



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

OBTENCIÓN DEL CAMPO DE VELOCIDADES EN UNA
CAVIDAD CERRADA INCLINADA MEDIANTE PIV.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO
P R E S E N T A :
CHÁVEZ MARTÍNEZ RAFAEL

DIRECTOR DE TESIS:
FRANCISCO J. SOLORIO ORDAZ



MÉXICO, D.F.

2005

m. 342591



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.

Agradecimientos.

A toda mi familia por haberme apoyado todos estos años.

Al Dr. Francisco J. Solorio Ordaz por su apoyo y paciencia en la dirección de esta tesis.

Al personal del departamento de Termofluidos.

A todos los amigos y compañeros por su apoyo incondicional.

“La inteligencia consiste no sólo en el conocimiento, sino también en la destreza de aplicar los conocimientos en la práctica”.

Aristóteles.

CONTENIDO.

NOMENCLATURA.....	V
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo.....	1
CAPÍTULO 1.	
ANTECEDENTES.....	3
1.1 Generalidades sobre cavidades.....	3
1.2 Estudios experimentales sobre convección natural en cavidades cerradas.....	5
1.3 Estudios numéricos sobre convección natural en cavidades cerradas.....	23
1.4 Objetivo de la Tesis.....	29
CAPÍTULO 2.	
DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	30
2.1 Dispositivo experimental.....	31
2.2 Preparación de los experimentos.....	32
2.3 Desarrollo de los experimentos.....	37
2.4 Obtención de resultados.....	39
2.4.1 Generalidades sobre el método PIV.....	39
2.4.2 El método DPIV.....	41

CAPÍTULO 3.	
RESULTADOS.....	43
3.1. Dependencia con el número de Rayleigh.	49
3.2. Influencia del ángulo de inclinación.	67
CAPÍTULO 4.	
Conclusiones.	72
APÉNDICE A	
TABLA A.1. DIFERENCIA DE TEMPERATURAS PARA DIFERENTES NÚMEROS DE RAYLEIGH Y ÁNGULOS DE INCLINACIÓN.....	76
APÉNDICE B	
PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DEL NÚMERO DE RAYLEIGH.....	77
BIBLIOGRAFÍA.....	78

Nomenclatura.

a	área de interrogación.	u	componente de la velocidad en la dirección horizontal, m/s
A_x	razón de forma (alto/ancho).	v	componente de la velocidad en la dirección vertical. m/s
A_c	razón de forma longitudinal (largo/ancho).	W	espesor de la cavidad, m
g	aceleración de la gravedad, m/s ²	x, y	coordenadas rectangulares.
Gr	número de Grashof, $g\beta L^3(T_c - T_f)/\nu^2$		
H	altura de la cavidad, m		Letras griegas.
k	conductividad térmica.	α	difusividad térmica, m ² /s
L	longitud característica, largo de la cavidad, m	β	coeficiente de expansión térmica volumétrica, K ⁻¹
Nu	número de Nusselt, hL/k	θ	ángulo de inclinación.
\overline{Nu}	número de Nusselt promedio.	ν	viscosidad cinemática, m ² /s
Pr	número de Prandtl, ν/α		Abreviaciones.
Ra	número de Rayleigh, $g\beta L^3(T_c - T_f)/(\alpha\nu)$		CFD computacional fluid dynamics.
Ra_c	número de Rayleigh crítico.		PIV particle image velocimetri.
T_a	temperatura ambiente, K		DPIV digital particle image velocimetri.
T_c	temperatura caliente, K		QUICK quadric upstream interpolation for convection kinematics.
T_f	temperatura fría, K		TIFF tagged image file format.
T_m	temperatura media, $(T_c + T_f)/2$, K		

INTRODUCCIÓN

Objetivo.

Esta tesis tiene por objetivo el estudio experimental del fenómeno de convección natural en cavidades cerradas para diferentes ángulos de inclinación y números de Rayleigh, enfocándose a la visualización de los campos de velocidades, utilizando para ello una variación del método PIV (velocimetría por imágenes de partículas). El modelo utilizado es una cavidad cuadrada de 4cm de lado, el cual es calentado en la pared inferior por medio de una resistencia y enfriado en la pared superior con agua proveniente de un baño térmico, ambas paredes se encuentran aisladas externamente y se consideran isotérmicas, mientras que las paredes laterales son conductoras. El fluido de trabajo es glicerina de alta pureza.

En la ingeniería fenómeno de transferencia de calor por convección natural en cavidades cerradas es de gran trascendencia y ha tomado un auge muy importante en los últimos años. Esto se debe a que tiene aplicaciones en muchas áreas de la ingeniería como son colectores solares, ventanas de doble cristal, placas de circuitos electrónicos, refrigeradores, algunos reactores nucleares, baterías de automóviles y procesos industriales como el crecimiento del tamaño de grano y el refinamiento electroquímico de metales. También es de gran importancia en sistemas de aislamiento en los que se quiere disminuir la transferencia de calor para minimizar los costos de operación.

En el primer capítulo se da una introducción sobre el fenómeno de convección natural en cavidades, así como una breve descripción del fenómeno. Se revisan artículos de estudios experimentales y numéricos realizados sobre el

tema en particular, y se menciona el objetivo de la tesis. En el segundo capítulo se describe el dispositivo utilizado en los experimentos, así como la lista de los materiales, equipo y dispositivos utilizados para la puesta en marcha del mismo. Se explica la metodología utilizada en la obtención de imágenes y datos, así como el manejo del software utilizado para la obtención de los campos de velocidades. En el tercer capítulo se proporcionan los resultados de los experimentos en forma de tablas, gráficas e imágenes tomadas de los patrones de flujo y campos de velocidad y se presenta una discusión de los mismos. En el cuarto capítulo se plantean las conclusiones generales del trabajo.

CAPÍTULO 1

Antecedentes.

1.1 Generalidades sobre cavidades.

Lo más fascinante sobre la convección natural en cavidades es que a pesar de ser un problema relativamente sencillo no tiene una solución analítica exacta en la mayoría de los casos. Las ecuaciones que gobiernan el fenómeno han sido estudiadas desde hace mucho tiempo, con resultados alentadores, pero aún no se han podido resolver de forma satisfactoria. La dificultad teórica se debe a que existe una interacción de energía que para ser comprendida de forma correcta se necesita el conocimiento de la mecánica de fluidos y de la transferencia de calor a la vez.

Para comprender mejor el fenómeno, consideremos un pequeño paquete de fluido cerca de la pared de un recipiente, este paquete se encuentra en equilibrio estático, ya que su densidad es igual al de su entorno. Si aplicamos calor a la pared, esta le transfiere calor al paquete de fluido por difusión térmica, el paquete presenta una disminución en su densidad por lo que asciende a una altura donde la presión hidrostática es menor hasta llegar a un nuevo punto de equilibrio. Además el paquete de fluido en su ascenso transfiere calor a su entorno por conducción, mientras que exista una diferencia de temperatura entre el paquete y sus alrededores. Al mismo tiempo otro paquete de fluido desciende hasta una región de menor densidad, por lo que debido a su peso se hunde. Conforme desciende el paquete absorbe calor del entorno, por lo que disminuye su densidad y se detiene hasta llegar a un nuevo punto de equilibrio. Debido a la transferencia

de calor entre el paquete de fluido y su entorno, la diferencia de temperatura entre ambos disminuye, lo que provoca una disminución de la fuerza de flotación, a consecuencia de la disminución en el gradiente de densidades. El efecto de todas las fuerzas mencionadas se puede observar con mayor claridad cuando se expresan en un número adimensional que recibe el nombre de Número de Rayleigh, que es una relación entre las fuerzas de flotación y las fuerzas viscosas.

El número de Rayleigh se define como $Ra = g\beta\Delta TL^3 / (\alpha\nu)$, donde g es la aceleración de la gravedad, β es el coeficiente de expansión volumétrica, L es una longitud característica, α la difusividad térmica, ν la viscosidad cinemática del fluido y ΔT la diferencia de temperatura entre la pared fría y caliente.

La diferencia de temperatura puede ser entre paredes horizontales o verticales, lo que afecta en gran medida a la convección natural, ya que mientras una pequeña diferencia de temperatura entre las paredes verticales de una cavidad basta para que comience el movimiento convectivo, en una cavidad calentada en su pared inferior se necesita que las fuerzas de flotación superen a las fuerzas viscosas y el efecto de la difusividad térmica, lo que se asocia directamente al número de Rayleigh. Unny [1] propone un valor crítico del número de Rayleigh de 1708, para una cavidad lo suficientemente larga y ancha. Otros autores consideran que 7000 es el valor crítico del número de Rayleigh para una cavidad cúbica con paredes laterales conductoras [2, 3]. Por debajo de este valor no existe movimiento del fluido y la transferencia de calor es únicamente por conducción. Por encima de este valor se pueden generar diferentes patrones de flujo convectivo, como se ilustra en la Figura 1.1, por lo que se puede considerar al número de Rayleigh crítico (Ra_c) como una representación cuantitativa del cambio de la conducción al transporte convectivo.

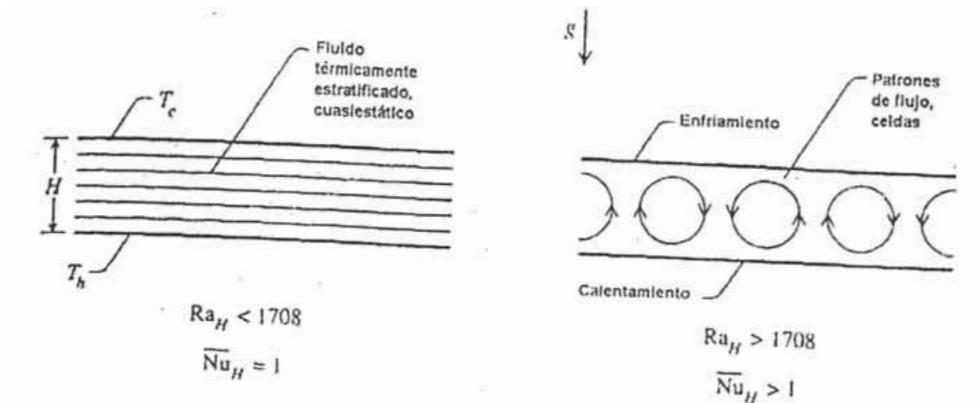


Figura 1.1. Capa de fluido entre dos paredes planas y horizontales, calentadas en la pared inferior.

Conforme aumenta el valor del número de Rayleigh los patrones del flujo convectivo se vuelven cada vez más complejos y pasan de patrones bidimensionales a tridimensionales, hasta que finalmente el flujo se vuelve turbulento.

Estos patrones se ven afectados considerablemente por la geometría de la cavidad, así como por el ángulo de inclinación de ésta. Esto se debe a que la influencia de la fuerza de flotación y la difusión de calor varía con la inclinación de la cavidad. Unny [1] determinó que el ángulo crítico donde ocurre la transición del efecto principal de la fuerza de flotación a la conducción es de 168° , para una cavidad calentada por debajo.

1.2 Estudios experimentales sobre convección natural en cavidades cerradas.

Existen muchos trabajos publicados en los que se estudia la convección natural en cavidades de diferente razón de forma, en cavidades cuadradas o cúbicas. También considerando diferentes condiciones de frontera como paredes adiabáticas, conductoras o con distribución lineal de temperatura.

Hamady et al. [4] realizan un estudio numérico y experimental, para observar el efecto de la inclinación en las características de la transferencia de calor por convección, en estado permanente, dentro de una cavidad con una razón de forma de uno. Obtienen el número de Nusselt local y promedio, para varios ángulos de inclinación entre 0° (calentado por arriba) y 180° (calentado por debajo). El rango del número de Rayleigh es de 10^4 a 10^6 y utilizan aire como fluido de trabajo. Las paredes superior e inferior se consideran isotérmicas, mientras que las paredes laterales son adiabáticas.

El modelo matemático se construyó utilizando las ecuaciones que gobiernan la convección natural en cavidades en régimen laminar: conservación de masa, energía y cantidad de movimiento. Las ecuaciones fueron discretizadas para aproximar el volumen de control y asegurar las características de conservación. Se utilizó el esquema QUICK (quadratic upstream interpolation for convection kinematics) extendido para cálculos tridimensionales. Las razones de forma son: $A_x = W/H = 1$ y $A_z = L/H = 10$, donde W es el ancho, L es el largo y H la altura de la cavidad. En el análisis numérico se utilizan las condiciones de frontera experimentales.

