

01173

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CONVECCION  
MIXTA A TRAVES DE LA TEORIA PIV”

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA MECANICA

(AREA DE TERMO FLUIDOS)

P R E S E N T A

JORGE LUIS ARENAS DEL ANGEL

DIRECTOR DE TESIS: DR. CESAR TREVIÑO TREVIÑO



UNAM  
POSGRADO

MEXICO, D. F.

2004



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

*Dedico especialmente este trabajo a mis Padres, a quienes lo ofrezco con todo mi cariño, con justo y merecido reconocimiento a la labor que han depositado en mí.*

*A ti hermana por tu cariño y por creer en mí.*

*A ti keiko por tu amor, consejos y apoyo incondicional.*

## **Agradecimientos**

*Un especial agradecimiento a mi tutor el Dr. César Treviño por la confianza y apoyo incondicional otorgado para la realización de este trabajo. Al Dr. Erick Luna por sus consejos y apoyo.*

*Deseo, agradecer y reconocer la confianza y apoyo brindado por todos mis familiares y amigos en mi realización profesional y personal.*

*Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por la oportunidad que ofrece para alcanzar la superación académica y personal.*

*Al posgrado de Ingeniería por permitirme alcanzar un sueño.*

*Al SNI por la beca que se me otorgo.*

*Al IMP por la beca de entrenamiento que se me otorgo para la realización de este trabajo.*

*A la DGEP por la beca que se me otorgo durante mis estudios.*

*A mis compañeros y amigos del cubículo que me apoyaron durante este periodo (Pepe, Lorenzo, Eduardo e Irais). A cada uno de ustedes mil gracias.*

*En especial mi sincero agradecimiento a mi primo hermano Pepe por sus consejos especiales y por las palabras de aliento que constituyeron un estímulo permanente en mí.*

*A la memoria de ti Julio.*

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>4</b>
1.1. Justificación . . . . .	4
1.2. Objetivo del trabajo . . . . .	8
<b>2. Planteamiento del Problema</b>	<b>9</b>
2.1. Descripción del problema . . . . .	9
2.2. Ecuaciones Fundamentales . . . . .	10
2.3. Análisis dimensional . . . . .	12
<b>3. Diseño Experimental</b>	<b>14</b>
3.1. Diseño y Construcción del Modelo Experimental . . . . .	14
3.2. Técnica experimental . . . . .	21
3.2.1. Velocimetría por imágenes de partículas . . . . .	21
3.2.2. Principio del PIV . . . . .	22
3.3. Equipo periférico . . . . .	24
<b>4. Resultados</b>	<b>29</b>
<b>5. Conclusiones</b>	<b>38</b>

## Resumen

Este trabajo está enfocado a obtener experimentalmente la hidrodinámica por convección mixta en un canal vertical cuadrado que tiene un flujo descendente sometido a un calentamiento diferencial. Si las fuerzas de flotación son comparables con las de inercia en flujos a contracorriente se genera un flujo inestable que da lugar a la formación de uno o varios vórtices en la vecindad de la placa caliente. Ello trae consigo que el flujo resultante sea intrínsecamente transitorio y por ende el flujo de calor de la placa al fluido. Se asume que el movimiento de las partículas trazadoras que ayudan a visualizar el flujo tienen densidad casi similar a la densidad del fluido.

Se utiliza la técnica de velocimetría por imágenes de partículas para obtener los perfiles de velocidad en la región de interés. Su principio de operación es el siguiente: Se tiene una cámara de alta resolución acoplada a un láser, el cual sirve para iluminar partículas sembradas en el flujo. Por medio de la correlación cruzada de las imágenes generadas, se obtiene el campo de velocidades del flujo para diferentes tiempos. La ventaja de este tipo de medición es que es no intrusiva, por lo que no altera por sí misma el flujo.

El diseño experimental aquí usado consta de un depósito de almacenamiento de agua que se ubica en la parte superior de un canal vertical cuadrado. El material que conforma las paredes es de acrílico transparente (con baja conductividad térmica), ya que de esta manera se puede estudiar la evolución del flujo desde cualquier zona del canal y las paredes se pueden considerar como adiabáticas. El agua del depósito superior, baja por gravedad a lo largo del canal. Por medio de una bomba hidráulica, el fluido se traslada al primer depósito, para formar un circuito. Una de las paredes en la parte media del canal tiene una placa de aluminio que es la encargada de calentar diferencialmente al fluido que atraviesa el canal.

La temperatura de la placa de aluminio se regula por medio de un sistema electrónico de calentamiento, el cual proporciona una temperatura uniforme en la placa. Se mide la temperatura del campo fluido con un sistema de termopares localizados en las zonas de interés. También se mide la transferencia de calor en la placa como función del tiempo y se correlaciona con la existencia y evolución de los vórtices que aparecerán en la región del fluido. Se obtiene los patrones de velocidad promedio para diferentes valores del número de Richardson, que relaciona las fuerzas de flotación con las inerciales.

Cabe mencionar que este estudio contribuye al avance para este caso de problemas ya que no se contaba con visualizaciones tan claras como las obtenidas en este trabajo.

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Justificación

La medición de la velocidad en un flujo es importante en una infinidad de casos existentes en la ingeniería, tal como es el caso de intercambiadores de calor, colectores solares y en dispositivos electrónicos ya que las aplicaciones que se derivan de estos fenómenos son considerables.

Existen ocasiones en las que se tienen ductos cuadrados con fluidos de baja velocidad, donde se puede presentar el fenómeno de reversión de flujo. Es por eso que el comportamiento del flujo es imprescindible, aunque a veces es suficiente con conocer las velocidades promedio para entender este fenómeno.

Existen muchos casos en los que el flujo es inestable y por ende no estacionario. Dichos flujos requieren ser analizados más a detalle para poder comprender el por qué de las inestabilidades y es aquí donde radica la importancia de la técnica del PIV. Más adelante, se explica a detalle en qué consiste esta técnica, sus principales aplicaciones en la mecánica de fluidos y en la convección mixta.

El parámetro que gobierna la convección mixta es el número de Richardson, donde grandes valores de dicho parámetro implican un dominio de la convección natural, mientras que valores pequeños implican el dominio de la convección forzada. Cuando se tienen valores del número de Richardson de orden unidad, las fuerzas de inercia y de flotación son equiparables, generándose un flujo altamente inestable.

El estudio de las formas acopladas de transferencia de calor por convección mixta es muy

importante en el análisis de dispositivos sujetos a sus efectos simultáneos. El efecto de la conducción de calor acoplado a la transferencia de calor convectiva ha sido el objeto de varios estudios tanto numéricos como analíticos.

La transferencia de calor por convección desde o hacia un cuerpo, comprende el movimiento de un fluido con relación al cuerpo. La transferencia de calor por convección puede ser clasificada de acuerdo a la naturaleza del flujo. Si el movimiento es provocado por las fuerzas de flotación, las cuales se generan por las diferencias de densidad debidas a la diferencia de temperaturas en las diferentes localidades del fluido, a este fenómeno se le conoce como convección natural. Por otro lado, si el movimiento del fluido es provocado por un agente externo, se le denomina convección forzada. El análisis del fenómeno de la convección generalmente se hace asumiendo que existe exclusivamente convección natural o convección forzada. Es necesario considerar que pueden existir condiciones para que exista la convección mixta, en la que se combinan los efectos de la convección natural y de la convección forzada. La convección mixta se presenta cuando las velocidades asociadas con el flujo forzado son del mismo orden que las generadas por los cambios de densidad, generadas por el campo de temperaturas. Las fuerzas de flotación deben de generar un flujo comparable con el flujo forzado. Resulta evidente que las condiciones necesarias para que se presente la convección mixta son muy particulares, por lo que el estudio de este fenómeno no ha recibido la misma atención que la que se le ha dado al estudio de la convección natural y a la convección forzada por separado.

Se han realizado investigaciones referentes a la convección mixta alrededor de cuerpos de diversas geometrías, tales como placas planas, cuerpos cilíndricos y algunos otros cuerpos regulares. También ha sido investigada la convección mixta en el interior de conductos de sección circular y rectangular. Para los casos más simples de convección mixta, se han obtenido soluciones numéricas, pero la mayor parte de los estudios de este fenómeno se realizan de manera experimental. Los resultados publicados se presentan de manera gráfica, y en algunos casos se reportan correlaciones empíricas.

La transferencia de calor en convección mixta, en un canal vertical representa un problema fundamental en ingeniería, por ello ha sido investigado desde ya algunas décadas. J.R. Lloyd, y E. M. Sparrow [1] estudiaron el caso de una placa vertical isotérmica proporcionando información sobre metales líquidos, gases y líquidos ordinarios. Posteriormente, C.M. Winkler [2]



y T.S. Chen [3] junto con W.J. Minkowycz [4] estudiaron analíticamente la convección mixta con condensación de vapor supercalentado en superficies verticales isotérmicas. Dividieron sus estudios en dos regiones fundamentales: convección forzada y convección natural. Encontraron que el parámetro  $Gr/Re^2$ , que representa el número de Richardson, caracteriza los efectos de flotación en un flujo con convección forzada, mientras que el parámetro  $Re/Gr^{1/2}$  caracteriza el efecto de flujo forzado en convección natural. Sus resultados muestran que la fuerza de flotación incrementa significativamente el esfuerzo cortante en la pared y el flujo másico de condensado. En menor escala, la fuerza de flotación también incrementa el flujo de calor en la pared. Aung y Works [5] realizaron una investigación para un flujo desarrollado cuando se tiene calentamiento asimétrico y uniforme, al mismo tiempo que señalan las condiciones necesarias para que exista una reversión en el flujo. Tewary y Jaluria [6] analizaron la convección mixta con fuentes térmicas discretas en superficies horizontales y verticales. Observaron que la fuente de calor aguas arriba afectaba la transferencia de calor de la fuente de calor aguas abajo si la longitud de separación es menor a tres veces el ancho de la placa. La magnitud del efecto es dependiente de la orientación de las fuentes de calor. Cheng y Weng [7] encontraron que el fenómeno donde el flujo cambia de sentido es dependiente del parámetro crítico  $Gr/Re$ . Lavine [8] al igual que Cheng [9] realizaron un análisis de estabilidad a la solución laminar para flujo desarrollado, tanto para el caso de calentamiento asimétrico con flujo de calor uniforme como para calentamiento uniforme asimétrico. Zhang [10] estudió la convección mixta en un canal vertical cuadrado bajo cuatro condiciones de calentamiento asimétrico, simulando el canal de enfriamiento del rotor de una turbina con calor conducido por ambos lados. Sus modelos de calentamiento asimétrico cubren el rango de flujo laminar, la transición y la turbulencia, con un rango de número de Reynolds de  $200 \leq Re \leq 11200$ , siendo que este rango es altamente conveniente para simulación numérica directa. Joye [11] comparó sus resultados experimentales con las correlaciones existentes para convección mixta opuesta en un canal vertical variando los valores del número de Grashof. Los resultados que obtuvo empleando el número de Grashof como parámetro mostraron que existe una disminución en la transferencia de calor conforme se incrementa el valor del número de Grashof. Ligrani [12] estudió ampliamente la convección mixta en canales rectos y curvados, donde la fuerza de flotación era ortogonal al flujo forzado. Barletta [13] divide los casos de estudio para convección mixta en canales verticales en tres

tipos: Temperatura uniforme en ambas paredes, las cuales pueden tener temperatura igual o diferente, temperatura uniforme en unas de las paredes y flujo de calor uniforme en la otra pared y flujo de calor uniforme en ambas paredes. M.M. Sa lah El-Din [14] estudió el efecto térmico y el efecto másico de las fuerzas de flotación sobre el desarrollo de la convección mixta laminar entre dos placas paralelas verticales con calentamiento uniforme. A. Barletta, E. Zanchini [15] estudiaron analíticamente la convección mixta laminar en un canal inclinado, con las siguientes condiciones de frontera: la temperatura de una de las placas es uniforme, mientras que la temperatura de la otra pared es senoidal a la función del tiempo.

