

53



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

PATRONES DE FLUJO EN LA INTERCARA AGUA-AIRE GENERADOS POR LA ROTACIÓN DE UN SÓLIDO

T QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE: FÍSICA PRESENTA: JUAN RAMÓN SÁNCHEZ JÁCOME



DIRIGIDA POR EL DR. RAMÓN PERALTA-FABI

2002

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



FACULTAD DE CIENCIAS SECCION ESCOLAR



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.



REPUBLICA DE COLOMBIA  
 MINISTERIO DE EDUCACION

**M. EN C. ELENA DE OTEYZA DE OTEYZA**  
 Jefa de la División de Estudios Profesionales de la  
 Facultad de Ciencias  
 Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito: Patrones de flujo en la intercara agua-aire generados por la rotación de un sólido

realizado por Juan Ramón Sánchez Jácome

con número de cuenta 8448131-3 , quién cubrió los créditos de la carrera de Física

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis

Propietario DR. RAMON PERALTA FABI

Propietario DR. STEVEN CZITRON BAUS

Propietario DR. CESAR TREVINO TREVINO

Suplente DR. RUBEN AVILA RODRIGUEZ

Suplente DR. GERARDO RUIZ CHAVARRIA

*Ramon Peralta Fabi*  
*Steven Czitron Baus*  
*Cesar Trevino Trevino*  
*Ruben Avila Rodriguez*  
*Gerardo Ruiz Chavarria*

Consejo Departamental de Física

*Patricia Goldstein Menache*

DRA. PATRICIA GOLDSTEIN MENACHE : HAS

SECRETARÍA DE FÍSICA

## Agradecimientos

A l apoyo de mis padres, mi abuelita y mi tía Tide.

A todos mis profesores desde el Jardín de niños hasta mi asesor, por que gracias a ellos soy lo que soy.

A l Dr. Ramón Peralta y la M en C Rocío Chicharro, por el tiempo brindado en la revisión del trabajo, sus consejos y revelado de fotografías indispensables para este trabajo.

A la insistencia de la Dra. Julia Tagüeña y Dra. Julieta Fierro.

A los Sinodales, Dr. Ramón Peralta, Dr. Rubén Ávila, Dr. Gerardo Ruiz, Dr. Steven Czitron, Dr. Cesar Treviño; por su tiempo, comentarios y sugerencias que ayudaron a mejorar el presente trabajo.

A la Dra. Julia Tagüeña, mi sinodal particular, que a pesar de las exigencias de su trabajo, revisó la Tesis y sugirió mejoras de este trabajo.

A los integrantes y ex integrantes del Laboratorio de Fluidos de Ciencias; Rocío Chicharro, Ramón Peralta, Eduardo Morales, Ramón Antonio Villaverde, Esteban Flores, Aurora Mandujano, Iván Santamaría, por su amistad.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme formado profesionalmente y por su apoyo a través de los proyectos de investigación de DGAPA IN107197 e IN106694.

A la Facultad de Ciencias donde aprendí y pasé una parte importante de mi vida.

A la DGDC, y en especial a su directora general Dra. Julieta Fierro y Directora de Museos por darme la oportunidad de realizarme profesionalmente.

A mi Flor por su luz.

## Patrones de Flujo en la intercara agua-aire generados por la rotación de un sólido.

### Resumen

Este trabajo experimental busca determinar las variables relevantes que intervienen en la transición de diversos flujos que se forman cuando un sólido de revolución, como es el caso de un cilindro, una esfera o un cono, gira alrededor de su eje y en la intercara agua-aire.

En el trabajo se encontraron 6 transiciones de flujo a las que llamamos en orden de aparición, transición a anillo, dona, fuente, fuente con membrana, fuente con membrana oscilante y desaparición de membrana. De estas transiciones se habían reportado el flujo del anillo y de la dona y se había caracterizado la transición a la dona. Este trabajo explora la relación existente entre la velocidad de aparición de cada transición con el diámetro característico del sólido, o con la sección transversal inmersa del sólido, este último se encuentra que es el mejor parámetro.

Se caracteriza el flujo del anillo encontrando que surge cuando la velocidad tangencial del sólido es constante, alrededor de 25 cm/s. También se exploró el efecto de cambiar algunos parámetros, como el de la distancia de los sólidos a las paredes del recipiente que contiene el agua el mojado de los sólidos, la forma del sólido y se puede inferir que los otros flujos no fueron reportados con anterioridad por el efecto de las condiciones de frontera predominantes en los trabajos previos.

## Índice

### Capítulo 1 Introducción

1.1 Generalidades	3
1.2 Antecedentes	5
1.3 Objetivo	8

### Capítulo 2 Dispositivo experimental

2.1 Dispositivo experimental	10
2.1.1 Sistema Mecánico	11
2.1.2 Sistema de Control	13
2.1.3 Medidor de velocidades angulares	13
2.1.4 Contenedor de agua	15
2.1.5 Sistema de adquisición de datos	17
2.1.6 Sistema de iluminación	19
2.2 Materiales empleados, construcción y pulido de las piezas	20
2.3 Desarrollo Experimental	23
2.4 Conclusiones	25

### Capítulo 3 Resultados experimentales

3.1 Descripción de los patrones de flujo encontrados	26
3.2 Líneas de corriente	31
3.2.1 Primer flujo, el flujo básico	32
3.2.2 El anillo	32
3.2.3 La dona	33
3.2.4 La fuente	35
3.2.5 Fuente con membrana	36
3.3 Frecuencias de transición	37
3.3.1 Esferas	38
3.3.2 Cilindros	41

<b>3.4 Factores que pueden afectar las frecuencias de transición</b>	<b>46</b>
3.4.1 Efecto del agua utilizada	46
3.4.2 Cambio en las condiciones de frontera	47
3.4.3 Forma y tamaño del recipiente	48
3.4.4 Distancia al fondo	49
3.4.5 Inmersión de la pieza	50
a.-) Cilindros	50
b.-) Esferas	50
3.4.6 Condiciones de mojado	51
a.-) Parafina	52
b.-) Grasa de silicón	53
<b>3.5 Los conos</b>	<b>55</b>
<b>3.6 conclusiones</b>	<b>58</b>

## **Capítulo 4 Análisis**

<b>4.1 Adimensionalización</b>	<b>60</b>
4.1.1 Cilindros	64
4.1.2 Esferas	67
<b>4.2 Discusión</b>	<b>73</b>
<b>4.3 Mojado</b>	<b>77</b>
<b>4.4 Geometría del contenedor de agua</b>	<b>78</b>
<b>4.5 Comentarios sobre el anillo</b>	<b>79</b>
<b>4.6 Conclusiones</b>	<b>83</b>

## **Capítulo 5 Conclusiones generales**

<b>5.1 Conclusiones</b>	<b>86</b>
<b>5.2 Perspectivas</b>	<b>88</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>89</b>

## Capítulo I

### Introducción

Este capítulo relata de manera breve los antecedentes del fenómeno en cuestión, describiendo los resultados de las únicas publicaciones encontradas hasta el momento, para finalmente plantear los objetivos del trabajo.

#### 1.1 Generalidades

Desde hace mucho tiempo los fenómenos que ocurren en la interfase de dos sustancias han despertado la curiosidad del ser humano. Esto se debe en gran medida, al cambio "repentino" de las magnitudes físicas que caracterizan a cada sustancia, como es el caso de la densidad, la composición, la viscosidad, conductividad, etc.

Uno de tantos fenómenos que tienen lugar en la interfase es el llamado efecto Weissenberg, que ocurre en los fluidos no newtonianos [1]. Éste se presenta cuando un cilindro que gira sobre su eje se sumerge parcialmente en un fluido no newtoniano, el eje del cilindro es perpendicular a la superficie del líquido y trepa por el cilindro (véase la figura 1.1). El efecto, a grandes rasgos, se explica por el hecho de que estos fluidos están constituidos por moléculas muy largas, por lo que se "enredan" en el cilindro ocasionando el acumulamiento de material en su base; la altura a la cual llega el fluido es proporcional a la velocidad angular del cilindro. De manera semejante el espagueti trepa al girar el tenedor.

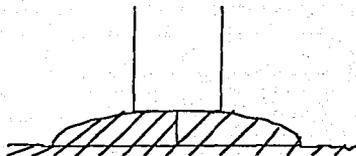


Figura 1.1 En el efecto Weissenberg el fluido trepa por un cilindro giratorio.

Sorpresivamente, en 1979, se observó un efecto parecido en el agua [2,3]. Hasta ese momento se decía "si se sumerge un cilindro en un fluido newtoniano y se hace girar sobre su eje perpendicular a la superficie libre, el fluido adyacente a la varilla formará una depresión [1]; véase figura 1.2.

El efecto encontrado en el agua se presenta de manera abrupta; es decir, hay una velocidad de rotación de transición crítica, mientras que el efecto Weissenberg es gradual, es decir, conforme se aumenta la velocidad angular del cilindro, el fluido trepa más.

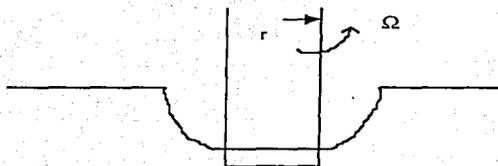


Figura 1.2 Un cilindro giratorio inmerso parcialmente en agua forma un vórtice. Éste ocasiona una depresión en la superficie del líquido proporcional a la velocidad angular del cilindro.

## 1.2 Antecedentes

Los primeros trabajos que exploran este comportamiento, sólo utilizan cilindros y únicamente estudian la vecindad de la interfase [2,3]. Encuentran dos patrones de flujo y describen su comportamiento. Uno de estos flujos es azimutal y lo llamaremos anillo, al otro, que recordó el efecto Weissenberg, lo llamaremos dona.

Se menciona en estos trabajos que cuando surge la dona, el anillo, desaparece. Se exploró la dependencia entre la frecuencia  $\Omega$  en que aparece y el radio del cilindro. Se encontró una ley potencial entre ambas variables [3].

$$\Omega = kr^{-2/3}, \quad (1)$$

donde  $\Omega$  representa a la frecuencia de transición o frecuencia crítica en que aparece el segundo patrón,  $k$  una constante de proporcionalidad, y  $r$  es el radio del cilindro.

Además, se describe en forma cualitativa el comportamiento de la dona si se cambia la tensión superficial del agua mediante tensoactivos, las condiciones de mojado y la inmersión del cilindro. Se aclara que la limpieza del cilindro es crítica para tener reproducibilidad de los datos.

En esos experimentos se colocó un cilindro limpio y seco en el eje. Posteriormente se llenó la cuba de agua, hasta que la superficie del agua tocó al cilindro. El llenado se realizó lentamente; se cuidó que no hubiera perturbaciones en la superficie del agua que provocarían un contacto prematuro entre el cilindro y el agua. Se hizo rotar al cilindro aumentando la velocidad angular en forma gradual. Es importante aclarar que el recipiente que se usó para contener el agua fue una caja cúbica de 20 centímetros por lado.

En un principio, no se observó ninguna perturbación de la superficie y el primer flujo que se tiene es axialmente simétrico.

Al seguir aumentando la velocidad angular del cilindro y se observó que aparecía un tenue anillo en la superficie del agua, apenas visible. Dicho anillo aumenta su radio proporcionalmente a la velocidad angular del cilindro  $\Omega$ , véase la figura 1.3.

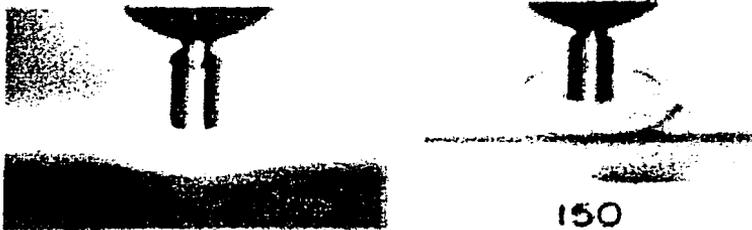


Figura 1.3 Segundo flujo, el anillo.

El anillo continuó creciendo hasta que a una frecuencia determinada (frecuencia crítica), apareció una perturbación y el anillo desapareció repentinamente. Es en esa frecuencia en que el fluido trepa alrededor del cilindro formando una especie de dona. La estructura de la dona comienza con una estructura de tipo espiral en su inicio (véase la figura 1.4), pero desaparece rápidamente dando lugar a una estructura más compacta que se asemeja a una dona.



Figura 1.4 La transición a la dona comienza con el surgimiento de una espiral.  
La dona aparece una vez que se pasa de dicha frecuencia de transición.

La dona crece en cuanto a su ancho y turbulencia, con la frecuencia; trepa muy poco al cilindro (figura 1.5). Aquí por turbulencia se entiende por la irregularidad del flujo. Los trabajos centraron su atención en el surgimiento de esta transición, encontrando una relación entre frecuencia de giro con el radio del cilindro y lo expresaron en la ecuación 1 de la página 5.

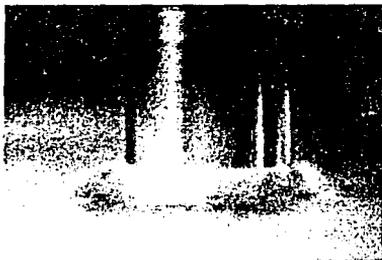


Figura 1.5 Vista lateral del tercer flujo, la dona.

### 1.3 Objetivo.

El objetivo del presente trabajo es determinar las variables relevantes que intervienen en el fenómeno y caracterizar los patrones de flujo.

Por tal motivo, se ha utilizado un conjunto de esferas, cilindros y conos, se han modificado las condiciones de frontera, es decir, la rugosidad, la forma del objeto, el mojado del sólido empleado, sus dimensiones, el recipiente que contiene el agua y la distancia al fondo.

En el capítulo 2 se describe el dispositivo experimental, los criterios para la selección de materiales, las condiciones de iluminación y visualización de los flujos, la forma en que se adquirieron los datos, la selección de instrumentación y el procedimiento experimental.

En el capítulo 3 se describen los flujos encontrados, tanto a nivel cualitativo, como recurriendo a las líneas de flujo observadas. Se presentan los resultados experimentales para cada flujo considerando cambios en las condiciones de frontera, mojado y de inmersión de las piezas.

En el capítulo 4 se hace un análisis de los datos y se hace una exploración de una posible adimensionalización.

El capítulo 5 contiene las conclusiones.

## Capítulo 2

### Dispositivo Experimental

En este capítulo se presentan las partes que integran el dispositivo experimental, se explica su funcionamiento y la forma como fueron hechas las mediciones. En términos generales el dispositivo consta de un recipiente para agua, un motor de velocidad variable, un sistema para determinar la velocidad angular, un eje de rotación "libre de vibraciones", un catetómetro para medir las distancias y un conjunto de sólidos de revolución (cilindros, conos y esferas) hechos de un material que no se oxida con el agua.

#### 2.1 Dispositivo experimental.

Esquemáticamente el arreglo se muestra en la figura 2.1. La descripción de cada parte del sistema se hará a continuación.

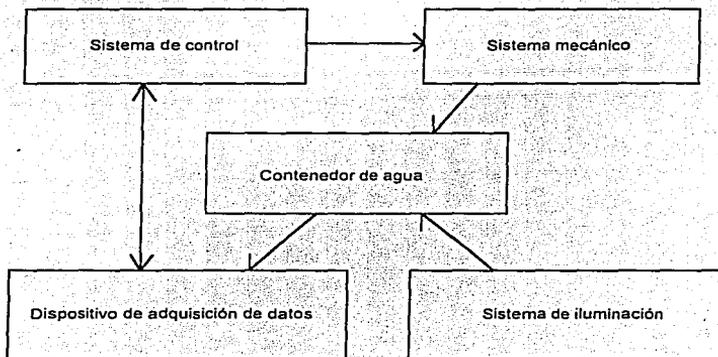


Figura 2.1 Diagrama de bloques del dispositivo experimental

### 2.1.1 Sistema mecánico:

El sistema mecánico esta integrado por:

Un motor de velocidad variable.

Estructuras metálicas independientes que soportan al sistema.

Eje para montar los sólidos de revolución.

Serie de poleas y banda.

