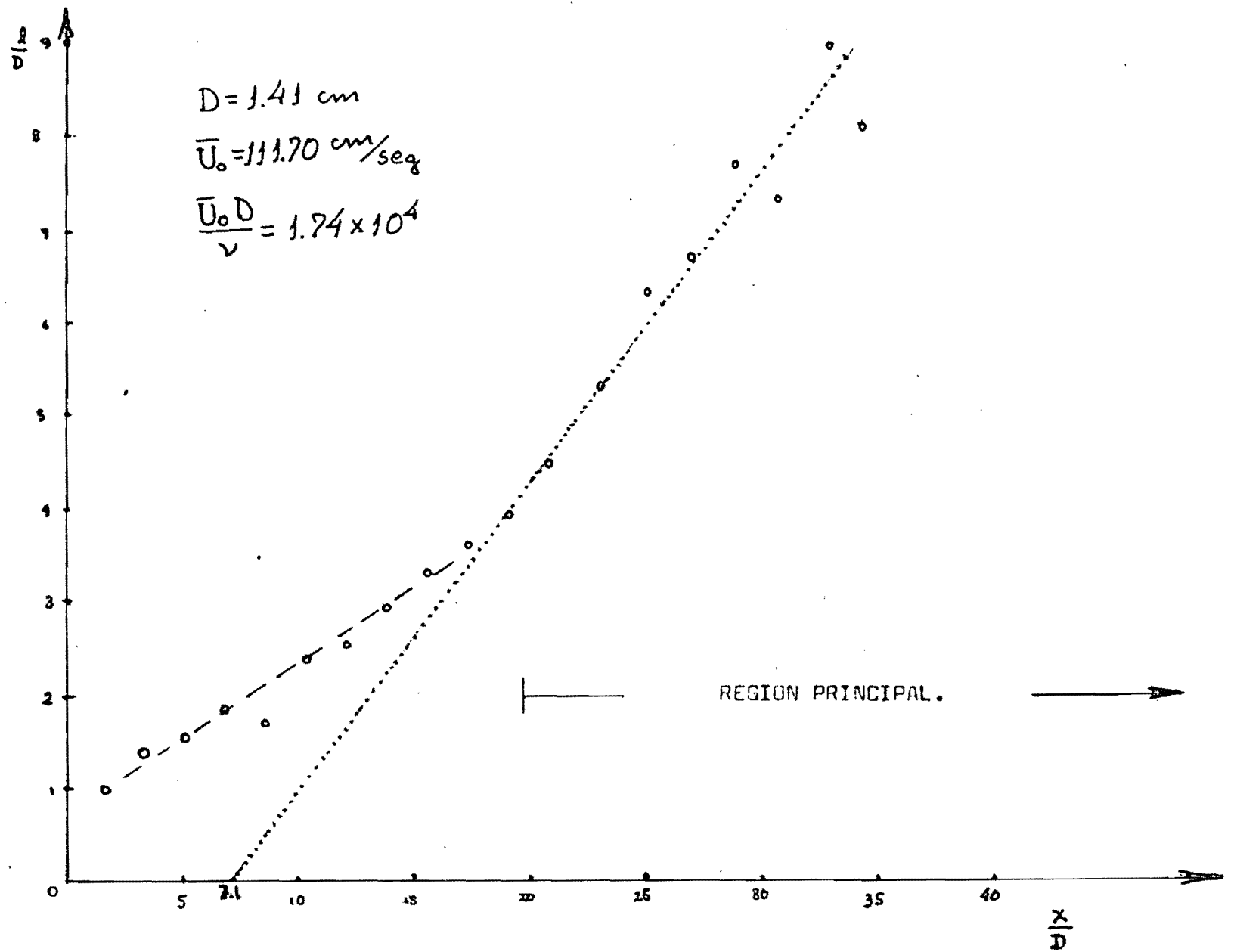


FIGURA 4.2.2.1. GRAFICA CORRESPONDIENTE A UN CHORRO CIRCULAR SIMPLE.



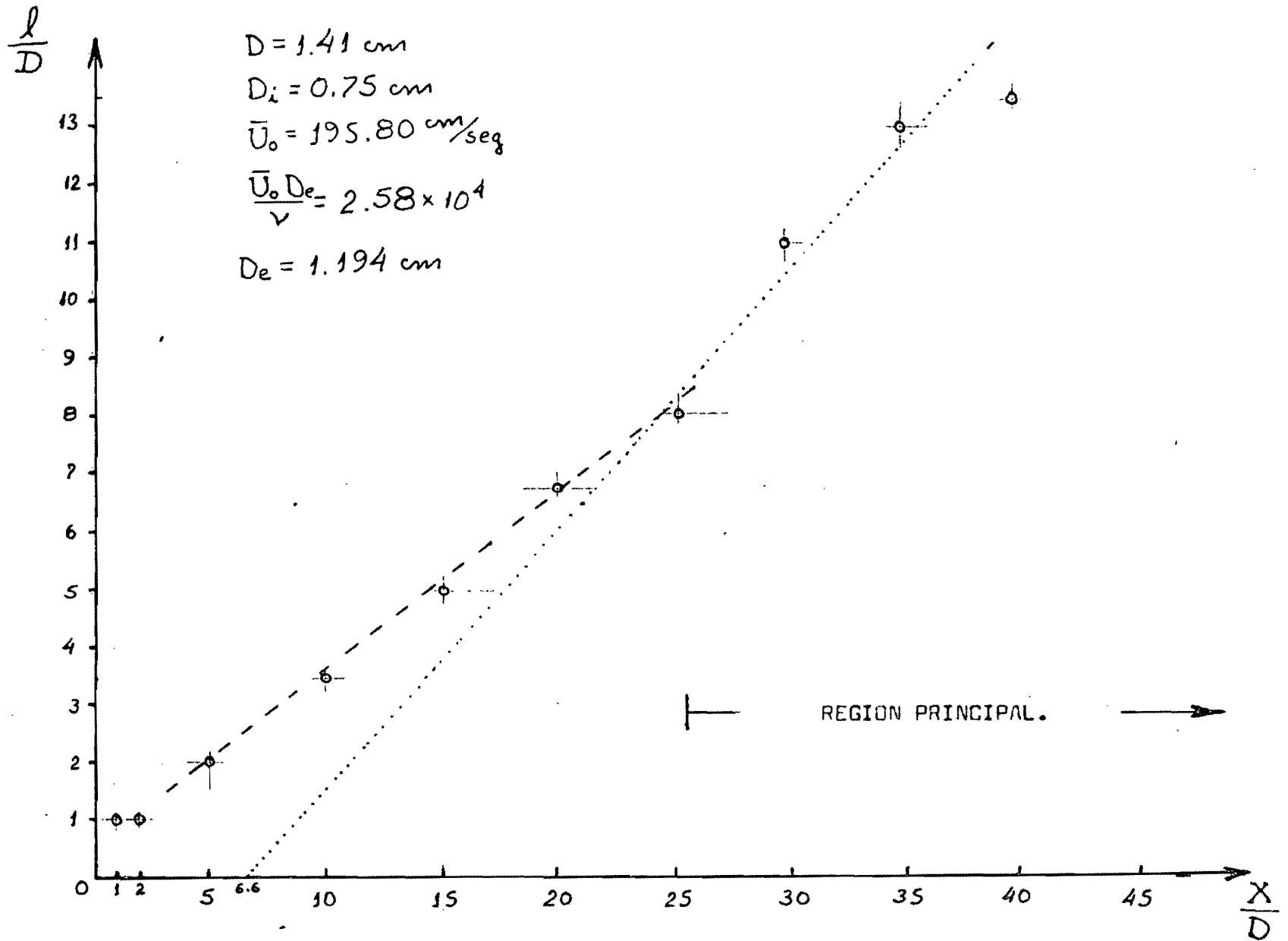


FIGURA 4.2.3.a. GRAFICA CORRESPONDIENTE A UN CHORRO ANULAR.