El dispositivo utilizado se muestra en la Figura 1.2. Este consiste en dos placas verticales de aluminio, de $50.80\text{cm} \times 50.80\text{cm}$ y 2.54cm de espesor, de alta conductividad para asegurar que la placa sea isotérmica. En su parte exterior se maquinaron canales, por los que pasa agua proveniente de dos baños térmicos independientes. Las placas horizontales son de plexiglás, $50.80\text{cm} \times 5.08\text{cm}$ y

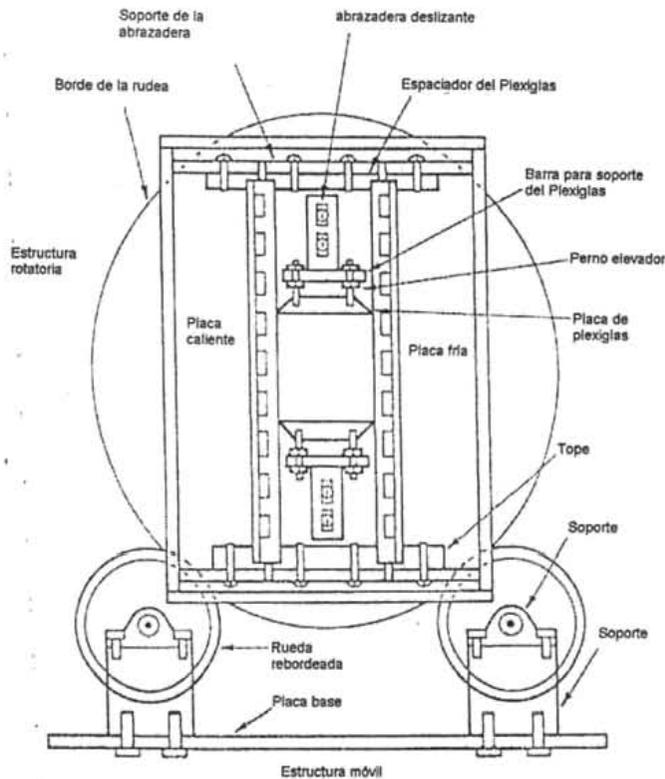


Figura 1.2. Diagrama esquemático del dispositivo experimental. Hamady et al. [4]

1.27cm de espesor, las esquinas se rebajan a un ángulo de 60° para minimizar la conducción. El modelo tiene las siguientes dimensiones internas $W = 5.08\text{cm}$, $H = 5.08\text{cm}$ y $L = 50.8\text{cm}$. El dispositivo se aísla con una capa de fibra de vidrio de 7cm de espesor y se monta en una estructura rotatoria.

Para la medición del campo de temperaturas se utilizó un interferómetro Mach-Zhender, mientras que para realizar la observación de los patrones de flujo utilizaron una hoja láser, con humo como trazador. El número de Nusselt se calculó a partir de gradiente de temperatura adimensional multiplicado por la relación de conductividades del fluido, en la pared fría y caliente, la ecuación se expresa como:

$$Nu(\zeta) = \left[\frac{K_H}{K_C} \frac{\partial(T - T_C)/(T_H - T_C)}{\partial(x/H)} \right] \quad (1.1)$$

donde ζ es la distancia adimensional en la dirección x que se define como $\zeta = x/H$, donde H es la altura de la cavidad.

En tanto que el número de Nusselt promedio se calcula de la siguiente forma:

$$\overline{Nu} = \int_0^1 Nu(\zeta) d\zeta \quad (1.2)$$

Hamady obtiene una correlación para obtener el número de Nusselt promedio a un ángulo de 90° :

$$Nu = 0.175 Ra^{0.275} \quad 10^4 \leq Ra \leq 10^6 \quad (1.3)$$

En la Figura 1.3 se muestran en forma gráfica los resultados obtenidos de forma experimental y numérica por Hamady y otros investigadores referidos por él. En esta gráfica se puede observar claramente el efecto de la inclinación en la transferencia de calor por convección. El número de Nusselt aumenta conforme aumenta el ángulo de inclinación, teniéndose un máximo entre 110° y 120° , posteriormente se observa un decremento entre 150° y 160° . Este efecto se debe a que al aumentar el ángulo de inclinación se incrementa el efecto del potencial de conducción llegándose a un máximo, a partir del cual el efecto de la transferencia de calor va en aumento. El autor recomienda un par de correlaciones para la obtención del número de Nusselt promedio (\overline{Nu}) en función del ángulo de inclinación:

$$\overline{Nu}(\phi) = \overline{Nu}(180^\circ)(\cos(\phi - 180^\circ)) \quad 150^\circ \leq \phi \leq 180^\circ \quad (1.4)$$

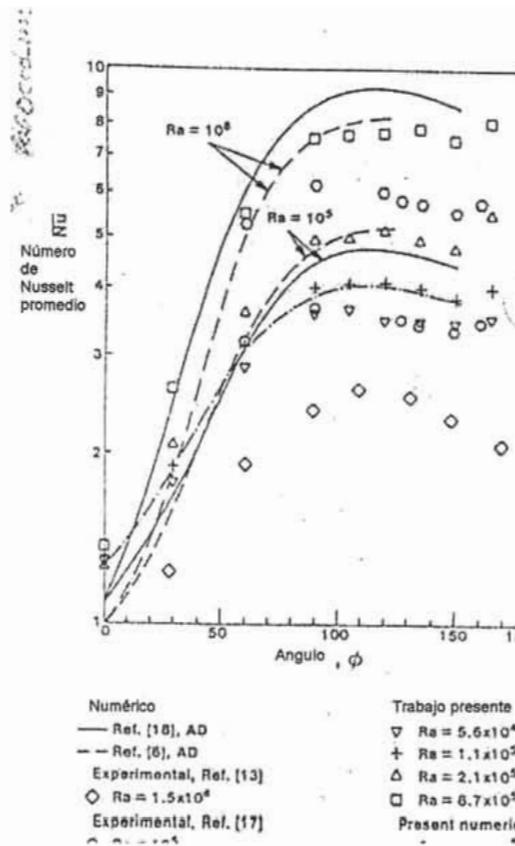


Figura 1.3. Efecto del ángulo de inclinación en el número de Nusselt promedio, a $A_x = 1.0$. Hamady et al. [4]

$$\overline{Nu}(\phi) = [\overline{Nu}(90^\circ) - \overline{Nu}(0^\circ)] [2 / \pi \phi \sin(\phi)] + \overline{Nu}(0^\circ) \quad \phi \leq 150^\circ \quad (1.5)$$

Ambas ecuaciones para: $10^4 \leq Ra \leq 10^6$

En la Figura 1.4 se muestra el comportamiento del número de Nusselt local para $Ra = 1.1 \times 10^5$ obtenidos experimentalmente para la pared caliente y fría, siendo comparados con los resultados obtenidos numéricamente para la pared caliente. En la Figura 1.5a se pueden observar los patrones de flujo obtenidos en los experimentos, mientras que en la Figura 1.5b se muestran las predicciones obtenidas a partir del código numérico, ambas tienen una gran similitud y fueron

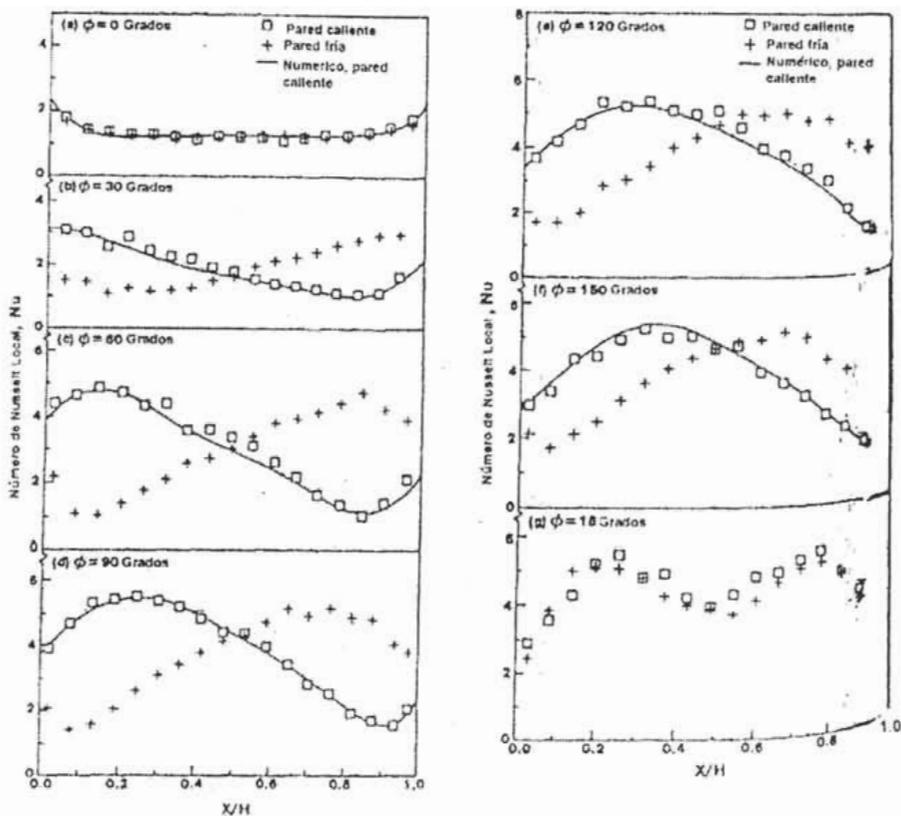


Figura 1.4. Efecto del ángulo de inclinación sobre el número de Nusselt local a lo largo de la pared caliente y fría, para $A_x = 1.0$ y $Ra = 1.1 \times 10^5$. Hamady et al. [4]

obtenidas para un $Ra = 3.0 \times 10^5$ y diferentes inclinaciones. Los campos de temperaturas obtenidos experimentalmente se muestran en la Figura 1.6a y los resultados de las predicciones numéricas se observan en la Figura 1.6b, teniendo también una gran similitud y fueron obtenidos para un $Ra = 1.1 \times 10^5$ y diferentes ángulos de inclinación.

Pallares et al. [5] realizaron una serie de experimentos en los cuales midieron el flujo convectivo en una cavidad cúbica calentada en la pared inferior, para

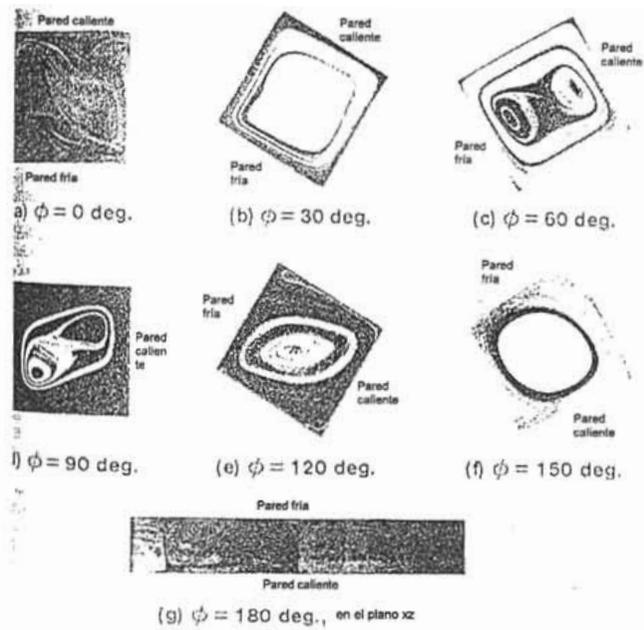


Figura 1.5a. Patrones de flujo en el plano x-y, para $Ra = 3.0 \times 10^5$. Hamady et al. [4]

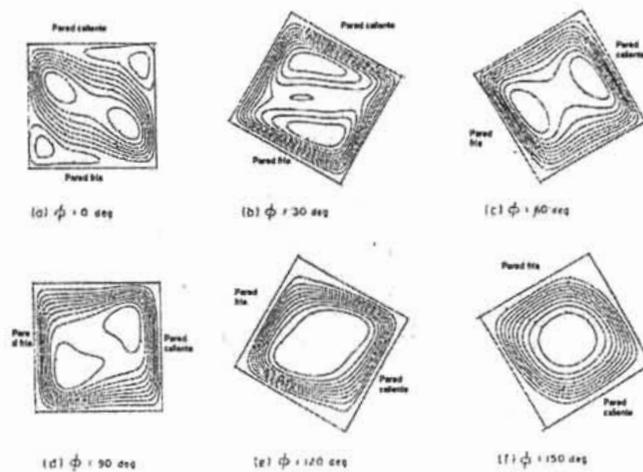


Figura 1.5b. Funciones de corriente en el plano x-y, $Ra = 3.0 \times 10^5$. Hamady et al. [4]