El motor está montado sobre una estructura metálica que se encuentra sujeta al techo del laboratorio. El motor hace girar el eje que se usó para soportar a los cilindros, conos o esferas; para lograrlo, usa un juego de poleas unidas por una banda. El eje ha sido previamente rectificando y se encuentra montado en una base metálica, soportada por una mesa. El separar el motor del eje produce una disminución en la propagación de las vibraciones propias del motor y afectan al experimento, (ver figura 2.2)

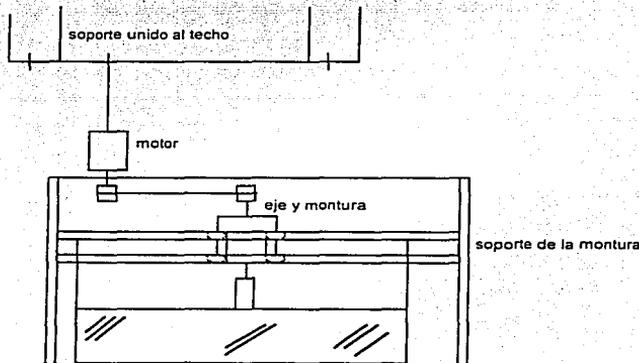


Figura 2.2 Dispositivo experimental, en este caso sólo se nombran las partes que componen al sistema mecánico. Las elipses corresponden a los lugares donde hay material plástico que amortigua las vibraciones

El eje soporta y mueve los sólidos de revolución durante el experimento; en su parte inferior se le puede atornillar la pieza con que se efectuará el experimento. En la parte superior del mismo, se encuentra una polea y un engrane. La polea está conectada al motor a través de una banda y el engrane es parte del sistema que mide la velocidad angular mismo, que se describe más adelante.

El eje está soportado por un armazón de aluminio y este último se encuentra atornillado a una estructura. Para evitar que la estructura amplifique las vibraciones, se coloca un material plástico entre ambos, así como entre las cabezas de los tornillos que se usan para sujetar el armazón y éstos. Además, se colocan tornillos con material plástico (figura 2.2) en algunas otras secciones de la estructura.

El motor fue fabricado por la compañía TALBOYS Engineering Corp. en su línea de T-line Laboratory Stirrer, modelo 106. Cuenta con tres ejes a los que se les puede regular la velocidad de giro (en revoluciones por minuto); el intervalo de velocidades que presenta cada eje es, para cada uno de ellos, de: 0 a 100 RPM, de 0 a 500 RPM y de 0 a 5000 RPM. Este último se acopló a nuestro dispositivo experimental. Además presenta un control que permite regular la velocidad del eje seleccionado, mediante una perilla que barre el intervalo, girándola hasta tres cuartas partes de una vuelta.

### **2.1.2 Sistema de control.**

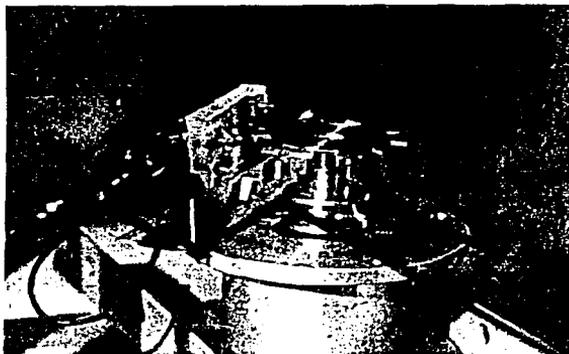
El motor descrito en el sistema mecánico varía la velocidad de rotación mediante el cambio de voltaje aplicado. Sin embargo, para mejorar esta regulación el motor se conectó a un variac (Powerstat tipo 3PN116C con un intervalo de voltaje de 0 a 140 volts a 10 amperes) obteniéndose un control más fino de la velocidad del motor; éste suaviza los picos que hay en la línea. Además, el variac se conectó a un regulador de voltaje, para suavizar aún más los cambios de voltaje.

Sin embargo, para tener a un objeto girando a una velocidad determinada, se opera el variac hasta que la lectura obtenida en el contador de vueltas indica la velocidad deseada.

### **2.1.3 Medidor de velocidades angulares**

Un motor de corriente alterna "tose", es decir, por lapsos de tiempo muy pequeños cambia su velocidad de giro en forma brusca. Aunado a esto, la velocidad nominal dada por el fabricante depende del voltaje de alimentación, así como de la torca que debe vencer el eje del motor (el motor que se empleó es de baja torca). Por esto se consideró necesario medir directamente la velocidad de giro de los sólidos de revolución, para lo cual se diseñó el siguiente dispositivo.

Sobre la armadura en la que está soportado el eje de giro de los sólidos de revolución, se montó un circuito que consiste de un fotodiodo infrarrojo y un foto detector (figura 2.3).



**Figura 2.3** Medidor de la velocidad angular, consta de un fotodiodo que emite continuamente luz en el infrarrojo y llega a un detector. Si el eje gira, el rayo se interrumpe con una frecuencia proporcional a la velocidad angular del eje, generando una señal pulsada que pasa a un frecuencímetro.

El fotodiodo emite luz que es detectada por el fotodetector; éste la traduce a voltaje. Si se pone un objeto entre el fotodiodo y el fotodetector de manera intermitente, se observa una serie de picos de voltaje correspondientes a las interrupciones de luz. Para que estos picos de voltaje correspondan con la velocidad angular del eje, se hace uso de una pieza dentada (engrane) montada sobre éste. Dicho engrane se coloca en forma perpendicular al circuito, de manera tal que sus dientes pasen entre el fotodiodo y el detector, correspondiendo diez pulsos a cada vuelta completa del engrane (o eje).

Los pulsos son detectados por un frecuencímetro Hewlett Packard de 9 dígitos con resolución de 1 Hz; de esta manera, la lectura sólo se

divide entre 10 para obtener la frecuencia de giro del eje. El frecuencímetro tiene varios tiempos de muestreo; la lectura resulta del promedio que obtiene durante el muestreo seleccionado. Se optó por un intervalo de un segundo.

Para alimentar al circuito del contador de vueltas se utilizó una fuente de voltaje directo modelo FP300 (fabricada en la UNAM), a un voltaje de operación de 7.5 Volts.

#### **2.1.4 Contenedor de agua**

Se trabajó con dos tipos de recipientes; una caja y una campana de vacío que se describirán a continuación. El uso de dos contenedores de agua es necesario para determinar el efecto de las fronteras y el tamaño del sistema.

La caja está hecha de vidrio de 9 mm de espesor y lucita de 12 mm. Las dimensiones son de un metro por lado formando un cubo, sin tapa superior. La base y dos paredes laterales son de lucita, las dos paredes laterales restantes son de vidrio, siendo su finalidad el permitir filmar y fotografiar a través de ellas; estas paredes de vidrio se encuentran una al lado de la otra.

La caja cuenta con flejes de aluminio, en las partes superior, inferior y media, que le dan mayor resistencia. La caja se encuentra sellada en todas las uniones con silicón.

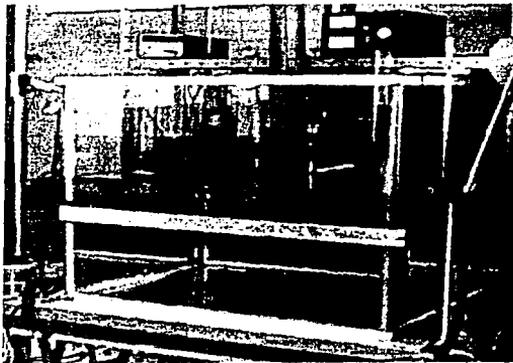
La campana de vacío esta hecha de vidrio, tiene forma cilíndrica y sus dimensiones son 22.6 cm de diámetro y 36.5 cm de profundidad. La

campana está soportada por una base de polipropileno puesta directamente en el suelo.

Para controlar el suministro de agua y evitar que su superficie se perturbe durante el llenado del contenedor de agua se procedió como sigue.

Para la caja, se usó una manguera de media pulgada, introducida en un tubo de vidrio de 5 cm de diámetro por 110 cm de largo (ver figura 2.4).

El tubo se colocó en una de las esquinas de la caja de manera perpendicular a la superficie, llegando a 10 cm arriba del fondo de la caja. El agua procedente de la llave se suministró lentamente a razón de 1 litro por cada diez segundos. Faltando uno o dos milímetros para que la superficie del agua tocara al sólido de revolución, se dejó de suministrar agua por la manguera y se colocó un embudo en el tubo (esto se hizo sin sacar la manguera) y se vertió agua mediante un vaso de precipitado. La manguera amortiguó las perturbaciones del agua vertida en el interior del tubo evitando la perturbación de la superficie del agua y el contacto anticipado de la superficie del agua con el sólido a usar en el experimento.



**Figura 2.4** Dispositivo experimental. En la esquina derecha se observa el tubo por el que se introduce la manguera usada en el llenado de la caja.

Para la campana, se utilizó una bureta graduada, cuya parte inferior tiene una manguera de hule de 3 mm de diámetro que entra a la campana y sigue las paredes de la misma hasta el fondo. El agua se suministró a razón de un mililitro cada dos segundos; faltando de dos a tres milímetros para que la superficie tocara al sólido de revolución en estudio, se cerró más la llave hasta llegar a tener un flujo de 1 ml cada 3 minutos. De esta manera cuando la superficie de agua toca al sólido, la superficie no presenta oscilaciones.

#### **2.1.5 Sistema de adquisición de datos**

El sistema de adquisición de datos está compuesto por varias partes. Se contó con un catetómetro montado en una escala, para medir distancias, una cámara de video, trazadores.

El catetómetro es una especie de catalejo que permite ver objetos que se encuentran a distancia, sin embargo cuando se usa para ver objetos que se encuentran a menos de un metro permite ver detalles de su estructura, como una lupa.

Dicho dispositivo se monta sobre una base con escala similar al calibrador vernier, que se ve complementada por otra que se encuentra en el soporte que sostiene a la base y que está graduada en milímetros. La base se puede mover mediante un engrane que coincide con el riel que está a lo largo del soporte (figura 2.5).

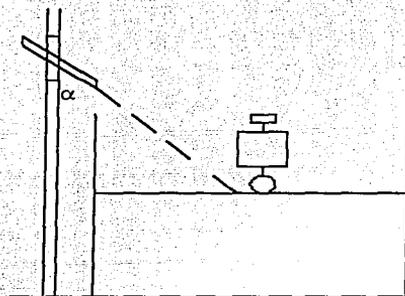


Figura 2.5 Uso del catetómetro en la adquisición de datos; el soporte presenta una escala y la distancia que se desplaza el catetómetro es proporcional al cambio en el radio del anillo.

Para poder medir cómo cambia la posición de la frontera de algún flujo, el ocular del catetómetro cuenta con una línea que fue usada como referencia. Desplazando el catetómetro a lo largo de la escala del soporte se pudo determinar el cambio de posición de la frontera del flujo. Primeramente se hace coincidir la línea del ocular con la frontera

del flujo para que cuando por alguna razón no coincida con dicha referencia, se mueve el catetómetro y así se mide el cambio ocurrido.

La cámara de vídeo usada fue una de marca Sony modelo CCD-90 de 8 mm. Su uso fue para el estudio de las líneas de flujo existentes. Ya que se filmaba el experimento, con la ayuda de trazadores se visualizaron las líneas de flujo en la vecindad de la zona de interés.

Los trazadores utilizados fueron; lápiz tinta, permanganato de potasio y polvo. El lápiz tinta, es un lápiz comercial, cuya mina de color morado es soluble en agua.

El polvo permitió ver que pasa en la superficie del fluido conforme giraba el sólido. El lápiz tinta y el permanganato de potasio se usaron para ver el flujo bajo la superficie. El más empleado fue el permanganato de potasio, que se inyecta a través de un tubo de vidrio cuyo final está a pocos centímetros del sólido en estudio. El tubo se conectó a una bureta que graduó el flujo del trazador. El lápiz tinta se usó para ver los flujos existentes cerca del fondo del recipiente.

#### **2.1.6 Sistema de Iluminación**

De los patrones observados, el único que requiere de condiciones especiales para ser visible es el anillo. Esto se debe a que dicho patrón es visible sólo a contraluz; éste resalta por la deformación de los reflejos en la superficie del agua.

La iluminación de preferencia no debe ser muy fuerte, ya que de lo contrario molesta la vista después de cierto tiempo de estar observando.

Se usaron dos lámparas, una de 75 W y otra de 150 W; la segunda es un foco luz de día. La primera se usó para ver el anillo aprovechando el reflejo producido en la superficie del agua; esta lámpara es importante sobre todo cuando el radio del anillo es similar al radio de la base del cilindro (donde el anillo se forma). La segunda se usó para eliminar las sombras que pudieran ocultar al anillo cuando éste apenas empieza a ser visible (cuando el anillo es claro, hay poca diferencia si esta última lámpara está o no apagada).

La iluminación se aprovecha sólo en el flujo del anillo. Para el resto de los flujos resulta innecesaria. Cuando se requiere fotografiar al anillo, la iluminación mencionada no es suficiente y conviene sustituir las lámparas de 75 y 150 W por lámparas de 150 W y 500 W, respectivamente. Además, se añade otra lámpara de 500 W de luz blanca, que se coloca a un lado de la cámara, evitando que el plano captado por ésta se encuentre oscuro.

## **2.2 Materiales empleados, construcción y pulido de las piezas.**

Para poder hacer las piezas se buscó un material inoxidable, que existiera en el mercado, que no tuviera poros y cuyas propiedades mecánicas permitieran trabajarlo en el torno. Con estas condiciones se eligió entre el duraluminio, el latón y el acero inoxidable, los cuales existen en forma de barras y cuya calidad se controla para que no

presenten poros, cosa que no ocurre con el bronce. Sin embargo, a pesar de que el acero inoxidable presenta las mejores propiedades para un maquilado, tiene varios inconvenientes, como la necesidad de un esmeril adecuado para afilar la herramienta con que se hacen las piezas, además, las piezas obtenidas con él son de tres y cinco veces más pesadas que si se hubiera hecho de latón o aluminio, respectivamente.

El duraluminio se eligió entre los anteriores materiales por ser fácil de conseguir, aunque tiene la desventaja de ser un poco más caro y sus propiedades mecánicas no son tan buenas para trabajarlo en el torno. Presenta la gran ventaja de que es el más ligero de los materiales accesibles y esto permitió que se alcanzaran velocidades angulares mayores, ya que el motor empleado es de baja torca. De dicho material se construyeron un juego de diez cilindros de diferentes diámetros, un juego de tres conos y un juego de ocho esferas de distintos diámetros.

Con la finalidad de explorar el efecto que tendría otro material en los patrones observados se usó también latón. Aunque se oxida con el agua, sufre una oxidación mínima (si se compara con la del fierro) y sólo se observa después de una inmersión muy prolongada (un día). Sus propiedades mecánicas lo hacen un buen material para el maquinado de las piezas; se hicieron cuatro esferas.

Para construir el eje de rotación, se mandó rectificar una barra de acero de 3/4 de pulgada de diámetro y se ajustó a un par de baleros

soportados por una armadura hecha de aluminio. Los baleros fueron separados entre sí aproximadamente 5 cm, lo que permitió eliminar en forma considerable la precesión del eje. En la parte superior del eje se disminuyó el diámetro de la barra a 5/16 de pulgada, con la finalidad de usar las poleas disponibles, en la parte inferior se hizo una cuerda de 1/2 de pulgada estándar en la que se atornillan las piezas. Éstas, en el momento de maquinarse, se montan en dicha cuerda con el propósito de que estén alineadas con el eje, evitando así vibraciones indeseables. Es decir, teniendo el trozo de barra a maquinar, se hace primero la cuerda para atornillar la pieza al eje y se procede a conformarla, estando ésta montada en el eje.

Las piezas que se pulieron a espejo fueron los cilindros y los conos. Para llegar a este pulido se partió de la pieza recién acabada, la cual se lijó primero con una lija de agua del 320; posteriormente se cambió de lija al 400 y se terminó con lija del mismo número, pero totalmente desgastada. Para decidir el cambio de lija se consideró que los rayones en la piezas fueran todos de la misma profundidad, de esta forma se fue disminuyendo el tamaño de los rayones. Una vez terminado con el proceso de lijado, se procedió a lavar la pieza con agua para quitar los restos de esmeril. Seca la pieza, se continuó puliendo con pulidor de metales (Brasso) y un paño de calidad controlada. En esta parte fue necesario usar una lámpara para poder ver bien los rayones. Terminado el pulido con Brasso, se pasó a pulir con alúmina. En este caso, como sólo se contaba con un tamaño de grano, el proceso fue muy lento, es decir, sólo se tenía alúmina de 0.05 micras, por lo que el proceso llevó varias horas por pieza.

El pulido se llevó alrededor de un mes para el juego de 10 cilindros. Para cada cono se empleó de 7 a 8 horas de pulido con alúmina por lo que no tienen el acabado de los cilindros. El pulido para la parte curva de cada objeto, se realizó montando la pieza sobre el eje alrededor del cual giró durante el experimento. Se hizo girar, a velocidad media (de 10 a 15 Hz), apoyando la lija o el paño con la alúmina sobre la superficie. La lija o el paño se montaron sobre un material plano para garantizar que el desgaste de la superficie fuera uniforme. Para el pulido de las partes planas, se fijó primero el paño o lija sobre una superficie plana (como un vidrio) y, sujetando la pieza con firmeza, se procedió a pasarla sobre el paño húmedo con movimientos giratorios.