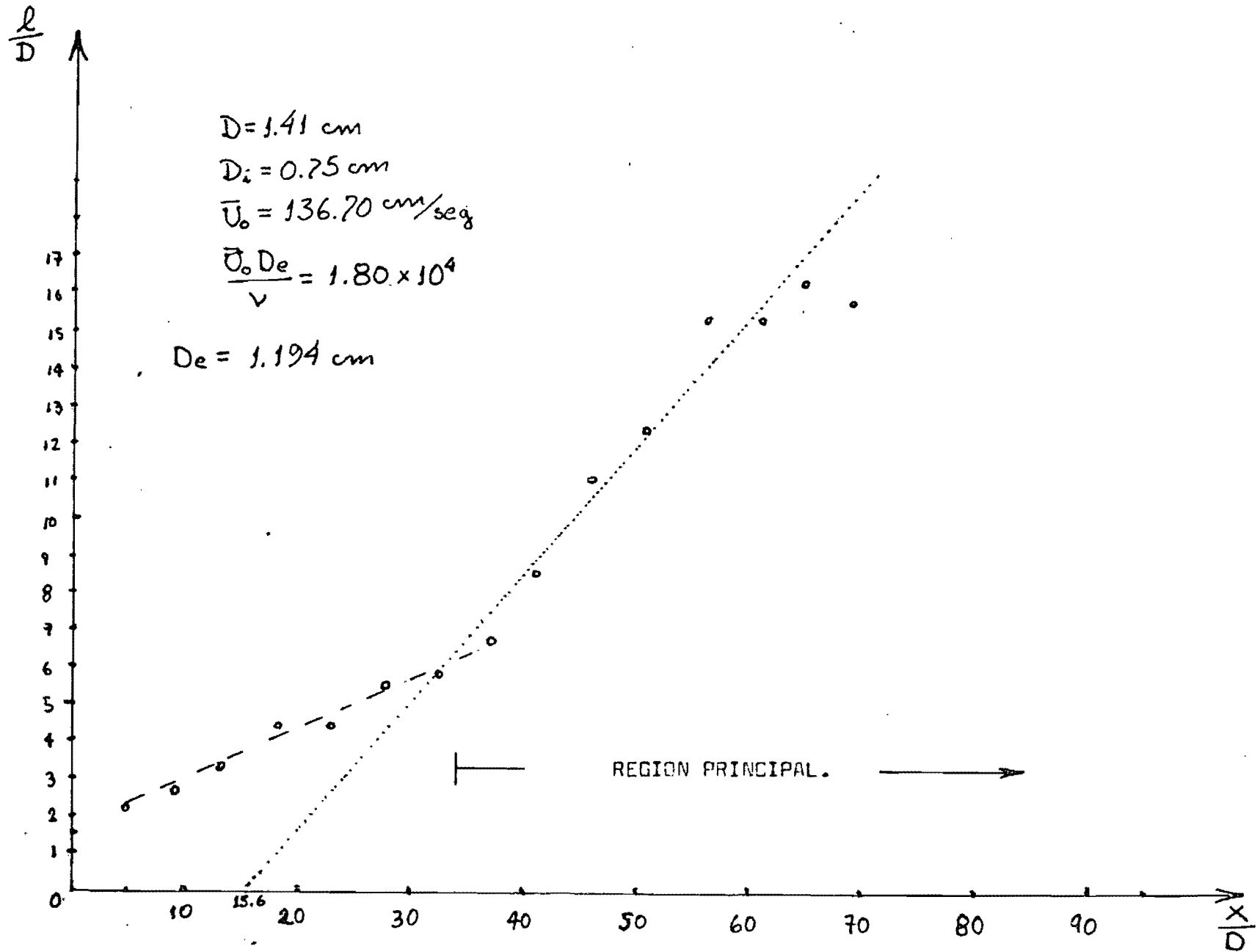


FIGURA 4.2.4.a. GRAFICA CORRESPONDIENTE A UN CHORRO ANULAR.

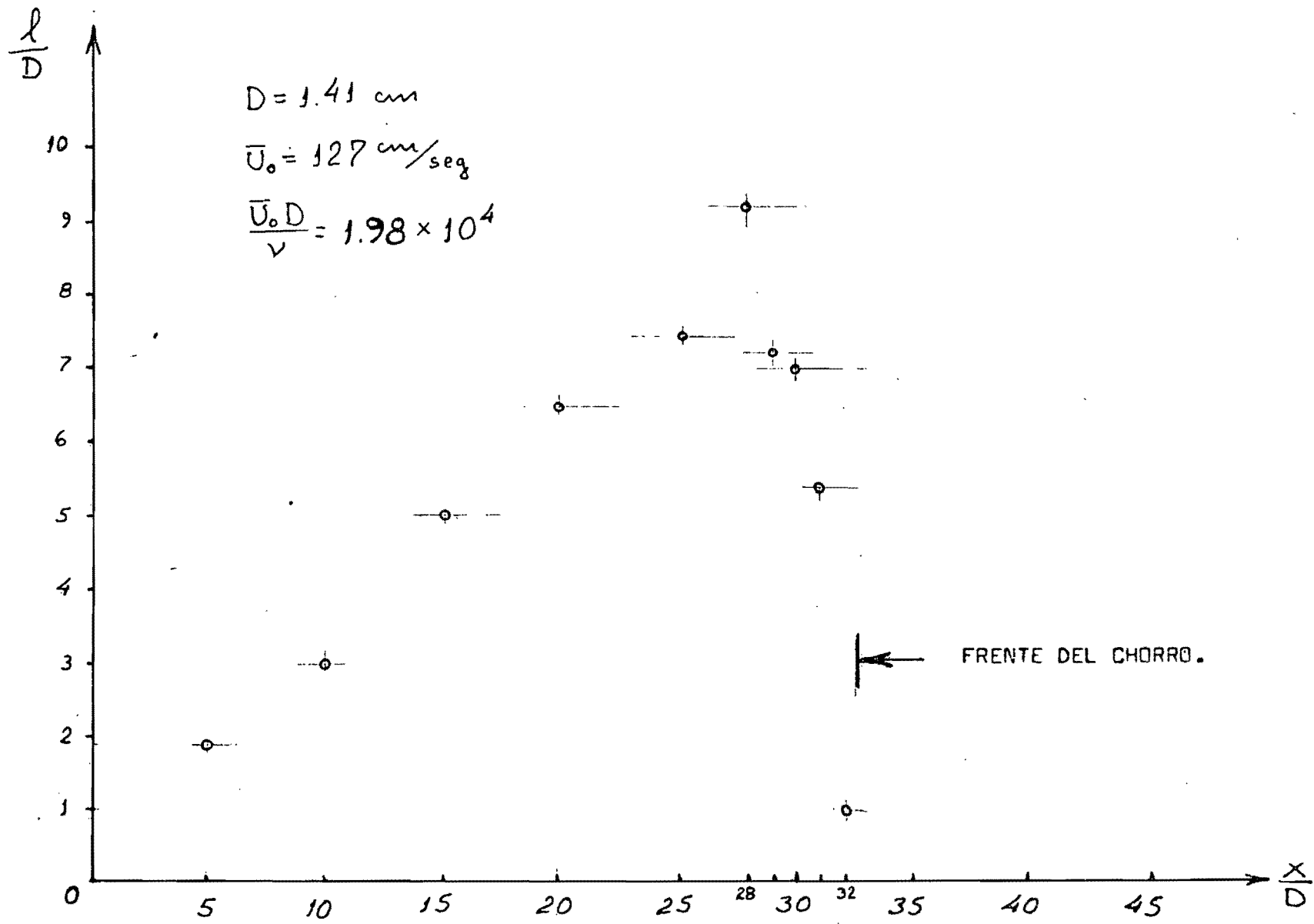


FIGURA 4.2.5.a. GRAFICA CORRESPONDIENTE A UN CHORRO SIMPLE EN DESARROLLO.