## 1.2. Objetivo del trabajo

Los objetivos del presente trabajo son los siguientes:

- Visualizar las líneas de corriente por medio de la técnica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV) de un flujo que es sometido a un calentamiento diferencial en un canal vertical cuadrado, en contracorriente.
- Obtener las dimensiones, geometría y localización del o los vórtices (remolinos) cuando se varían los parámetros fundamentales (Grashof, Reynolds, Parámetros geométricos).
- Presentar de manera gráfica los resultados obtenidos de los experimentos realizados.

## Capítulo 2

# Planteamiento del Problema

### 2.1. Descripción del problema

Como ya se mencionó, el problema de un canal vertical ha recibido mucha atención debido a que las aplicaciones que se desprenden de este tipo de investigación son abundantes.

Se tiene un canal vertical cuadrado donde un fluido que desciende por efecto de las fuerzas inerciales (gravedad) es perturbado térmicamente por medio de una placa plana. La perturbación térmica ocasiona que en el fluido, las fuerzas de flotación generen un flujo ascendente cerca de la placa. Cuando las fuerzas de flotación son comparables con la de inercia del flujo forzado se genera un flujo inestable por la existencia de un punto de inflexión. Consideremos que el flujo forzado inicialmente se encuentra a temperatura ambiente  $T_0$ .

El canal cuenta con un calentamiento asimétrico, ya que una de las cuatro paredes del canal de acrílico tiene una placa plana de aluminio de 8 cm de largo por 7 cm de ancho, con temperatura uniforme  $T_w$ , mientras que las otras tres paredes se consideran adiabáticas.

Las ecuaciones se escriben solo para obtener los parámetros adimensionales que influyen en el problema, debido que el objetivo de la tesis es experimental.

El sistema cartesiano de ejes es de forma tal que el eje longitudinal  $x$  es paralelo al la placa y con el mismo sentido que la gravedad, mientras que el eje transversal  $y$  es perpendicular a la placa. Las componentes de velocidad longitudinal y transversal a la placa son  $u$  y  $v$  respectivamente, y el origen de coordenadas está ubicado en el borde de entrada de la placa como se muestra en el siguiente esquema 2-1

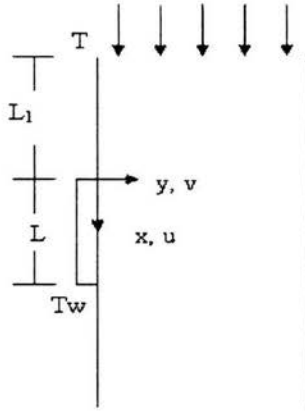


Figura 2-1: Esquema del problema.

## 2.2. Ecuaciones Fundamentales

Las ecuaciones que rigen el fenómeno de convección en un canal vertical son la ecuación de continuidad

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (2.1)$$

la ecuación de cantidad de movimiento en dirección longitudinal y transversal son

$$\rho_0 \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho g \quad (2.2)$$

$$\rho_0 \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (2.3)$$

y la ecuación de la energía

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right). \quad (2.4)$$

En estas ecuaciones,  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $C_p$  y  $k$  son la densidad, la viscosidad, el calor específico y la conductividad térmica del fluido, respectivamente.  $\rho_0$  es la densidad inicial del fluido,  $\alpha$  es la difusividad térmica del fluido,  $\alpha = k/\rho_0 C_p$ .  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $p$  es la presión y  $T$  la temperatura del fluido. Aquí se ha despreciado los efectos de la disipación viscosa y se considera que los cambios de densidad, producidos por los cambios de temperatura son despreciables comparados con la densidad del fluido (aproximación de Boussinesq).

Las condiciones de frontera son las siguientes

$$\begin{aligned} u &= v = 0 \text{ en } y = 0 \\ u &= v = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \text{ para } y = H \\ T &= T_w \text{ si } 0 \leq x \leq L, y = 0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial y} &= 0 \text{ si } 0 > x > L, y = 0 \\ p &= p_0, T = T_0, u = \bar{u}(y), \text{ para } x = -L_1 \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial x} = v = 0 \text{ para } x \rightarrow +\infty \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \mu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \text{ en } y = 0 \text{ ó } y = H$$

A continuación se utilizan los siguientes cambios de variable para adimensionalizar las ecuaciones:

$$\begin{aligned} X &= \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, U = \frac{u}{u_0}, V = \frac{v}{u_0} \\ P &= \frac{(p - p_0) - \rho_0 g(L_1 + x)}{\rho_0 u_0^2}, \text{ y } \theta = \frac{(T - T_0)}{(T_w - T_0)}, \end{aligned} \quad (2.8)$$

donde  $u_0 = \frac{1}{H} \int_0^H \bar{u}(y) dy$ .

Las ecuaciones adimensionalizadas de continuidad, cantidad de movimiento en dirección longitudinal y transversal junto con la ecuación de la conservación de la energía respectivamente son

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (2.9)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} - Ri\theta + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (2.10)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad (2.11)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{PrRe} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (2.12)$$

las cuales están sujetas a las condiciones de frontera adimensionales siguientes

$$\begin{aligned} U &= V = 0, \text{ en } Y = 0, 1, \\ U &= U_0(Y), V = 0, \text{ en } X = -\frac{L_1}{L}, \\ \theta &= 1 \text{ en } Y = 0 \text{ para } 1 \geq X \geq 0, \\ \frac{\partial \theta}{\partial Y} &= 0 \text{ en } Y = 0, \text{ para } 1 < X < 0, \\ \frac{\partial \theta}{\partial Y} &= 0 \text{ en } Y = 1 \text{ para } 1 < X < 0, \end{aligned} \quad (2.13)$$

Las ecuaciones de frontera de la presión adimensionales en las paredes y arriba son

$$\frac{\partial P}{\partial Y} = \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2}, \text{ para } y = 0 \text{ ó } y = \frac{H}{L}$$

$$\begin{aligned} P &= 0, \text{ para } X = -\frac{L_1}{L} \\ P &= P_\infty, \text{ para } X \rightarrow \infty \end{aligned}$$

### 2.3. Análisis dimensional

El estudio del fenómeno de convección mixta frecuentemente se realiza analizando por separado la convección forzada pura y la convección natural pura. Esto se hace debido a que en la mayoría de los casos el efecto que tiene alguna de ellas trasciende más que el efecto que tiene la otra. Por ello resulta importante determinar el criterio que indique la predominancia de alguno de los fenómenos. Comúnmente se emplea el número de Richardson basado en la relación entre el número de Grashof y el cuadrado del número de Reynolds, para caracterizar la convección

mixta. El número de Grashof,  $Gr$ , se define como  $Gr = g\beta(T_w - T_0)L^3/\nu^2$ , donde  $\beta$  es el coeficiente de expansión volumétrica,  $T_w$  es la temperatura de la placa,  $T_0$  es la temperatura de la corriente libre,  $L$  es una longitud característica de la placa y  $\nu$  la viscosidad cinemática. Por su parte, el número de Reynolds,  $Re$ , se define como  $Re = \rho U_0 L/\mu$ .

El número de Grashof juega el mismo papel en la convección libre que el que juega el número de Reynolds en la convección forzada. Hay que recordar que el número de Reynolds provee una medida de la relación de fuerzas de inercia respecto a las fuerzas viscosas actuando sobre el fluido. El número de Grashof indica la relación de las fuerzas de flotación con respecto a las fuerzas viscosas actuando sobre el fluido.

Es necesario tener en cuenta que esto se cumple sólo cuando los efectos de la convección forzada y natural son comparables. Generalmente se considera que los efectos de la convección natural y forzada actúan simultáneamente cuando  $(Gr_L/Re_L^2) \sim 1$ , el subíndice indica que ambos números son calculados con la misma longitud característica  $L$ . Si la desigualdad  $(Gr_L/Re_L^2) \ll 1$  se satisface, los efectos de la convección natural pueden ser despreciados. Contrariamente, si  $(Gr_L/Re_L^2) \gg 1$ , los efectos de la convección forzada pueden ser despreciados. En sentido estricto, una convección natural es aquella que es inducida sólo por fuerzas de flotación, y en tal caso  $(Gr_L/Re_L^2) \rightarrow \infty$ , mientras que para la convección puramente forzada será necesario que  $(Gr_L/Re_L^2) \rightarrow 0$ . Algunos autores proponen intervalos más específicos como  $0,01 < Gr/Re^2 < 100$  para la presencia de la convección mixta. Sin embargo, este intervalo depende de la dirección del flujo forzado con respecto al flujo natural y de la geometría del cuerpo. Consecuentemente, este rango no se puede generalizar.

Lo más frecuente es utilizar el criterio de la proporción del número de Grashof respecto al cuadrado del número de Reynolds para caracterizar la convección mixta, pero el exponente al que se eleva el número de Reynolds en realidad depende de la geometría y de las condiciones de la capa límite térmica, por lo que no es necesariamente igual al cuadrado del Reynolds, estando dicho exponente en el rango entre el cuadrado y al cubo.

El experimento que se realizó abarcó diversos valores del número de Richardson para ver cómo afecta este parametro adimensional en la respuesta del flujo.