### **2.3 Desarrollo experimental**

Antes de comenzar el experimento, fue necesario asegurarse de que la pieza o sólido de revolución (cilindro, cono o esfera) estuviera limpia y seca. Para lograr esto, se colocó la pieza en el eje y se le pasó un paño húmedo con acetona grado analítico; posteriormente se hizo girar a alta velocidad (aproximadamente 100 Hz), por cerca de un minuto.

Finalmente se procedió a llenar el contenedor con agua, se tuvo la precaución de no mojar la pieza en el proceso. Una vez que la base del sólido toca la superficie del agua, se interrumpe el llenado. La pieza quedó siempre al ras de la superficie con excepción de los conos. Para estos últimos se varió la profundidad de inmersión de la pieza, para tener una sección transversal predeterminada.

Ya que se consiguió lo anterior, se fijó el nivel de contacto entre el agua y el objeto con el catetómetro, para marcar el "radio cero" del anillo como se describe en el capítulo 3. Se hizo girar cada pieza accionando el variac, se incrementó la velocidad angular lentamente y se observó a través del catetómetro.

Inicialmente el fluido gira uniformemente alrededor del cilindro. A cierta frecuencia que mas adelante se caracteriza aparece un segundo flujo. En éste se observa una pequeña sombra que se aleja de la base del objeto; se siguió su avance con el catetómetro desplazándolo sobre su base. Dicho flujo se explica más adelante. Cuando se dio el tercer flujo, la sombra, que es el perfil del anillo, se hizo menos clara y se dejó de medir. Por lo que el catetómetro dejó de ser útil.

Se continuó aumentando la velocidad de rotación, se observaron otros flujos que no se habían reportado con anterioridad. Por lo que se registró la velocidad de rotación con que aparecen. De ahora en adelante llamaré "corrida" a realizar el experimento pasando por todos los flujos.

Al finalizar se limpiaron y secaron las piezas. El secado fue por centrifugado. La siguiente corrida no usó la misma pieza, sino otra de dimensiones diferentes (para dar tiempo a que se secase bien la pieza usada). Esto se hizo con la finalidad de tener condiciones análogas y ver la reproducibilidad de cada transición.

Como se mencionó anteriormente, para ver los efectos de frontera se contó con dos recipientes de agua, uno de ellos que llamamos la campana, por ser una campana de vacío, y el otro una caja cúbica de 1 metro cúbico. La campana se usó únicamente con los cilindros: el tamaño de ésta permitió ver si existía algún efecto en cambiar de agua destilada por agua de la llave. Como no se observó un cambio significativo, se utilizó agua de la llave en la caja; en ella se realizaron los experimentos con todas las piezas (conos, esferas y cilindros), así como las variaciones en las condiciones de frontera, de distancia al fondo, efectos de mojado y rugosidad, que más adelante se explican.

#### **2.4 Conclusiones**

Con el dispositivo experimental aquí descrito se logró aislar a la pieza con la que realizamos el experimento de vibraciones generadas por el motor. A velocidades mayores a 100 Hz este aislamiento falla. Afortunadamente para los patrones encontrados a esta frecuencia la vibración no los afecta.

En cuanto a la reproducibilidad de los datos, el que las piezas se encuentren un poco húmedas o no se sequen bien, sí es crítico. El crecimiento del anillo sigue siendo lineal, pero cambia la velocidad de crecimiento con la velocidad de rotación.

## **Capítulo 3**

### **Resultados experimentales**

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos.

Primero se hace una descripción de los patrones de flujo encontrados, se describen las líneas de flujo que pueden producir cada patrón y se presenta en tablas las frecuencias a las cuales ocurre la transición entre cada patrón. Finalmente, se construye una relación empírica para describir el comportamiento de cada flujo con respecto a los parámetros relevantes, como son el tamaño de las piezas, las condiciones de mojado, la rugosidad, la inmersión y las condiciones de frontera. En algunos de los casos sólo se da una descripción cualitativa del comportamiento encontrado.

#### **3.1 Descripción de los Patrones de Flujo Observados.**

En cada corrida se encuentran regímenes de flujo bien definidos y claros, que en esta sección se describen. Es importante aclarar que durante la presente descripción se toma el caso de la esfera que es el sólido que presenta la máxima cantidad de flujos; los otros sólidos tienen menos transiciones, pero el orden en que aparecen los flujos es el mismo, por lo que se hará la aclaración de las diferencias pertinentes en cada caso.

Una vez colocada la esfera en el eje sobre el cual gira, se procede a llenar la cuba de agua hasta que toque a la esfera, naturalmente se forma un menisco en la línea de contacto de la esfera y el agua, pero si vemos el nivel del agua y la posición de la esfera notaremos que la

esfera queda tangente a la superficie del agua. Se hace rotar la esfera, usando el variac, y se aumenta la velocidad angular en forma gradual.

Al principio, no se observan perturbaciones en la superficie del agua; el flujo tiene simetría axial y se ilustra en la figura 3.1.



figura 3.1 Flujo con simetría axial, no hay perturbación en la superficie del fluido y las líneas de flujo forman círculos concéntricos a la esfera.

Si se continúa aumentando la velocidad angular de la esfera se observa que a una frecuencia denotada por  $\Omega$ , aparece un anillo que sólo es visible a contraluz, por la deformación de las sombras que hay en la superficie del agua. Dicho anillo crece en diámetro con la velocidad angular de la esfera (véase la figura 3.2) y se ve como una ligera perturbación en la superficie.



Figura 3.2 El anillo

El anillo continúa creciendo hasta que a una frecuencia  $\Omega_2$ , se contrae repentinamente (no desaparece; en contraste con lo reportado en la ref. 2) y se observa una estructura irregular con apariencia espiral. Esta figura es más fácil de observar y retratar para los cilindros y conos que para la esfera, por lo que presentamos la imagen de este patrón en cilindros y conos (figura 3.3).



Figura 3.3 Transición ondas espirales

Con un poco que aumente la frecuencia, la espiral desaparece y el agua sube en forma parcial a la esfera, formando una especie de dona turbulenta. La estructura crece en cuanto a anchura con la

frecuencia. No se observa cambio en cuanto al nivel que alcanza para los casos de cilindro y esfera (véase figura 3.4). En el caso de los conos, el agua puede trepar por el cono hasta una altura estimada de dos a tres centímetros. La dona crece ligeramente con la velocidad de rotación; el flujo ahí es turbulento y se observan burbujas de aire.

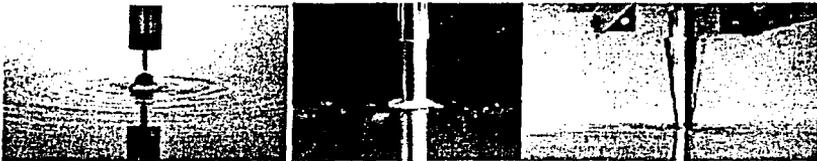


figura 3.4 La dona en los distintos sólidos

Cuando la frecuencia alcanza el valor  $\Omega_3$ , la dona desaparece y el agua trepa por la esfera, formando una película muy delgada, llegando hasta su ecuador. En éste se desprende saliendo en forma de pequeñas gotas, como una fuente, y de manera tangencial como lo muestra la figura 3.5. Hay diferencias en los otros sólidos que se comentarán inmediatamente después de describir el caso de la esfera. Al aumentar la velocidad angular no se observan cambios aparentes en lo que respecta a la altura del agua sobre la esfera; es decir, la fuente siempre sale del ecuador.

Para los cilindros, la altura que alcanza la fuente es de aproximadamente 0.5 cm y permanece constante. En los conos, para ángulos menores de  $15^\circ$ , la altura a la cual llega el agua depende de la velocidad de rotación, es decir, a mayor velocidad la altura de la

fuerza es mayor. Para ángulos mayores, la altura a la que se desprende la fuente es donde se trunca el sólido (figura 3.5).

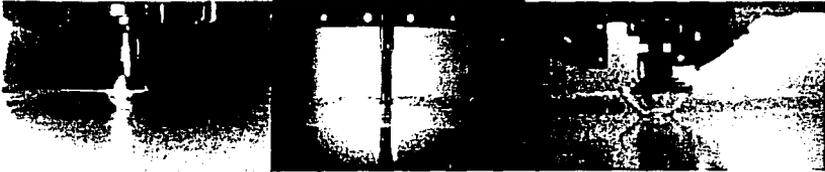


Foto 3.5 La fuente en los distintos sólidos.

En la siguiente frecuencia  $\Omega_4$ , que es muy clara para las esferas, poco clara en los cilindros y no se ha observado en los conos, se forma una película delgada de agua. Ésta nace en la superficie del objeto, -para el caso de las esferas del ecuador-, y se curva al alejarse del sólido, la curvatura de la película depende fuertemente de la velocidad de giro del sólido.

A dicho flujo se le llamó fuente con membrana y se muestra en la figura 3.6. Este flujo se presenta de forma intermitente, cuando apenas comienza, y da la impresión de que se ha abierto un paraguas, por lo repentino y la forma que adopta en la esfera. El radio de la membrana de la fuente crece con la velocidad angular y con cualquier perturbación comienza a oscilar. Conforme va creciendo se va curvando hasta que llega a un radio máximo, en el cual prácticamente toca la superficie del agua. A partir de este punto, conforme aumenta la velocidad angular del sólido, disminuye su radio.



Fig. 3.6 Fuente con membrana. La de la izquierda muestra la membrana a una velocidad de giro muy cercana a su aparición. La foto de la derecha cuando la membrana es totalmente horizontal y comienza a disminuir su radio por la gran velocidad de giro.

Cuando la membrana desaparece las gotas son lanzadas con un ángulo positivo con respecto a la horizontal. Para los conos no se observa la membrana.

Una de las limitantes del experimento es la velocidad máxima de giro que se le puede dar a cada pieza. Esto está determinado por dos factores. Uno es la parte mecánica, que la forman el motor y los baleros, con la que podemos alcanzar hasta 350 Hz (21 000 RPM), en condiciones óptimas. El otro factor es debido a las dimensiones del contenedor de agua. Al aumentar la velocidad angular, las gotas salen del recipiente, corriéndose el riesgo de mojar la fuente de alimentación del circuito contador.

### 3.2 Líneas de corriente.

Para describir las líneas de corriente usamos trazadores y filmamos el experimento; como se mencionó en el capítulo anterior se usó polvo, lápiz tinta y permanganato de potasio. El polvo se esparció por la superficie del agua. El lápiz tinta y la disolución de permanganato se

usaron bajo el agua; como en ambos casos la densidad del trazador es ligeramente mayor a la del agua, éste sube sólo cuando hay un flujo ascendente.

### 3.2.1 Primer flujo, el flujo básico

El flujo previo a la aparición del anillo es semejante a un vórtice potencial, es decir, el fluido gira con la velocidad angular del sólido en sus inmediaciones y decae la velocidad del fluido con la distancia. Las líneas de corriente son círculos concéntricos a la superficie del sólido (figura 3.7).

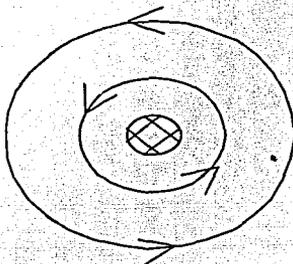


Figura 3.7 Flujo de vórtice.

### 3.2.2 El anillo

Cuando ocurre la primera transición, se presentan dos regiones de flujo en la vecindad del sólido. En la región cercana al sólido, dentro del anillo, el flujo tiene dos componentes. Una radial y positiva, la otra, angular; las líneas de corriente son espirales que divergen del sólido y llegan a un círculo límite.

En la región externa al círculo límite, el flujo tiene una componente angular con el mismo sentido que se observa dentro del anillo, pero, la componente radial del flujo tiene el signo contrario; otra vez, las líneas

de corriente son espirales que convergen al círculo límite dándole a este un carácter de "ciclo límite", el anillo, ver figura 3.8.

Lo anterior se observó, al seguir partículas de polvo suspendidas en la superficie del agua, las cuales muestran que a partir de unos centímetros fuera del anillo cualquier partícula se ve atraída hacia éste, pero al alcanzar la frontera del anillo gira en él durante algún tiempo y posteriormente se pierde (se piensa que se hunde). Mientras que en la parte interna del anillo es más difícil observar por la ausencia de partículas; ocasionalmente se ven pequeñas burbujas que salen radialmente lo que indica que hay espirales divergentes al sólido

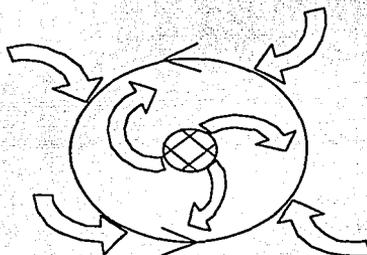


Figura 3.8. Líneas de flujo para el anillo

### 3.2.3 La Dona

Para describir a la dona, se tiene que recordar el principio de Bernoulli. La presión del fluido en contacto con un objeto que se mueve, es menor que la presión lejos del objeto, si el fluido tiene una velocidad menor lejos del objeto. La consecuencia de este gradiente de presión es que el fluido se "abulte" en la región de contacto.

La transición a dona muestra que el anillo no puede mantenerse estable al excederse el influjo más allá de un valor crítico. Así, el agua que llega, sube en forma abrupta y cae inmediatamente, esto forma una celda que rodea al objeto a la que llamamos dona (ver figura 3.9). El flujo en la dona es turbulento.

La diferencia de presiones existe desde antes que surja el anillo, y se corrobora al ver las líneas de flujo por debajo de cualquiera de los sólidos, para ello se utiliza una solución concentrada de permanganato de potasio; el influjo existe desde poco antes de que el anillo se forme, aumentando el mismo conforme aumenta la velocidad angular del sólido. Esto es notorio por el adelgazamiento de las líneas de color, si se mantiene constante el flujo del trazador que se controla por la llave de la bureta conectada al tubo que inyecta al trazador.

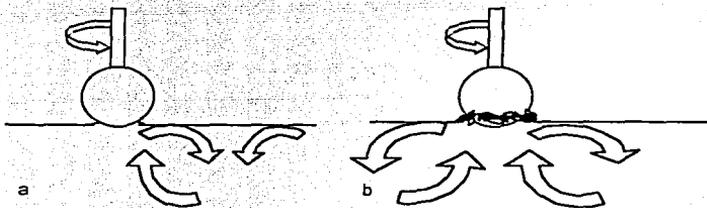


Figura 3.9. Líneas de flujo observadas por debajo del sólido. a) para el caso del anillo b) para el caso de la dona

### 3.2.4 La Fuente

Para la tercera transición las líneas de flujo son más pronunciadas que en la dona. Cerca del sólido, en la superficie, el flujo es radial entrante, es decir, las espirales entrantes son muy pronunciadas y casi son rayos radiales. Por debajo de la superficie, se tiene un gran bombeo hacia arriba, exactamente por debajo del sólido. Lo anterior queda más claro en la figura 3.10.

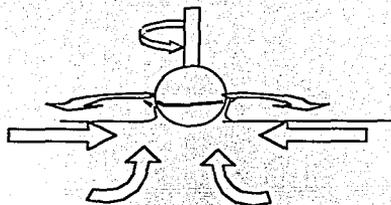


Figura 3.10. Flujo de la fuente

El fluido que se mueve en espirales que convergen en el objeto en rotación tiende a ir a la región de menor presión, donde la velocidad tangencial es mayor. En el caso de conos es la parte más alta (su base) y en esferas es el "ecuador". Para cilindros, de sección constante, el fluido asciende a una altura tal que equilibra la gravedad. En la altura máxima el fluido no se acumula, si no que es arrojado tangencialmente. El chorro resultante se rompe en gotas, dando lugar a la fuente. El bombeo aumenta conforme se aumenta la velocidad del sólido.

### 3.2.5 Fuente con membrana

Se ha descrito como el flujo tangencial se rompe en gotas. Conforme se aumenta la velocidad angular  $\Omega$ , el flujo ascendente aumenta proporcionando un mayor gasto en la salida del chorro (por ejemplo el ecuador en esferas). Esto origina que a partir de cierta  $\Omega$  se mantiene la "cohesión" del fluido, después de separarse del sólido, formando la membrana. Por continuidad, ésta se hace más delgada con la distancia radial hasta que se rompe en gotas.

Este comportamiento es mucho más notorio en esferas. En los conos, el aumento constante del área transversal con respecto a la altura, hace que la membrana no se pueda observar ya que si se aumenta  $\Omega$ , la altura de la fuente aumenta y con ello la sección transversal por lo que nunca se llegó a lograr un gasto ascendente suficiente para formar la membrana.

Un efecto que tiene la membrana formada es el de reducir la componente vertical del flujo al llegar a la zona de eyección. La membrana crece de manera proporcional con  $\Omega$  aunque su forma depende de varios factores; como es la gravedad, la fuerza centrífuga y posibles perturbaciones debidas al rompimiento de las gotas en la orilla de la misma. Esto hace que sea difícil de determinar su área en función de  $\Omega$ .