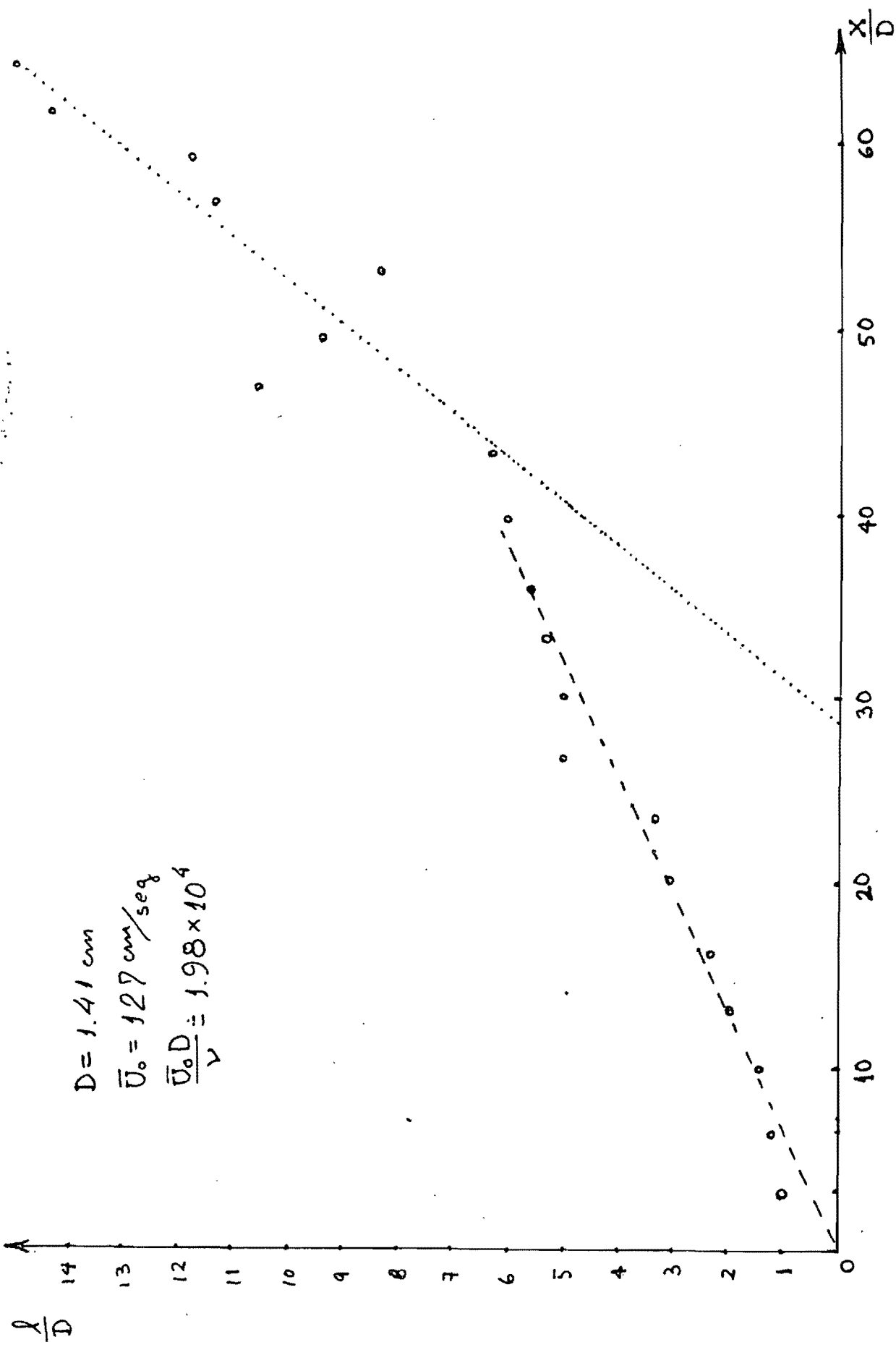


FIGURA 4.2.6.a. GRAFICA CORRESPONDIENTE A UN CHORRO SIMPLE.

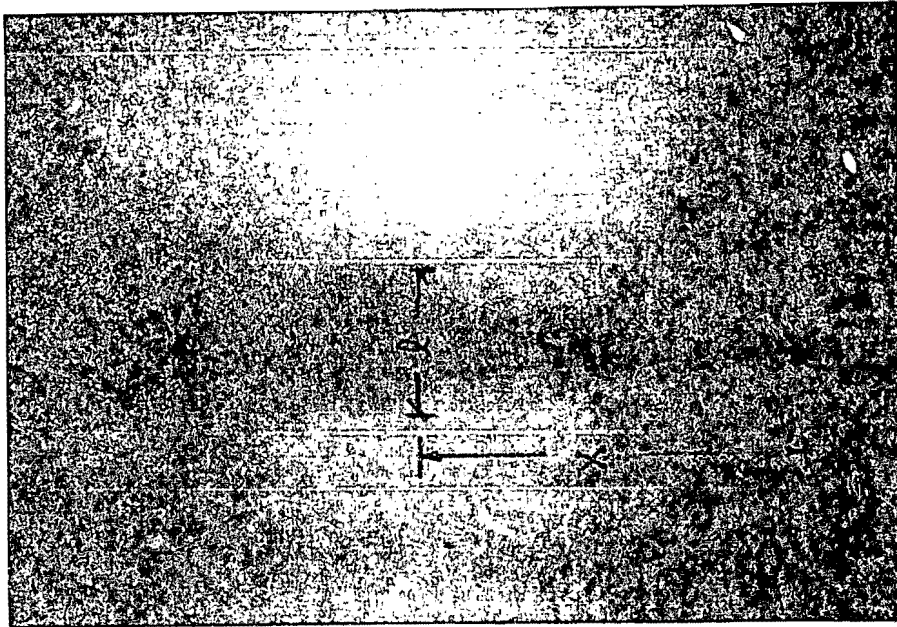


FIG. 4.2.1.b. FOTOGRAFIA CORRESPONDIENTE A LA FIG. 4.2.1.a.

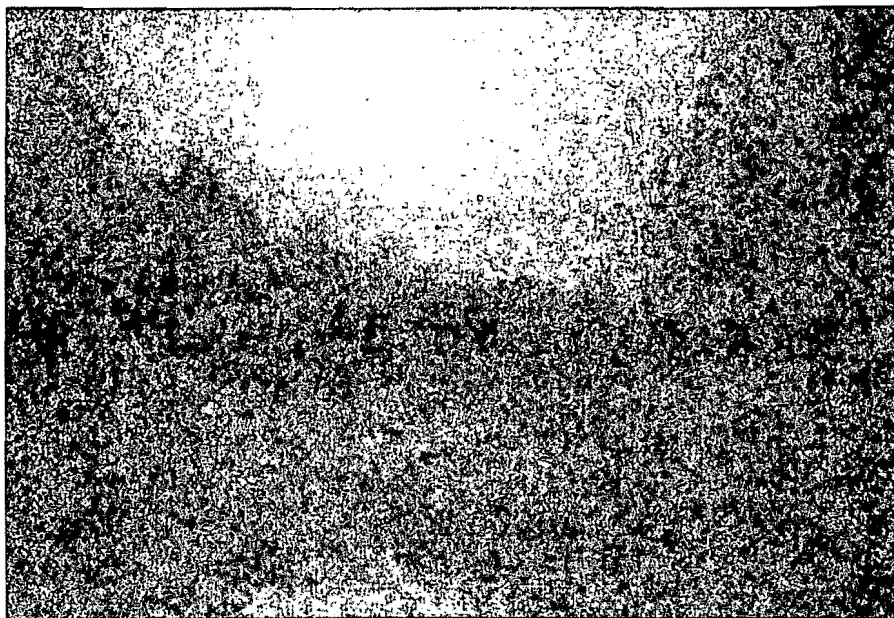


FIG. 4.2.2.b. FOTOGRAFIA CORRESPONDIENTE A LA FIG. 4.2.2.a.

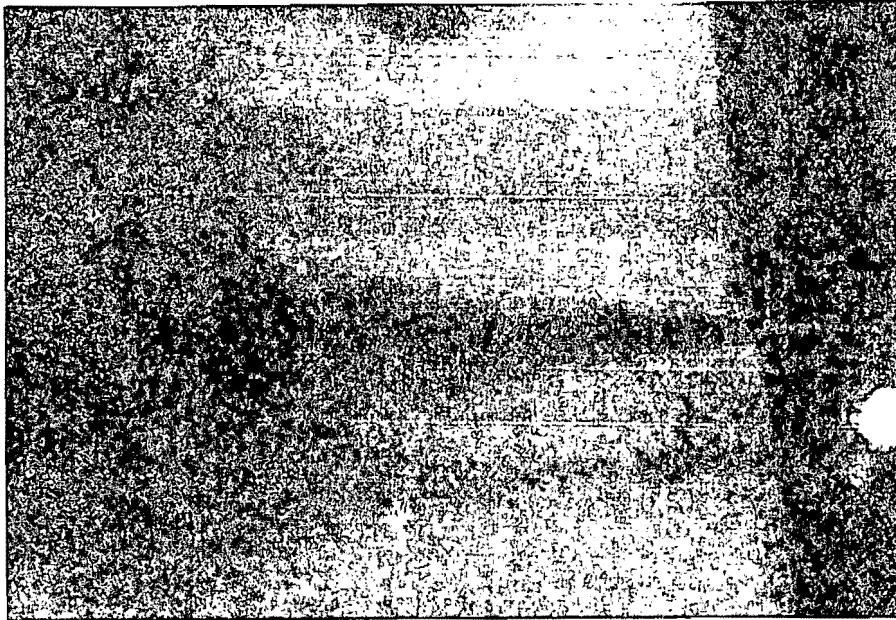


FIG. 4.2.3.b. FOTOGRAFIA CORRESPONDIENTE A LA FIG. 4.2.3.a.