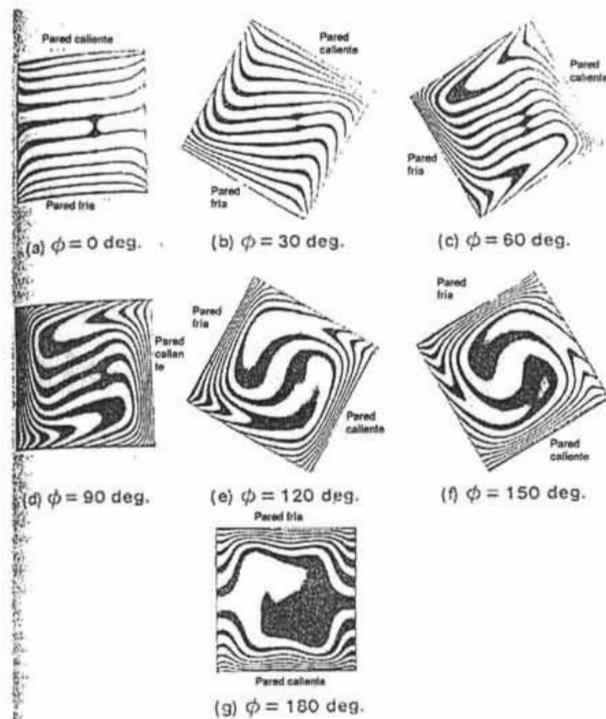


Figura 1.6a. Patrones de Isotermas, para $Ra = 1.1 \times 10^5$. Hamady et al. [4]

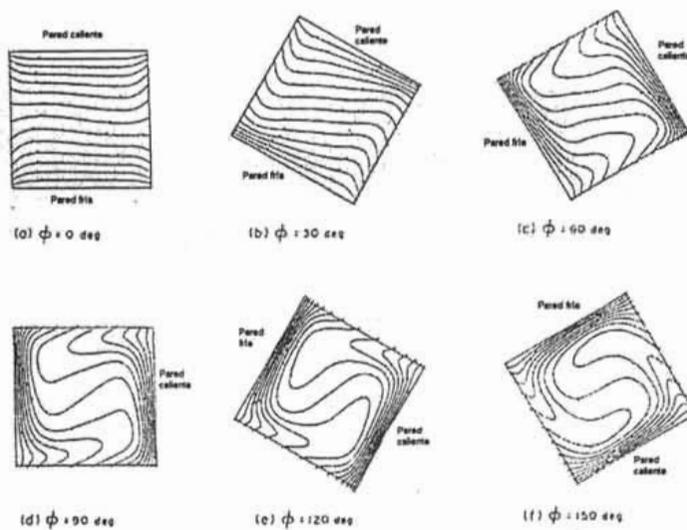


Figura 1.6b. Isotermas, para $Ra = 1.1 \times 10^5$. Hamady et al. [4]

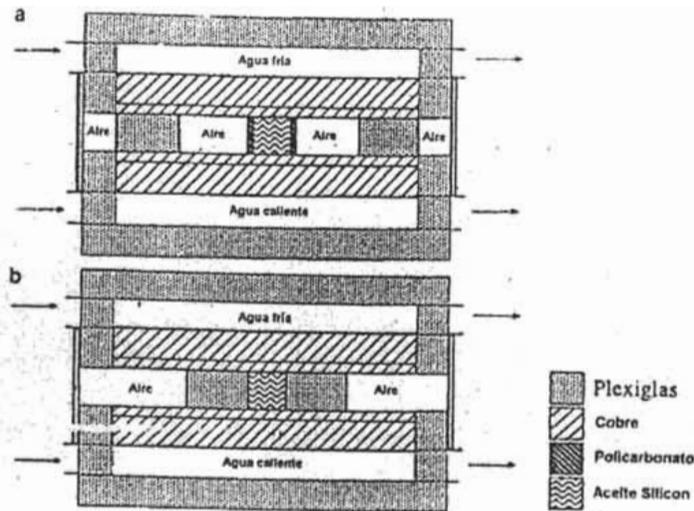


Figura 1.7. Corte seccional de la cavidad. a) con paredes laterales adiabáticas, b) con paredes laterales conductoras. Pallares et al. [5]

números de Rayleigh menores a 8×10^4 , proponiendo dos condiciones de frontera en la paredes laterales; para la primera condición de frontera se tienen paredes adiabáticas, mientras que para la segunda se presentan paredes conductoras con un perfil lineal de temperatura. Realizaron visualizaciones de los campos de flujos así como la medición de los campos de velocidades utilizando velocimetría por imágenes de partículas (PIV) en diferentes planos verticales y a diferentes profundidades. El fluido de trabajo es aceite silicón ($Pr = 130$).

El dispositivo consiste en una cavidad cúbica de 12.5mm de lado, la pared superior e inferior son de cobre de 4mm de espesor comprimidas por dos placas de cobre de 10mm de espesor, alimentadas con agua fría o caliente respectivamente de forma independiente por dos baños térmicos. Para lograr la condición de paredes adiabáticas, se utilizaron placas de policarbonato de 1mm de espesor tal como se muestra en la figura 1.7a, en tanto que para la condición

de paredes laterales conductoras y perfil lineal de temperatura se utilizaron placas de plexiglás de 20mm de espesor como se muestra e la figura 1.7b.

Los autores reportaron las siete estructuras estables que se presentan a diferentes números de Rayleigh, ver figura 1.8. Hacen referencia a estas estructuras tanto para paredes laterales adiabáticas como conductoras. Para todas las estructuras el área sombreada indica que el fluido va en ascenso y el área clara señala que el fluido va en descenso. La estructura S1 tiene su celda convectiva perpendicular a dos paredes verticales opuestas. Para la estructura S2 la celda convectiva tiene su eje de rotación orientado en diagonal cerca de dos esquinas verticales opuestas. Las estructuras S3 y S7 son muy similares a S1 pero el eje rotación de la celda convectiva es irregular. La estructura S4 es un toroide en donde el fluido asciende cerca de las paredes laterales y desciende en la parte central de la cavidad. En la estructura S5 se presentan cuatro estructuras, cada una con la celda convectiva perpendicular a una de las paredes verticales. La estructura S6 presenta cuatro celdas convectivas, cada una con el eje de rotación perpendicular a una de las esquinas verticales de la cavidad.

Se hace una comparación entre los resultados obtenidos en los experimentos y los obtenidos en el estudio numérico hecho por Pallares et al. [6] encontrando que las estructuras que habían observado en los experimentos son similares a las que se habían observado en las simulaciones numéricas para $Pr = 130$ y $Ra < 8 \times 10^4$. (Figuras 1.9 y 1.10).

En las Figuras 1.11a y 1.11b se muestra la histéresis, se señala la evolución de las configuraciones para un número de Rayleigh ascendente y descendente, para ambas condiciones de frontera. La zona blanca muestra el rango en el que cada estructura es estable, mientras que las zonas oscuras señalan el rango en el que se hace la transición de una estructura a otra.

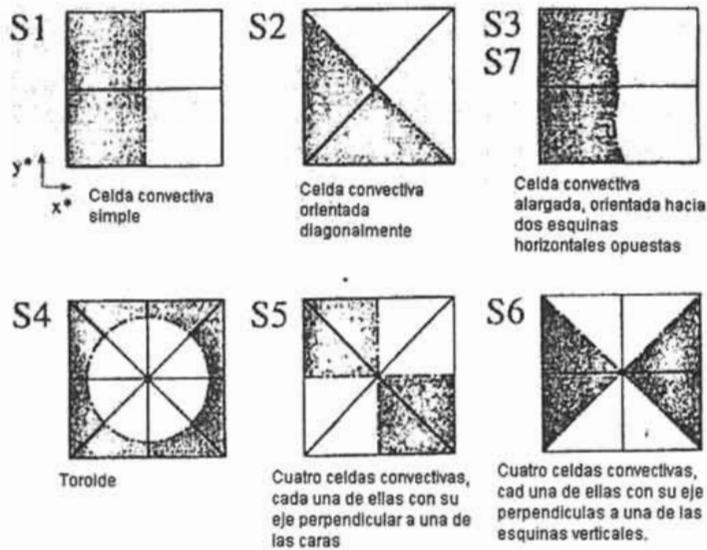


Figura 1.8. Celdas convectivas desarrolladas en una cavidad cúbica. Pallares et al. [5]

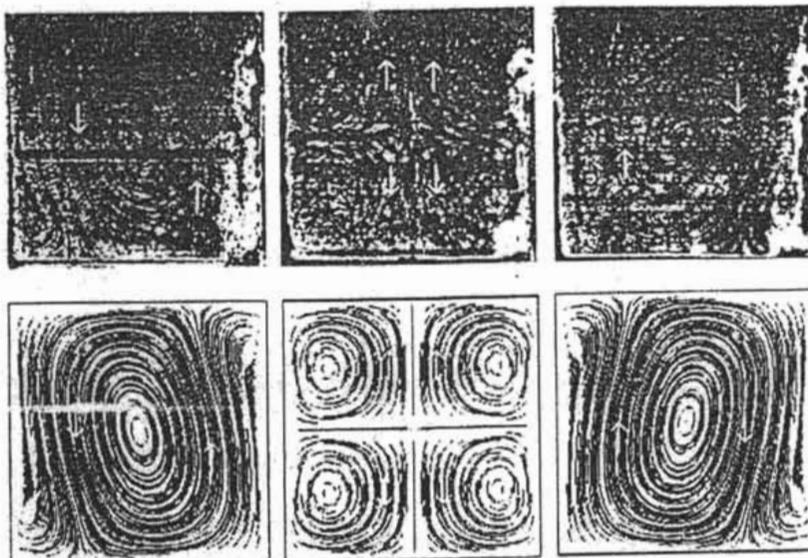


Figura 1.9. Patrones de flujo para las cinco estructuras en tres distintos planos verticales. (a) Visualización para el número de Rayleigh de 7×10^4 . (b) Predicción hecha por Pallares [5]

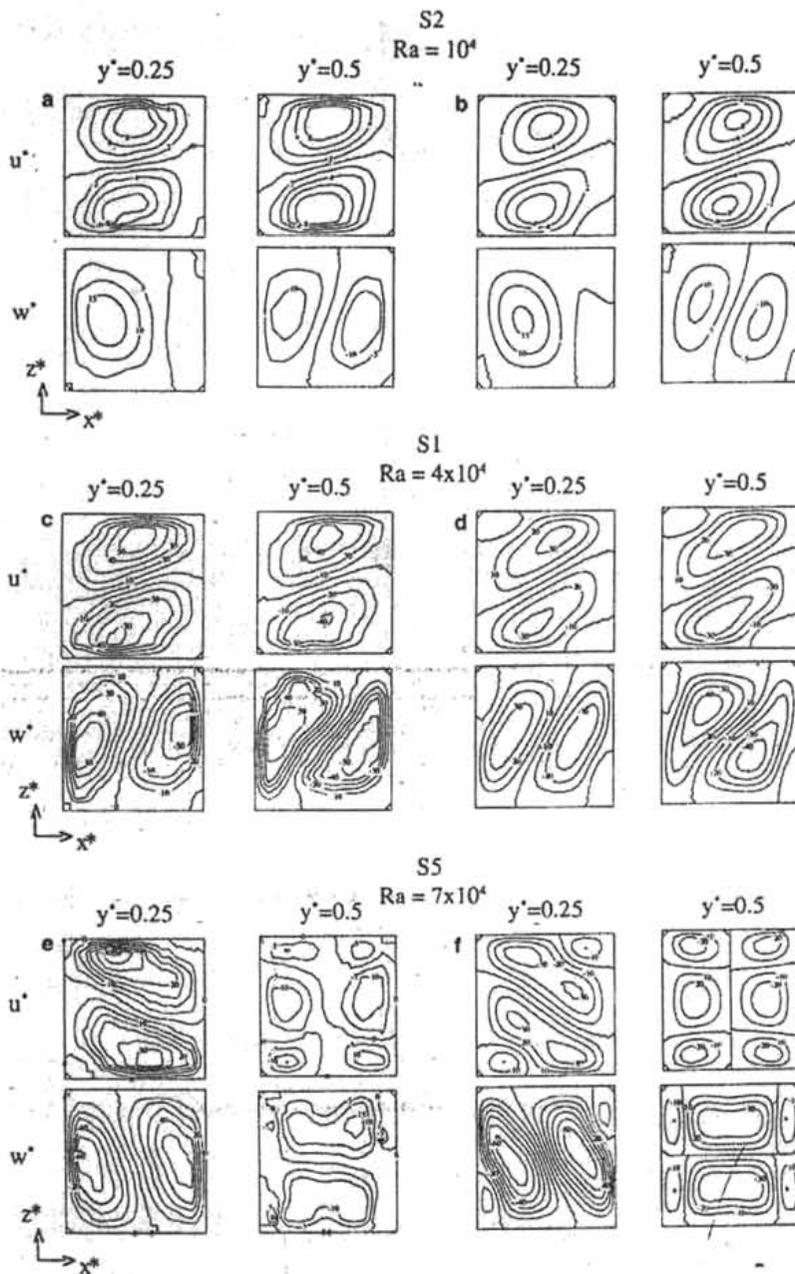


Figura 1.10. Comparación entre los resultados, de las componentes de la velocidad, numéricos y experimentales, para la cavidad B y tres distintas estructuras. Para S2 a un $Ra=10^4$, S1 para un $Ra=4 \times 10^4$, y S5 a un $Ra=7 \times 10^4$. Pallares et al. [5]