## Capítulo 3

# Diseño Experimental

### 3.1. Diseño y Construcción del Modelo Experimental

El estudio que se presenta en esta tesis, está basado en experimentos realizados en el laboratorio. Para llevar a cabo los experimentos, fue necesario construir un modelo adecuado a las características del fenómeno.

En primer lugar, se elige el fluido que se ha de emplear, y de acuerdo al fluido elegido, se diseña el sistema que resulte idóneo a los fines perseguidos.

El fluido elegido es un líquido, debido a la facilidad que este tipo de fluidos presentan en su manejo, comparándolo con los fluidos gaseosos; además de que los líquidos alcanzan un flujo completamente desarrollado en una distancia más corta y se logra con mayor facilidad una distribución uniforme de velocidades.

Dentro de los fluidos líquidos, el agua resulta ser más atractiva para los fines buscados en este proyecto, ya que sus propiedades físicas como viscosidad, densidad, coeficiente de expansión volumétrica, capacidad térmica específica y de conductividad térmica, permiten variar con facilidad las condiciones de operación del modelo experimental; además, el agua al ser incolora, permite tener una buena visualización de las líneas de corriente con la ayuda de un trazador. Por otro lado, su abundancia y bajo costo lo hacen más atractiva con respecto a otros líquidos, dado que las cantidades empleadas en los ensayos son considerables.

En esta figura 3-1 se muestra un bosquejo del sistema empleado para la realización de los experimentos, los cuales se realizan con condiciones estacionarias. Para asegurar las condiciones de estado permanente durante el desarrollo de los ensayos, es necesario que el flujo de agua a través del canal de la experimentación sea constante.

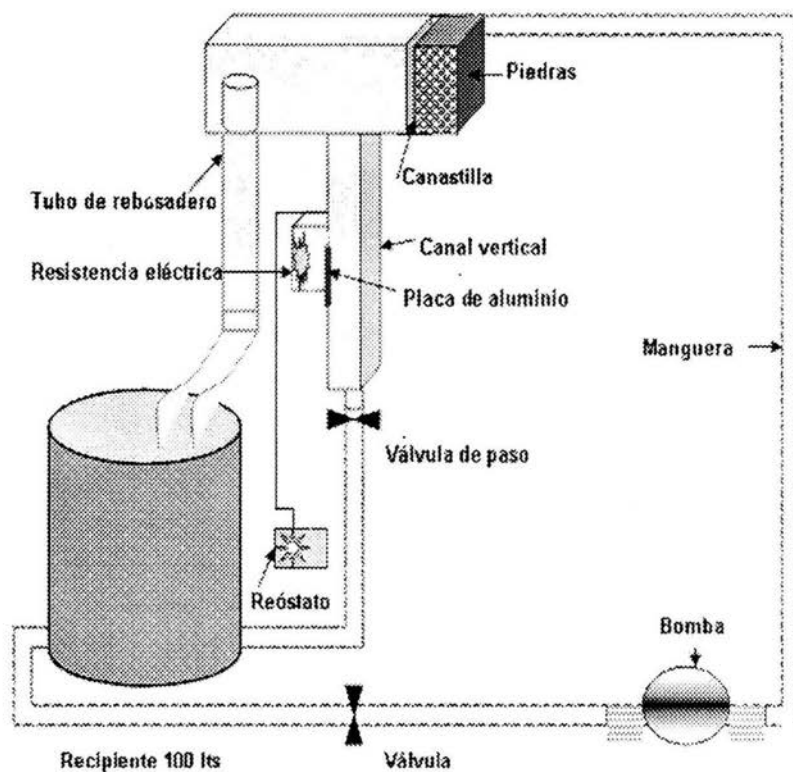


Figura 3-1: Modelo experimental.

El depósito superior se encuentra abierto a la atmósfera al igual que la salida de la válvula. Entonces, considerando que la pérdida de carga hidráulica a través de la válvula de regulación de flujo es fija y que el agua fluye de manera descendente por acción de la gravedad, resulta necesaria una carga hidráulica constante a lo largo del sistema para poder cumplir la condición referente a un flujo constante fijo a través del conducto de experimentación. El depósito superior esta hecho de acrílico transparente, se llena con la ayuda de una bomba que tiene un caudal mayor requerido en el canal vertical para tener una carga hidráulica constante durante el ensayo. El nivel superior del agua en el depósito se mantuvo constante empleando un tubo de rebosadero que se encuentra dentro del depósito superior, con la finalidad de evacuar el agua sobrante y mantener así el nivel superior del agua a una misma altura. El tubo de rebosadero se encuentra conectado a un recipiente donde se almacena el fluido estudiado y se recircula a lo largo de todo el proceso. Para evitar que haya perturbaciones debido a la bomba, se adecuó una canastilla con pequeñas rocas, junto con un una pared de acrílico provista de perforaciones, tal como se muestra en la figura 3-2

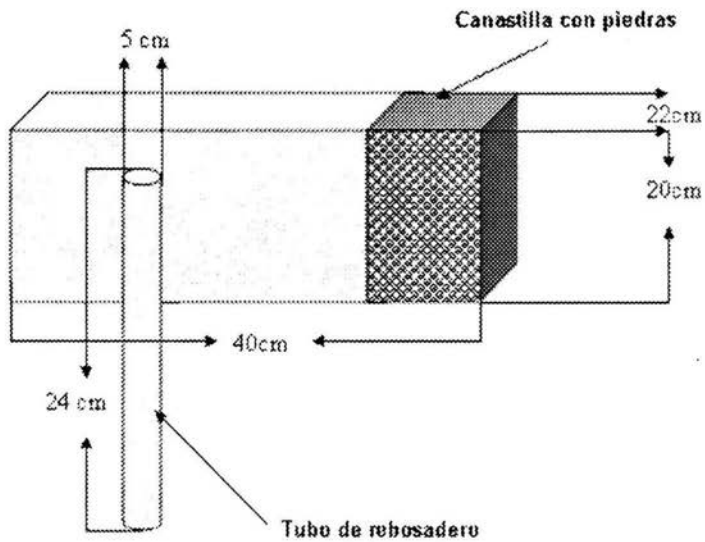


Figura 3-2: Deposito superior

Se pretendió que el agua de llenado no golpeará directamente en la entrada del conducto de experimentación, sino que primero pasará por la canastilla llena de piedras, y a su vez por una serie de filtros (popotes), para que en la entrada del canal el flujo sea lo más posible laminar. Este canal también está construido con acrílico de 6 mm. de espesor. La razón por la que se escogió acrílico para diseñar el canal, es que éste cuenta con propiedades favorables para el experimento como, la facilidad de visualización, armado fácil y mayor resistencia.

Debido a las características del sistema de anemometría por imágenes de partículas (PIV), es necesario que la sección de prueba sea transparente, como se muestra en la figura 3-3

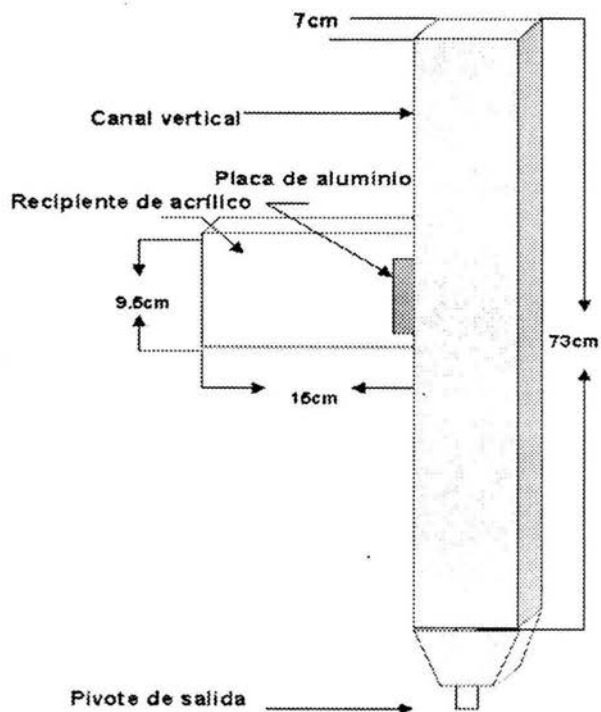


Figura 3-3: Canal vertical

### Vista frontal de la placa de aluminio

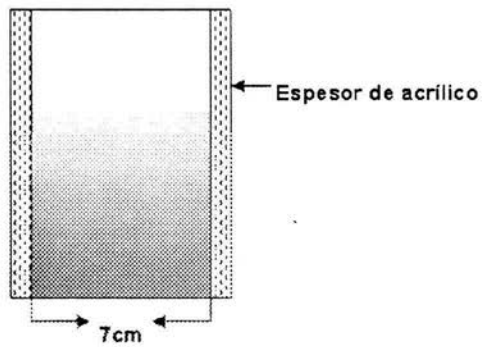


Figura 3-4: Placa de aluminio

Estando el fluido en el canal, se somete a un calentamiento diferencial por efectos de la placa de aluminio (figura 3-4) que está a temperatura uniforme en una de las cuatro paredes

del ducto, por lo que este tipo de calentamiento se denomina asimétrico. La temperatura de la placa se regula por medio de una resistencia eléctrica que se encuentra en un recipiente de acrílico lleno de agua. Esta se puede variar regulando la intensidad de corriente que fluye por la resistencia gracias a un reóstato que se encuentra acoplado a dicha resistencia.

La placa cuenta con nueve termopares de tipo K, cuya función es sensar la temperatura con el objeto de ver si se cumple la restricción de tener temperatura uniforme. Estos termopares se encuentran acoplados a un termómetro digital donde se leen las temperaturas que se registran en la placa, tal como se muestra en la figura 3-5.

### Vista frontal de la placa

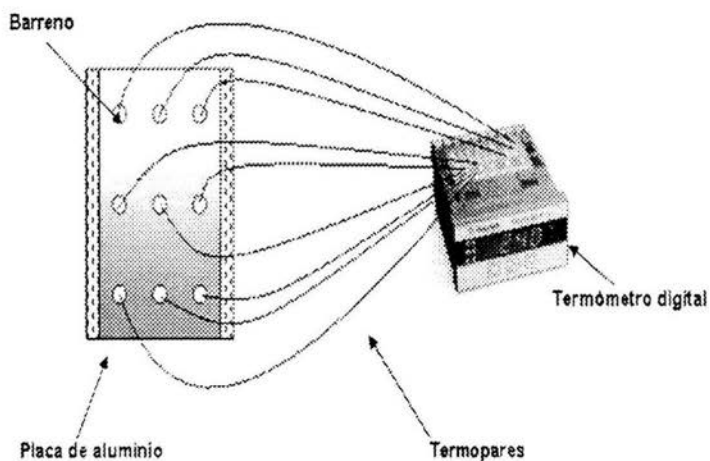


Figura 3-5: Placa con termopares

## 3.2. Técnica experimental

### 3.2.1. Velocimetría por imágenes de partículas

La técnica usada en este experimento es denominada velocimetría por rastreo de partículas, (PIV, Particle Image Velocimetry) que se muestra en la figura 3-6. Es una técnica relativamente nueva que proporciona el campo instantáneo de velocidad para intervalos de tiempos cortos. Con esta técnica, podemos observar la evolución del campo de velocidades y resulta ser una herramienta ideal para la finalidad del experimento.