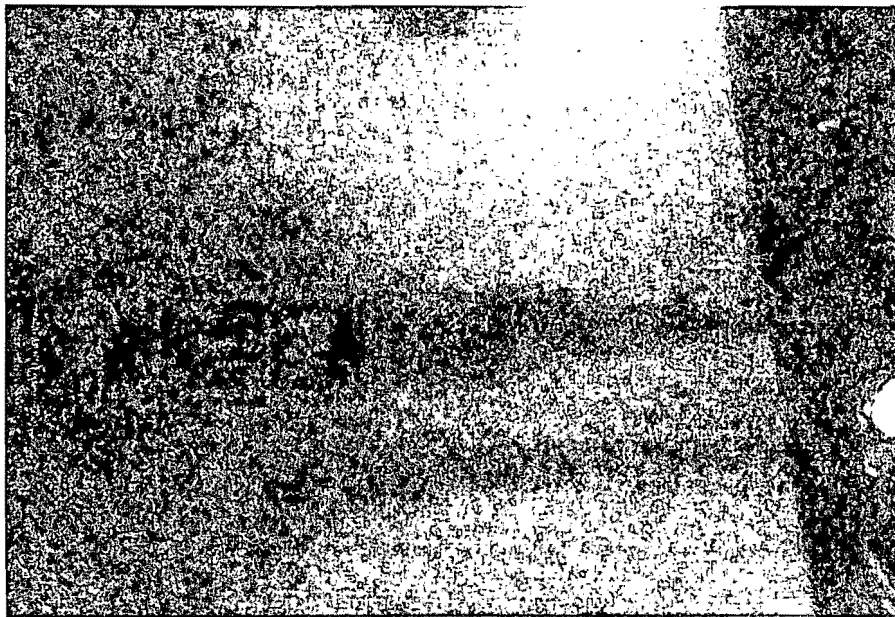


FIG. 4.2.4.b. FOTOGRAFIA CORRESPONDIENTE A LA FIG. 4.2.4.a.

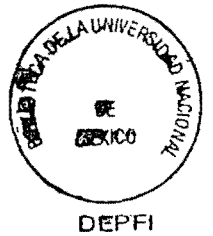
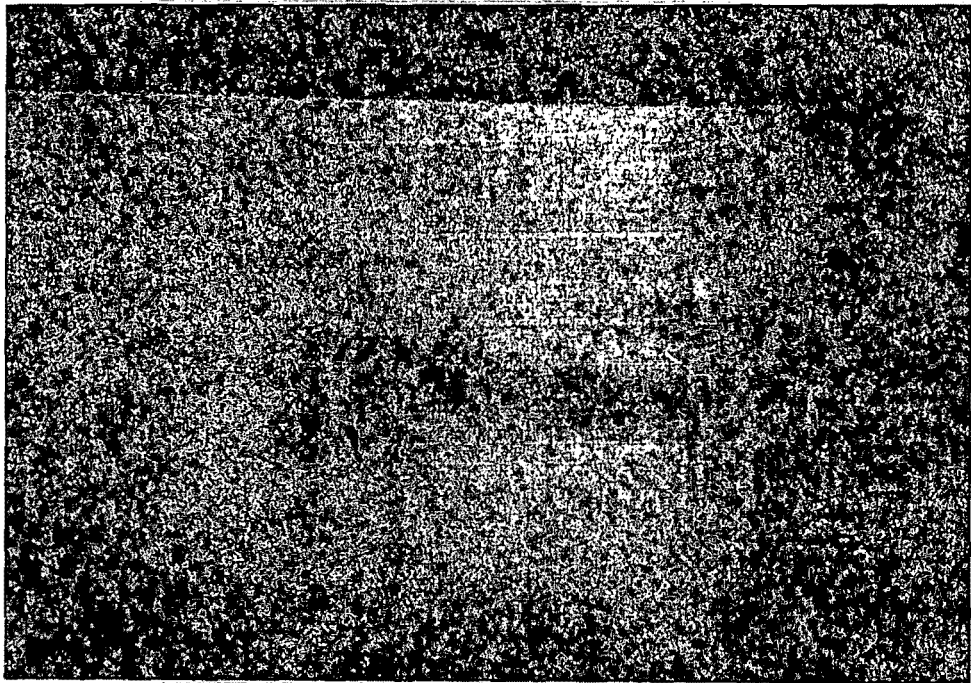


FIG. 4.2.5.b. FOTOGRAFIA CORRESPONDIENTE A LA FIG. 4.2.5.a.

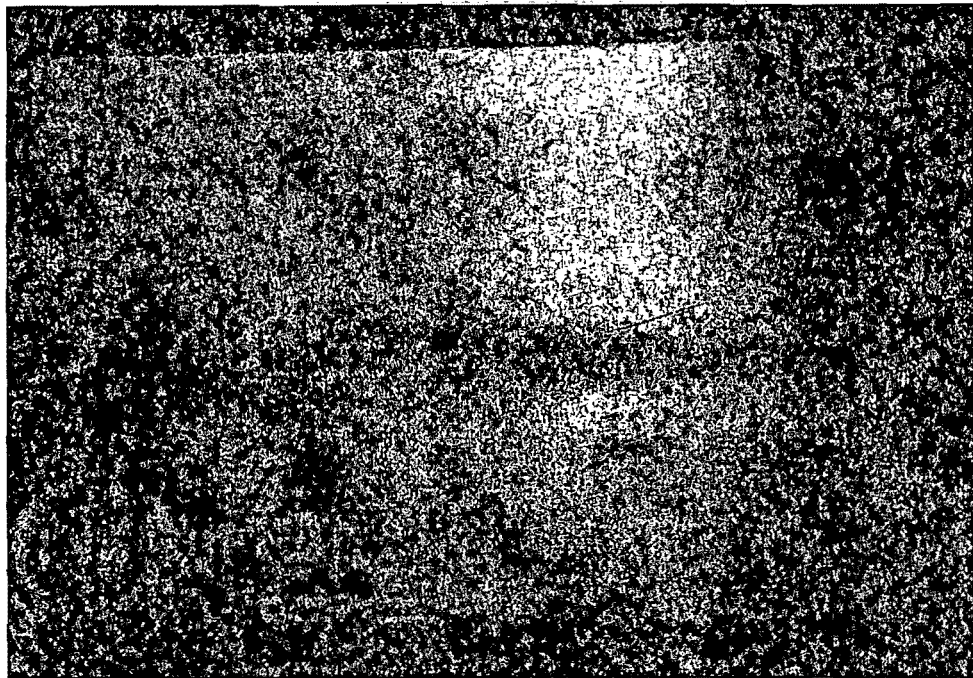
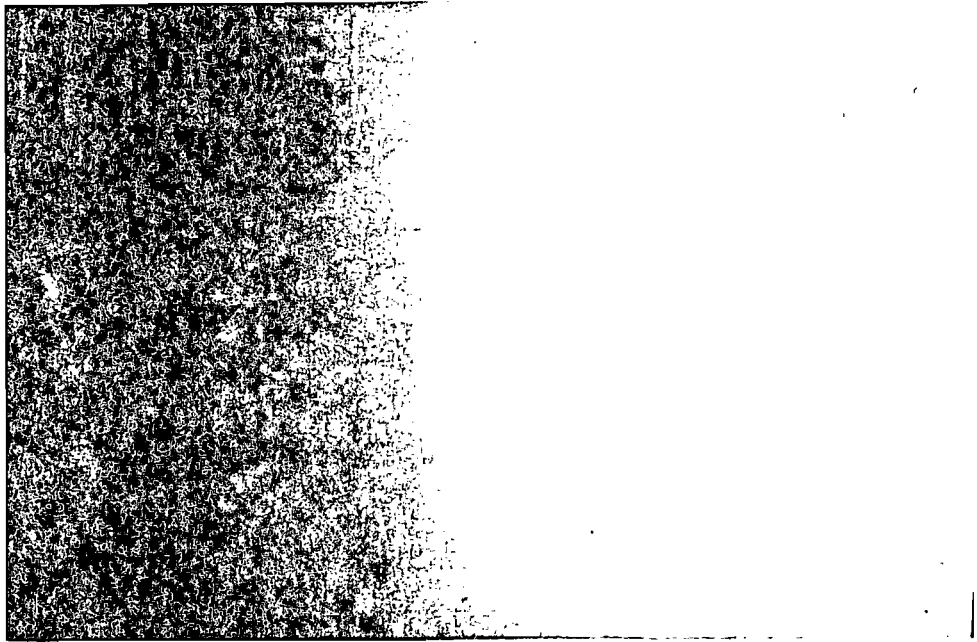
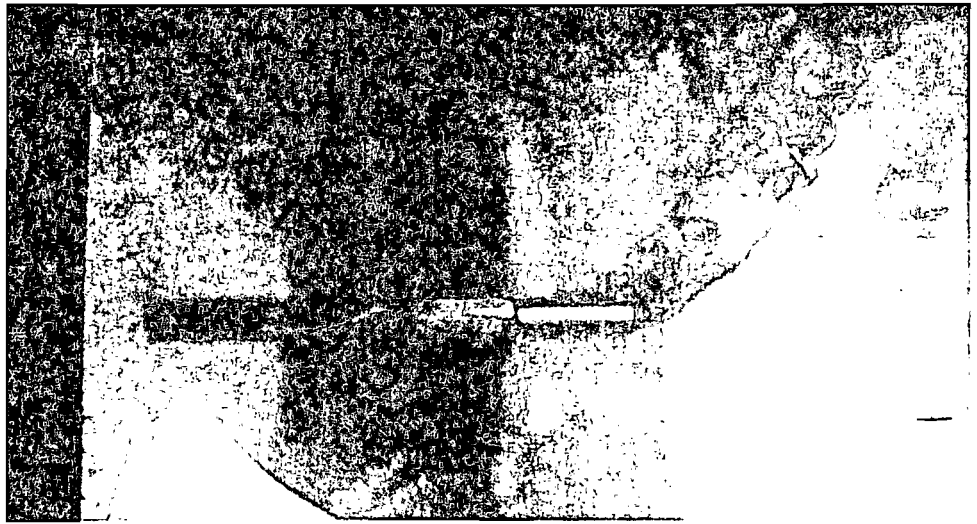