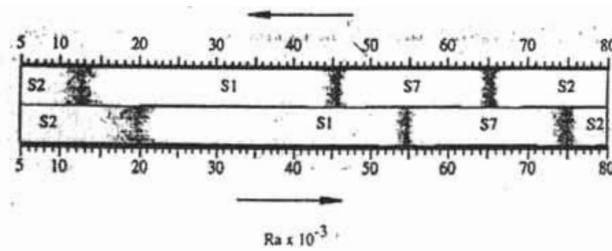


Figura 1.11a. Secuencia experimental de las estructuras y la transición para el flujo en la cavidad con paredes laterales adiabáticas. Pallares et al. [5]

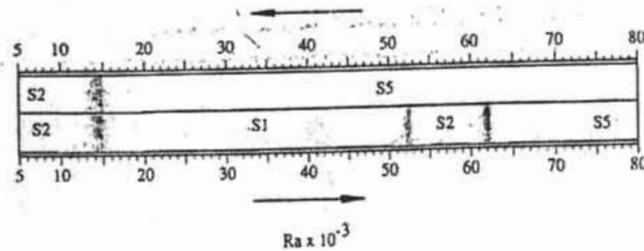


Figura 1.11b. Secuencia experimental para las estructuras y la transición para el flujo en la cavidad con paredes laterales conductoras. Pallares et al. [5]

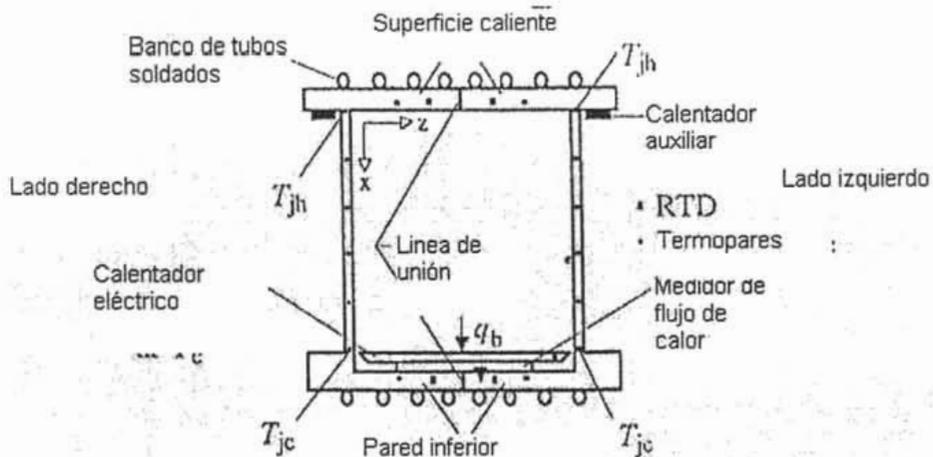


Figura 1.12. Esquema del modelo experimental. Leong et al. [7]

Leong et al. [7,8] realizaron un estudio experimental para validar un nuevo código de CFD (computacional fluid dynamics), utilizando el problema como referencia (benchmark). El modelo utilizado en los experimentos es una cavidad cúbica de 127mm. de lado, con un perfil lineal de temperatura en las paredes laterales. Los experimentos se realizaron con la cavidad a 0°, 45° y 90° de inclinación. El aislamiento se hizo con fibra de vidrio de 100mm de espesor. El modelo consta de cuatro partes principales: un medidor de flujo de calor, un calentador eléctrico y dos semicubos (Figura 1.12). La pared caliente eleva su temperatura mediante un banco de tubos que se encuentra en la parte exterior, por los que circula agua proveniente de un calentador. En la pared fría se encuentra un banco de tubos en su exterior por las que circula agua. La temperatura de las paredes es constante y la variación del número de Rayleigh se logra cambiando la presión del recipiente donde se colocó el modelo, que puede variar entre 0.1 a 1140kPa con lo que el número de Rayleigh estará entre 100 a 2×10^8 . Las propiedades se calculan a la temperatura media. $T_m = (T_c + T_f) / 2$.

Los resultados se observan en la Tabla 1.1. En la Figura 1.13 se hace una comparación entre los resultados obtenidos de las simulaciones del código CFD para un ángulo de 90° y los obtenidos por Le Quere [8] y Fusegi et al. [9]. A partir de esta gráfica obtiene la siguiente correlación para el número de Nusselt:

$$Nu = 0.08461Ra^{0.3125} \quad 10^4 \leq Ra \leq 10^8 \quad (1.6)$$

Para un ángulo de 0° y un $Ra = 10^5$ los resultados se muestran en la Figura 1.14a. Se obtuvieron dos correlaciones para dos distintos valores del número de Nusselt $Nu = 3.5$ y $Nu = 3.9$ debido a que la temperatura media es de $T_m = 298K$ y $T_m = 308K$ respectivamente, lo que indica que la temperatura media tiene un efecto muy importante sobre el fenómeno. Para el valor de $Nu = 3.5$ se obtiene la siguiente correlación:

Ra	\overline{Nu}		
	$\phi = 0^\circ\text{C}$	$\phi = 45^\circ\text{C}$	$\phi = 90^\circ\text{C}$
10^4	1.246 ± 0.013	1.614 ± 0.015	1.520 ± 0.015
4×10^4	2.018 ± 0.017	2.650 ± 0.027	2.337 ± 0.020
10^5	3.509 ± 0.035	3.492 ± 0.034	3.097 ± 0.028
10^6	7.883 ± 0.091	8.837 ± 0.101	6.383 ± 0.070
10^7	15.38 ± 0.19	17.50 ± 0.21	12.98 ± 0.16
10^8	31.22 ± 0.43	34.52 ± 0.42	26.79 ± 0.34

Tabla 1.1. Número de Nusselt promedio a diferentes ángulos de inclinación. Leong et al. [8]

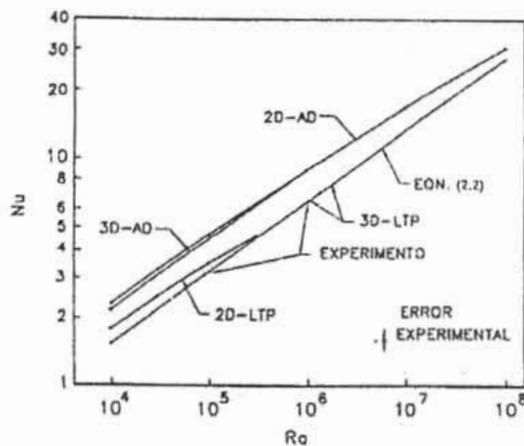


Figura 1.13. Gráfica de resultados experimentales para $\psi = 90^\circ$. La curva marcada con EXPERIMENTO (3D-PC) son los resultados experimentales [8]; 2D-AD son los resultados de Le Quere [9] para un flujo bidimensional en una cavidad cuadrada con paredes laterales adiabáticas. 3D-AD son los resultados de Fusegi [10] para un flujo tridimensional en una cavidad cúbica con paredes laterales adiabáticas, y 2D-LTP son los resultados de Raithby y Wong para un flujo bidimensional en una cavidad cuadrada con un perfil lineal de temperatura en las paredes laterales.

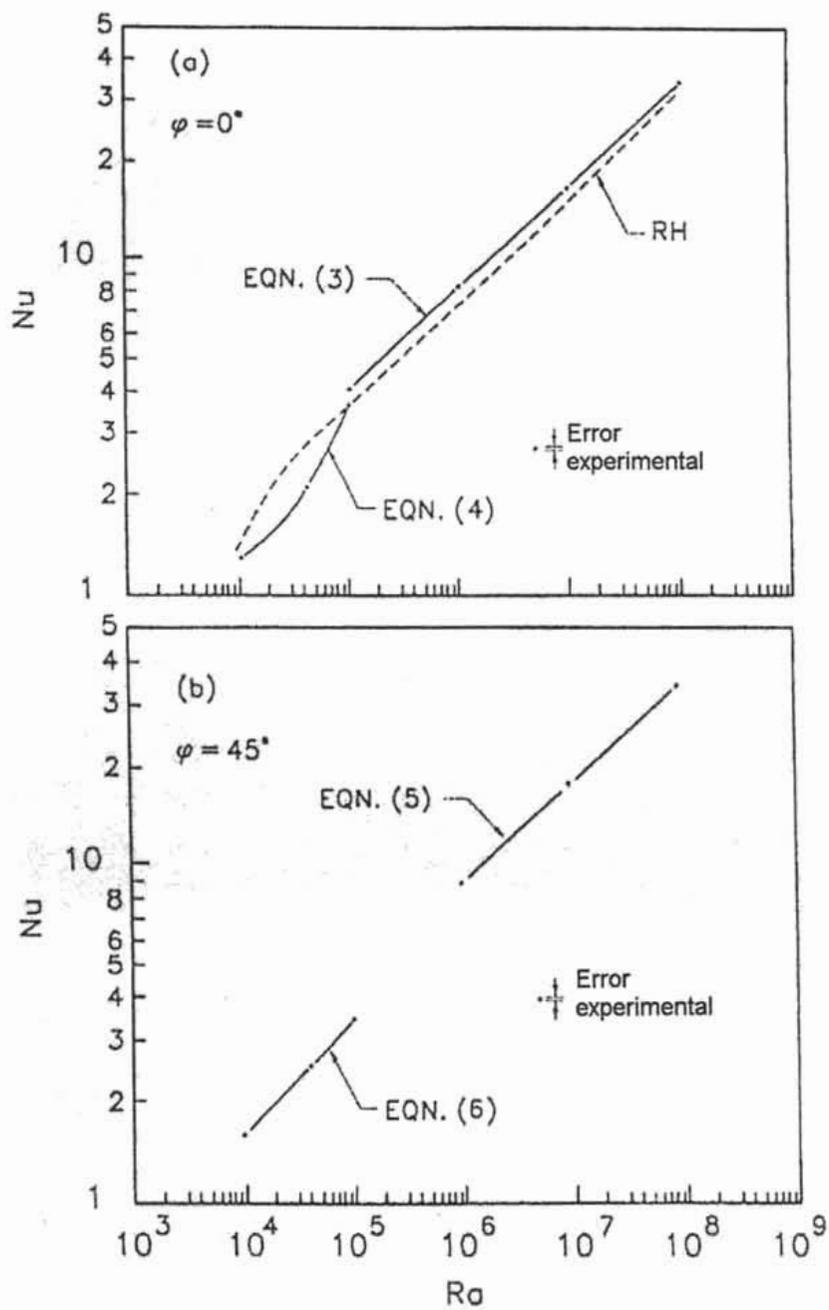


Figura 1.4. Gráfica de resultados para $\psi = 0^\circ$ y $\psi = 45^\circ$. Leong et al. [8]

$$Nu = 1 + 2.5135 \times 10^{-5} Ra \quad 10^4 \leq Ra \leq 4 \times 10^4 \quad (1.7)$$

Para el valor de $Nu = 3.9$ se obtiene la correlación:

$$Nu = 0.1194 Ra^{0.3021} \quad 10^5 \leq Ra \leq 10^8 \quad (1.8)$$

Los resultados obtenidos para un ángulo de 45° se muestran en la Figura 1.14b. Debido a que esta gráfica no es continua, se obtuvieron dos correlaciones para diferentes rangos del número de Rayleigh.

$$Nu = 0.07309 Ra^{0.3358} \quad 10^4 \leq Ra \leq 10^5 \quad (1.9)$$

$$Nu = 0.1492 Ra^{0.2955} \quad 10^6 \leq Ra \leq 10^8 \quad (1.10)$$

Manum et al. [12] realizaron una extensión del trabajo de Leong et al. [7,8], utilizando el mismo dispositivo experimental, las mismas condiciones iniciales, así como el mismo fluido de trabajo. Para este experimento se utilizó una orientación de diamante, es decir la cavidad tiene una doble inclinación con respecto a la horizontal. Los resultados de este experimento se muestran en la Tabla 1.2. A partir de la tabla se obtuvo la siguiente correlación para el número de Nusselt.

$$Nu = 0.09649 Ra^{0.3168} \quad 10^4 \leq Ra \leq 10^8 \quad (1.11)$$

Analizando los resultados de las Tablas 1.1 y 1.2 se puede observar que para un $Ra \leq 10^5$ el número de Nusselt es mayor para la orientación de diamante que para las otras orientaciones (calentada por debajo, lateralmente e inclinada). Para $10^6 \leq Ra \leq 10^8$ el número de Nusselt para la orientación de diamante es menor que cuando la cavidad se encuentra inclinada y mayor que para los otros dos casos. Esto puede deberse a que la orientación de diamante es muy

Measured Nusselt number results at diamond orientation	
Ra	Nu
1×10^4	1.676 ± 0.026
4×10^4	2.763 ± 0.033 ; 2.818 ± 0.033
1×10^5	3.856 ± 0.043
1×10^6	8.012 ± 0.092
1×10^7	15.77 ± 0.19
1×10^8	32.84 ± 0.39

Figura 1.2. Número de Nusselt promedio para la orientación de diamante. Manum et al. [10]

parecida a la configuración de cavidad inclinada, pero para la orientación de diamante se pueden presentar flujos más complejos.