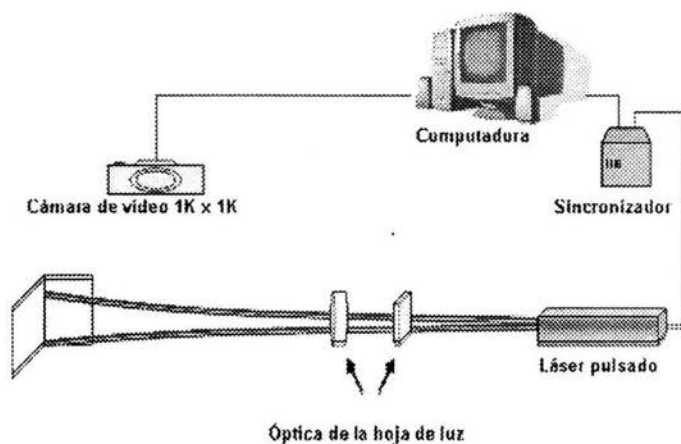


Figura 3-6: Técnica PIV



### 3.2.2. Principio del PIV

El arreglo experimental básico del PIV (figura 3-7) , consiste en una serie de subsistemas. En la mayoría de las aplicaciones, partículas trazadoras, deben ser agregadas al flujo. Dichas partículas son iluminadas por una hoja de luz láser, por lo menos dos veces en un pequeño intervalo de tiempo. La luz dispersada por las partículas es captada y guardada, ya sea en un simple negativo fotográfico o en dos cuadros separados por un sensor de CCD especial para correlación cruzada. Los datos adquiridos por el sensor de CCD son transmitidos y guardados en la memoria de una computadora. El desplazamiento de las partículas entre los pulsos de luz, es determinado por medio de un procesamiento posterior de las imágenes.

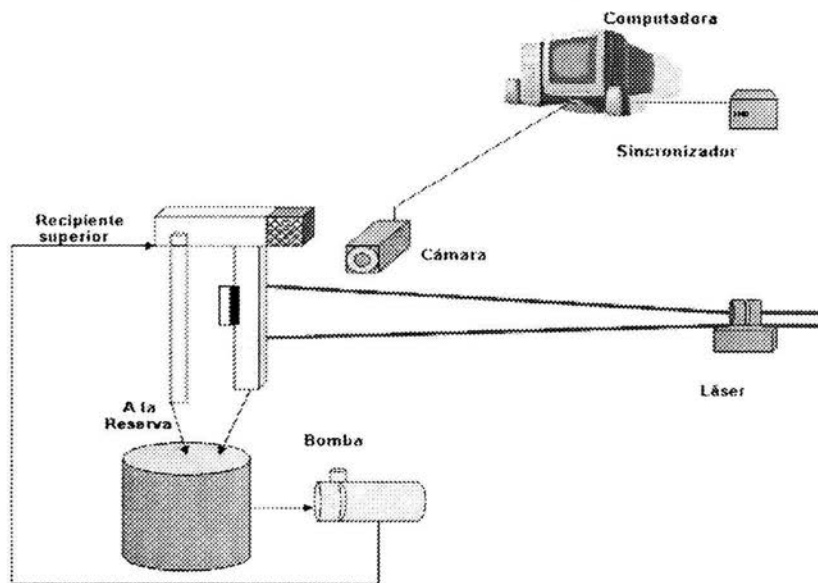


Figura 3-7: Arreglo experimental basico PIV.

Para realizar una interpretación correcta de la gran cantidad de datos recolectados por la técnica del PIV es necesaria una técnica sofisticada de post-procesamiento. Las imágenes digitales adquiridas por el PIV son divididas en pequeñas regiones denominadas áreas de interrogación. El vector desplazamiento local entre la primera y la segunda imagen es determinado por métodos estadísticos, los cuales pueden ser auto-correlación o correlación cruzada. Se supone que todas las partículas dentro de una región de interrogación se desplazan de forma homogénea en cada par de imágenes. La proyección del vector velocidad del flujo local dentro del plano de la hoja láser es calculada tomando en cuenta el tiempo entre los dos pulsos del láser. Este proceso se repite en todas las regiones de interrogación consiguiendo así, el campo de velocidades completo para la imagen adquirida por la cámara.

Algunas características del PIV son:

Velocimetría no-intrusiva. De forma contraria a otras técnicas de velocimetría como anemometría de hilo caliente (HWA) y diferencias de presiones, la técnica del PIV es una técnica óptica que funciona en forma no-intrusiva, lo cual permite que sea usada tanto en flujos rápidos como en capa límite.

Medición indirecta de la velocidad. Del mismo modo que el anemómetro láser Doppler (LDV), la técnica del PIV obtiene la velocidad del flujo, por medio de la velocidad de los trazadores inmersos en el flujo.

Técnica del campo completo. El PIV permite adquirir imágenes de gran parte de un flujo, y por consecuencia, se obtiene el campo de velocidades completo de la imagen adquirida en un instante  $\Delta t$ . Algunas otras técnicas (LDV,HWA) únicamente proporcionan la velocidad puntual del flujo en función del tiempo. En cambio, el PIV proporciona todo el campo de velocidades, limitado únicamente por el campo de visión de la cámara.

### 3.3. Equipo periférico.

#### Cámara de CCD

La cámara utilizada por el PIV, es digital marca y modelo: Dantec Dynamics HiSense PIV/PLIF (Figura 3-8). Esta contiene un chip de CCD 1k X 1k, el cual tiene un modo de control tal que puede ser usado por el PIV para una rápida adquisición de pares de imágenes. El CCD es expuesto a la luz dispersada el primer pulso de la hoja láser y es adquirida una imagen completa de 1k X 1k. Posteriormente el chip es reiniciado, y expuesto a la luz dispersada por el segundo pulso de la hoja láser y una segunda imagen completa de 1k X 1k es guardada.

Ambas imágenes son transferidas al procesador FlowMap PIV por un conector digital. El tiempo mínimo entre este par de imágenes es de  $1\mu s$ .

Ambas imágenes son procesadas con algoritmos de correlación cruzada, para obtener mapas de vectores de velocidad del campo de visión de la cámara.

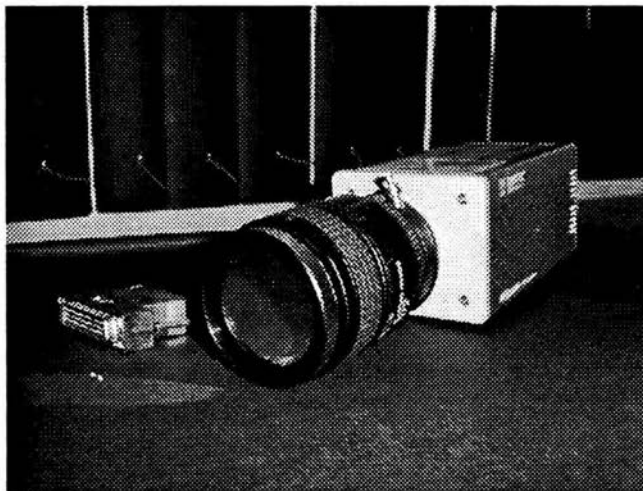


Figura 3-8: Camara Dantec Dynamics HiSense PIV/PLIF

### Láser NEWWAVE GEMINI PIV

Este tipo de láser (Figura 3-9) se usa para flujos de agua y algunos flujos de aire de baja velocidad. El control puede efectuarse de modo interno (control manual) o en modo externo (por medio de un controlador o señales lógicas).



Figura 3-9: Láser NEWWAVE GEMINI PIV

El láser contiene en su interior (figura 3-10) dos cabezas láser con longitud de onda en la salida de 1064 [nm], las cuales están colocadas en una misma base. Los rayos generados por las cabezas láser son combinados y entran en un generador de 2° armónico (SHG) para producir pulsos de luz verde polarizada (532 nm). La salida del generador de segundo armónico (SHG) incide en un espejo dichroico que transmite la energía residual de 1064 (nm) hacia unos metales que absorben esta energía y refleja la luz verde de 532 (nm) por la salida del láser.

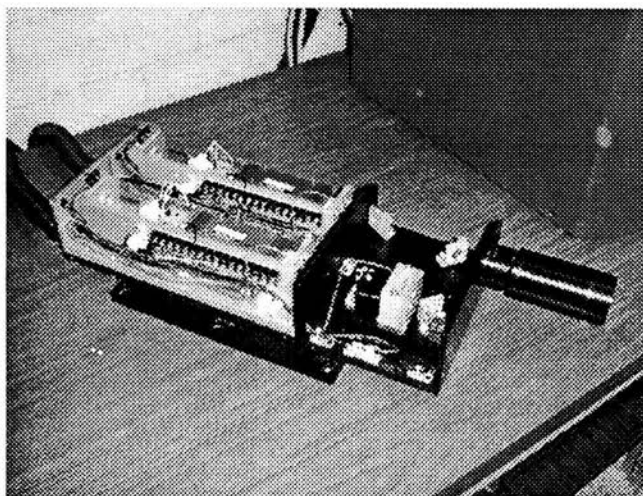


Figura 3-10: Arreglo interno del láser NEWWAVE SOLO PIV

Para obtener una hoja de luz láser es necesario un arreglo óptico (figura 3-11) para lo cual se implementan una serie de lentes cilíndricas. Así mismo, el arreglo óptico permite girar y modificar el grosor de la hoja láser.