A partir de cierta  $\Omega$ , la membrana oscila radial y verticalmente en forma irregular. Más adelante este comportamiento desaparece y su área empieza a disminuir, hasta desaparecer.

El flujo subsecuente, para valores mayores de  $\Omega$ , es una fuente con una inclinación vertical cada vez más grande (ver figura 3.11).

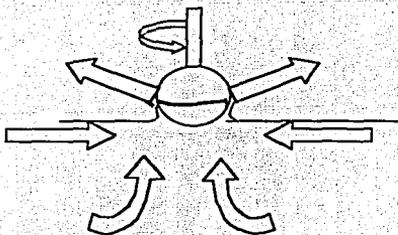


Figura 3.11 Líneas de flujo para la fuente en donde desaparece la membrana

### 3.3 Frecuencias de transición

En esta parte se presentan en forma de tablas las frecuencias a las que ocurre cada transición.

Para el anillo es difícil ver cuando aparece, debido a su cercanía al sólido, el menisco de mojado y las sombras, por lo que se aprovechó que su crecimiento es lineal para determinar la frecuencia de transición. Esta frecuencia de transición representa también la frecuencia a la cual el diámetro del anillo coincide con el diámetro de la sección transversal del área de contacto del sólido. Las frecuencias en las que se presentan las otras transiciones, no presentaron tal inconveniente. Los parámetros de las gráficas que a continuación se presentan consideran a la frecuencia crítica de la transición  $\Omega_c$  contra el diámetro del objeto (cilindro o esfera). La presentación es primero

para las esferas y después para los cilindros comentando brevemente algunos puntos de los resultados expuestos.

### 3.3.1 Esferas

**Tabla 3.1** Frecuencias de transición en Hz de los flujos para las esferas. Las siglas IM implican que el motor no dio la velocidad necesaria para ver el flujo y N R es la no reproducibilidad de la medida.

diámetro mm	Anillo $\Omega_1$	Dona $\Omega_2$	Fuente $\Omega_3$	Fuente Membran a $\Omega_4$	Mem. Oscilante $\Omega_5$	mem no osc. $\Omega_6$	desap. mem $\Omega_7$
9.55	40.6 ± 5.6	129.9 ± 2.3	170.3 ± 2.3	216.5 ± 3.5	IM	IM	IM
10	57.4 ± 1.3	90.7 ± 1.5	132.9 ± 2	177 ± 2.1	IM	IM	IM
12.35	30.1 ± 1.3	84 ± 2.5	106.7 ± 2.1	126.6 ± 0.9	N R	N R	257
14.2	24.8 ± 1.7	71.2 ± 1.2	79.1 ± 8.4	116.2 ± 2	N R	N R	231.5
15	23.6 ± 4.4	64.4 ± 7.9	66.9 ± 6.9	103 ± 1.4	174	N R	210
16.7	27.8 ± 3.2	57.1 ± 5.4	62.4 ± 0.5	93 ± 0.9	108	120	192
17	31.4 ± 7.2	56.6 ± 2.5	61 ± 4.1	92.8 ± 2.5	N R	N R	200
20	22.5 ± 2.6	No se da	47.3 ± 1.4	74.1 ± 0.7	101	128	161.6
23.8	12 ± 1.5	No se da	45 ± 2.3	63.2 ± 0.7	71.4	101	130
24.2	18.1 ± 1.1	No se da	38.9 ± 2.7	62.6 ± 2.0	77	111.8	153
24.9	22.8 ± 0.5	No se da	45 ± 1.1	60.4 ± 0.3	64.4	103.8	136
30	12.3 ± 0.8	No se da	36.9 ± 1.0	53.5 ± 0.4	54.5	N R	N R
35	10.8 ± 1.2	No se da	30.9 ± 1.6	48.4 ± 0.8	N R	N R	N R
38.6	15.2 ± 2.1	No se da	28.3 ± 3.4	46.7 ± 2.1	48.8	N R	94.4
43.5	8.1 ± 0.5	No se da	25.9 ± 2.1	No se da	No se da	No se da	No se da
49.5	8.7 ± 1.3	No se da	24.7 ± 1.0	No se da	No se da	No se da	No se da

Graficando los datos de la tabla 3.1 en escala log-log (ver figuras 3.12 a 3.15), se observa una línea, lo que indica una relación de la forma  $\Omega_c = k d^{-m}$  siendo  $k$  y  $m$  constantes a determinar. Se presenta el coeficiente de correlación para el exponente propuesto, y los valores de  $k$  y  $m$  resultantes, en la tabla 3.2.

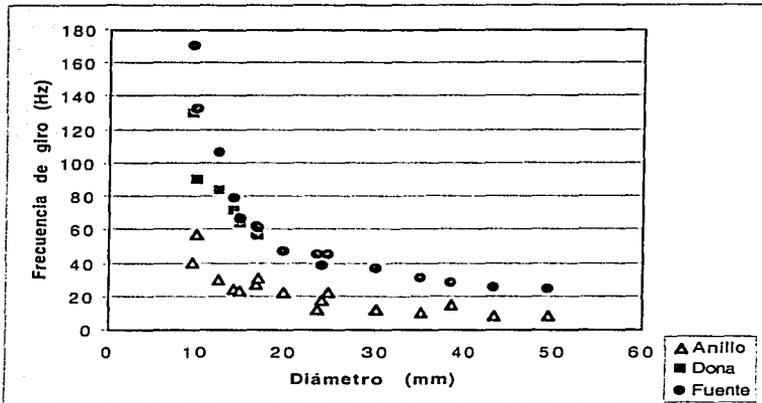


Figura 3.12 Presenta las tres primeras transiciones para las esferas

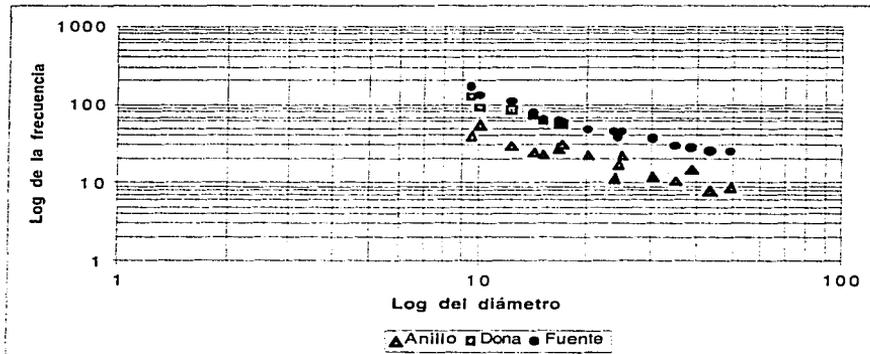


Figura 3.13 Representación logarítmica de los primeros tres flujos para las esferas

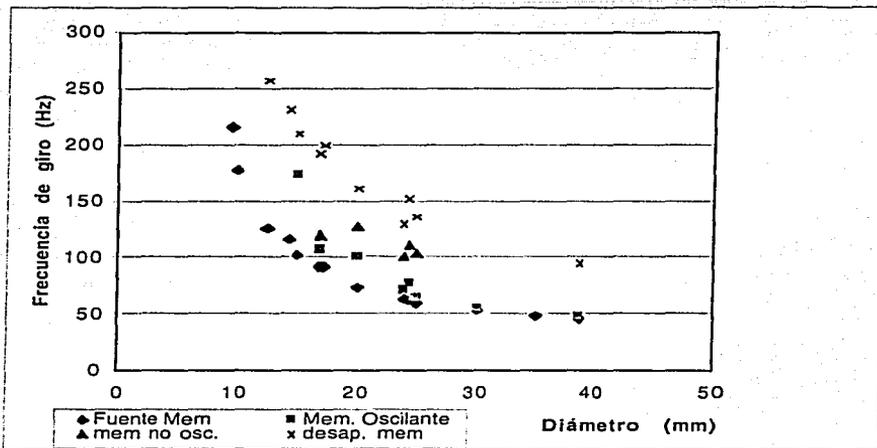


Figura 3.14 Presenta las últimas 4 transiciones, encontrando que cuando la membrana deja de oscilar no se sigue el mismo comportamiento que en los otros flujos

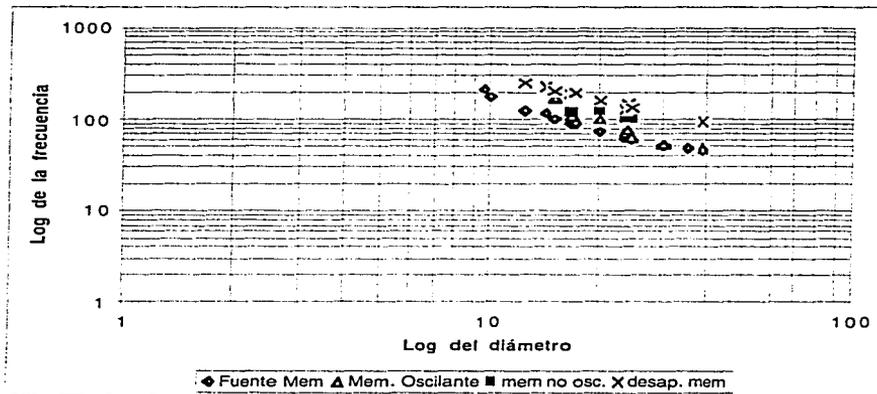


Figura 3.15 Representación logarítmica de los últimos 4 flujos.

**Tabla 3.2** Parámetros calculados para cada flujo  
y sus coeficientes de correlación

Flujo observado	exponente m	k	Coefficiente de correlación
anillo	-1.01	438.8	0.86
dona	-1.21	1746.2	0.91
fuelle	-1.11	1563.9	0.95
fuelle con membrana	-1.06	1946.4	0.97
membrana oscilante	-1.29	4646.8	0.9
desaparece membrana	-0.89	2373.9	0.98

Es interesante notar que el exponente correspondiente al anillo, la fuente y la fuente con membrana es casi el mismo, mientras que para la dona y la membrana oscilante es otro el exponente que las describe. Hay una transición con un comportamiento distinto a los demás, que es el caso del exponente que describe como desaparece la membrana.

Hay que señalar que se utilizó agua de la llave para los experimentos realizados en la caja, pero se tuvo la precaución de secar la pieza inmediatamente después de terminar cada corrida. Si la pieza se seca por evaporación, en su superficie quedan pegadas las sales que contiene el agua, provocando una mayor dispersión en los datos. Para la realización del secado, primero se centrifugó la pieza para posteriormente pasarle un paño húmedo con acetona analítica.

### 3.3.2 Cilindros:

En el caso de los cilindros se trabajó con distintos contenedores de agua. El primero fue una campana de vacío y como líquido de trabajo se usó, tanto agua destilada como agua de la llave. En el segundo caso el contenedor de agua fue un recipiente cúbico, la caja; en ella

sólo se usó agua de la llave. Los resultados se encuentran resumidos en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3** Transiciones encontradas para los cilindros en (Hz). Donde no se indica el recipiente es por que se usó la campana. Las siglas IM implican que el motor no dio la velocidad necesaria para ver el flujo y N R es la no reproducibilidad de la medida.

Diámetro (mm)	Agua destilada			Agua de la llave		caja Agua de la llave		
	Anillo $\Omega_1$	Dona $\Omega_2$	Fuente $\Omega_1$	Anillo $\Omega_1$	Dona $\Omega_2$	Anillo $\Omega_1$	dona $\Omega_2$	Fuente $\Omega_1$
3.9	96.2	215.2		106	210.2	60.3	215.6	IM
7.4	57.8	133.3	327.6	66.4	112.6	No se realizó	No se realizó	No se realizó
9.85	36.7	91.3	229.3	47.1	91.4	29.1	88.8	217.3
12.4	26.6	65.7	174	33	66	22.2	66.7	172.5
15.2	20.2	53.5	134.1	No se realizó	No se realizó	N. R.	50.3	159.2
19	N R	37.5	130	13.1	33.4	12.6	36.5	124.2
21.6	12.5	32.4	103.2	No se realizó	No se realizó	12.9	No se realizó	No se realizó
25.3	12.1	25.2	78.6	13	25.2	7.8	22	113.3
28.75	10.7	20.9	71.9	No se realizó	No se realizó	No se realizó	No se realizó	No se realizó
30.5	8	19	59.7	12	19.6	8.7	16.6	77.8

La representación gráfica de los resultados de la tabla se encuentran en las siguientes figuras. Por conveniencia, primero se muestra la gráfica en escala lineal y posteriormente en escala logarítmica.

### Agua destilada campana de vacío

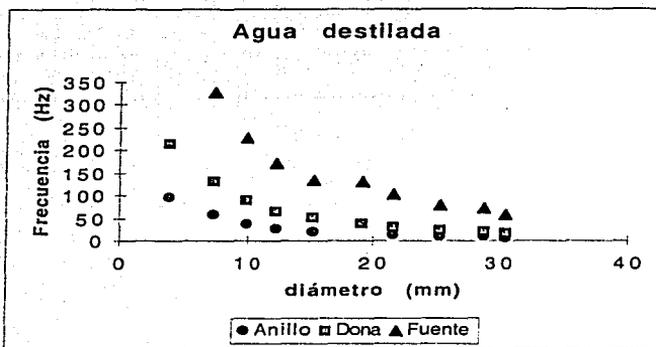


Figura 3.16

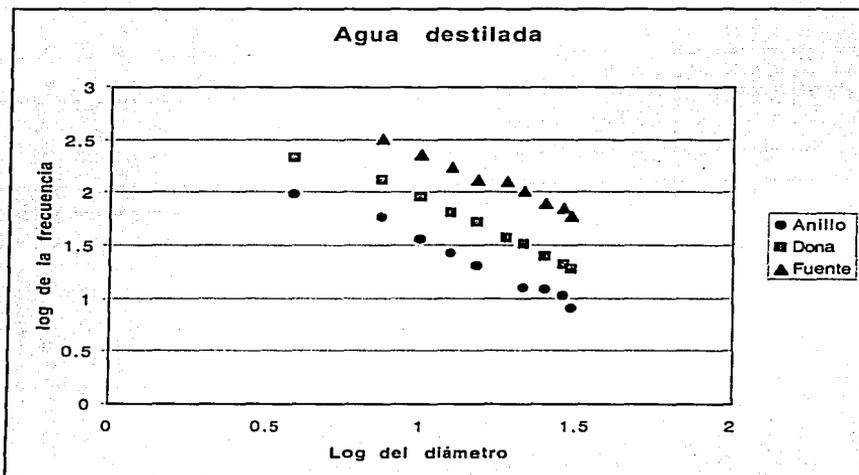


Figura 3.17

### Agua de la llave campana de vacío

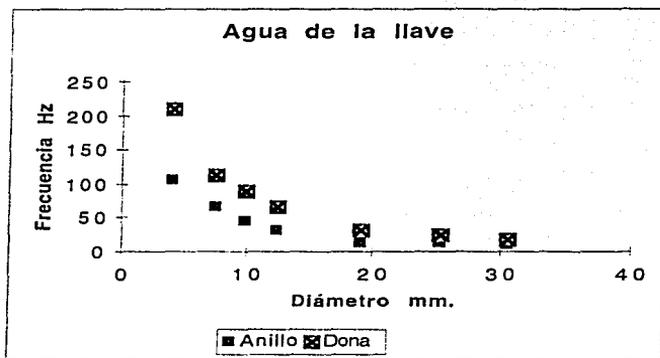


Figura 3.18

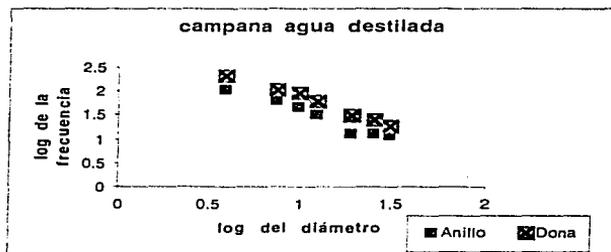


Figura 3.19

## Agua de la llave Caja

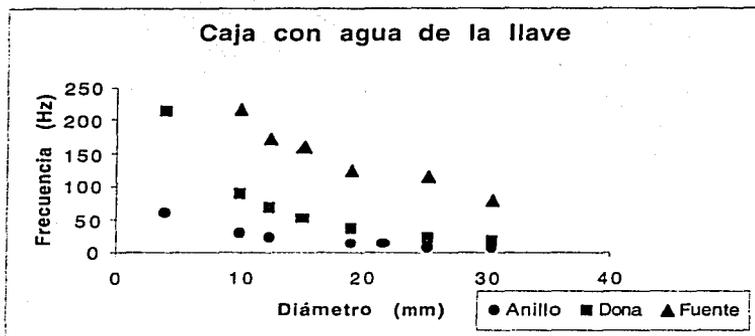


Figura 3.20

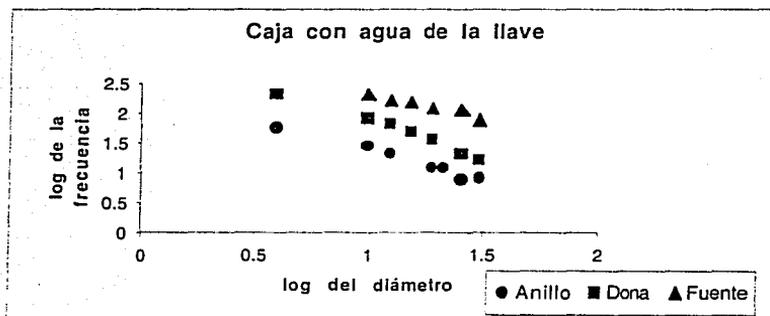


Figura 3.21

### **3.4 Factores que pueden afectar la frecuencia de transición**

En esta sección se exploran algunos de estos factores que afectan los valores a los que se dan las transiciones de flujo. Primeramente se inició con el tipo de agua por la facilidad que implica, a gran escala, usar agua de la llave en lugar de agua destilada (además de las implicaciones económicas). También se explora si el tamaño y forma del recipiente afecta, la distancia al fondo y mojado.