Para el caso de paredes calentadas lateralmente, Ramesh y Ventakeshan [13] realizaron un estudio experimental en una cavidad cuadrada en la que las paredes laterales son adiabáticas y las paredes verticales se consideran isotérmicas. Utilizaron aire como fluido de trabajo.

Se emplearon dos modelos experimentales, el primero de $40\text{mm} \times 40\text{mm}$ y 200mm de profundidad, mientras que el segundo modelo tiene las siguientes dimensiones: $60\text{mm} \times 60\text{mm} \times 300\text{mm}$. Las paredes fría y caliente se fabricaron con aluminio, en la parte exterior de la pared fría se maquinaron canales en los que circula agua, mientras que en la pared caliente se incorporó un calentador eléctrico. En las paredes horizontales se utilizaron Perspex y corcho para tener un buen aislamiento.

Los resultados se presentan en función del número de Grashof, debido a que las propiedades del aire varían poco en el rango de temperatura manejado. Con los resultados obtenidos formularon la siguiente correlación para calcular el número de Nusselt promedio en función del número de Grashof:

$$\overline{Nu} = 0.560Gr^{0.195} \quad 5 \times 10^4 \leq Gr \leq 2 \times 10^6 \quad (1.12)$$

1.3 Estudios numéricos sobre convección natural en cavidades cerradas.

Existe una gran cantidad de estudios numéricos publicados sobre convección natural en cavidades, impulsados por la gran variedad de aplicaciones que tienen en la ingeniería, además de ser menos costosos y requerir un menor tiempo para la obtención de resultados. En estas simulaciones numéricas a partir de las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento, masa y energía, se pueden obtener campos de temperatura, velocidades y patrones de flujo en función del número de Rayleigh. Se ha hecho común el uso de códigos numéricos previamente validados por estudios experimentales, a los que sólo se les hacen pequeñas modificaciones.

Wakashima y Saitoh [14] presentaron una solución numérica al problema de “benchmark” para la convección natural en tres dimensiones en una cavidad cúbica. Se tienen dos paredes verticales opuestas calentadas de forma diferencial, mientras que, las otras paredes se consideran adiabáticas. El problema se solucionó para tres valores del número de Rayleigh: 10^4 , 10^5 y 10^6 . El fluido de trabajo es aire y considera el número de Prandtl como 0.71. Los resultados se obtuvieron por medio del método espacio-tiempo, para discretizar las ecuaciones que modelan el fenómeno, mientras que para las condiciones de frontera se utilizó un método de diferencias finitas de cuarto orden, con una malla tridimensional de $120 \times 120 \times 120$. Un modelo esquemático del problema se puede observar en la Figura 1.15. Se considera un flujo incompresible y laminar, además se toma como válida la aproximación de Boussinesq.

La distribución del número de Nusselt promedio obtenido, en el plano medio de la cavidad, concuerdan con los resultados obtenidos por Fusegi et al. [15] en simulaciones en dos dimensiones, Figura 1.16.

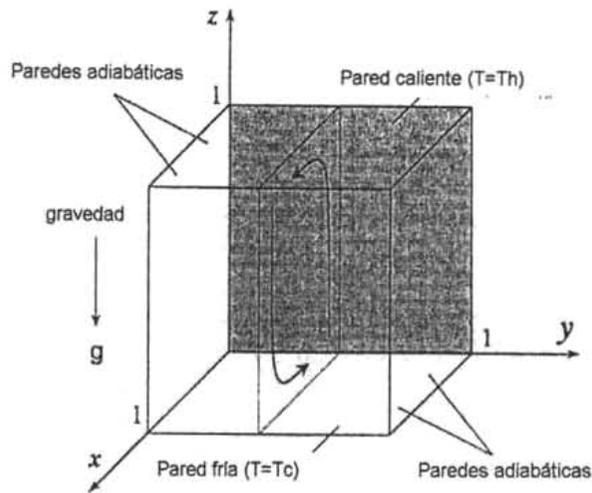


Figura 1.15. Modelo esquemático de la cavidad cúbica para la convección natural. Wakashima y Saitoh [14]

Pallares et al. [16] realizaron un estudio numérico sobre la convección natural en una cavidad cuadrada calentada por debajo, las paredes laterales se consideran adiabáticas. Para esto utilizaron las ecuaciones de Navier-Stokes y de transporte de energía para $3500 \leq Ra \leq 10000$. Usaron la aproximación de Boussinesq para modelar los efectos de la flotación, usando aire como fluido de trabajo ($Pr = 0.71$).

Se usó el código CFD 3DINAMICS para obtener las soluciones numéricas de las ecuaciones, utilizando una aproximación de segundo orden, en términos de las variables primitivas. El flujo de calor a través de las superficies del volumen de control se discretizó utilizando el esquema QUICK de segundo orden. El algoritmo SMAC, basado en el esquema de predicción-corrección, fue aplicado para calcular el campo de presiones.

Se encontraron cuatro estructuras convectivas estables. Tres de estas estructuras son rollos simples con sus ejes de rotación paralelo a las paredes

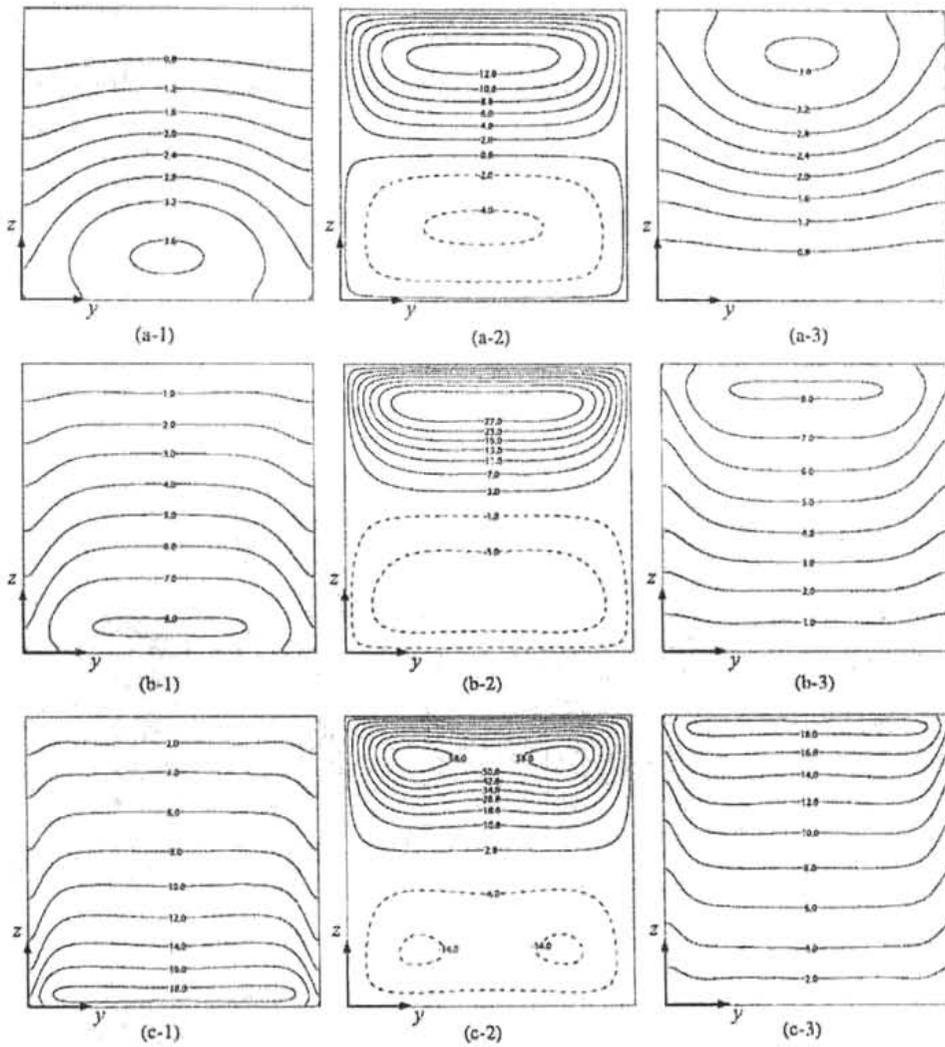


Figura 1.16. Número de Nusselt local para los planos $x=0$ (izquierda), 0.5 (centro) y 1 (derecha). Para $Ra = 10^4$. Wakashima y Saitoh [14]

laterales. Las estructuras S1 y S3, tienen el eje de rotación paralelo a dos paredes verticales. La estructura S2 tiene su eje de rotación orientado a dos esquinas verticales. La cuarta estructura S4 se parece a un toroide, con movimiento descendente alineado con las cuatro esquinas verticales y un movimiento ascendente a lo largo de los ejes verticales de la cavidad (ver Figura 1.18). La distribución espacial de estas estructuras es influenciada por las cuatro paredes laterales adiabáticas, las cuales favorecen ciertas orientaciones.

Como se puede observar en la Figura 1.17, el número de Nusselt promedio depende del número de Rayleigh y del tipo de estructura que presente el fluido. La variación del número de Nusselt promedio con el número de Rayleigh para las estructuras S1-S3 es claramente diferente al correspondiente para S4. Las tres primeras estructuras S1-S3 tienen las mismas características de transferencia de calor, con números de Nusselt incrementándose en función del número de Rayleigh elevado a una potencia en el rango de 0.7 a 0.4. La estructura S1 es la más eficiente para la transferencia de calor, seguida por S2 y S3 respectivamente. La Figura 1.18, muestra los campos de velocidades.