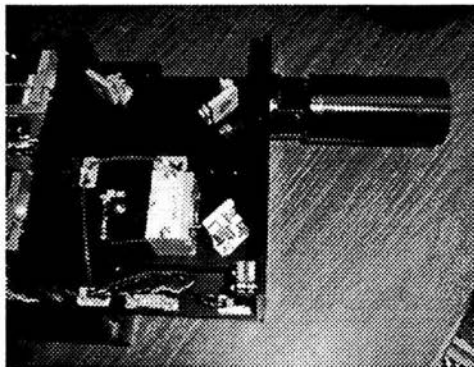


Figura 3-11: Arreglo óptico para obtener una hoja láser

## Partículas trazadoras

La correcta elección de las partículas trazadoras es muy importante para un buen funcionamiento de la técnica PIV. Las partículas seleccionadas para este experimento fueron, de poliamida. Estas partículas sirven para aplicaciones con flujos líquidos. Están hechas de forma esférica y de superficie lisa.

Algunos datos técnicos de estas partículas son:

Diámetro medio	$10\mu$
Distribución de tamaño	$2 - 20\mu$
Forma de las partículas	<i>esférica</i>
Densidad	$1,1 [g/cm^3]$
Material	<i>vidrio borosilicato.</i>

## Parámetros experimentales.

- Tiempo entre pulsos de los láseres:  
 $9000 \mu s.$
- Area de interrogación de estudio:  
 $64 \times 64$  pixeles.

## Capítulo 4

# Resultados

El objetivo de la presente tesis es obtener los perfiles de velocidad a contracorriente del flujo inmerso en un canal vertical en presencia de convección mixta. Se obtuvieron las imágenes promedio de cada secuencia tomada (sup2, sup1, sup, placa, inf, inf1) como se observa en la figura 4-1. Que muestran los patrones de flujo característicos del fenómeno de convección mixta. Estas imágenes son el resultado de promediar las líneas de corriente de 5040 fotografías por cada secuencia.

Se empezó a experimentar con un valor del número de Richardson (que es el parámetro que rige la convección mixta) de 22.51, ya que para este valor, empieza a aparecer el vórtice junto a la placa por efectos de la perturbación térmica.

El número de Richardson se incrementó de manera que los valores obtenidos corresponden a una diferencia de temperatura entre la placa y el fluido de 5°C, 10°C y 15°C para los números de Richardson de 22.51, 41.5 y 60.8, respectivamente. mientras que para 20°C, 30°C, 40°C y 50°C los números de Richardson fueron 60.8, 81.49, 119.45 y 157.3.

A continuación se presentan las dimensiones del vórtice (longitud y ancho) y su localización (distancia de separación de la placa, en dónde nace y dónde termina).



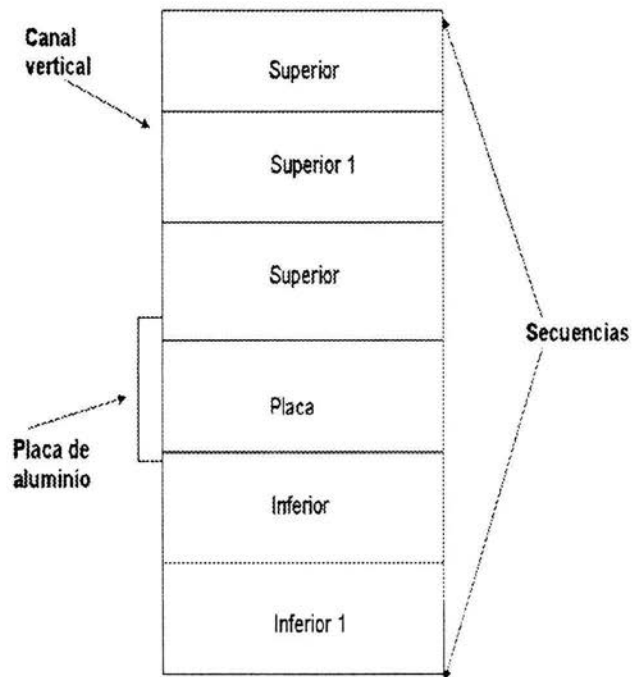


Figura 4-1: Secuencias tomadas

$$Ri = 22,51$$

Dimensiones:

Longitud = 10.5 cm.

Ancho = 1 cm.

Localización:

0.8 cm. separado de la placa.

0.7 cm. por arriba de la placa.

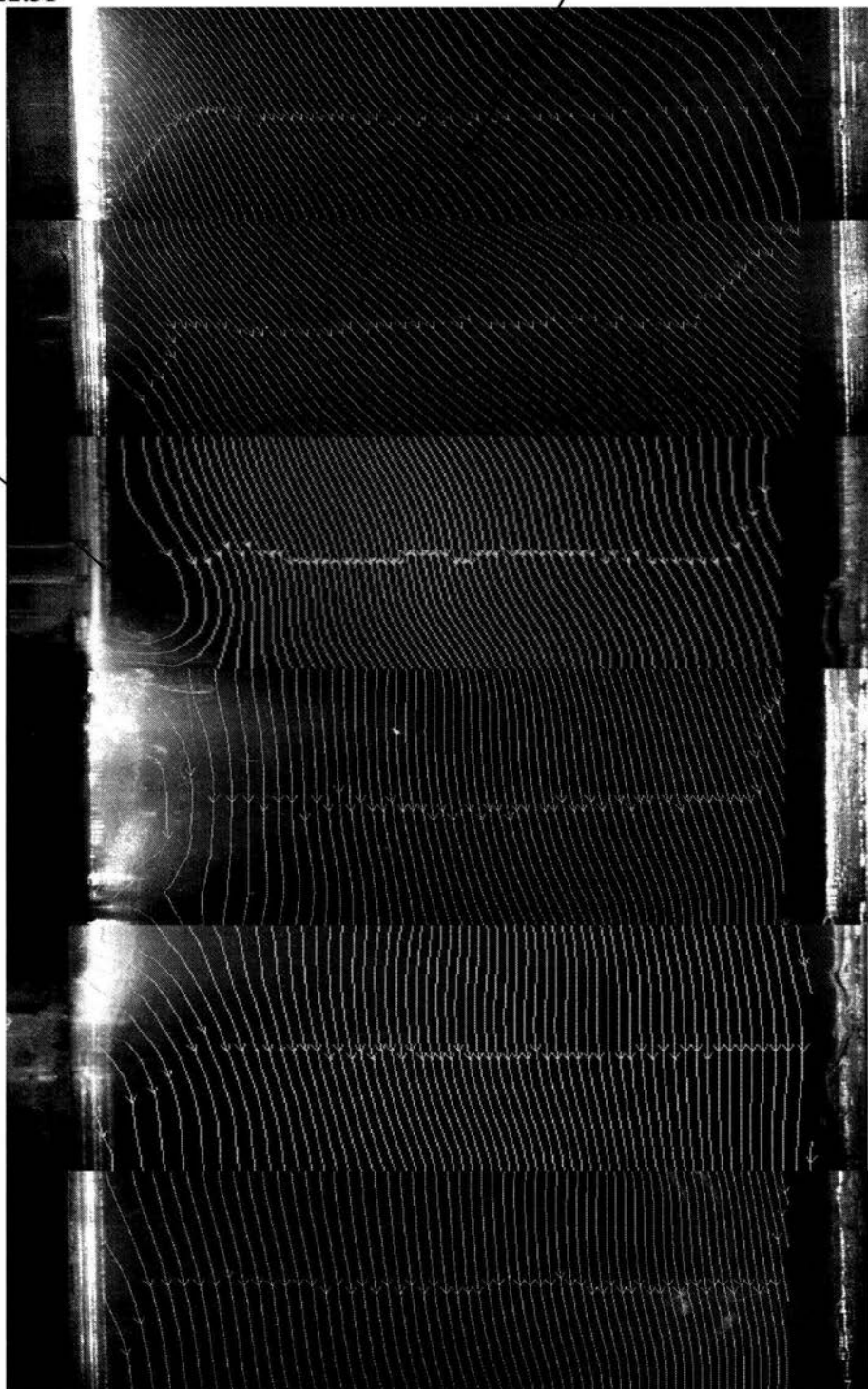
- Las fuerzas inerciales son mayores que las fuerzas de flotación.
- La diferencia de temperaturas ocasiona que en la vecindad de la placa las fuerzas de flotación provoquen que el fluido tienda a subir, pero no son lo suficientemente grandes como para lograr que se forme una recirculación en el vórtice. Como se muestra en la figura.

$Ri = 22.51$

Líneas de corriente

Perturbación térmica

Placa de aluminio



$$Ri = 41,5$$

Dimensiones :

Longitud = 12.5 cm.

Ancho = 1.8 cm.

Localización:

0.2 cm. separado de la placa.

1 cm. por arriba de la placa.

8.5 cm naciendo por arriba de la placa.

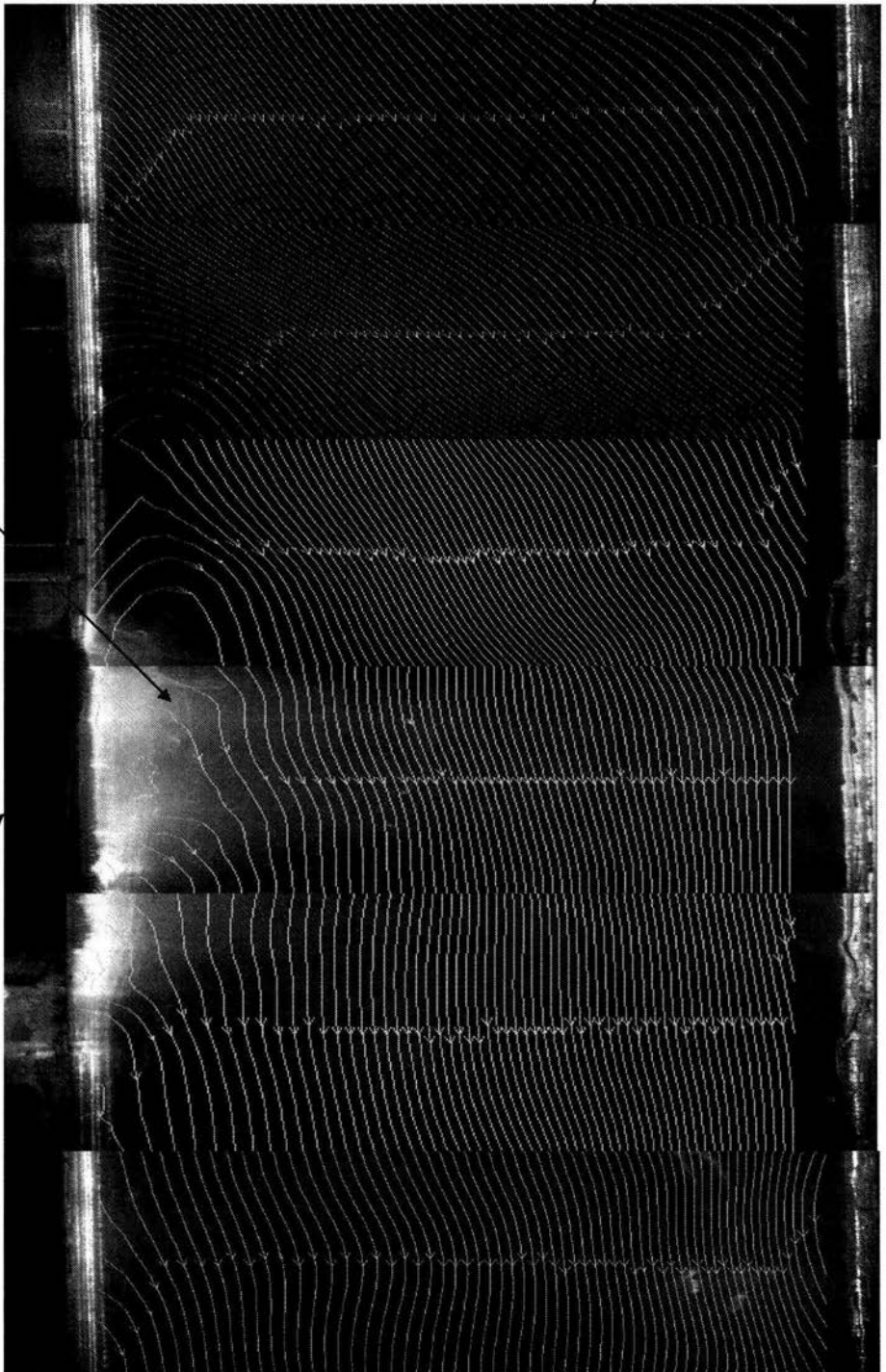
- El vórtice se ensancha y tiende a descender, se encuentra en la parte superior de la placa.
- Se tiene un salto de temperatura muy marcado inmediatamente después de la placa. Como se muestra en la figura.