#### **3.4.1 Efecto del agua utilizada**

Para estudiar el efecto de la calidad del agua, se utilizó una campana que funcionó como recipiente. Sólo se trabajó con los cilindros, encontrándose que el cambio de utilizar agua destilada y agua de la llave provoca un corrimiento muy pequeño en los valores de transición para cada flujo, lo cual se puede apreciar más fácilmente al observar nuevamente la tabla 3.3. Sin embargo los exponentes de la relación potencial que gobierna las transiciones no cambia, ver la tabla 3.4.

**Tabla 3.4** Parámetros calculados para cada flujo  
y sus coeficientes de correlación

	Agua destilada (campana)	Agua de la llave (campana)	Agua de la llave (Caja)
<b>Anillo</b>			
Exponente m	-1.2	-1.19	-1.014
Ordenada K	551.1	613.3	602
Coefficiente de correlación	0.987	0.955	0.967
<b>Dona</b>			
Exponente m	-1.23	-1.19	-1.25
Ordenada K	1375.3	1188.3	1385.7
Coefficiente de correlación	0.986	0.988	0.979
<b>Fuente</b>			
Exponente m	-1.13		-0.82
Ordenada K	3084.5		1437
Coefficiente de correlación	0.982		0.955

Por lo mismo, se puede pensar que el usar agua destilada es igual que usar agua de la llave. Conviene aclarar que el primer experimento que se realizó fue con cilindros para reproducir los datos reportados de la transición de la dona, la exploración con agua de la llave tiene menos datos pues sólo se mapeo la zona y se corroboró que tenía el mismo comportamiento, por lo que se decidió que no era necesario terminar con el mapeo.

### 3.4.2 Cambio en las Condiciones de Frontera

La forma del recipiente afecta a algunas transiciones. Lo importante de esta comparación es tener una idea de los efectos que se tendrían al cambiar a un recipiente más grande que pudiera minimizar la interferencia de las paredes del recipiente. Si no hubiera existido diferencia entre la caja y la campana el experimento podría realizarse

en la campana para algunas condiciones y en la caja para otras según la facilidad que ofrece cada recipiente.

Como sí hay cambio, pero se observó que las perturbaciones ocasionadas por la dona y la fuente en la superficie son muy pequeñas en las paredes y no se nota su reflexión, se procedió a explorar otros cambios en las condiciones de frontera para encontrar puntos de comparación o explicación de las diferencias existentes entre el experimento realizado en la campana y los resultados publicados.

Debe aclararse que como en las referencias publicadas realizan el experimento con cilindros, se inició el presente trabajo con dicho sólido. Posteriormente, ya en la caja, se realizaron la mayor parte de los experimentos y se encontraron las otras transiciones.

La campana tenía el inconveniente de limitar el margen de velocidad del flujo, ya que a altas velocidades el agua despedida por la fuente se sale del recipiente y se corre el riesgo de mojar los aparatos ocasionando un corto.

### **3.4.3 Forma y tamaño del recipiente de agua**

De la tabla 3.4 se observa que las tres transiciones se comportan siguiendo una ley de potencias como se comentó con anterioridad. Sólo una de las transiciones no altera el valor del exponente por el cambio de recipiente, "la dona". Esto se infiere porque la variación del exponente es comparable al que se obtiene al cambiar de agua destilada a agua de la llave. Por lo tanto, se puede pensar que para

este flujo los efectos de frontera no son importantes. No así para los otros flujos en los cuales el valor del exponente cambia más que el cambio que implica el cambio de agua.

### 3.4.4 Distancia al fondo.

Se estudió el efecto de la distancia al fondo con la esfera de 2.42 cm, la esfera de 4.95 cm y el cilindro de 2.53 cm de diámetro. Estos ensayos se realizaron en la caja y la distancia al fondo se varió colocando una placa de vidrio que hace las veces de fondo a distintas alturas. Las observaciones se presentan en la tabla 3.5.

tabla 3.5 Variación de la frecuencia de transición para cada flujo, conforme el fondo se aleja del sólido utilizado. 10-40 indica que en el intervalo comprendido entre 10 y 40 cm no hay cambio en la  $\Omega$  de transición

Diámetro de la esfera (mm)	Distancia al fondo (cm)	Frecuencia de transición (Hz)			
		anillo $\Omega_1$	Dona $\Omega_2$	Fuente $\Omega_3$	Fuente membrana $\Omega_4$
24.2	4	31.8	45.4	46.1	64.9
24.2	5	29.8	45.4	45.6	64.3
24.2	7	31.4	47.6	47.8	64.3
24.2	10 - 40	18.24	no hay dona	40.2	62.7
49.5	0.1	No hay anillo	12.5	16.6	no se midió
49.5	0.4	no hay anillo	16.4	21.5	en
49.5	6	15.1	no hay dona	24.4	esta
49.5	10 - 40	8.4	no hay dona	24.7	esfera
<b>Cilindro</b>					
25.3	0.1	no hay anillo	23.8	55	
25.3	2	18.6	26.9	53.2	
25.3	5	16	26.6	88.6	
25.3	10 - 40	11.5	25.2	78.6	

Conforme el recipiente se hace más profundo, -se aleja el fondo del sólido utilizado-, existen cambios en la frecuencia de transición. Sin embargo, éstos sólo son apreciables en los primeros 10 cm, por lo que

en la tabla 3.5 se presentan los datos obtenidos a distancias menores a 10 cm; se señala como 10 – 40 al valor obtenido entre los 10 y 40 centímetros de profundidad.

Se pueden apreciar algunas tendencias como el hecho de que si el recipiente tiene poca profundidad (fracciones de centímetros) el anillo no aparece, pero cuando la profundidad aumenta (pero es menor a 10 cm) la transición a anillo ocurre a una frecuencia mayor que la observada si el recipiente es muy hondo. La transición a la fuente con membrana se mantiene constante, independientemente de la profundidad del recipiente. De la dona y la fuente, aunque son ligeramente afectadas, no se puede decir algo general sobre ellas.

### **3.4.5 Inmersión de las piezas**

#### **a.-) Cilindros**

En este punto es donde se observan cambios mayores en los cilindros, ya que a partir de 0.5 cm no se observa ninguno de los patrones anteriormente señalados. Es decir, sólo se observa un remolino centrado en el cilindro.

#### **b.-) Esferas**

En este caso, conforme se sumerge la esfera, la dona aparece a una frecuencia menor que cuando no está inmersa; incluso llega a observarse en esferas que no presentaban este flujo. Por ejemplo, la esfera de 24.2 mm. fue sumergida a 3 y 8 mm encontrándose la tabla 3.6.

**Tabla 3.6** Frecuencias a las que ocurren las distintas transiciones después de que se ha sumergido la esfera algunos milímetros. Profundidad 0 indica que el agua esta al ras de la esfera y por tanto no hay inmersión de la misma.

Patrón	Profundidad 3 mm	Profundidad 8 mm	profundidad 0,0
Anillo	10.3 ± 2.0	7.0 ±	18.1 ± 1.1
Dona	32.5 ± 1.6	24.4	no se da
Fuente	43.9 ± 2.5	no se da	38.9 ± 2.7
Fuente con Membrana	58.6 ± 1.2	217	62.6 ± 2.0
Desaparece membrana	115.9 ± 0.1		153

Primeramente se observa que el anillo surge a una  $\Omega$  menor conforme se sumerge la esfera; la dona se presenta, a pesar de que originalmente no se tenía este patrón a inmersión cero y conforme se sumerge tiende a disminuir el valor de la frecuencia de transición; la aparición de la fuente presenta un corrimiento hacia frecuencias mayores. Finalmente, para el caso de la fuente con membrana y la desaparición de la membrana no hay una tendencia clara.

### 3.4.6 Condiciones de Mojado.

Para cambiar las condiciones de mojado, fue necesario recubrir las superficies con un material hidrofóbico, como es el caso de la grasa, parafina o en general un recubrimientos de tipo orgánico.

Para que el recubrimiento fuera considerado como bueno, debía de cumplir con la condición de que fuera muy delgado y uniforme, con la finalidad de que la geometría del sólido no se viera afectada. También, no debía de despegarse de la superficie durante la realización del experimento. De acuerdo con lo anterior, se probaron dos recubrimientos: Parafina y grasa de silicón.

### a) Parafina.

El recubrimiento de parafina se consiguió al fundir un pedazo de vela en un crisol y bañar a la esfera. Se presentó el inconveniente de que no se fijaba uniformemente a la superficie metálica. Para resolver el problema se puso un poco de grasa en la superficie de la esfera. Posteriormente, se sumergió la esfera en la parafina derretida que se mantenía a temperatura constante, se dejó sumergida la esfera por aproximadamente diez minutos y se procedió a sacarla rápidamente, se dejó que la parafina escurriera por la esfera.

Para las pruebas hechas con parafina no se pudo limpiar la superficie de la esfera con acetona, por lo que sólo se secaba mediante centrifugado. Los resultados obtenidos son los siguientes:

**Tabla 3.7** Con esfera de 2.38 cm recubiertas con parafina. El número junto a la corrida representa la cantidad de veces que se usa a la esfera con el recubrimiento. Es decir, corrida 1 indica que la esfera recién recubierta se utiliza, la 2 señala que la esfera se usará por segunda vez con ese recubrimiento. Los números presentados en la parte inferior señalan la frecuencia de transición del respectivo flujo.

Flujo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 4	sin recubrir
Anillo	41.4	20.2	20.3	27.4	12.0
Dona	No se presenta dicho flujo				
Fuente	56.9	54.9	56.8	56.7	45.0
Fuente con membrana	62.4	62.3	62.7	62.7	63.2

De la tabla se observa que para la dona y fuente con membrana no se presenta cambio apreciable si se comparan los resultados de la esfera recubierta y la esfera sin recubrimiento. Para el anillo y la fuente si se presenta un cambio en el valor en que ocurre la transición. En ambos casos es a una frecuencia mayor que para la esfera sin recubrir. Por tanto uno puede decir que estos dos flujos dependen de las condiciones de mojado.

Para el recubrimiento con parafina, únicamente se trabajó con una esfera, ya que para los cilindros no fue posible recubrirlos de manera uniforme, por formarse en ellos un borde redondeado en su base.

#### **b.-) Grasa de silicón.**

La grasa de silicón se eligió por ser mas difícil de lavar que las grasas ordinarias. Se untó a la esfera y se dejó en presencia del calor de una lámpara por el lapso de unas horas. Posteriormente, se guardó la pieza para utilizarla al día siguiente.

La grasa, a pesar de que formó una capa muy delgada y uniforme, se fue eliminando en forma gradual conforme se realizaba el experimento. Por esto los resultados tienen un carácter eminentemente cualitativo, destacándose la tendencia de aumentar la frecuencia de transición al reducir el mojado.

Para volver a realizar el experimento con la misma pieza, primero se secaba por centrifugado y posteriormente se dejaba reposar en presencia de calor, con lo que los huecos formados por la grasa

desprendida desaparecían. Los resultados encontrados son los siguientes.

**Tabla 3.8 Esfera de 2.42 cm de diámetro recubierta con grasa**

Flujo	Corrida 1	Corrida 2	Sin grasa
Anillo	26.2	32.7	18.2
Dona	50.6	53.1	no se presenta
Fuente	60.0	59.2	40.2
Fuente con Membrana	60.5	63.5	62.7

En las tablas 3.8 y 3.9, la corrida 1 denota al promedio de las veces en que se usó la pieza con grasa puesta el día anterior y sin uso. La corrida 2 se refiere a la pieza después de realizar cinco corridas completas con la grasa, esto con el fin de quitar la grasa excedente de la superficie. De estos datos se puede apreciar que la falta de mojado de la superficie tiende a hacer que cada transición se presente a una frecuencia mayor que cuando la superficie no esta recubierta.

**tabla 3.9 Cilindro de 2.53 cm de diámetro recubierto con grasa**

Flujo	Corrida 1	Corrida 2	Sin grasa
Anillo	12.8	15.5	11.5
Dona	27.1	27.3	25.2
Fuente	otro comportamiento	otro comportamiento	78.6

El comportamiento que presenta la fuente en el cilindro recubierto de grasa se caracteriza porque la dona no desaparece, si no que coexiste con la fuente. Es decir, la fuente se manifiesta porque algunas gotas salen expulsadas de la intercara superior de la dona con el cilindro, como se muestra en la figura siguiente.

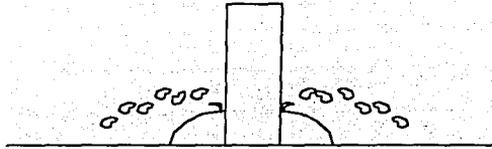


Figura 3.22 La fuente coexiste con la dona en los cilindros recubiertos con grasa

### 3.5 Los conos

Por el diferente comportamiento que se encontró en las transiciones tanto por el cambio de geometría entre esferas y cilindros como por la inmersión de las esferas surgió la duda de si se había tomado el parámetro adecuado, en este caso el diámetro de las piezas; el otro posible parámetro natural a elegir es el radio de contacto, por tal motivo se decidió repetir el experimento, pero ahora se usaron conos por ofrecer las siguientes ventajas.

1. Se puede determinar con facilidad el radio de contacto, esto se hace multiplicando la tangente del ángulo  $\alpha$  del cono con la profundidad a la que está inmerso.
2. Puesto que el radio del cono (considerando la sección transversal) aumenta con la altura, se puede explorar la altura a la cual llega la fuente para diferentes velocidades angulares y distintas secciones transversales. En el caso de esferas la fuente siempre llega al ecuador, de radio máximo; en conos este radio máximo está a una altura en teoría infinita, lo que ofrece la

posibilidad de hablar de la altura tope para cada frecuencia y área de contacto.

Para este experimento, se contó con un juego de 3 conos de distintos ángulos, hechos de duraluminio, con valores:

Cono 1 =  $15^\circ$ ;

Cono 2 =  $34^\circ$ ;

Cono 3 =  $90^\circ$ ;

cada ángulo se midió después del proceso de pulido.

El cono número 3 presentó el gran inconveniente de que el ángulo seleccionado tapó toda la luz destinada a ver y medir el crecimiento del anillo con el catetómetro. El anillo pasó abruptamente a fuente cuando se cambia  $\Omega$ ; el intervalo de valores de  $\Omega$  en el que la dona esta presente es muy pequeño. Por tal motivo no se presentan datos para este cono. Sin embargo, lo que si se puede decir es que la dona aparece sólo cuando la sección transversal es grande. Cuando se pasa al régimen de fuente, esta llega hasta donde termina el cono (base superior o base del cono; ver la figura 3.23).

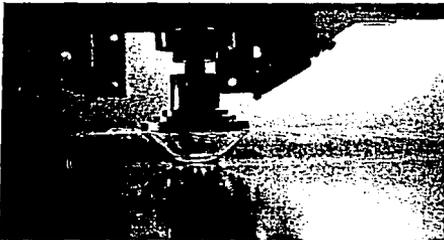


Figura 3.23 Fuente llegando a la base del cono3

Para el cono 2 sólo se tienen observaciones cualitativas, muy parecidas a las del cono tres. Para el cono 1 se tienen los datos de la tabla 3.10:

Tabla No.3.10 Cono de  $15^\circ$  la frecuencia para los distintos flujos esta en Hz

Radio Trasversal (cm)	Anillo	Dona	Fuente-Dona	Fuente
0.604		38.5	69.7	75.6
0.766		39	88.9	100
1.115		29.3	66	91.4
1.384		18.2	55.8	

Este cono es el único en el que se pueden ver patrones mixtos, es decir, se puede ver que la dona no desaparece al momento de surgir la fuente. De la parte superior de la dona, surge una película delgada de agua que sube por el cono, hasta una cierta altura que depende de la velocidad angular.