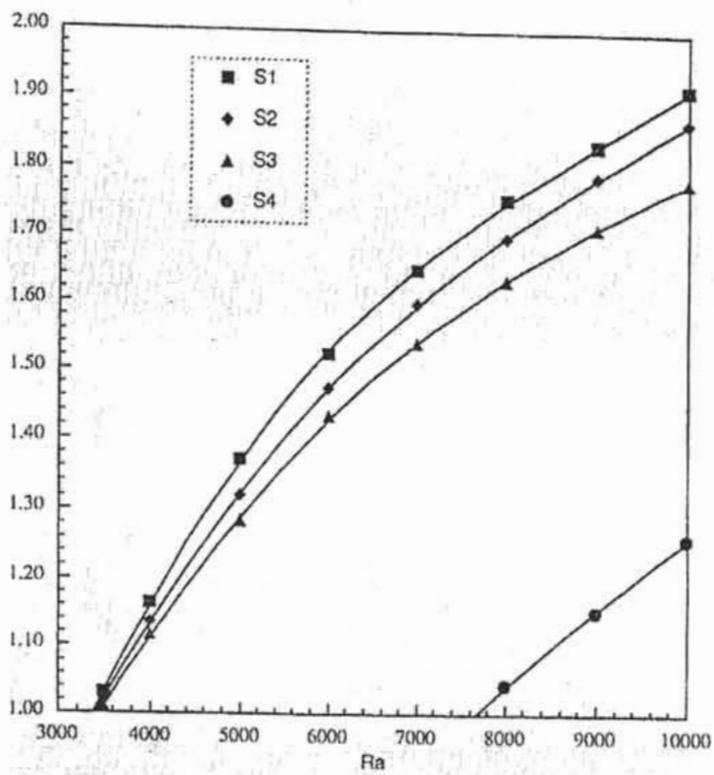


Figura 1.17. Variación del número de Nusselt promedio con el número de Rayleigh para las cuatro celdas convectivas. Pallares et al. [15]

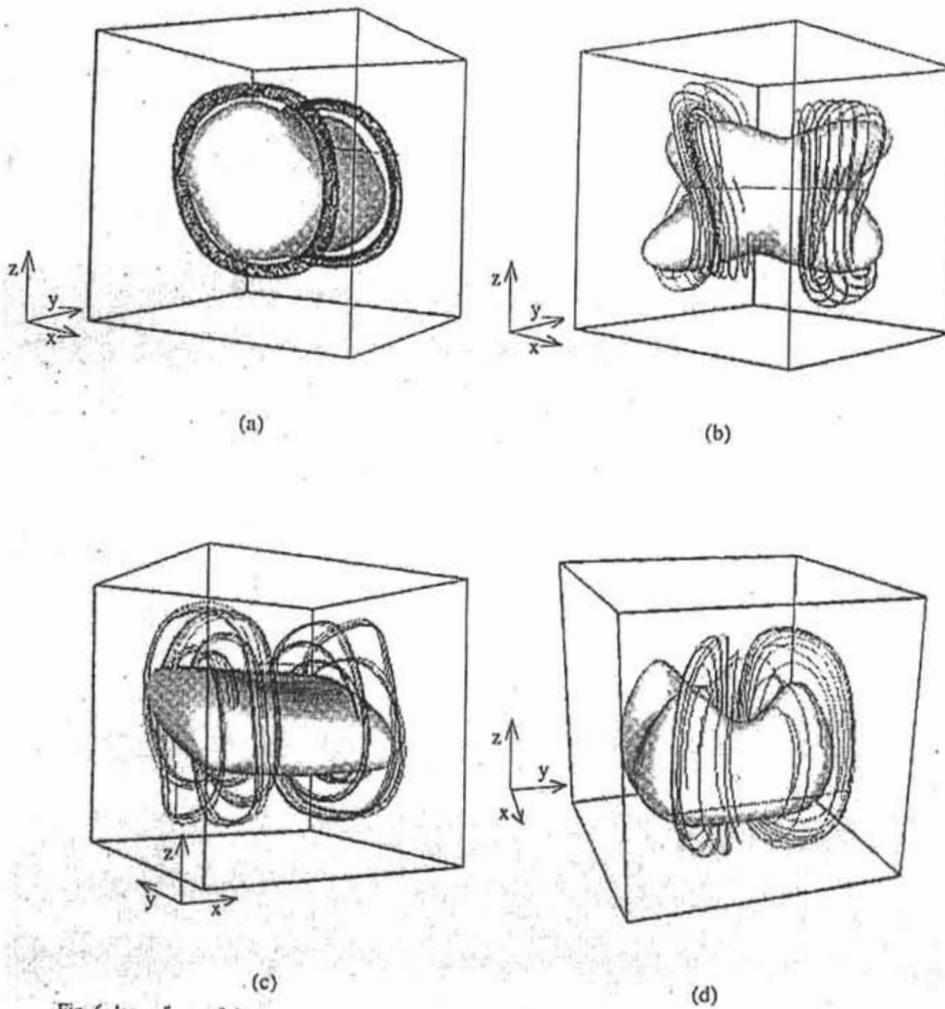


Figura 1.18. Isosuperficies del segundo invariante del gradiente de velocidades para $Re = 9000$, para las cuatro estructuras. Pallares et al. [15]

1.4 Objetivo de la Tesis.

El trabajo que se desarrolló en la presente tesis forma parte de un proyecto más general que tiene por objeto el estudio experimental del problema acoplado de conducción en las paredes y convección en el fluido, en una cavidad inclinada. Se pretende variar el material de las paredes conductoras, la razón de forma y el ángulo de inclinación. Como se puede ver en la revisión bibliográfica presentada en las secciones anteriores, en investigaciones previas se ha estudiado el efecto del ángulo de inclinación en la transferencia de calor y en los patrones de flujo, incluso para los casos de paredes laterales conductoras en las que se tiene una distribución lineal de temperaturas desde la temperatura de la pared fría a la de la pared caliente. No se encontraron reportados estudios experimentales en los que se investigue el efecto de la conductividad térmica finita y el espesor de las paredes en la transferencia de calor y en los patrones de flujo para cavidades cerradas inclinadas. El presente trabajo de tesis tiene por objetivo diseñar y probar el dispositivo experimental necesario para llevar a cabo el proyecto general, además de realizar las primeras visualizaciones y la obtención del campo de velocidades mediante la técnica de PIV para diferentes ángulos de inclinación y número de Rayleigh.

CAPÍTULO 2

Desarrollo experimental.

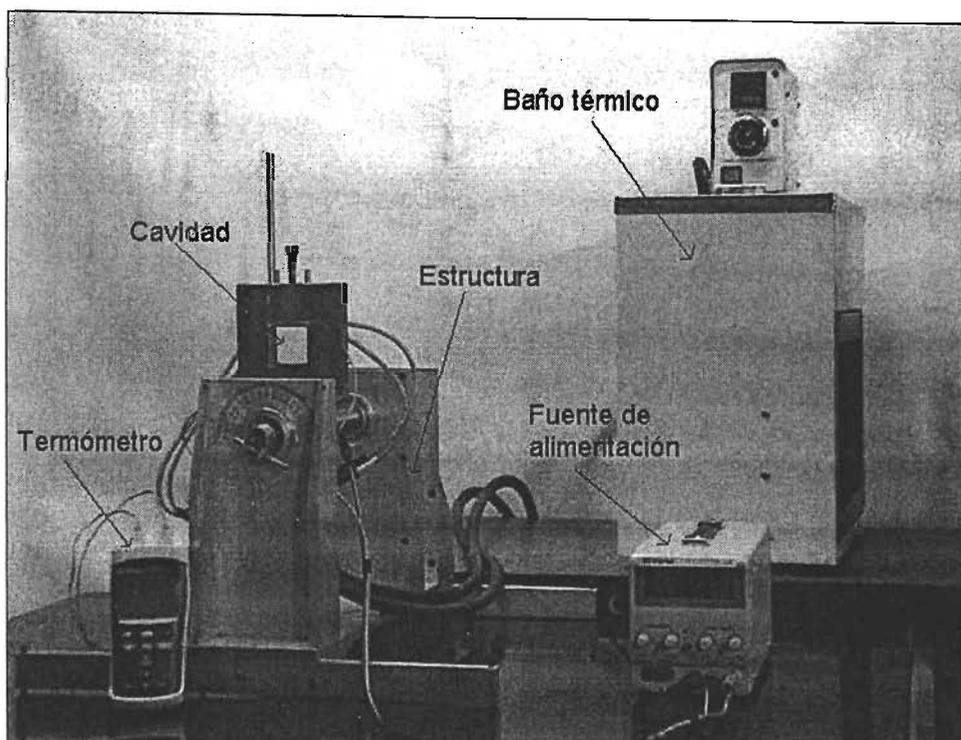


Figura 2.1. Equipo utilizado en los experimentos.

En los experimentos se utilizó una fuente de alimentación para proporcionar la corriente eléctrica a la resistencia que se encuentra en la pared caliente, un baño térmico que hace fluir agua a temperatura constante a través del sistema de enfriamiento de la cavidad, permitiendo así que la pared fría se encuentre a una

temperatura constante de 20°C. La inclinación de la cavidad se logra gracias a que el eje de la estructura en la que se encuentra montada la cavidad es giratorio, pudiendo abarcar los 360°, Figura 2.1

La distancia entre la pared fría y caliente (L) es de 4.28 cm y dichas paredes se consideran isotérmicas, en tanto que las paredes laterales son conductoras. Se obtienen los campos de velocidades mediante una variante del método PIV (velocimetría por imágenes de partículas) para los números de Rayleigh: 3×10^4 , 6×10^4 , 8×10^4 y 1×10^5 , variando el ángulo de inclinación entre 0° y 90°, con incrementos de 30°.

2.1 Dispositivo experimental.

El dispositivo utilizado para el desarrollo del experimento es una cavidad cuadrada de 4 cm de alto \times 4 cm de ancho \times 1 cm de espesor. Los bloques de las paredes laterales fueron maquinados de acero, los cuales pueden ser cambiados por bloques de diferente material, altura o espesor y son de 4 cm de alto \times 1.9 cm de ancho \times 1 cm de espesor. Los bloques de las paredes caliente y fría fueron hechos de cobre para tener una buena conducción de calor. Son de 6 cm de largo \times 1.9 cm de ancho \times 1 cm de espesor, en ambos bloques se maquinó un barreno en la parte central para poder medir su temperatura. En la pared caliente se maquinó un canal por medio de fresado para introducir la resistencia; para tener una distribución uniforme de temperatura en la pared este canal se maquinó en zig-zag y la resistencia se aisló eléctricamente por medio de un material refractario de alta conductividad térmica (arena sílica). La pared se aisló en su cara inferior con un bloque de madera para garantizar que la mayor parte del calor generado

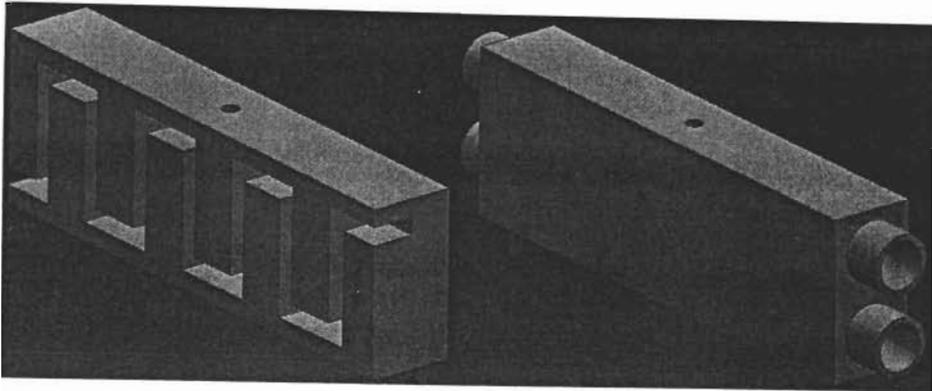


Figura 2.2. Bloques o paredes superior (izquierda) e inferior (derecha) de la cavidad.

por la resistencia fluya al interior de la cavidad. En la pared fría se maquinaron dos barrenos, por los que circula agua proveniente de un baño térmico. Todas las paredes de los bloques tienen un acabado fino para tener una baja emisibilidad. Ver Figura 2.2.

2.2 Preparación de los experimentos.

Antes de comenzar a realizar los experimentos se tuvieron que resolver diversos problemas con el dispositivo experimental y adecuar las instalaciones del laboratorio para minimizar los efectos de los cambios bruscos de temperatura y las corrientes de aire. Además se probaron diversos materiales para aislar eléctricamente la resistencia que genera el calor en la pared caliente, ya que muchos materiales se degradaban con facilidad o no tenían una buena conductividad térmica.

Por otro lado se probaron diferentes materiales para sembrar el fluido, como son polianilina, grafeno, níquel, titanio, plata, hierro, polianilina y polen. Debido a que el problema es por los ángulos de inclinación por lo que presenta una dificultad por la inclinación y el ángulo de inclinación, además de presentar mayores viscosidades que las de los materiales, se usó lo que es el trazador para realizar los experimentos, teniendo el inconveniente de que cada día a los cuatro días una vez preparada la mezcla. Una vez solucionado el problema se tuvo que encontrar la mezcla que permitiera realizar mejor las visualizaciones del flujo dentro de la cavidad.

Una vez solucionados los detalles se prosiguió a probar el comportamiento del dispositivo experimental obteniendo excelentes resultados. Posteriormente se calibró todo el equipo. En las pruebas se presentaron diversas dificultades principalmente con la iluminación de la cavidad ya que la colocación de las lámparas es diferente y depende del ángulo de inclinación de la cavidad; además, el eje giratorio de la estructura sobre la que fue montada la cavidad estorba para ángulos superiores a 60° , lo que hizo difícil ubicar correctamente las lámparas para iluminar de forma uniforme la cavidad, por lo que es necesario corregir el montaje de la cavidad o modificar la estructura si se quieren realizar visualizaciones para ángulos mayores de 90° sin que se tenga que desmontar la cavidad.