Ri = 41.5

Líneas de corriente

Perturbación  
térmica

Placa de  
aluminio



$$Ri = 60,8$$

Dimensiones:

Longitud =14 cm.

Ancho =1.6 cm.

Localización:

0.2 cm. separado de la placa.

0.8 cm. por arriba de la placa.

10 cm. naciendo por arriba de la placa.

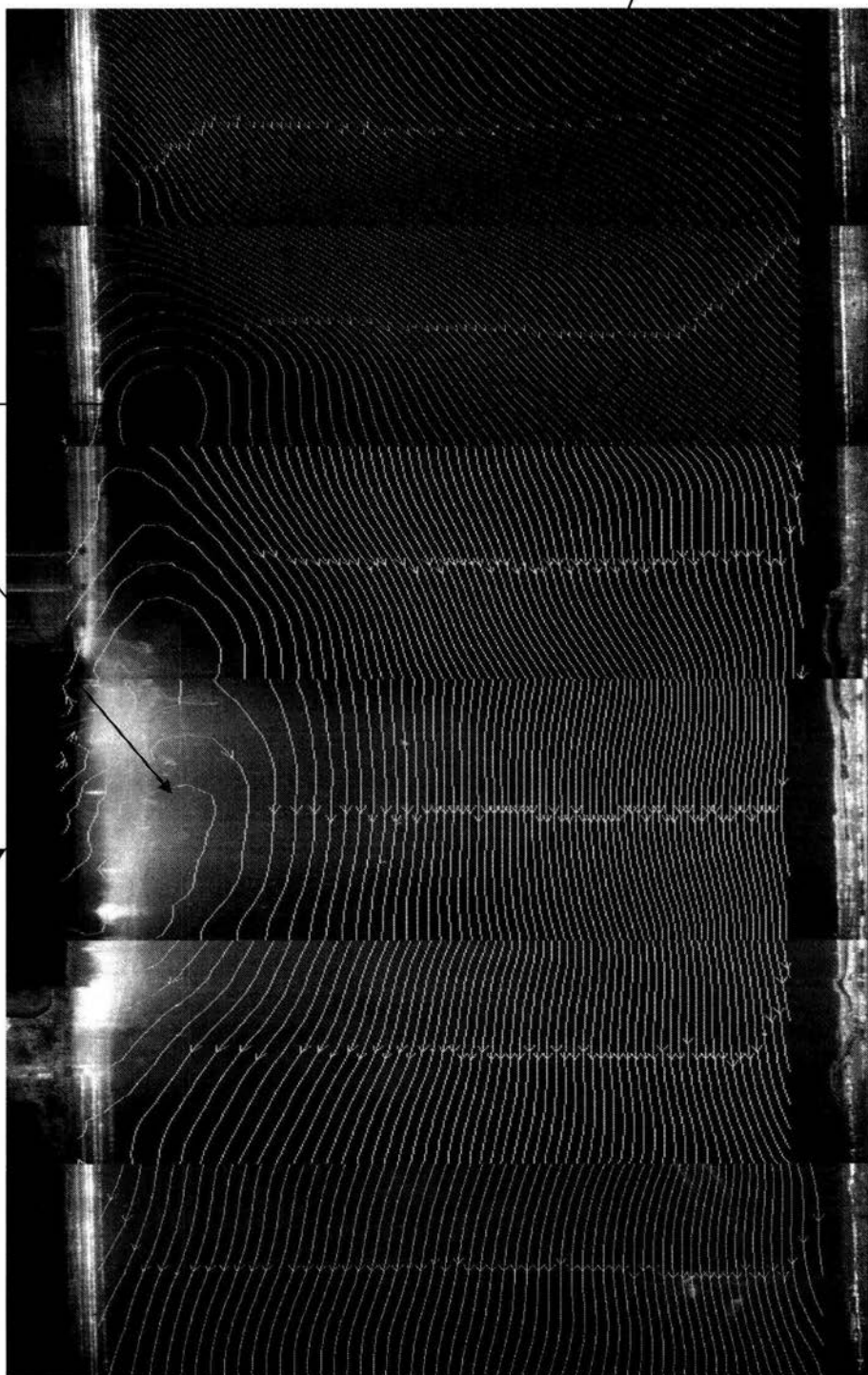
- El ancho del vórtice es mucho más notorio, pero sin percibir un cierre de las líneas de corriente.
- En la parte superior se genera una perturbación mayor. Como se muestra en la figura.

Ri=60.8

Líneas de corriente

Vórtice

Placa de aluminio



$$Ri = 81,49$$

Dimensiones:

Longitud =18.5 cm.

Ancho =1.8 cm.

Localización:

0.2 cm. separado de la placa.

1 cm. por arriba de la placa.

12.5 cm. naciendo por arriba de la placa.

- Las líneas de corriente tienden a cerrarse formando así un vórtice mucho más definido que tiende a dirigirse hacia la derecha del canal. Tiene una longitud menor y con el centro de éste más alejado de la placa. Como se muestra en la figura.

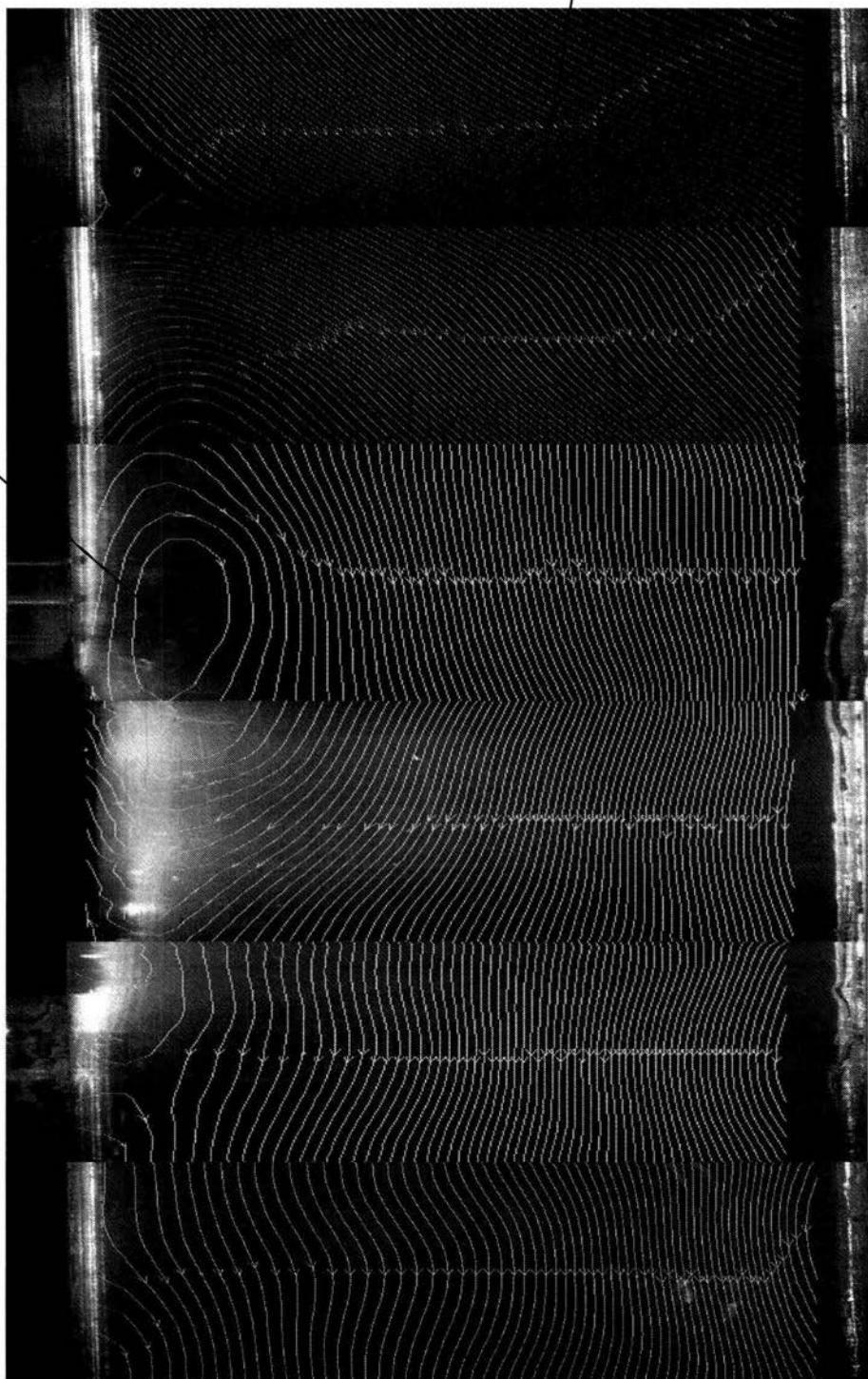


Ri = 81.49

Líneas de corriente

Vórtice

Placa de aluminio



$$Ri = 119,45$$

Dimensiones:

Longitud =17 cm.