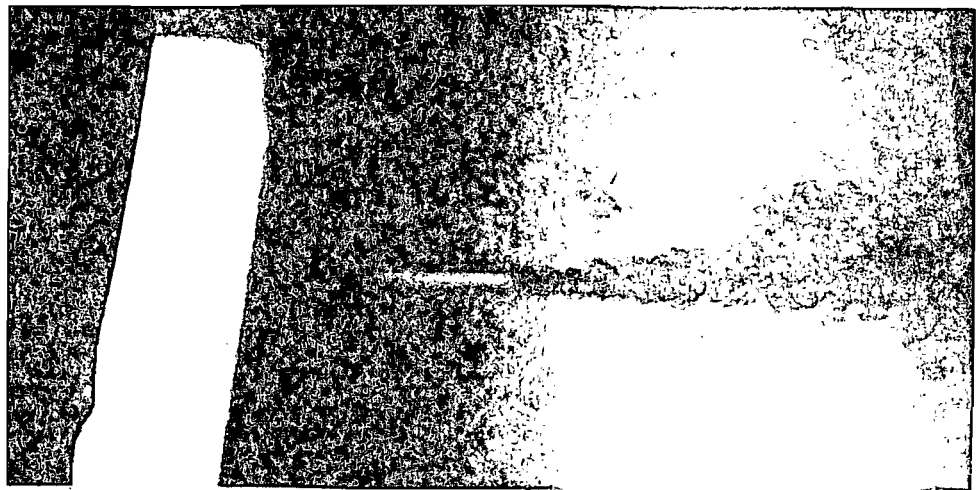
FIG. 4.2.6.b. FOTOGRAFIA CORRESPONDIENTE A LA FIG. 4.2.6.a.



a



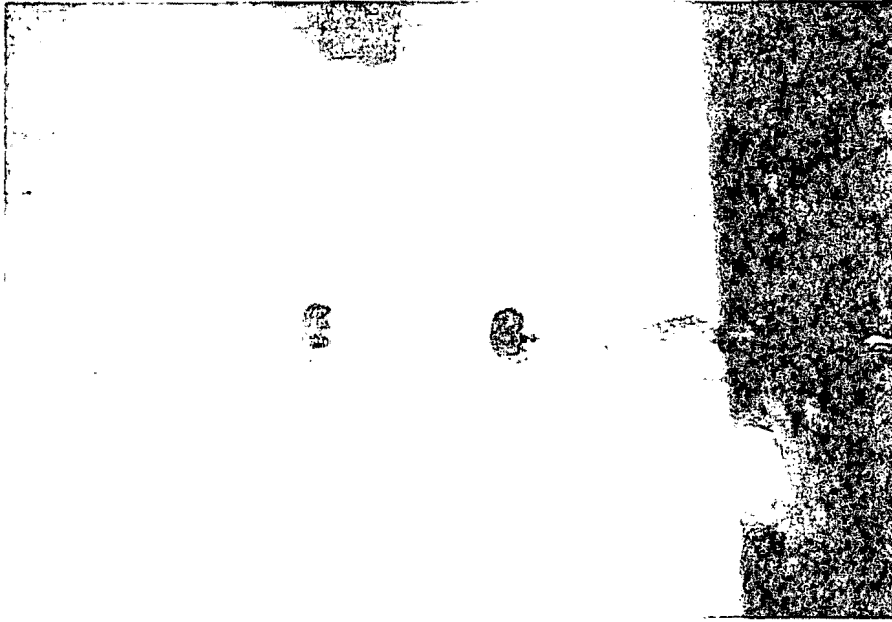
b



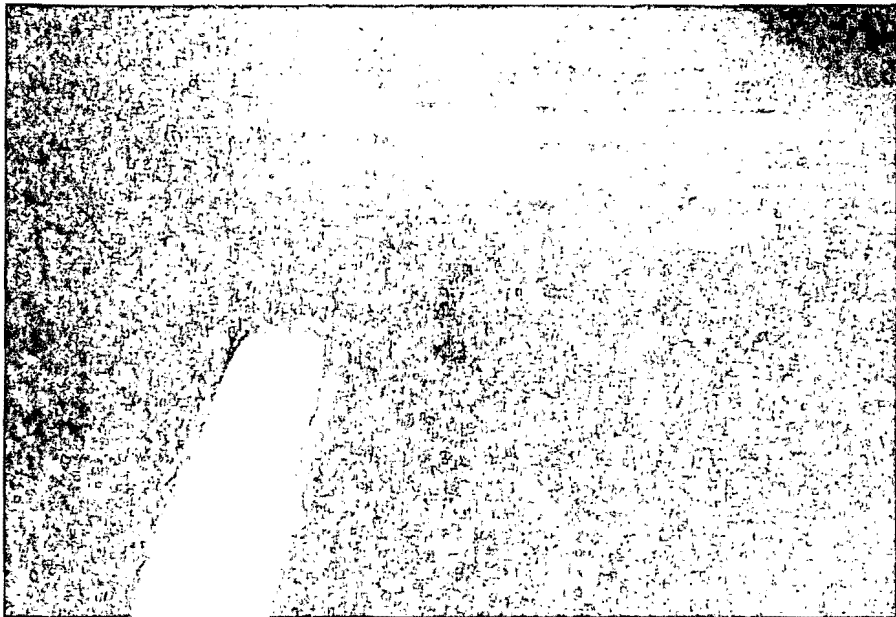
c

FIGURA 4.3.





a



b

FIGURA 4.4.1.