En el ensamblado del modelo todas las piezas se montan en un marco de acero para que se encuentren sujetas firmemente. Se comienza fijando el bloque de madera (aislante) y el bloque que contiene la resistencia (pared caliente), a la parte inferior del marco, teniendo cuidado que ambos bloques se encuentren colocados en la parte central del marco. Posteriormente se coloca el bloque superior (pared fría) a un bloque móvil de 6 cm de largo \times 1.9 cm de ancho \times 1 cm de espesor, que se encuentra fijo a un tornillo en la parte superior del marco. Finalmente se colocan las paredes laterales, auxiliándose de un bloque de acrílico

en forma de pirámide escalonada que tiene las dimensiones de todas las configuraciones que se pueden formar con el modelo. Todas las piezas quedan fijas cuando se baja el bloque móvil. Una vez ensamblada la cavidad se aplica barniz transparente en las esquinas internas para evitar fugas del fluido, Figura 2.3 y 2.4

Debido a que se requiere observar los patrones de flujo y medir los campos de velocidades, se decidió utilizar en la pared frontal de la cavidad un cristal de 3mm de espesor, cubriendo un área de $5 \times 5 \text{ cm}^2$. En la pared posterior se utilizó una película de acetato, de las mismas dimensiones que el cristal, para facilitar el llenado de la cavidad con el fluido de trabajo. Tanto el cristal como la película de acetato son pegados con pegamento de contacto.

Colocadas las paredes frontal y posterior de la cavidad, se hace un pequeño agujero en una de las esquinas superiores de la película de acetato, con un alfiler para que posteriormente se inyecte el fluido de trabajo, previamente sembrado con partículas de polen.

Para el sembrado de la glicerina con partículas de polen, se colocan una cucharada de polen y aproximadamente 10ml de glicerina en un recipiente, mezclando perfectamente con una varilla de vidrio hasta que la mezcla tome un tono amarillento. La mezcla se filtra por una malla fina para que las partículas tengan un tamaño máximo de 0.01 in. De este preparado se agregan de 15 a 19 gotas a un vaso de precipitados con 60ml de glicerina, distribuyendo de forma uniforme las partículas de polen con la varilla de vidrio.

Una vez que se ha verificado que no se formaron burbujas de aire al distribuir las partículas de polen, se procede a inyectar el preparado de glicerina dentro de la cavidad; esta operación se realiza con una jeringa con aguja de plástico (vena

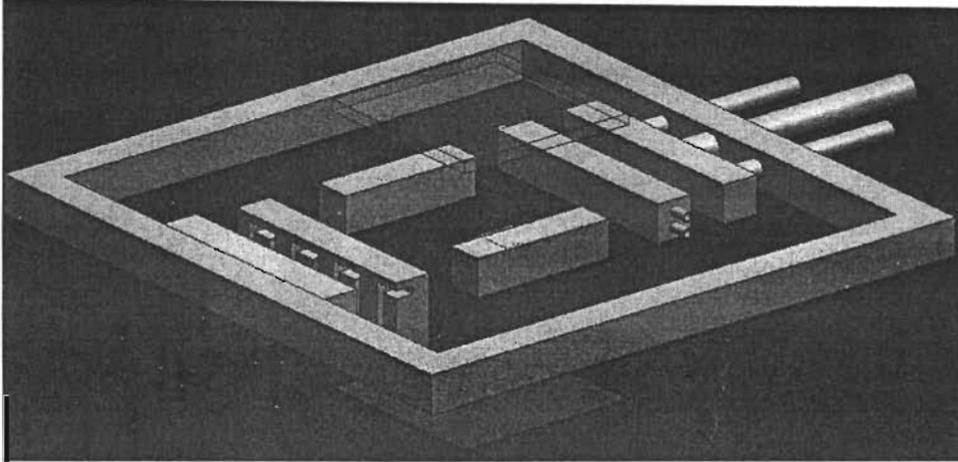


Figura 2.3. Ensamblado de la cavidad.

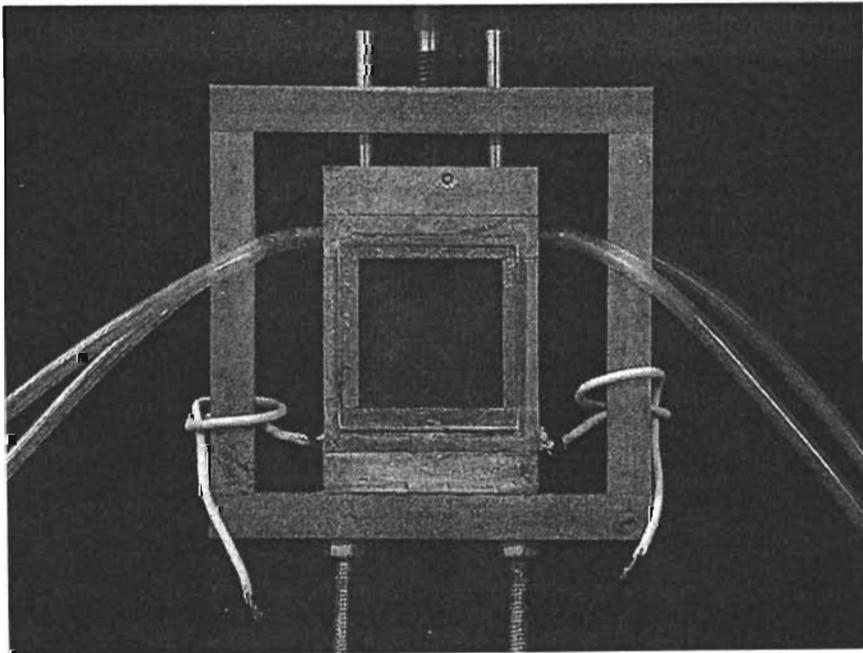


Figura 2.4. Cavidad ensamblada

forte) que se introduce en el agujero hecho previamente en una de las esquinas de la película de acetato.

El vaciado de la glicerina tiene que ser despacio para que no se formen burbujas de aire en el preparado o en las esquinas internas de la cavidad. Se recomienda mantener inclinada la cavidad, para que ésta se llene de forma uniforme y evitar que en la película de acetato se formen pequeñas venas de aire al llenar la cavidad. Una vez que se llena completamente la cavidad se deja que salga el exceso de glicerina, para posteriormente limpiar el área alrededor de agujero y cerrarlo con cinta adhesiva transparente.

Se inspecciona la cavidad en busca de posibles fugas del preparado de glicerina; si no existen fugas, se limpian las paredes frontal y posterior con un líquido especial para lentes y un paño limpio para quitar todas las manchas que se pudieran haber dejado en las superficies, que pudieran afectar la visualización y las grabaciones. En caso de existir fugas se sellan de ser posible, o en el peor de los casos, se desarma completamente la cavidad para ensamblarla nuevamente.

El marco de acero que sujeta a la cavidad se fija por medio de unos tornillos a una estructura de acero inoxidable cuyo eje es rotatorio. Ver figura 2.1. El ángulo de inclinación se mide con la ayuda de un transportador y una aguja indicadora, colocados en la parte frontal del eje de la estructura.

Una vez fijo el modelo se insertan los termopares tipo K en los agujeros hechos en las paredes caliente y fría, fijándolos con cinta adhesiva para evitar que variaciones en la temperatura ambiental o corrientes de aire afecten las lecturas. Estos termopares se conectan a un termómetro digital marca FLUKE, con una resolución de 0.1 °C.

Finalmente se conectan las mangueras provenientes del baño térmico a la pared fría, asegurándose que el agua circule en contra flujo a través de los canales internos para tener un mejor enfriamiento de la superficie. La fuente de alimentación se conecta a las terminales de la resistencia alojada en la pared caliente.

2.3 Desarrollo de los experimentos.

Una vez fijada la cavidad en la estructura y colocada a la inclinación deseada, se enciende el baño térmico y se espera a que se estabilice la temperatura de la pared fría (T_f). Una vez estabilizada T_f se pone en funcionamiento la fuente de alimentación para elevar la temperatura de la pared caliente (T_c). Todos los equipos utilizados se calibraron previamente para obtener los diferentes números de Rayleigh a los diferentes ángulos de inclinación manejados, la diferencia de temperatura depende del número de Rayleigh manejado. Ver apéndice A.

La cavidad se debe colocar en la inclinación deseada con anterioridad, de preferencia un día antes, para evitar que el movimiento de la cavidad influya en la formación de los patrones de flujo de la cavidad.

La cavidad se ilumina una vez que se estabiliza el sistema, con una lámpara de mano de 6V y una lámpara que originalmente pertenecía a un microscopio. Ambas lámparas están montadas en soportes universales independientes. La lámpara de mano se modificó para ser alimentada por una fuente de voltaje variable y poder así igualar la luminosidad de la lámpara del microscopio. La lámpara del microscopio puede variar su intensidad luminosa en tres niveles, seleccionándose el nivel medio. Ambas lámparas se colocan a un ángulo no

mayor de 45° , medidos desde el plano de la cavidad. El ángulo donde se colocan ambas lámparas varía de acuerdo al ángulo de inclinación de la cavidad así como la distancia de separación entre la cavidad y las lámparas.

Un vez que se estabiliza la diferencia de temperaturas, se deja que el sistema trabaje una hora aproximadamente, corrigiendo las pequeñas variaciones de voltaje o corriente que se pudiesen presentar. Si ocurriesen cambios significativos en la diferencia de temperatura entre las paredes, se verifica que el sistema se encuentre en el orden del número de Rayleigh a obtener, utilizando para ello un programa de computadora que obtiene el número de Rayleigh para la glicerina a partir de las temperaturas de las paredes caliente y fría (T_c y T_f). Ver apéndice B. Si el sistema se encuentra dentro del orden del número de Rayleigh se deja que el sistema continúe trabajando, de lo contrario se modifica la corriente de alimentación o la temperatura del baño térmico, el tiempo de estabilización se inicia de nuevo. Transcurrido el tiempo y que el sistema se encuentre en el orden del número de Rayleigh a obtener, se graba el flujo dentro de la cavidad con una cámara de video digital (handy cam), durante aproximadamente de 5 minutos, la cámara empleada tiene una velocidad de grabación de 30 imágenes por segundo.

En caso de querer realizar otro experimento a un diferente número de Rayleigh se apaga la fuente de alimentación y se desconecta de la resistencia, mientras que el baño térmico se deja funcionando hasta que la pared caliente tenga la misma temperatura que la pared fría. Adicionalmente se deja reposar el sistema por aproximadamente 45 minutos antes de comenzar un nuevo experimento.

2.4 Obtención de resultados.

2.4.1 Generalidades sobre el método PIV.

Para la obtención de los campos de velocidades existe el método PIV (velocimetría por imágenes de partículas), en el que a partir de dos imágenes se traza la trayectoria de las partículas embebidas en un fluido a dos distintos tiempos, t_1 y t_2 , para estimar la velocidad del fluido. Estas imágenes son grabadas generalmente en película (fotográfica u holográfica) o en un arreglo de cámaras de video CCD. En el análisis se utiliza una correlación para obtener el desplazamiento de las partículas, ΔX , donde la estimación de primer orden de la velocidad es

$$u = \frac{\Delta X}{\Delta t}$$

donde ΔX es una aproximación al desplazamiento de las partículas en el fluido sobre el intervalo de tiempo $\Delta t = t_2 - t_1$.

Normalmente el campo de la imagen se divide en pequeños subdominios a los que se les denomina regiones o zonas de interrogación. Cada uno de estos subdominios se analiza de forma separada para obtener la velocidad en la zona de interrogación, y posteriormente se obtiene el campo de velocidades del flujo completo. La región de medición se ilumina por medio de una hoja láser, la cual define una región bidimensional del flujo.

Los sistemas PIV están formados por cuatro subsistemas:

Sistema de iluminación: Se usa una hoja láser Nd:YAG con tres tipos principales de funcionamiento: láser pulsado, láser de onda continua (CW) con emisión

expandida y láser CW con emisión exploradora. Actualmente se utiliza un láser de doble pulso en los sistemas de iluminación. Por medio de un arreglo estereoscópico de las cámaras CCD se pueden medir las tres componentes de la velocidad y determinar así la velocidad tridimensional del flujo. Existen fuentes de luz láser de diferente potencia, la elección del láser dependerá del tipo de fluido manejado (agua, aire, etc.) y la velocidad del flujo.

Sistema de captura: En un principio las grabaciones se realizaban en película fotográfica u holográfica, teniendo el inconveniente que el tiempo para obtener los resultados era demasiado y no se podían corregir los errores de iluminación o enfoque del experimento por lo que se tenían que realizar varias pruebas antes de realizar las grabaciones. Actualmente se usan cámaras de video CCD, que además de tener mejor definición, tienen la capacidad de obtener resultados en tiempo real y modificar las condiciones del experimento.