Ancho =2.4 cm.

Localización:

0.2 cm. separado de la placa.

1 cm. por arriba de la placa.

16.5 cm. naciendo por arriba de la placa.

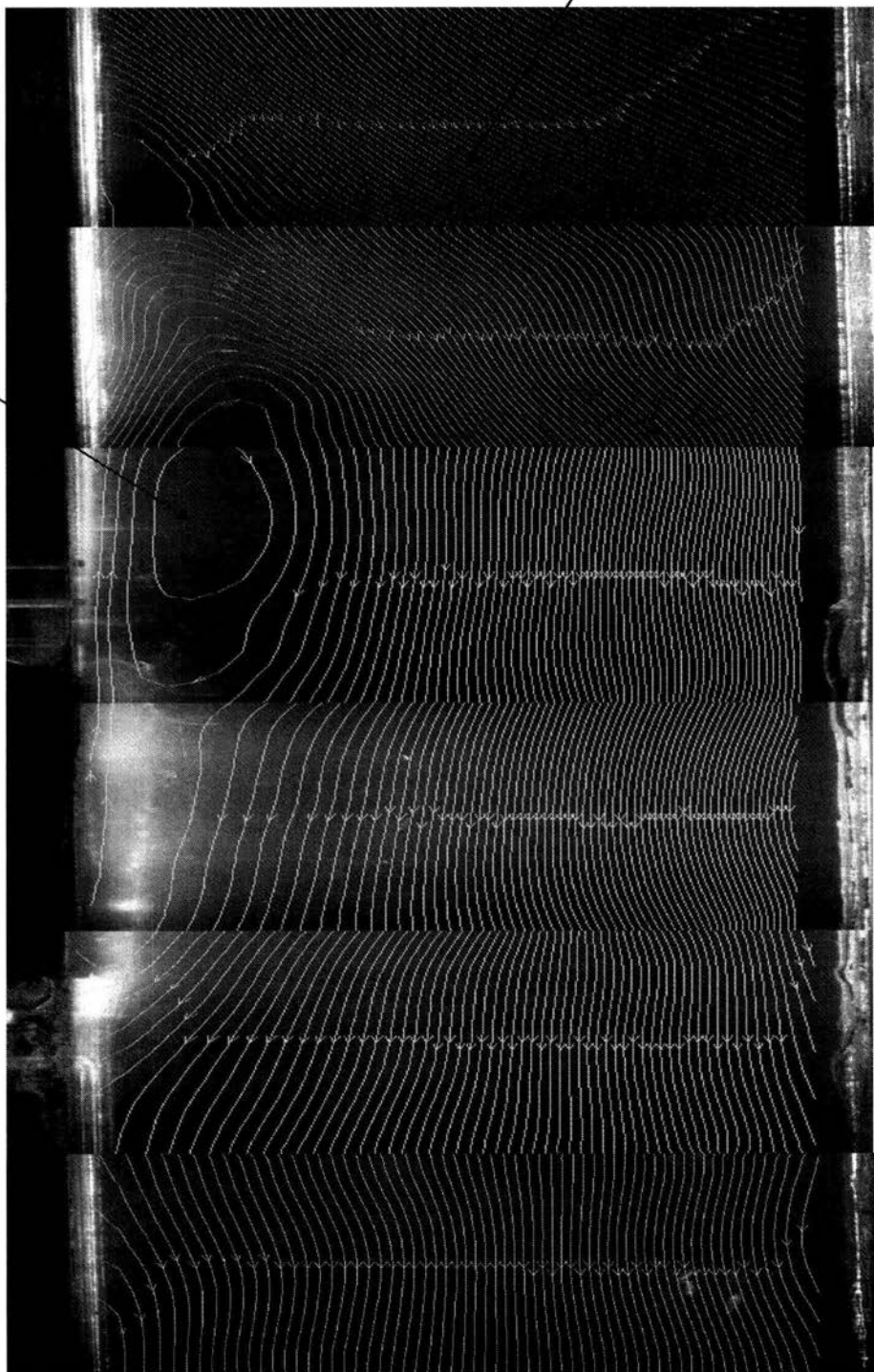
- En la vecindad de la placa, las líneas de corriente suben por efecto de las fuerzas de flotación, generando así un vórtice muy bien definido.
- En la parte superior de la placa el vortice tiene un ensanchamiento mayor.
- En la parte inferior de la placa se tiene un salto de temperatura. Como se muestra en la figura.

Ri = 119.45

Líneas de corriente

Vórtice

Placa de aluminio



$$Ri = 157,30$$

Dimensiones:

Longitud =16 cm.

Ancho =3.4 cm

Localización:

1 cm. separado de la placa.

1 cm. por arriba de la placa.

17 cm. naciendo por arriba de la placa.

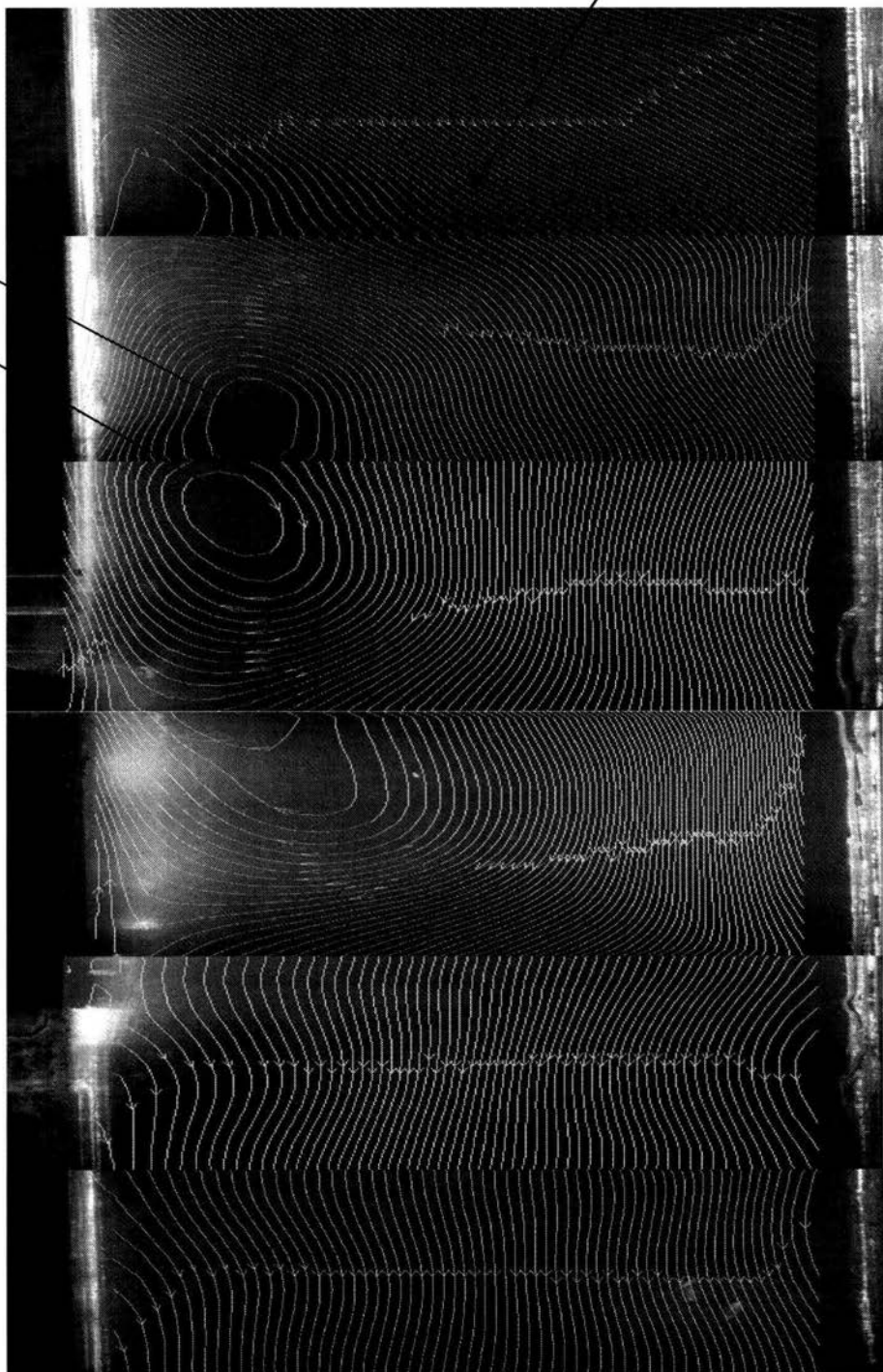
- Se tiene un apareamiento de dos vórtices muy por arriba de la placa. La influencia de este apareamiento es muy grande, generando así un solo vórtice con un ancho muy considerado.
- En la parte inferior de la placa se tiene flujo desarrollado. Como se muestra en la figura.

$Ri = 157.30$

Líneas de corriente

Vórtice

Placa de aluminio



$Ri = 194$

Dimensiones:

Longitud = 15 cm.

Ancho = 3.4 cm.

Localización:

1.2 cm. separado de la placa.

1 cm. por arriba de la placa.

16.5 cm. naciendo por arriba de la placa.