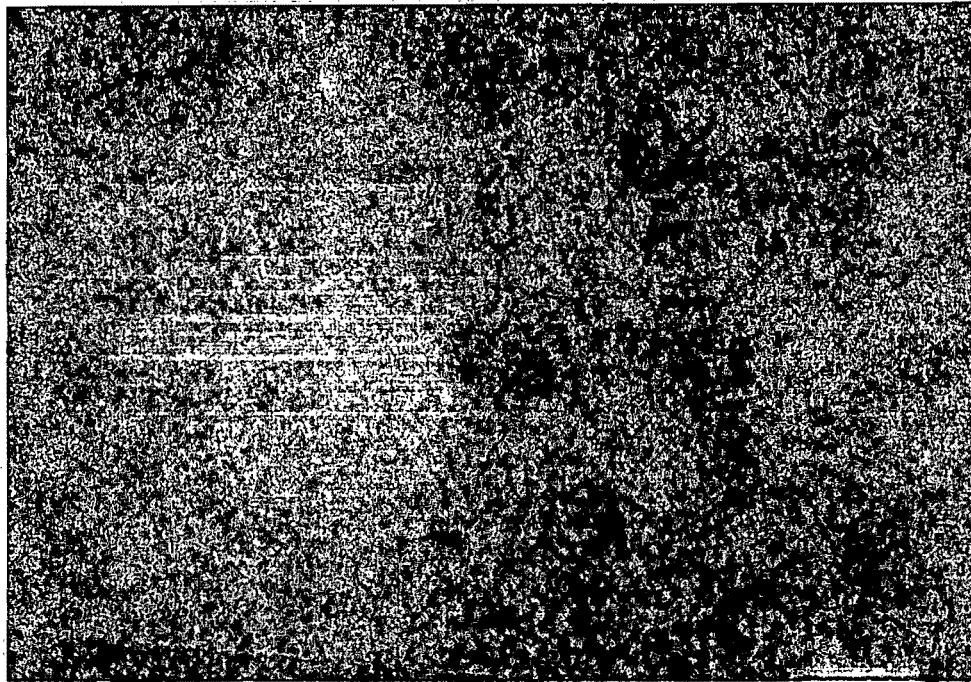


FIGURA 4.4.2.

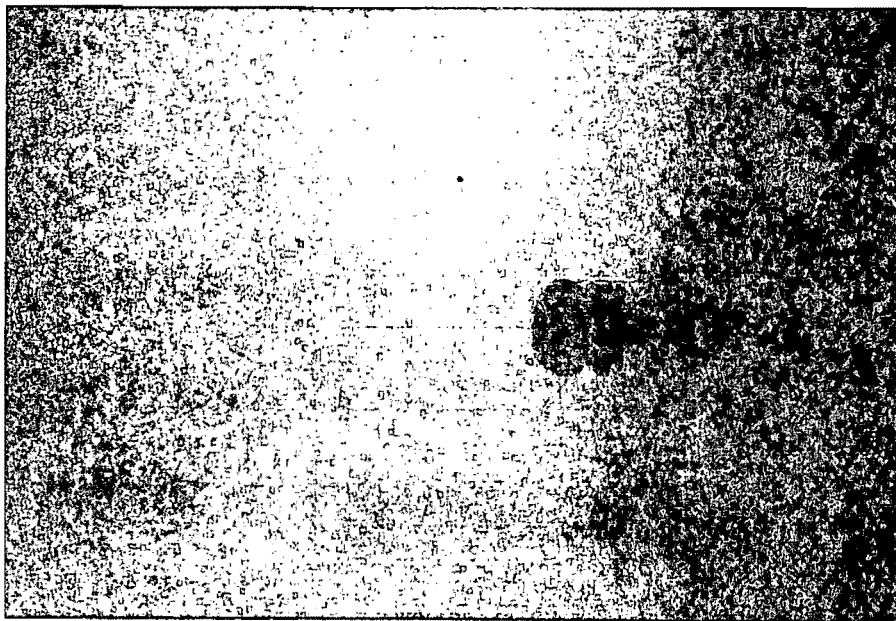


FIGURA 4.4.3.

C A P I T U L O V .  
C O N C L U S I O N E S .

La turbulencia es un fenómeno extremadamente complejo y por esto, su modelación matemática ha resultado ser tan complicada y difícil que después de alrededor de un siglo de ser estudiada, sigue siendo un problema quizá lejos de ser resuelto. Las fluctuaciones de las variables que describen al flujo turbulento, forzaron a que su estudio se hiciera por métodos estadísticos, atribuyendo a dichas fluctuaciones una naturaleza aleatoria. Sin embargo, la gran cantidad de estudios en los que se han encontrado patrones organizados dentro de flujos turbulentos, ponen de manifiesto la no aleatoriedad de una buena parte de la turbulencia.- Esto conduce a la formulación de modelos simplificados para el estudio de ciertos aspectos de este fenómeno, que permiten -- una mejor comprensión de su naturaleza, teniendo además un amplio campo de aplicación práctica.

En lo que respecta al experimento realizado, éste resulta de masiado elemental para aportar algo nuevo en la materia.

R E F E R E N C I A S .

- ABRAMOVICH, N. "The Theory of Turbulent Jets", M.I.T. Press, 1963.
- ARMSTRONG, R. R.; MICHALKE, A. & FUCHS, H.V. "Coherent --- Structures in Jet Turbulence and Noise", AIAA J., Vol. 15, - July 1977, p. 1011-1017.
- ARNDT, R.E.A.; GEORGE, W.K. "Investigation of the Large Scale Coherent Structure in a Jet and Its Relevance to Jet --- Noise", Pennsylvania State Univ., Rep. No.: NASA-CR-138908, 1974.
- BARRA, V. & HOZUMI, K. "Measurements of the Coherent Structure of Boundary Layer Turbulence at a High Subsonic Speed", International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, 24-26 Sept., 1979, Monterey, Ca. U.S.A.
- BECKER, H.A. & MASSARO, T.A. "Vortex Evolution in a Round-Jet", 1968, p. 435-448., J. Fluid Mech., Vol. 31.
- BIRKHOFF & Zarantonello, "Jets, Wakes and Cavities", Academic Press, Inc., New York, 1957.
- BONNET, C.M.T. & FISHER, M.J. "Correlation Techniques and Modal Decomposition Analysis for the Detection of Azimuthally Coherent Structures in Jet Flows", J. Sound Vib., Vol. 66, p. 545-555, 1979.
- BRADBURY, L.J.S. & KHADEM, A.H. "The Distortion of a Jet by Tabs", J. Fluid Mech., Vol. 70, 1975, p. 801-813.
- BRADSHAW, P.; FERRIS, D.H. & JOHNSON, R.F. "Turbulence in the Noise-Producing Region of a Circular Jets", 1964, p. 591-624., J. Fluid Mech., Vol. 19.
- BRADSHAW, P. "The effect of Initial Conditions on the Development of a Free Shear Layer", 1966, p. 225-236., J.F.M., 26.
- BRADSHAW, P. "In Turbulent Mixing in Nonreactive and Reactive Flows" (ed. S.N.B. Murthy), 1975, pp. 311-312. Plenum.
- BROWN, G. & ROSHKO, A. "The Effect of Density Difference on the Turbulent Mixing Layer", Conf. Proc. No. 93, 1971, paper 23.
- BROWN, G.L. "The Entrainment and Large Structure in Turbulent Mixing Layers", Proc., 5th Australasian Conf. on Hydraulics and Fluid Mech., Canterbury Univ., New Zealand, - Vol. 1, p. 352-359, 1974.
- BROWN, G.L. & ROSHKO, A., "On Density Effects and Large --- Structure in Turbulent Mixing Layers", 1974, p. 775-816. J. Fluid Mech., Vol. 69.