Figura 3.24 En el cono 1 se da la dona coexiste con la fuente. Cuando la fuente alcanza los 4cm de altura la dona desaparece.

La fuente sale de la orilla superior de la película ascendente. Al llegar a una altura de 4 cm, aproximadamente, la dona desaparece quedando solo la fuente. Esta última alcanza la altura máxima posible que es la base del cono.

Es muy probable que el hecho de observar a la dona y a la fuente juntos se deba a la combinación de dos variables. Primero al hecho de que el cambio en la sección transversal es muy ligero para este cono, cosa que no ocurre en las esferas cuando tocan la superficie del agua de manera tangencial. Segundo que, conforme asciende el líquido sobre el cono, la velocidad tangencial aumenta por tener una sección transversal mayor, lo que da una presión menor que en la base del mismo por el principio de Bernoulli.

### **3.6 Conclusiones**

El cambiar de agua destilada a agua de la llave no provoca cambios significativos, si se compara con el corrimiento existente cuando se cambia de contenedor.

La distancia al fondo comienza a ser significativa a partir de los 9 cm. A partir de este valor comienzan a ser notorios los cambios (como lo muestra la tabla 3.5).

Se pueden apreciar algunas tendencias como el hecho de que si el recipiente tiene poca profundidad (fracciones de centímetros) el anillo no aparece, pero cuando la profundidad aumenta (pero es menor a 10 cm) la transición a anillo ocurre a una frecuencia mayor que la observada si el recipiente es muy hondo. La transición a la fuente con membrana se mantiene constante, independientemente de la profundidad del recipiente. La dona y fuente aunque son ligeramente afectadas, no se puede decir algo general sobre ellas.

En cuanto al mojado de las piezas, se observa que a medida que se "reduce el mojado" la dona gana estabilidad. Es decir, este flujo se presenta en algunas piezas que no lo presentaban y la transición a fuente ocurre a una frecuencia mayor, sin embargo, la fuente con membrana se presenta a la misma frecuencia.

## Capítulo 4

### Análisis

En el capítulo anterior se presentaron los datos obtenidos para diferentes sólidos de revolución, combinando las variables que se consideró que podrían tener mayor relevancia para el problema. Ahora nos corresponde hacer un análisis de estos resultados. Para ello se procede a adimensionalizar las variables, posteriormente se ve la relación entre estas variables y los números adimensionales aceptados por la comunidad, es decir, con el número de Reynolds, Weber y Froude. Para el caso del flujo del anillo se hace una discusión de la forma en que crece.

#### 4.1 Adimensionalización

El comportamiento de cada una de las transiciones de flujo fue similar, es decir, todas las transiciones obedecen una ley potencial. Se pueden encontrar los parámetros adecuados para que todos los comportamientos caigan en una misma gráfica. Lograr esto implica encontrar un comportamiento universal en las transiciones estudiadas. Para iniciar esta búsqueda recurrimos al teorema II. Dicho teorema establece el número de variables adimensionales independientes que existen para describir un sistema, para esto debemos conocer el número de variables y dimensiones involucradas. Además, el teorema determina la forma de construir las (5).

El teorema  $\Pi$ , puede ser enunciado de la siguiente manera.

Si  $N$  magnitudes están relacionadas por una dependencia funcional y  $K$  de ellas son de dimensiones independientes, se pueden formar  $N-K$  combinaciones adimensionales independientes. Cuanto menor sea esta diferencia tanto más determinada será la solución del problema.

Para el caso que nos atañe tenemos 3 dimensiones; masa ( $m$ ), longitud ( $l$ ) y tiempo ( $t$ ). Las variables involucradas tienen las dimensiones siguientes.

$\eta$ , coeficiente de viscosidad cortante  $[\eta] = ml^{-1}t^{-1}$ ,

$\rho$ , densidad  $[\rho] = ml^{-3}$ ,

$\sigma$ , coeficiente de tensión superficial  $[\sigma] = mt^{-2}$ ,

$r$ , radio de contacto  $[r] = l$ ,

$\Omega$ , frecuencia de transición  $[\Omega] = t^{-1}$ ,

$d$ , longitud característica del objeto usado  $[d] = l$ ,

$g$ , aceleración de la gravedad  $[g] = lt^{-2}$ .

Hay que aclarar que como una aproximación se está considerando que las variables asociadas al aire son despreciables al compararse con las asociadas al agua, como son el caso de la densidad y el coeficiente de viscosidad cortante.

El teorema  $\Pi$  nos dice por tanto que hay  $7-3 = 4$  variables adimensionales independientes.

Para construirlas primero escogemos como variables repetidas a  $\eta$ ,  $\rho$  y  $\sigma$ , cuyas dimensiones son  $ml^{-1}t^{-1}$ ,  $ml^{-3}$  y  $mt^{-2}$ , respectivamente.

A partir de éstas, los parámetros adimensionales se construyen de la siguiente manera.

$$\Pi_1 = \eta^\alpha \rho^\beta \sigma^\gamma d,$$

$$\Pi_2 = \eta^\alpha \rho^\beta \sigma^\gamma r,$$

$$\Pi_3 = \eta^\alpha \rho^\beta \sigma^\gamma \Omega,$$

$$\Pi_4 = \eta^\alpha \rho^\beta \sigma^\gamma g.$$

donde los exponentes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , con el subíndice respectivo, están por determinarse, lo cual se hace de la siguiente manera

Ejemplo para  $\Pi_1$ .

$$(ml^{-1}r^{-1})^\alpha (ml^{-3})^\beta (ml^{-2})^\gamma l = 1,$$

por lo tanto;

$$\alpha_1 + \beta_1 + \gamma_1 = 0,$$

$$-\alpha_1 - 3\beta_1 + 1 = 0,$$

$$-\alpha_1 - 2\gamma_1 = 0,$$

obteniendo  $\alpha = -2$ ,  $\beta = 1$  y  $\gamma = 1$ ; es decir,

$$\Pi_1 = \frac{\rho\sigma}{\eta^2} d. \quad (4.1)$$

Continuando con el procedimiento antes descrito se obtienen los siguientes resultados

$$\Pi_2 = \frac{\rho\sigma}{\eta^2} r, \quad (4.2)$$

$$\Pi_3 = \frac{\eta^3}{\sigma^2 \rho} \Omega, \quad (4.3)$$

$$\Pi_4 = \frac{\eta^4}{\rho\sigma^3} g. \quad (4.4)$$

Para ver la relación de las variables arriba definidas con los números de Froude ( $Fr$ ), Weber ( $We$ ) y Reynolds ( $Re$ ) recordamos que cada número se define de la siguiente manera:

$$Fr = \frac{v^2}{rg} = \frac{\Omega^2 r}{g} = \frac{\Pi_1^2 \Pi_2}{\Pi_4} \quad (4.5)$$

$$We = \frac{\rho r v^2}{\sigma} = \frac{\rho r^3 \Omega^2}{\sigma} = \Pi_1^3 \Pi_3^2 \quad (4.6)$$

$$Re = \frac{\rho r v}{\eta} = \frac{\rho \Omega r^2}{\eta} = \Pi_1^2 \Pi_3 \quad (4.7)$$

Expresiones similares se obtienen al relacionar estos números con  $\Pi_1$ .

$$Re = \frac{\rho r v}{\eta} = \frac{\rho \Omega r^2}{\eta} = \Pi_1^2 \Pi_3 \quad (4.8)$$

$$Fr = \frac{v^2}{rg} = \frac{\Omega^2 r}{g} = \frac{\Pi_1^2 \Pi_1}{\Pi_4} \quad (4.9)$$

$$We = \frac{\rho r v^2}{\sigma} = \frac{\rho r^3 \Omega^2}{\sigma} = \Pi_1^3 \Pi_3^2 \quad (4.10)$$

El término de cada número que representa a la velocidad ( $v$ ) en cada número se sustituyó por la velocidad tangencial ( $\Omega r$ ).

Se procede a adimensionalizar los datos obtenidos para el caso de cilindros y esferas, utilizando las expresiones arriba señaladas.  $\Pi_4$  es una constante para los casos aquí tratados, su valor es  $2.57 \times 10^{-11}$  tomando

$$\sigma = 72.5 \text{ dinas/cm,}$$

$$\rho = 1.0\text{gr/cm}^3,$$

$$g = 980 \text{ cm/s}^2$$

$$\eta = 0.01 \text{ cps.}$$

según los datos proporcionados en (6).

#### 4.1.1 Cilindros

En el caso de los cilindros, los parámetros  $d$  y  $r$  coinciden, por lo que basta con reportar  $\Pi_2$ . Los resultados se presentan en la tabla 4.1, seguida de las gráficas log-log correspondientes.

En la tabla 4.1 la primera columna ( $\Pi_2$ ) corresponde a los diámetros de los cilindros y las siguientes a los valores de la frecuencia ( $\Pi_3$ ) crítica a la que ocurre la transición. Para distinguir las diferentes frecuencias de transición se añadirá al subíndice una letra "a" para la transición al anillo ( $\Pi_{3a}$ ), "d" para la transición a la dona ( $\Pi_{3d}$ ) y f para la de la fuente ( $\Pi_{3f}$ ). Los datos se obtuvieron en el recipiente marcado en el recuadro superior indicándose si se usó agua de la llave o agua destilada.

Para identificar las condiciones en que se llevó a cabo el experimento, se usará C que implica la campana de vacío, más una letra "H o L" para indicar el tipo de agua, destilada es H, de la llave es L.

Tabla 4.1 Muestra los valores de las variables adimensionales a las que ocurre cada transición de flujo para los cilindros.

$\Pi_2^x (10^0)$	campana agua destilada (C H)			campana agua de la llave (C L)		caja agua de la llave		
	$\Pi_{3a} \times 10^{-3}$	$\Pi_{3d} \times 10^{-3}$	$\Pi_{3f} \times 10^{-3}$	$\Pi_{3a} \times 10^{-3}$	$\Pi_{3d} \times 10^{-3}$	$\Pi_{3a} \times 10^{-3}$	$\Pi_{3d} \times 10^{-3}$	$\Pi_{3f} \times 10^{-3}$
2.828	1.83	4.09		2.02	4	1.15	4.1	
5.365	1.1	2.54	6.23	1.26	2.14			
7.141	0.698	1.74	4.36	0.896	1.74	0.554	1.69	4.13
8.990	0.506	1.25	3.31	0.628	1.26	0.422	1.27	3.28
11.020	0.384	1.02	2.55				0.957	3.03
13.775		0.713	2.47	0.249	0.635	0.24	0.694	2.36
15.660	0.238	0.616	1.96			0.245		
18.342	0.23	0.479	1.5	0.247	0.479	0.148	0.419	2.16
20.844	0.204	0.398	1.37					
22.112	0.152	0.361	1.14	0.228	0.373	0.166	0.316	1.48

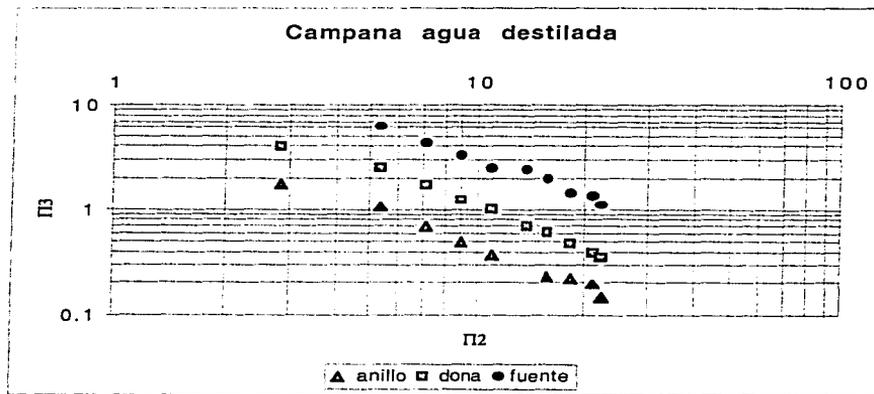


Figura 4.1 Gráfica en escala log-log de los datos adimensionales para cilindros.

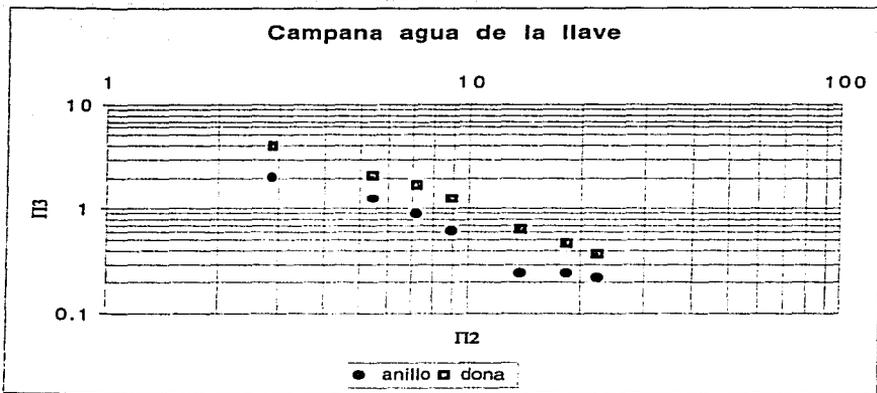


Figura 4.2

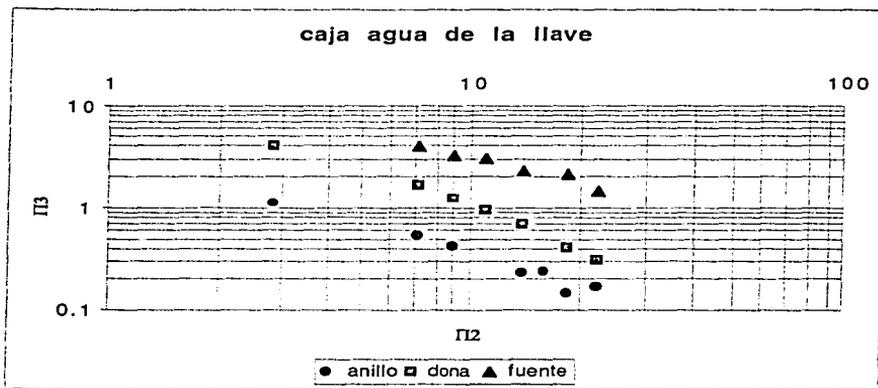


Figura 4.3

La escala que mejor linealiza la gráfica de cada transición es la log-log, por lo que la forma en que están relacionadas las variables graficadas es de tipo potencial,  $\Pi_3 = b\Pi_2^m$ . Esta relación involucra algunos parámetros que la caracterizan y se presentan en la tabla 4.2.

tabla 4.2 m es la pendiente de la recta asociada a la transición del flujo correspondiente, b la ordenada al origen y c el coeficiente de correlación de la regresión

	Regresión Potencial		
	m	b	c
anillo C H	-1.203	0.068	0.987
Anillo C L	-1.188	0.030	0.955
Anillo caja L	-1.015	-1.354	0.967
Dona C H	-1.367	1.614	0.998
Dona CL	-1.187	0.308	0.988
Dona caja L	-1.253	0.766	0.979
Fuente CH	-1.127	0.371	0.982
Fuente Caja L	-0.824	-1.732	0.955

Primeramente, la dona parece tener valores de "m" similares entre ellos si se realiza el experimento en la caja o en la campana; posiblemente a este flujo sólo le afectan condiciones locales. En el caso del anillo y la fuente "m" y "b" no son similares si se cambia de recipiente.

Si el experimento se realiza en el mismo recipiente, como en la campana, y sólo se cambia el agua, los valores son semejantes en "m", pero no así en "b", por lo que hay un corrimiento de la curva.

#### 4.1.2 Esferas

Para este caso se procede de manera análoga a los cilindros. Es decir, primero se hace la adimensionalización, como se definió al principio del presente capítulo para después ver la relación que mejor ajusta a los puntos obtenidos (tabla 4.3).

Se usaron más subíndices porque las esferas tienen más transiciones que los cilindros. Denotando:

$\Pi_{3fm}$  la frecuencia en que a la fuente le aparece una membrana (fuente con membrana).

$\Pi_{3mo}$  la frecuencia a la cual dicha membrana comienza a oscilar (membrana oscilante).

$\Pi_{3mno}$  la frecuencia a la cual la membrana deja de oscilar (membrana no oscilante).

$\Pi_{3dm}$  frecuencia a la cual desaparece la membrana (desaparece membrana).

Tabla 4.3 Transiciones para las esferas.