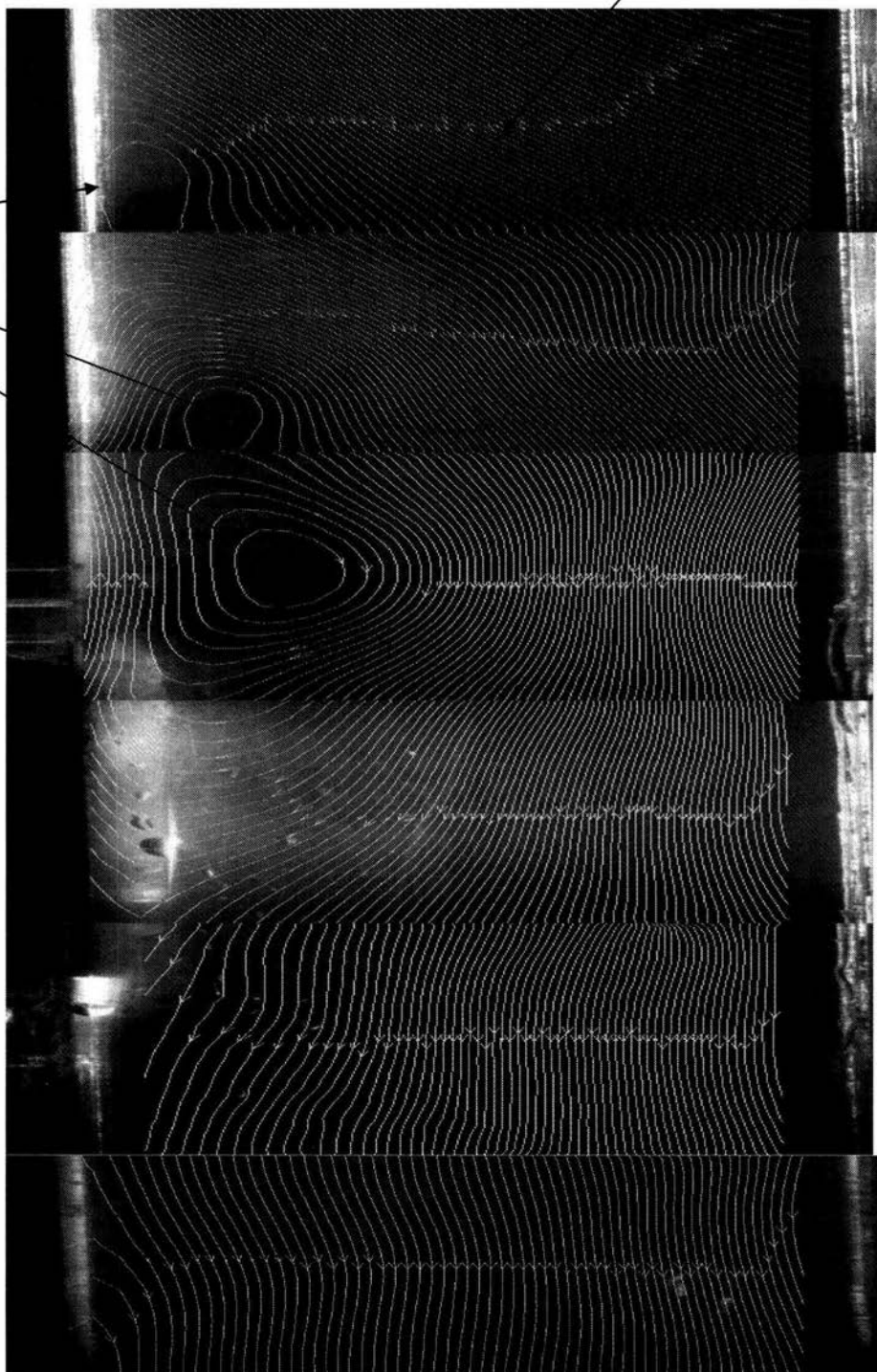
- Nace un vórtice por arriba de la placa no muy definido, debido a que las líneas de corriente no tienden a cerrarse, no siendo así el caso por debajo de éste, en donde se generará un apareamiento de dos vórtices, siendo uno mayor al otro.
- El mayor de estos dos vórtices está más deformado que el otro. Y tiende a dirigirse hacia la parte derecha del canal. Como se muestra en la figura.

Ri = 194

Líneas de corriente

Vórtice

Placa de aluminio



## Capítulo 5

# Conclusiones

El fenómeno de convección generalmente se estudia asumiendo convección natural pura o bien, convección forzada pura. Sin embargo, hay que tener en consideración que un gradiente de temperatura, por pequeño que sea, genera una diferencia de densidades en el fluido. Esto se conoce como fuerzas de flotación, mismas que inducen el movimiento del fluido respecto a la superficie. Entonces, los efectos debidos a la fuerzas de flotación están presentes aún en el fenómeno conocido como convección forzada. Por tal motivo, es necesario conocer la forma en que se afecta la transferencia de calor por una convección debida a fuerzas de flotación cuando se introduce un movimiento forzado.

Se diseñó un experimento que cubrió las necesidades que exigía el objetivo de éste. Se implementó la técnica PIV, una técnica moderna muy potente que presenta una variedad de características que hacen que su uso sea muy atractivo para aplicaciones de investigación en el laboratorio. Una de las características que la diferencian de las otras técnicas es su no-intrusividad, por lo que no interfiere con el desarrollo del flujo así como el LDV tampoco perturba el flujo. Por medio de esta herramienta, logramos observar la evolución del campo de velocidades, de vorticidad y de magnitud de la velocidad, por diferentes valores del número de Richardson.

Se obtuvo una descripción clara del flujo con base a los campos de velocidad y vorticidad. También se estudió la convección mixta en un canal vertical cuadrado sujeto a un flujo descendente. El rango de estudio presentado abarca la zona de convección mixta, en la que los efectos, tanto de la convección natural y la convección forzada actúan de manera simultánea.



A partir de la interpretación de los resultados experimentales obtenidos, es posible hacer las siguientes aseveraciones:

- El vórtice no está bien definido, ya que las líneas de corriente no alcanzan a crear una recirculación. Esto ocurre cuando el número de Richardson está en el rango  $22.5 \leq Ri \leq 60.8$ , como resultado de la oposición de los efectos de las convecciones natural y forzada.

- El vórtice aumenta de manera importante cuando el número de Richardson está en el rango  $81.49 \leq Ri \leq 194$ , como resultado de la oposición de los efectos de las convecciones natural y forzada. Para éstos valores, el vórtice ya está perfectamente definido.

- Dentro del mismo rango para el número de Richardson ( $22.5 \leq Ri \leq 60.8$ ), la estela formada aguas abajo incrementa su tamaño de forma considerable, lo que muestra que la zona de recirculación crece conforme aumenta el número de Richardson ( $81.49 \leq Ri \leq 194$ ). Este fenómeno se debe a la oposición de los efectos de las convecciones natural y forzada. Por encima del rango mencionado, los efectos de las convecciones natural y forzada generan una recirculación de las líneas de corriente muy bien definidas.

- Cuando se incluye la variación de los parámetros adimensionales,  $Re$ ,  $Gr$ ,  $Ri$ , es posible observar gráficamente el comportamiento global del fenómeno de la convección mixta.

Entodos los experimentos realizados se puede notar de que la aproximación de la capa límite no es aplicable.

La técnica PIV tiene muchas aplicaciones en mecánica de fluidos ya sean monofásicos o bifásicos. El problema principal en mecánica de fluidos es el conocer el campo de velocidades y la distribución de presiones. El PIV es la herramienta que proporciona campos completos de velocidades instantáneos por lo que es muy útil para comprender mejor los fenómenos de flujo, describir estructuras coherentes, determinar con mayor precisión los regímenes que dividen a un flujo laminar de uno turbulento o determinar el grado de inestabilidad en un flujo.

Las aplicaciones del PIV van más allá de su uso en el laboratorio. Resultan útiles para actividades docentes, demostraciones y visualizaciones. De hecho el software de correlación cruzada, que utiliza el PIV, puede servir para estudiar otro tipo de flujos o deformaciones, sin la necesidad imperante de que las imágenes sean captadas por la iluminación del láser y la doble-exposición de las imágenes por la cámara de CCD. Por ejemplo, se ha utilizado también para el estudio de medios granulares densos o dispersos, la única restricción es la de obtener una

secuencia de imágenes y con éstas realizar el procesamiento como si hubiesen sido obtenidas por el equipo periférico del PIV.

# Bibliografía

- [1] Lloyd, J.R., y E.M. Sparrow: Combined Forced and Free Convection Flow on Vertical Surfaces; *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1970.
- [2] C. M. Winkler. Condensation along an isothermal vertical surface in mixed convection, M. S. Thesis, *Department of mechanical and aerospace engineering and engineering mechanics, University of Missouri-Rolla*. 1998.
- [3] T. S. Chen, Parabolic Systems: Local nonsimilarity method, in W. J. Minkowycz et al. *Handbook of numerical heat transfer*. 1988;183-214.
- [4] W. J. Minkowycz, Laminar film condensation of water vapor on an isothermal vertical surface. *Dissertation, University of Minnesota*, 1965.
- [5] W.Aung and G. Worku, Developing flow and flow reversal in a vertical channel with asymmetric wall temperatures. *J. Heat Mass Transfer*. 1986;108:299-304
- [6] Tewary SS, Jaluria Y. Mixed convection heat transfer from thermal sources mounted on horizontal and vertical Surfaces. *ASME Journal of Heat Transfer*. 1990; 112: 87-975.
- [7] Cheng CH, Weng CJ. Developing flow of mixed convection in a vertical rectangular duct with one heating wall. *Numerical Heat Transfer*. 1993;24:93-479.
- [8] A.S. Lavine. On the linear stability of mixed and free convection between inclined parallel plates with fixed heat flux boundary conditions. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1993;36:1373-1387.

- [9] Cheng CH, Yang JJ. Buoyancy-induced recirculation bubbles and heat convection of developing flow in vertical channels with fin arrays. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 1994;15:9-11.
- [10] Z. J. Zhang, B.T.F. Chung, L. T. Yeh. Thermally developing convection from Newtonian flow in rectangular ducts with uniform heating, *J. Thermophys. Heat Transfer*. 1993;7:534-536.
- [11] Joye DD. Comparison of correlations and experiment in opposing flow, mixed convection heat transfer in a vertical tube with Grashof number variation. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 1996;39:8-1033.
- [12] Ligrani PM, Choi S. Mixed convection in straight and curved channels with buoyancy orthogonal to the forced flow. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 1996;39:84-2473.
- [13] A. Barletta. Laminar mixed convection with viscous dissipation in a vertical channel. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 1998;41:3501-3513.
- [14] M.M. Sa lah El-Din. Effect of thermal and mass buoyancy forces on the development of laminar mixed convection between vertical parallel plates with uniform wall heat and mass fluxes. *International Journal of Thermal Sciences*. 2003;42:447-453.
- [15] A. Barletta, E. Zanchini. Time-periodic laminar mixed convection in an inclined channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2003;46:551-563.
- [16] Incropera, F.P., and DeWitt, D.P., "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 4<sup>th</sup> ed., John Wiley & Sons, 1996.
- [17] Mills, A., "Heat Transfer", John Wiley & Sons.
- [18] Oösizik, "Heat Transfer", Mc. Graw Hill.
- [19] Shames, I. H. "Mecánica de Fluidos", Mc Graw Hill, 1988.
- [20] Fox & Mc Donald, "Introducción a la Mecánica de Fluidos", Mc Graw Hill, 1988.

[21] TSI Incorporated, PIV SYSTEM Installation manual, operation manual, insight operation manual. 1996.