- BRUUN, H.H. "A Time-domain Analysis of the Large-scale Flow Structure in a Circular Jet". Part. 1. Moderate Reynolds -- Number., 1977, p. 641-671., J. Fluid Mech., Vol. 83.
- BROWAND, F.K. & LAUFER, J. "The Role of Large Structures in the Inicial Develoment of Circular Jets". Proc. 4th Biennial Symp. Turbulence in Liquids. Univ. Missouri-Rolla. Princeton, New Jersey: Science Press., 1975, pp. 333-334.
- BROWAND, F.K. & WEIDMAN, P.D. "Large Scales in the Develo--- ping Mixing Layer", J. Fluid Mech., Vol. 76, 1976, p.127-144.
- CROW, S.C. & CHAMPAGNE, F.H. "Orderly Structure in Jet Turbulence". J. Fluid Mech., Vol. 48, 1971, p. 547-591.
- CHAN, W.T. & KO, N.W.M. "Coherent Structures in the outer - Mixing Region of Annular Jets". J. Fluid Mech., Vol. 89, -- 1978, p. 515-533.
- CHANDRSUDA, C., MEHTA, R.D., WEIR, A.D. & BRADSHAW, P. "Ef- fect of Free-Stream Turbulence on Large Structure in Turbulent Mixing Layers", J. Fluid Mech., Vol. 85, 1978, p. 693-704.
- CHIGIER, M.A. & BEER, J.M. "The flow Region Near the Nozzle in Double Concentric Jets". Trans. A.S.M.E., J. Basic Engng. D86, 1964, p. 797-804.
- DAHAN, C.; ELIAS, G.; MAULARD, J.; PERULLI, M. "Coherent -- Structures in the Mixing Zone of a Subsonic Hot Free Jet". J. Sound Vib., Vol. 59, 19 , p. 313-333.
- DAHAN, C.; ELIAS, G. "Source Structure Pattern in a Hot Jet by Infrared-Microphones Correlations", AIAA Paper No. 76-542, Palo Alto, Calif., 1976.
- DAHAN, C. "Acoustic Emission from Coherent Structures in a Turbulent Jet". Rech. Aerosp. (France), No. 2, 1977, p.113-126. ONERA.
- DAVIES, P.O.A.L., FISHER, M.J. & BARRATT, M.J. "The Charac- teristics of the Turbulence in the Mixing Region of a Round Jet", J. Fluid Mech., Vol. 15, 1963, p. 337-367.
- DAVIES, P.O.A.L. & YULE, A.J. "Coherent Structures in Turbu- lence", J. Fluid Mech., Vol. 69, 1975, p. 513-537.
- DIMOTAKIS, P.E. & BROWN, G.L. "Large Structure Dynamics and Entrainment in the Mixing Layer at High Reynolds number". - Proyect SQUID, Purdue Univ. Indiana, Tech. Rep. (II-7-PU),- 1975.
- DIMOTAKIS, P.E. & BROWN, G.L. "The Mixing Layer at High Rey- nolds number: Large-Structure Dynamics and Entrainment", J. Fluid Mech., Vol. 78, 1976, p. 535-560.

- ECKELMANN, H. "Pattern Recognition, a Means for Detection - or Coherent Structures in Bounded Shear Flows". Proc. Dynamic Flow Conf. on Dynamic Measurements in Unsteady Flows. - Marseille, France, Sep. 11-14, J. Fluid Mech., Vol. 83, 1978, p. 673-693.
- FAVRE, A.J.; GAVIGLIO, J.J. & DUMAS, R. "Space-Time Double - Correlations and Spectra in a Turbulent Boundary Layer". J. Fluid Mech., Vol. 2, 1957, p. 313-342.
- FUCHS, H.V. "Space Correlations of the Fluctuating Pressure - in Subsonic Turbulent Jets", J. Sound Vib., Vol. 23, 1972, - p. 361-378.
- FUCHS, H.V. & ARMSTRONG, R.R. "Turbulent Surface Coherence - and Helmholtz number as Aerodynamic Noise Parameters", Structure and Mechanisms of Turbulence, Part II, p. 189-201, Springer-Verlag, Berlin, 1978.
- FUCHS, H.V. & MICHEL, U. "Experimental Evidence of Turbulent Source Coherence Affecting Jet Noise", AIAA J., Vol. 16, Sept. 1978, p. 871-872.
- FUCHS, H.V. & RIBNER, J.S. "Two Point Correlations of Jet -- Noise and their Interpretation" (Comments and Reply), J. Sound Vib., Vol. 61, 1978, p. 153-159.
- FUCHS, H.V.; MERCKER, E. & MICHE, U. "Large Scale Coherent - Structures in the Wake of Axisymmetric Bodies", Inst. fuer - Experimentelle Stroemungsmechanik, Rept. No. DFVLR-FB-78-28. - Goettingen, Ger., R.F., 1978.
- FUCHS, H.V.; MERCKER, E. & MICHEL, U. "Large-Scale Coherent - Structures in the Wake of Axisymmetrical Bodies", J. Fluid -- Mech., Vol. 93, 1979, p. 185-207.
- GATSKI, T.B. & LIU, J.T.C. "On the Interactions Between Large-Scale Structure and Fine-Grained Turbulence in a Free --- Shear Flow", Proc. R. Soc. London, Vol. 359A, 1978, p.497.
- GATSKI, T.B. & LIU, J.T.C. "On the Interactions Between Large-Scale Structure and Fine-Grained Turbulence in a Free --- Shear Flow, Part III. A numerical Solution", Philos. Trans - R. Soc. London, Vol. 293, 1979, p. 483-509.
- GATSKI, T.B. "Sound Production Due to Large-Scale Coherent - Structures", AIAA J., Vol. 17, June 1979, p.614-620.
- GAUTAM T. KALGHATGI "Study of Coherent Structures in Axisymmetric Jets Using an Optical Technique", AIAA J. Vol. 18, March 1980, p. 225-226.
- GUSTAVSSON, H. & LINDE, M. "The Gust as a Coherent Structure in the Turbulent Boundary Layer", Aeronautical Research Inst. of Sweden, Stockholm, 1979.

- HEAD, M.R. & BANDYOPADHYAY, P. "Flow Visualisation of Turbulent Boundary Layer Structure", AGARD Conference Proceedings No. 271, 25/1-12, 1980, The Hague, Netherlands.
- HINZE, J.O. "Turbulence" 2a. Ed., McGraw-Hill, 1975.
- HOFBAUER, M. "The Investigation of Coherent Structures in - Regions Near The Walls of a Channel with a Designed Turbulent Flow", Z. Angew. Math. and Mech., Germany, Vol. 60, p. 192-193, 1980.
- HUSSAIN, A.K.M.F. & ZAMAN, K.B.M.Q. "Vortex Pairing in a Circular Jet Under Controlled Excitation. Part I". J. Fluid Mech. Vol. 101, 1980, p. 449-491.
- HUSSAIN, A.K.M.F. & ZAMAN, K.B.M.Q. "Vortex Pairing in a Circular Jet Under Controlled Excitation. Part II". Coherent --- Structure Dynamics. J. Fluid Mech., Vol. 101, 1980, p.493-544.
- HUSSAIN, A.K.M.F.; KLEIS, S.J. & SOKOLOV, M. "A Turbulent -- spot" in an Axisymmetric Free Shear Layer" Part 2, J. Fluid - Mech., Vol 98, 1980, p. 97-135.
- JAMES, W. & GOLDSCHMIDT, V.W. "Coherent Structures in the Similarity Region of a Two Dimensional Turbulent Jet: a Vortex-Street". Rept. No.: HL-80-6, Purdue University Lafayette, -- 1980.
- KIM, J. & MOIN, P. "Large Eddy Simulation of Turbulent Channel Flow. ILLIAC IV Calculation", AGARD Conference Proceedings No. 271, 14/1-18, 1980, The Hague, Netherlands.
- KLINE, S.J. & FALCO, R.E. "Summary of the AFOSR/MSU Research Specialists Workshop on Coherent Structure in Turbulent Boundary Layers. Held at Michigan State University July 30 to -- August 1, 1979".
- KO, N.W.M. & DAVIES, P.O.A.L. "The Near Field Within the Potential Cone of Subsonic Cold Jets". J. Fluid Mech., Vol. 50, 1971, p. 49-78.
- KO, N.W.M. & CHAN, W. T. "Similarity in the Initial Region of Annular Jets: Three Configurations", J. Fluid Mech., Vol. 84, 1978, p. 641-656.
- KO, N.W.M. & CHAN W.T. "The inner Regions of Annular Jets", J. Fluid Mech., Vol. 93, 1979, p. 549-587.
- KOCH, B. PFEIFER, H.J. "Detection of Large Scale Coherent --- Structures in Free Jets by Laser Anemometry and Crossed Beam Schlieren Techniques". Institut Franco-Allemand de Recherches, St. Louis, France, Rep. No. ISL-CO-210/77, 1977.
- KOLOVADIN, B.A.; SOSINOVICH, V.A. & KRAVAR, S.V. "To the --- Theory of Mechanism of Mixing in Turbulent Flows with Coherent Structures". Lett. Heat Mass Transfer, Vol. 5, 1978, -- p. 253-258.