$\Pi_1 \times 10^6$	$\Pi_2 \times 10^6$	$\Pi_{3a}$ $\times 10^3$	$\Pi_{3d}$ $\times 10^{-3}$	$\Pi_{3r}$ $\times 10^{-3}$	$\Pi_{3m}$ $\times 10^3$	$\Pi_{3mo}$ oscilante $\times 10^3$	$\Pi_{3mno}$ oscilante $\times 10^3$	$\Pi_{3dm}$ $\times 10^3$
4.712	6.924	0.772	2.471	3.240	4.119			
5.8	7.25	1.092	1.726	2.528	3.367			
6.96	8.954	0.573	1.598	2.030	2.409			4.889
8.192	10.295	0.472	1.355	1.505	2.211			4.404
	10.875	0.449	1.225	1.273	1.960	3.310		3.995
9.062	12.107	0.529	1.086	1.187	1.769	2.055	2.283	3.653
9.715	12.325	0.597	1.077	1.160	1.766			3.805
	14.5	0.428		0.899	1.410	1.921	2.435	3.074
12.47	17.255	0.228		0.856	1.202	1.358	1.921	2.473
	17.545	0.344		0.740	1.191	1.465	2.127	2.911
11.6	18.052	0.434		0.856	1.149	1.225	1.975	2.587
12.832	21.75	0.234		0.702	1.018	1.037		
13.485	25.375	0.206		0.588	0.921			
15.406	27.985	0.289		0.538	0.888	0.928		1.796
17.038	31.538	0.154		0.493				
18.488	35.888	0.165		0.470				

En la tabla 4.3 se presentan todas las transiciones observadas. Las tres últimas columnas que corresponden a las transiciones (membrana oscilante, membrana no oscilante y desaparición de la membrana) tienen menos datos debido a que las velocidades de rotación

necesarias para su transición son muy altas y no se pudieron alcanzar para las esferas de diámetro pequeño.

En las figuras siguientes se presenta la representación gráfica de los datos correspondiendo las dos primeras a las variables  $\Pi_1$  y  $\Pi_3$ , las dos últimas a  $\Pi_2$  y  $\Pi_3$ .

$\Pi_1$  representa adimensionalmente al radio de contacto.

$\Pi_2$  representa adimensionalmente al diámetro o parámetro geométrico de la esfera.

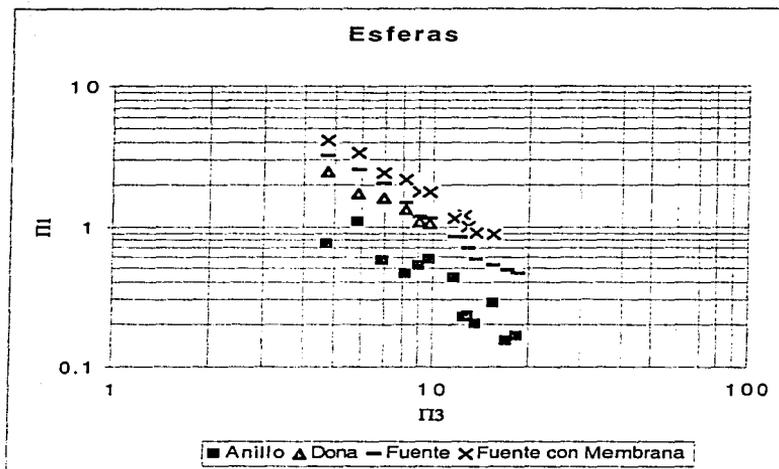


Figura 4.4

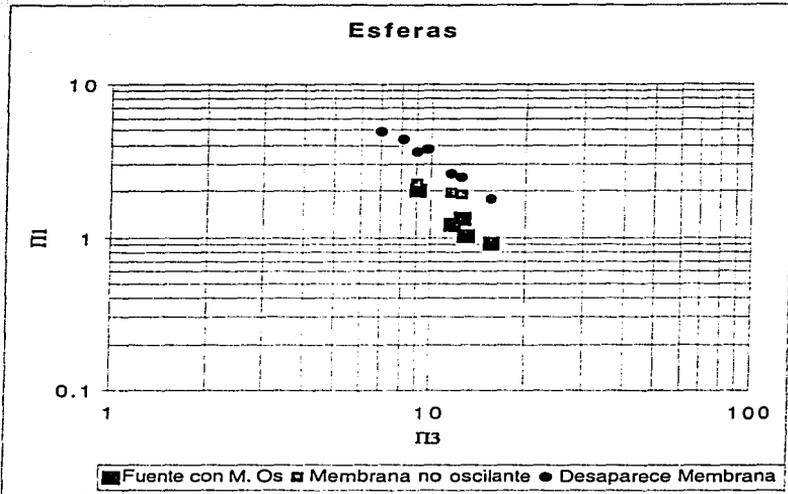


Figura 4.5

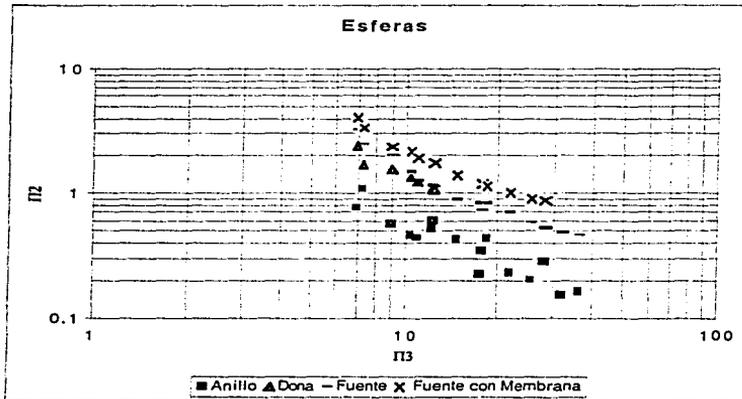


Figura 4.6

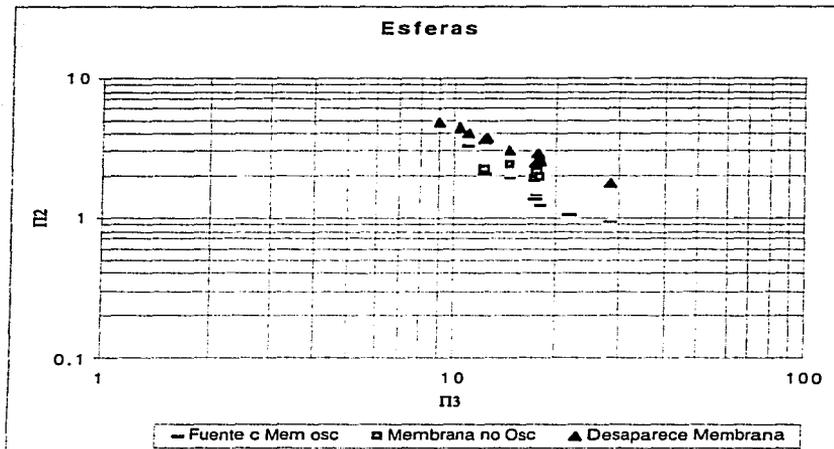


Figura 4.7

El ajuste de los datos se presenta en las tablas 4.4a y 4.4b; en ellas se observa que una relación de tipo potencial entre  $\Pi_1$  vs  $\Pi_3$  y entre  $\Pi_2$  vs  $\Pi_3$  describe bien los datos. Se exploró también la relación exponencial pero el coeficiente de correlación fue en todos los casos mayor en las relaciones potenciales que en las exponenciales, aunque la diferencia es muy pequeña entre ambos ajustes.

Se observa que la relación entre  $\Pi_1$  vs  $\Pi_3$  es mejor que entre  $\Pi_2$  vs  $\Pi_3$ , sobretodo para el caso de la membrana no oscilante.  $\Pi_1$  representa al radio de contacto,  $\Pi_2$  representa al parámetro geométrico, que para el caso de los cilindros coinciden y para otros, como en esferas y conos no; en los conos es relevante  $\Pi_1$ . Parece

natural considerar únicamente a  $\Pi_1$ , por el mejor ajuste con  $\Pi_3$  y por la información que contiene.

Tabla 4.4a Ajuste potencial de los datos de las distintas transiciones, considerando a las variables  $\Pi_2$  y  $\Pi_3$

Potencial			
$\Pi_2$ vs. $\Pi_3$			
	pendiente	ordenada	Coef
anillo	-1.01	0.78	0.858
dona	-1.21	1.35	0.911
fuelle	-1.10	1.32	0.952
fuelle mem	-1.06	1.42	0.966
mem osc	-1.54	2.06	0.930
mem nosc	-0.43	0.84	0.541
des mem	-0.89	1.53	0.976

Tabla 4.4b Ajuste potencial de las distintas transiciones, considerando a las variables  $\Pi_1$  y  $\Pi_3$

$\Pi_1$ vs. $\Pi_3$			
	pendiente	ordenada	coef.
anillo	-1.36	0.95	0.836
dona	-1.11	1.13	0.966
fuelle	-1.51	1.55	0.987
fuelle mem	-1.38	1.57	0.981
mem osc	-1.51	1.74	0.893
mem nosc	-0.55	0.87	0.995
des mem	-1.31	1.82	0.971

En ambas tablas, la incertidumbre en el caso del anillo y de desaparición de membrana (des mem) es de 15 %; en los otros casos es inferior al 2 %. En la tabla sólo se destacan los valores promedio. Se marcaron las transiciones que tienen los mismos exponentes, es decir, la transición a anillo y la de fuente con membrana

Por tanto, el comportamiento observado para todas las transiciones es del tipo

$$\Pi_3 = b\Pi_2^{-m}; \quad (4.11)$$

En la parametrización (ajuste) se encuentra que para esferas y cilindros, el valor de "m" que rige las transiciones a anillo es el mismo, es decir,  $m = -1$  (tabla 4.2 y 4.4a); análogamente ocurre para la dona con  $m = -1.2 \pm 0.02$ .

En el primer caso, la relación equivale a decir que las transiciones ocurren a una velocidad tangencial constante ( $v = \Omega r = c \left( \frac{\sigma}{\eta} \right)$ ). Para el caso de esferas, esta relación también la satisface la transición de fuente con membrana por tener un exponente cercano a -1.

#### 4.2 Discusión.

En la figura 4.8, se observa que los parámetros  $\Pi_1$  vs  $\Pi_3$ , tanto para cilindros como para esferas siguen la misma tendencia. En general los parámetros  $k$  y  $m$ , que describen la transición de cada flujo dependen de la forma de los sólidos como lo muestran las tablas 4.1 a 4.4, salvo algunas excepciones, como ocurre en el anillo y la dona. Mismo que se aprecia en la figura 4.8.

Como un ejemplo de la dependencia existente, basta mencionar que la transición a fuente en los cilindros presenta un exponente de - 0.82, mientras que para esferas es de -1.1.

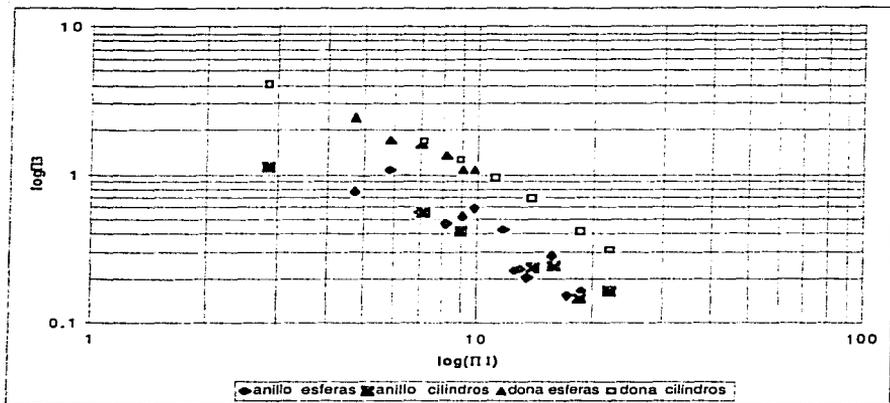


Figura 4.8 Presenta el logaritmo de los parámetros adimensionales  $\Pi_1$  y  $\Pi_3$ , tanto de esferas como de cilindros

Los patrones de flujo son un reflejo de los mecanismos que el sistema emplea para que no se acumule agua en la vecindad del sólido. Por ejemplo, la dona, que abarca un intervalo pequeño de velocidades angulares deja de ser suficiente para eliminar el excedente de fluido para velocidades cada vez mayores. Esto es común a todos los casos. La fuente es claramente el flujo más eficiente para deshacerse de la masa de agua que llega por la diferencia de presiones.

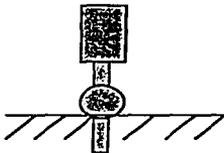
El fluido que gira pegado al sólido tiene una presión menor que el resto del fluido que gira a menor velocidad, esto produce un movimiento convergente del fluido al sólido, esto da lugar a que el líquido suba por la superficie del sólido. La altura a la que llegue el fluido es distinta para cada sólido (cilindros, esferas y conos). Dicha altura depende del movimiento convergente, del peso de la película

ascendente, las fuerzas de cohesión de las moléculas del fluido y el perfil de velocidades tangenciales del sólido con respecto a la altura. Si el perfil de velocidades tangenciales del sólido aumenta con la altura, la película llegará más alto que si permanece constante. aumenta es que el gradiente de presión se comporta distinto en la superficie de cada uno. En los cilindros, al tener sección constante, la velocidad tangencial no cambia con la altura, por lo que el fluido llegará sólo hasta la altura en que el peso del mismo iguale a la diferencia de presiones. Para esferas, la velocidad tangencial aumenta hasta llegar al ecuador, el radio máximo; ahí la presión tendrá su mínimo y el fluido fluye hacia dicha zona, de donde sale despedido tangencialmente; subir más, implica pasar a una región de mayor presión.

Finalmente, para los conos, la subida del fluido es favorecida siempre por el gradiente de presión; cabe señalar que a pesar de haber estudiado sólo tres casos ( $\theta = 15^\circ, 34^\circ, 90^\circ$ ), la tendencia que apoya lo anterior se confirma. Es decir, para  $15^\circ$  la fuente sube gradualmente con la frecuencia (figura 3.24), mientras que para el resto de los conos, la fuente aparece hasta el límite superior o base del cono (figura 3.23). Otro hecho que apoya el argumento anterior es que la  $\Omega$  crítica de transición a fuente es mayor siempre para cilindros que para esferas de igual sección transversal de contacto.

Se encontró que si la base del sólido está por debajo del nivel del agua (se sumerge la pieza), se modifican fuertemente los flujos. Sin embargo, se tienen evidencias de que si la sección transversal

hundida es menor que la sección que está en contacto con la interfase, las  $\Omega$ 's de transición no se ven afectadas, como lo demostró un ensayo hecho con una pieza que se ilustra en la figura 4.9.



**Figura 4.9** Esfera con extensión sumergible, usada para ver los efectos de una sección transversal menor, sumergida.

Para cilindros, se observa que si la inmersión es mayor a 3 o 4 milímetros, no se presentan los flujos antes descritos. Por el contrario, la superficie del agua presenta un hundimiento semejante a cuando se agita el agua circularmente; las líneas de flujo son parecidas a las de un vórtice potencial; no se observa ninguna transición (anillo, dona, etc.).

Para esferas sumergidas una fracción de su radio se presentan todos los flujos. Por ejemplo, si la esfera originalmente no presenta transición a dona, en este caso si presentará dicho flujo y éste a su vez se transformará en fuente cuando llegue a la velocidad adecuada. Sólo hay un cambio apreciable si la inmersión está próxima al radio máximo; en este punto la dona desaparecerá a velocidades grandes (por ejemplo, a  $\Omega \sim 200$  Hz si normalmente lo hace a 40 Hz).

Si el nivel de inmersión es mayor al radio máximo, la superficie se hunde como en el caso de los cilindros sumergidos más de 4 mm. Para un nivel igual al radio máximo, el anillo se da aunque es difícil observarlo y seguirlo. La dona se manifiesta como una envoltura turbulenta despegada de la esfera. Debido al agua arrojada por la esfera y acumulada alrededor de ella (ver figura 4.10), los flujos subsiguientes no se presentan; lo más que se puede observar es que a grandes velocidades salen gotitas de agua de la parte superior de la dona, esto es una dona con fuente.

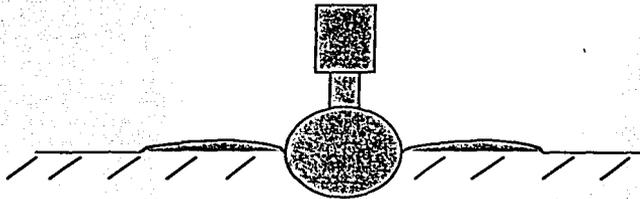


Figura 4.10 Forma de la dona cuándo el nivel del agua es igual al del radio máximo

### 4.3 Mojado

En este caso se utilizaron dos tipos de recubrimientos, grasa de silicón y parafina. Ambos mostraron que las frecuencias de transición se ven incrementadas, con una diferencia. Se encontró un flujo mixto, es decir, coexistiendo fuente y dona cuando los cilindros estaban recubiertos con grasa de silicón, mientras que dicho flujo no se encuentra si el recubrimiento es parafina. Una de las posibles causas

de la discrepancia entre los dos tipos de recubrimiento, es que la grasa no es un recubrimiento rígido; la capa de grasa en contacto con el fluido podría tener una  $\Omega$  menor que la de rotación de la pieza.