- KOPLIN, M.A. "The Flow in the Mixing Region of a Jet", J. -- Fluid Mech., Vol 18, 1964, p. 529-548.
- KOVASZNAVY & LESLIE, S.G. "Coherent Structures in Turbulent - Shear Flow", Australia's Conf. on Heat and Mass Transfer, 2nd, p. 295-304, 1977, University of Sidney.
- KWAN, A.S.H. & KO, N.W.M. "Coherent Structures in Subsonic -- Coaxial Jets", J. Sound Vib., Vol. 48, 1976, p. 203-219.
- KWAN, A.S.H. & KO, N.W.M. "The initial region of Subsonic co axial Jets. Part 1", J. Fluid Mech., Vol. 73, 1976, p. 305-332.
- KWAN, A.S.H. & KO, N.W.M. "The initial region of Subsonic co axial Jets. Part 2", J. Fluid Mech., Vol. 82, 1977, p. 273-287.
- LANDAHL, M.T. "Dynamics of Boundary Layer Turbulence and the Mechanisms of Drag Reduction", The Physics of Fluids, Vol. 20, No. 10, p. 11.
- LAU, J.C. "The Coherent Structure of Jets", University of --- Southampton, Ph. D. Thesis, 1971.
- LAU, J.C. & FISHER M.J. "The Vortex-Street Structure of 'Turbulent' Jets. Part. 1", J. Fluid Mech., Vol. 67, 1975, p. 299-339.
- LAU, P.J.; MORRIS & FISHER M.J. "Measurements in Subsonic and Supersonic Free Jets using a Laser Velocimeter", J. Fluid --- Mech., Vol. 93, 1979, p. 1-27.
- LAUFER, J.; KAPLAN, R.E. & CHU, W.T. "On the Generation of -- Jet Noise". AGARD Conf. Noise Mechanisms, Brussels, paper 131, 1973.
- LESLIE, D.C. "Developments in the Theory of Turbulence", Clarendon Press, Oxford, 1973.
- LEUCHTER, O. & DANG, K. "Experimental Investigation of Large-Scale Structures in Turbulent Jet Mixing Layers". Rech. Aerosp. (France) No. 5, 1978, p. 279-282.
- LIU, J.T.C.; ALPER, A. & MANKBADI, R. "The Large-Scale Organized Structure in Free Turbulent Shear Flow and its Radiation Properties", Structure and Mechanisms of Turbulence, Part II, p. 202-218, Springer-Verlag, Berlin, 1978.
- MAXWORTHY, T. "Turbulent Vortex rings", J. Fluid Mech., Vol. -- 64, 1974, p. 227-239.
- MICHALKE, A. & FREYMUTH, P. "The Instability and the Formation of Vortices in a Free Boundary Layer". AGARD, Conf. Proc. No. 4, paper 2.
- MICHALKE, A. & FUCHS, H.V. "On Turbulence and Noise of an -- axisymmetric Shear Flow", J. Fluid Mech., Vol. 70, 1975, p. -- 179-205.



- MOLLO-CHRISTENSEN, E.; KOPLIN, M.A. & MARTUCCELLI, J.R. "Experiments on Jet Flows and Jet Noise far-field Spectra and Directivity Patterns", J. Fluid Mech., Vol. 18, 1964, p. 285-301.
- MOLLO-CHRISTENSEN, E. J. Appl. Mech., Vol. 89, 1967, p. 1.
- MOORE, D.J. "The role of Shear-Layer instability Waves in -- Jet Exhaust Noise", J. Fluid Mech., Vol 80, 1977, p.321-367.
- MORRIC, P. J. "Flow Characteristics of the Large-Scale Wave-like Structure of a Supersonic Round Jet", J. Sound Vib., -- Vol. 53, 1977, p. 223-244.
- NAKAMURA, I.; KUSHIDA, T.; NODA, A. & SUGISHITA K. "An Experimental study of a square, Jet", Trans-Japan Soc, Mech. --- Engr., Vol. 44, 1978, p. 4197-4205.
- NIHOUL, J.; RONDAY; FRANÇOIS, C. "Coherent Structures and -- Negative Viscosity in Marine Turbulence", J. Mec., Vol. 15,- 1976, p. 119-132.
- PERRY, A.E.; LIM, T.T. "Coherent Structures in Coflowing Jets and Wakes", J. Fluid Mech., Vol. 88, 1978, p. 451-463.
- PERRY, A.E.; LIM, T.T. & CHONG, M.S. "The Instantaneous Velocity Fields of Coherent Structures in Coflowing Jets and --- Wakes", J. Fluid Mech., Vol. 101, 1980, p. 243-256.
- PETERSEN, T.A. "Influence of Wave Dispersion on Vortex Pairing in a Jet", J. Fluid Mech., Vol. 89, 1978, p. 469-495.
- PFEIFER, H.J. "Analysis of Coherent Structures in Flow Fields Using Laser Doppler Anemometry", IEEE, (Cat. No.79CH1500-8AES), New York, N.Y., 1979, p. 266- 272.
- PRATURI, A.K. & BRODKEY, R.S. "A Stereoscopic Visual Study - of Coherent Structures in Turbulent Shear Flow", J. Fluid -- Mech., Vol. 89, 1978, p. 251-272.
- ROSHKO, A. "Structure of Turbulent Shear Flows:A New Look",- AIAA J. Vol. 14, Oct. 1976, p. 1319-1357.
- SABOT, J. & COMTE-BELLOT, G. "Intermittency of Coherent Structures in the Core Region of Fully Developed Turbulent Pipe -- Flow", J. Fluid Mech., Vol. 74, 1976, p. 767-796.
- SEINER, J.M. & RETHOF, G. "On the Distribution of Source Coherency in Subsonic Jets", AIAA Paper No. 74-4, Washington, D. C., 1974.
- SCHAFFAR, M. & BOBIN, L. "Recherche de Structures Coherentes dans un Jet Froid au Moyen de Correlations", Institut Franco-Allemand de Recherches, St. Louis, France, Rept. No. ISL - R-130/76, 1976.
- TANEDA, S. "Visual Observations of the Flow past a Sphere at

- Reynolds numbers between  $10^4$  and  $10^6$ ; J. Fluid Mech., Vol 85, 1978, p. 187-192.
- TOWNSEND, A.A. "The Structure of Turbulent Shear Flow", 2nd.-Ed., Cambridge University Press, 1976.
- MAXWORTHY, T. "Turbulent Vortex rings", J. Fluid Mech., Vol. 64, 1974, p. 227-239.
- VIETS, H. "Coherent Structures in time dependent Shear Flows". AGARD Conference Proceeding No. 271, 5/1-14, 1980.
- WALLACE, J.M. & ECKELMANN, H. "Pattern-Recognised Structures in Bounded Turbulent Shear Flows", J. Fluid Mech., Vol. 83, 1977, p. 673-693.
- WEHRMANN, C. "Discrete values of the large scale structure - in Turbulent Flows", Structure and Mechanisms of Turbulence, - Vol. 1, p. 43-47, Springer-Verlag, Berlin, 1978.
- WIDNALL, S.E. & SULLIVAN, J. P. "On the Stability of Vortex Rings", Proc. Royal Soc. A 332, p. 335-353, 1973.
- WINANT, C.D. & BROWAND, F.K. "Vortex pairing: the Mechanism of Turbulent Mixing-Layer Growth at Moderate Reynolds Number" J. Fluid Mech., Vol. 63, 1974, p. 237-255.
- WYGNANSKI, I.J. "On the Possible Relationship Between the -- Transition Process and Large Coherent Structure, in Turbulent Boundary Layers", Tel-Aviv Univ., School of Engineering, 1978.
- YULE, A.J. "Two-Dimensional self-preserving Turbulent Mixing Layers at Different Free Stream Velocity Ratios", Aero, Res. Council. R. & M. No. 3683, 1972.
- YULE, A.J., BRUNN, H.H., BAXTER, D.R.J. & DAVIES P.O.A.L. -- "Structure of Turbulent Jets". Univ. Southampton ISVR Memo.-No. 506, 1974.
- YULE, A.J. "Large-Scale Structure in the Mixing Layer of a - Round Jet", J. Fluid Mech., Vol. 89, 1978, p. 413-432.
- YULE, A.J. "Investigations of Eddy Coherence in Jet Flows", - Presented at the AIAA 18th Aerospace Sciences Meeting, Pasadena, Cal., 14-16 Jan 80, Paper AIAA-80-0077.
- ZARIC, Z. "Physical Evidence on Coherent Structure, in the - Wall Layers of Turbulent Flows" Hemisphere Publ. Corp., Washington, D. C. 1979.
- ZAKKAY, V.; BARRA, V. & WANG, C.R. "The Nature of Boundary-Layer Turbulence at High Subsonic Speed", AIAA J., Vol. 17, April 1979, p. 356-364.