Además, existe la observación reportada en la referencia [2] donde no se observa cambio alguno en la transición a la dona con piezas hechas con teflón; en este caso, surge la duda de si los valores reportados con anterioridad [1,2] están siendo afectados por el tamaño del recipiente.

#### 4.4 Geometría del contenedor de agua

La geometría (dimensiones y forma) del recipiente en el que se hace el experimento, parece jugar un papel muy importante. Esto se manifiesta por las diferencias entre los datos para la campana y la caja. Muy posiblemente, la razón por la que los trabajos previos [1, 2] no observaron los mismos flujos aquí descritos, es la marcada diferencia en dimensiones; el contenedor que se usó en [1, 2], es un cubo de 20 cm de lado, contrasta con la caja de 100 x 100 cm y 60 cm de distancia al fondo.

Observamos que el flujo menos afectado por las condiciones de frontera es la dona y es de esperarse que ocurra lo mismo con la fuente, ya que sólo dependen del gradiente de presión generado, sólo un efecto en la vecindad del sólido puede alterarlo.

Durante la exploración, se vio que si la distancia al fondo es menor a 10 cm existe una oscilación entre dona y fuente que puede

confundirse con un efecto debido a las paredes laterales; es decir, si las paredes estuvieran lo suficientemente cerca, uno podría pensar que las oscilaciones se amplifican debido a la cercanía de éstas. En la caja, dichas oscilaciones se presentan cerca de la pieza pero en las cercanías a las paredes no se observan.

#### **4.5 Comentarios sobre el anillo.**

En el presente trabajo se han reportado las frecuencias críticas de cada transición. Sin embargo, se siguió la evolución de los flujos; la dona no presentó una característica fácilmente medible. Para el anillo, fue necesario el uso de un catetómetro y la iluminación apropiada descrita en el capítulo 2.

En el anillo se determinó la frecuencia de transición de manera indirecta, por haber ciertas dificultades para observarlo. Cuando el anillo surge su contorno es muy tenue y se confunde con el menisco que forma el agua con la pieza. Otra, es que el sólido de revolución tapa parte de la luz en su vecindad haciendo menos clara la observación del incipiente anillo.

El comportamiento del anillo es muy regular; si se sigue su crecimiento, se encuentra que una relación lineal entre  $\Omega$  y su radio describe bien el comportamiento. Por tal motivo, se optó por extrapolar para determinar la frecuencia a la cual el radio del anillo coincide con el radio del círculo de contacto entre la pieza y el agua.

Dicho valor es el que se reporta como la frecuencia a la cual surge el anillo. Es por ello que dicha transición presenta la mayor incertidumbre en su determinación.

A continuación se presentan los datos adimensionales del anillo para ver su velocidad de crecimiento con respecto a la frecuencia, para cilindros de distinto diámetro. Las variables adimensionales involucradas son  $\Pi_3$  y  $\Pi_5$ . Definiendo por conveniencia a  $\Pi_5$  como:

$$\Pi_5 = \frac{r_a}{r_c} \quad (4.12)$$

siendo  $r_a$  el radio del anillo y  $r_c$  el radio de contacto de la pieza.

Por la forma en que se define a  $\Pi_5$ , la frecuencia de transición siempre ocurre cuando es igual a la unidad. Con estas variables se corrobora el crecimiento lineal que muestra este flujo.

$\Pi_3$  denota a la frecuencia adimensional que se definió al inicio del capítulo.

Tabla 4.5 Diámetros correspondientes a los  
Diferentes cilindros presentados en la tabla 4.6 y la figura 4.11

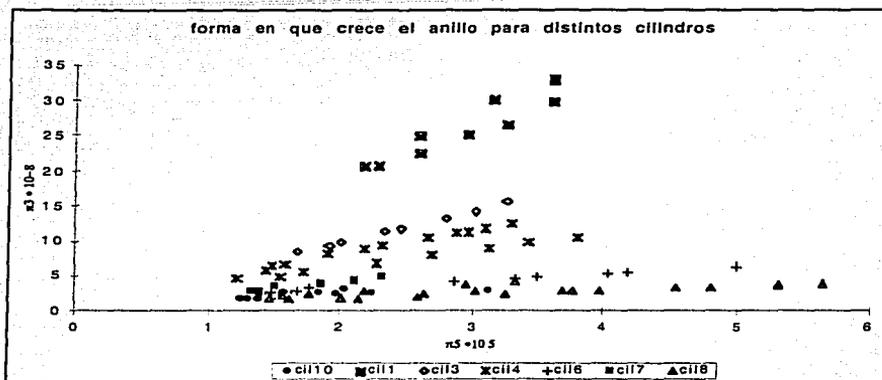
Diámetro del cilindro (cm)	No de cilindro
0,39	1
0,985	3
1,24	4
1,90	6
2,16	7
2,53	8
3,05	10

Tabla 4.6 Datos adimensionales del crecimiento del crecimiento del anillo con la frecuencia para varios cilindros.

Cilindro 10		Cilindro 4		Cilindro 8	
$\Pi_5$	$\Pi_3$	$\Pi_5$	$\Pi_3$	$\Pi_5$	$\Pi_3$
1.301639	1.883472	1.209677	4.815317	1.466403	1.921522
1.393443	2.473246	1.435484	6.030916	1.56917	2.263971
1.465574	2.549346	1.483871	6.601665	1.774704	2.606421
1.583607	2.815696	1.580645	6.715815	2.193676	3.043995
1.714754	2.929845	1.903226	8.237812	2.944664	3.862069
2.036066	3.234245	2.177419	9.074911	3.324111	4.242568
1.380328	1.864447	2.322581	9.53151	1.624506	1.788347
1.491803	1.940547	2.645161	10.55886	1.996047	2.054697
1.511475	2.092747	2.870968	11.12961	2.620553	2.587396
1.55082	2.416171	2.967742	11.43401	3.023715	3.06302
1.970492	2.606421	3.096774	11.85256	5.300395	3.652794
2.239344	2.834721	3.290323	12.51843	2.13834	1.788347
3.131148	3.043995	1.548387	4.984542	2.581028	2.168847
1.242623	1.769322	1.725806	5.707491	3.245059	2.549346
1.491803	2.397146	2.274194	6.944114	3.695652	2.853746
1.662295	2.739506	2.693548	8.085612	3.758893	3.005945
1.839344	2.815696	3.129032	9.093936	3.956522	3.082045
		3.419355	9.778835	4.541502	3.40547
		3.790323	10.65398	4.802372	3.44352
				5.3083	3.766944
				5.632411	4.014269

Cilindro 1		Cilindro 6		Cilindro 3	
$\Pi_5$	$\Pi_3$	$\Pi_5$	$\Pi_3$	$\Pi_5$	$\Pi_3$
2.282051	20.71819	1.484211	2.777646	1.690355	8.599287
2.589744	22.37337	1.684211	3.082045	1.913706	9.512485
2.948718	25.18906	1.768421	3.44352	1.994924	9.931034
3.25641	26.61593	2.863158	4.223543	2.340102	11.51011
3.615385	29.83115	3.326316	4.718193	2.461929	11.89061
2.179487	20.75624	3.484211	4.908442	2.786802	13.37455
2.589744	24.82759	4.021053	5.498216	3.030457	14.30678
3.153846	30.13555	4.178947	5.726516	3.253807	15.60048
3.615385	32.79905	4.989474	6.50654		

Cilindro 7	
$\Pi_5$	$\Pi_3$
1.333333	2.853746
1.37963	3.06302
1.509259	3.728894
1.861111	4.033294
2.101852	4.413793
2.324074	4.851367



**Figura 4.11** Comportamiento del anillo para el caso de los cilindros; se puede apreciar que en todos los casos la relación entre  $\Pi_3$  y  $\Pi_2$  es lineal, y que la pendiente de la relación disminuye conforme el radio del cilindro aumenta.

**Tabla 4.7** La velocidad de crecimiento del anillo dada por la pendiente respectiva de la figura 4.11 disminuye con el diámetro del cilindro.

Diámetro del cilindro (cm)	m	b	Coef. De correlación
0,39	7.523	3.983	0.878
0,985	4.401	1.129	0.998
1,24	3.502	1.166	0.988
1,90	1.023	1.382	0.992
2,16	1.833	0.613	0.942
2,53	1.180	0.380	0.985
3,05	0.613	0.577	0.990

De la figura 4.11 y las tablas 4.5 y 4.7 se observa que la velocidad de crecimiento del anillo disminuye con el diámetro del cilindro. Además se obtuvo que el exponente de la ley de potencias para este flujo es  $-1$  (tabla 4.2), y como se discutió en la sección 4.1.2, se puede pensar

que la velocidad tangencial a la que surge el anillo es la misma para cada cilindro. Para corroborarlo se construyó la tabla 4.8.

Tabla 4.8 velocidad tangencial a la que surge el anillo dependiendo del diámetro del cilindro

Diámetro (cm)	Velocidad tangencial (cm/s)
0,39	23.517
0,985	28.6635
1,24	27.528
1,90	23.94
2,16	27.864
2,53	19.734
3,05	26.535

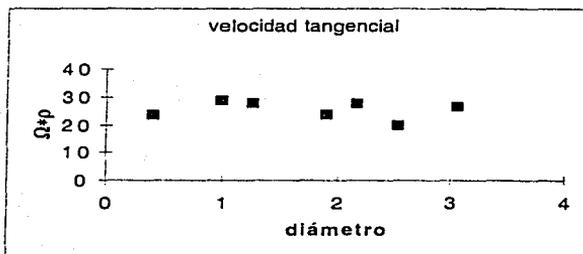


Figura 4.12 velocidad tangencial del anillo cuando surge.

La velocidad tangencial a la que surge el anillo parece oscilar alrededor de un valor constante. No se da el valor pues la correlación es muy baja.

#### 4.6 Conclusiones

Las transiciones de flujo obedecen una relación de tipo potencial,  $\Omega = kd^{-m}$ , donde  $m$  y  $k$  dependen de la forma del sólido de revolución.

Los flujos que se presentan dependen de la forma del sólido de revolución.

Los parámetros importantes para describir las transiciones son el parámetro de contacto y la velocidad angular.

La dona es un flujo que no es afectado de manera significativa por la forma del recipiente.

Se encontró que existen dos patrones que siguen el criterio de recirculación de Rayleigh, el anillo y la fuente con membrana. Dichos flujos siguen la ley que dice que  $\Omega d = k$  y se debe a un equilibrio que tiene que establecerse entre la fuerza centrífuga y una fuerza de tipo centrípeta, debida a la diferencia de velocidades tangenciales, cuando nos acercamos radialmente al sólido de revolución.

La dona es un patrón de tipo local, es decir, no afecta su comportamiento la distancia a las paredes, (siempre y cuando la distancia a las paredes no sea menor a 10 cm). Además el valor del exponente asociado es independiente de la geometría del sólido de revolución empleado.

El efecto del fondo es más importante que el de las paredes del recipiente, por alterar fuertemente las líneas de flujo, impidiendo que ciertos patrones aparezcan o que modifiquen su comportamiento.

La velocidad tangencial asociada para que surja el anillo es constante.

La velocidad tangencial del fluido que está en la frontera del anillo es constante e igual a la velocidad de surgimiento del mismo.

La velocidad de crecimiento del anillo es lineal  $\Omega = kd$  y se corrobora en la adimensionalización.

La grasa permite la observación de flujos mixtos (donde coexisten fuente y dona).

La fuente con membrana y las subsiguientes transiciones no se ven afectadas una vez que la fuente se da y se mantiene estable.

## Capítulo 5

### Conclusiones generales

#### 5.1 Conclusiones

A continuación se encuentran las conclusiones generales de este trabajo.

- 1) El cambiar de agua destilada a agua de la llave no provoca cambio en la frecuencia en que se lleva a cabo cada transición
- 2) Cuando se cambia la distancia a las paredes del recipiente las líneas de flujo se modifican alterando los patrones, al grado que algunos de ellos no se presentan. Dicha distancia comienza a ser significativa a partir de los 9 cm.
- 3) La distancia del sólido al fondo del recipiente con agua es más importante que la distancia a las paredes, por alterar fuertemente las líneas de flujo.
- 4) La dona es el patrón que menos se modifica por el cambio de la distancia con las paredes del recipiente.
- 5) La velocidad tangencial asociada al sólido giratorio es constante para que se de el anillo.
- 6) La velocidad tangencial del fluido que está en la frontera del anillo es también constante e igual a la velocidad de surgimiento del mismo.

- 7) El radio del anillo crece linealmente con la frecuencia de rotación del sólido de revolución  $r = k\Omega$ .
- 8) Encontramos que el anillo y la fuente con membrana siguen el criterio de recirculación de Rayleigh, es decir, siguen la ley que dice  $v = \Omega r = c \left( \frac{\sigma}{\eta} \right)$ . Esta ley se aplica si se establece un equilibrio entre la fuerza centrífuga y una fuerza de tipo centrípeta debida a la diferencia de velocidades tangenciales cuando nos acercamos radialmente al sólido de revolución.

Si los sólidos se cambian por objetos que tienen un material que no es mojado por el agua no se alteran las frecuencias de transición de cada flujo. Sin embargo, si el recubrimiento hidrófobo no es rígido se observa que todos los patrones, con excepción de la fuente con membrana, surgen a una frecuencia mayor. La fuente con membrana no cambia su frecuencia de transición. Se observa un flujo mixto; coexisten a una frecuencia dada la fuente y la dona.

Finalmente, y algo que en lo personal me sorprendió encontrar fue el comportamiento tan definido que sigue a la desaparición de la oscilación en la membrana.

## 5.2 Perspectivas:

- 1) Para el caso del anillo, no se pudo determinar si el anillo surge desde la base del sólido de revolución o un poco despegado del mismo. Tampoco se determinó si su crecimiento es lineal desde el inicio, como sucede en el intervalo en que se observó. Creemos que es interesante conocer esto y de ahí inferir si la relación asociada es válida.
- 2) Determinar la altura o forma del borde del anillo, ya que nuestro experimento no nos permite discriminar de las posibles formas. Una vez conocida la forma se podrá inferir si es afectada por los efectos viscosos.
- 3) Ver qué pasa con el aire en este experimento, ya que esta fue una zona no explorada en el presente trabajo y cual sería el efecto de disminuir la presión exterior.
- 4) Falta medir el efecto de la tensión superficial. Esta variable puede ser crítica, porque gran parte de los argumentos presentados para la fuente con membrana se atribuyen a su efecto.
- 5) Es importante verificar hasta qué punto se modifican las transiciones cuando se cambian las propiedades de contacto. Para ello se debe asegurar que el recubrimiento usado es rígido.

## Bibliografía

- 1.-) Joseph D.D. Stability of Fluid Motions II 1976.
- 2.-) Bobrovsky B.Z., Shlien D.J., Brosh A. y Kleinstein G., Phys. Fluids **22**, (4) 781(1979).
- 3.-) Shlien D.J., Bobrovsky B.Z., y Brosh A., Phys. Fluids **23**, (6)1075(1980).
- 4.-) Panton, R. L. Incompressible Flow, Wiley, 1984.
- 5.-) Sena, L. A. Unidades de las magnitudes físicas y sus dimensiones, MIR, Moscu 1979.
- 6.-) CRC, Handbook of Chemistry and Physics 1982, ed CRC.
- 7.-) Sánchez-Jácome, J. R., Chicharro, R. Peralta-Fabi, R. "Efecto fuente en una bomba centrífuga". I Congreso de la División de Dinámica de Fluidos, Oct. 1995.
- 8.-) Chicharro, R. Peralta-Fabi, R. Sánchez-Jácome, J.R. "Observations of Interfacial Flows generated by axisymmetrical Rotating cones". New York USA Dic. 1992.

9.-) Sánchez-Jácome, J.R. Peralta-Fabi, R. "Patrones de Flujo cuando un Cono gira en la interfase agua aire". XXIV Congreso Nacional de Física México Nov 1992.

10.-) Sánchez-Jácome, J.R. Peralta-Fabi, R. "Flow Patter at a Fluid-Fluid Interface in which an axis-symmetrical Solid Rotates Uniformly". (Premiado) Dynamics Days, Austin Texas, USA Ene..1990.

11.-) Sánchez-Jácome, J.R. Peralta-Fabi, R. "Nuevas Observaciones del efecto Weissenberg en agua". XXII Congreso Nacional de Física México Oct. 1989.