Procesamiento de la señal: Es el responsable de la manipulación de los mapas de bits y los vectores de evaluación. Además provee una plataforma hardware para el control y sincronización del sistema. La sincronización y el control son implementados por el procesador, basándose en las especificaciones proporcionadas en la configuración del software de la computadora. El usuario sólo tiene que proporcionar algunos parámetros relevantes como son: duración del pulso del láser, intervalo del pulso, el generador de pico; el resto de la información es cargada al procesador vía software, el cual evalúa el tiempo y la secuencia de los eventos, para posteriormente ser enviados.

Software: Es una de las partes integrales de los sistemas PIV, está diseñado para tener las funciones de adquisición, control, análisis y el guardado de los datos. Este software contiene las especificaciones de los equipos que puede soportar, como son: láser, obturadores y cámaras, para configurar el software de acuerdo al equipo con que se cuente y asegurar que la adquisición de datos sea correcta. La

paquetería de software con que se cuenta actualmente tiene la característica de poder modificar los parámetros de adquisición y análisis en el desarrollo del experimento, con el fin de optimizar las mediciones.

2.4.2 El método DPIV.

Debido a que en laboratorio de Termofluidos no se cuenta con el equipo necesario para realizar las mediciones de los campos de velocidades de forma directa, se utilizó una variante del método PIV, al que se conoce como DPIV (velocimetría por imágenes de partículas digital) en el que a partir de grabaciones tomadas de los experimentos, se obtienen imágenes a un intervalo de tiempo que depende de la velocidad del flujo; el programa lee las imágenes desde un disco o de la memoria de la computadora, guardándolos en la memoria del programa para procesarlos posteriormente y obtener así los campos de velocidades.

Para tener una medición confiable a partir de las imágenes digitales es necesario conocer la velocidad aproximada del flujo. Para nuestro caso, la velocidad se calculó midiendo el desplazamiento de una partícula en un intervalo de tiempo determinado. A partir de esta velocidad (en píxeles por segundo) y considerando que el área de interrogación será de 8×8 píxeles, y se tiene que una partícula debe viajar entre $1/3$ y 2 veces el área de interrogación de una imagen a otra, las imágenes se tomaron a un intervalo de tiempo definido por las características anteriores, guardándose con el formato TIFF y un tamaño de 320×240 píxeles. Para cada experimento se utilizó un conjunto de aproximadamente 100 imágenes.

Cada conjunto de imágenes se analizó con el software Insight de TSI. Las imágenes fueron divididas por una malla uniforme de 30×30 . Para obtener un

primer promedio de la velocidad de las partículas entre dos imágenes se utiliza el software Insight PIV system versión 3.0 (1993) de TSI, primero se selecciona el tamaño del área de interés y se selecciona el área de interrogación donde se quiere que el software trabaje y se aplica una correlación cruzada entre las dos imágenes. Cuando se alcanza una buena validación en la medición se elige el tamaño del área de interrogación más adecuado. Entonces se aplican dichas condiciones a todo el conjunto de imágenes correspondiente al evento. Se utiliza el subprograma DATASHOW de TSI para obtener el campo de velocidades medio temporal del flujo (promedio de varios campos instantáneos); este software arroja los resultados en un archivo con extensión .DAT, en este archivo se encuentran las posiciones (x, y) y las componentes de la velocidad (u, v) en píxeles y píxeles/imagen respectivamente en un sistema de coordenadas $-x, y$, por lo que fue necesario utilizar un programa hecho en Visual Fortran que emplea las dimensiones originales de la cavidad y el tiempo entre imágenes para calcular la velocidad en (m/s) y las posiciones en (m), además de calcular la función de corriente con los datos ya calculados. Los datos son arrojados en un archivo con la extensión .PLT y otro con extensión .DAT, la diferencia entre ambos archivos es que el .PLT contiene un encabezado que contiene la información necesaria para ser reconocido por el programa TECPLOT mientras que el otro archivo carece de dicho encabezado y los datos aparecen de forma ordenada. El archivo con extensión .PLT es utilizado para obtener las gráficas de las líneas de corriente y los campos de velocidad, pudiendo observar los patrones de flujo en este último, con el software graficador TECPLOT. El archivo con extensión .DAT se utiliza para obtener los perfiles de velocidad en la dirección x e y en cada evento utilizando el software ORIGIN, con ayuda de estos perfiles se puede hacer una mejor comparación entre los resultados obtenidos experimentalmente y los numéricos de otros autores.

CAPÍTULO 3

Resultados.

Como se mencionó en el primer capítulo, esta tesis tiene por objeto el estudio de la convección natural en una cavidad cerrada con diferentes ángulos de inclinación comprendidos entre 0° y 90° , para el rango del número de Rayleigh de $3 \times 10^4 \leq Ra \leq 1 \times 10^5$. La cavidad tiene una relación de forma H/L de 1 mientras que para H/W se tiene una relación de 4.

Los resultados se presentan de forma gráfica de cuatro maneras: traza, campo de velocidades, líneas de corriente, perfiles de velocidad en la dirección x e y . En algunas gráficas se presentan zonas oscurecidas en las que no se puede observar el campo de velocidades de forma correcta, esto se debe a problemas en la iluminación o que existen pequeñas manchas en las caras frontal o posterior de la cavidad, por lo que se pierde la información perteneciente a esa zona al realizar las grabaciones y por consiguiente el software no pudo obtener los datos correspondientes.

Los perfiles de velocidad para la dirección x fueron tomados para diferentes planos verticales (x/L), donde $x/L = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7$ y 0.9 . En tanto que los perfiles de velocidad en la dirección y fueron tomados diferentes planos horizontales (y/L), donde $y/L = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7$ y 0.9 .

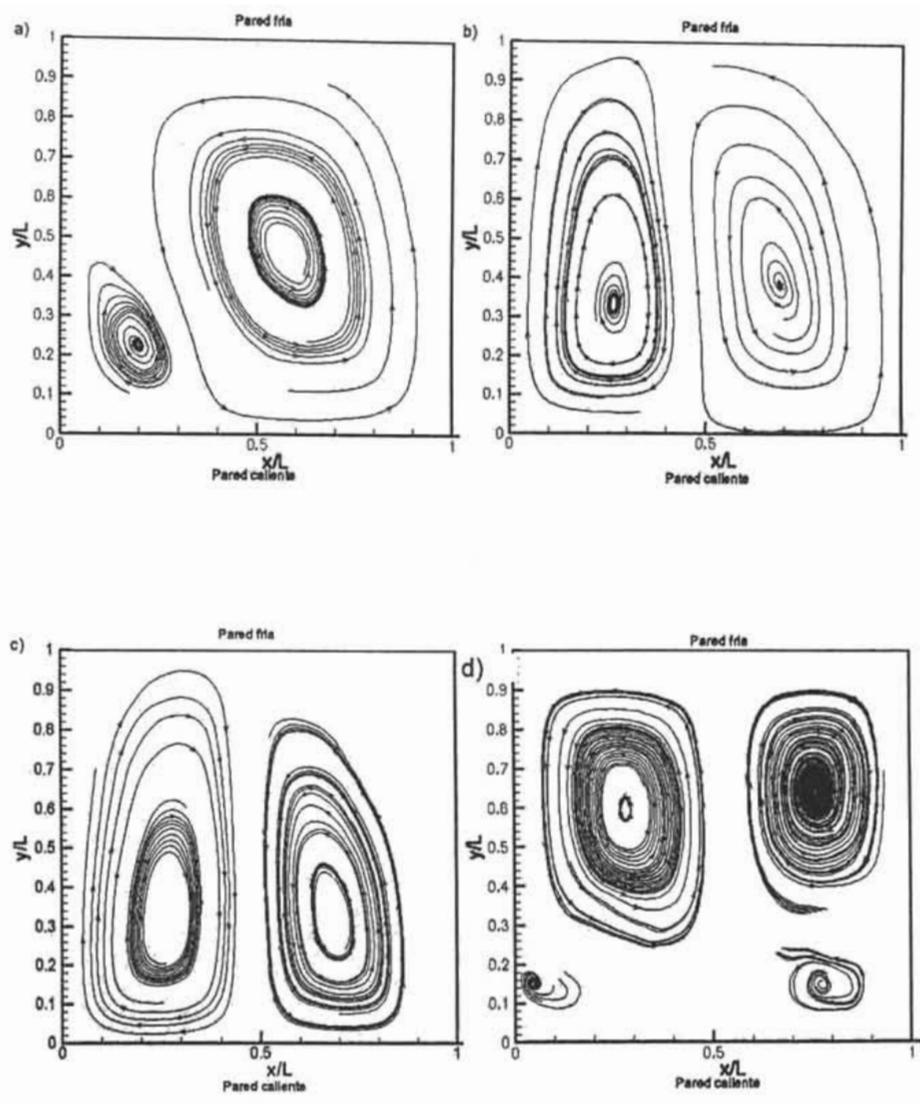


Figura 3.1. Trazas para $\theta=0^\circ$. a) $Ra = 3 \times 10^4$, b) $Ra = 6 \times 10^4$, c) $Ra = 8 \times 10^4$, d) $Ra = 1 \times 10^5$.

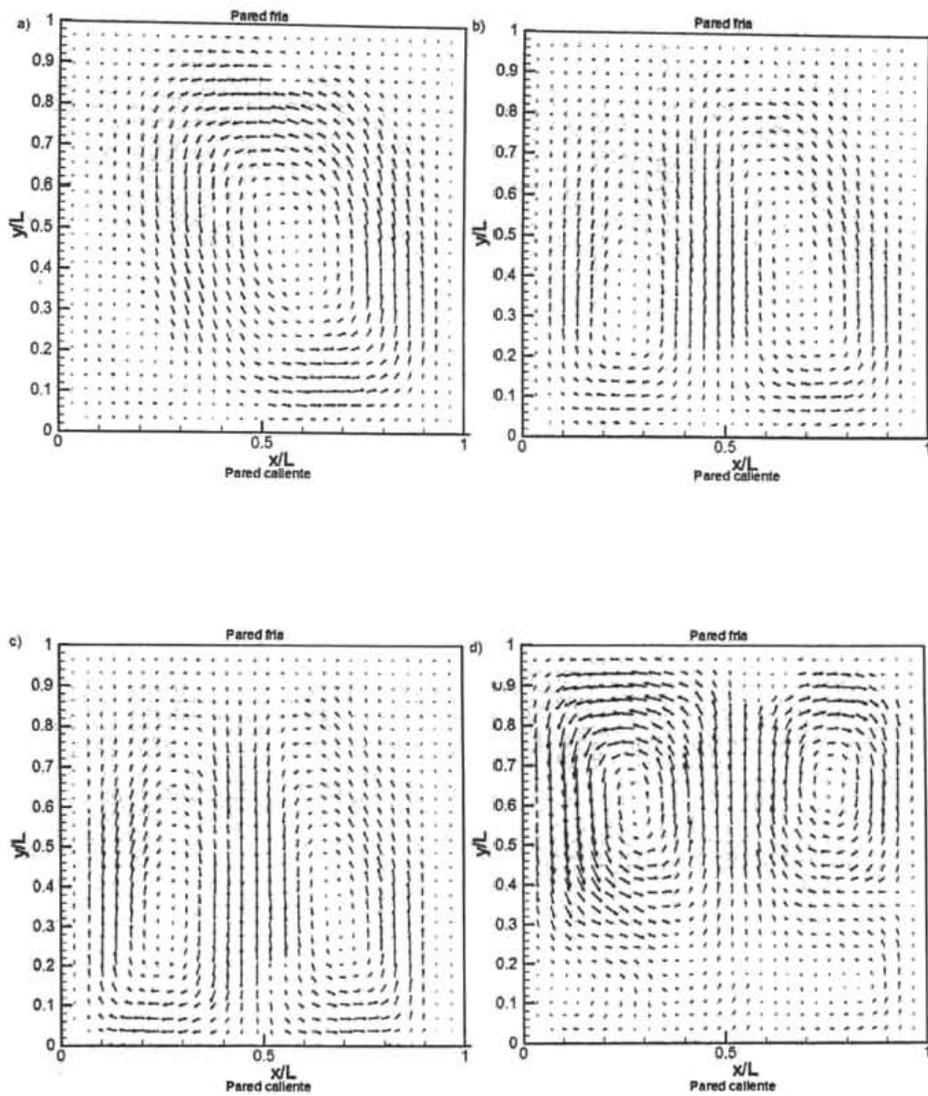


Figura 3.2. Campos de velocidad para $\theta=0^\circ$. a) $Ra = 3 \times 10^4$, b) $Ra = 6 \times 10^4$, c) $Ra = 8 \times 10^4$, d) $Ra = 1 \times 10^5$.

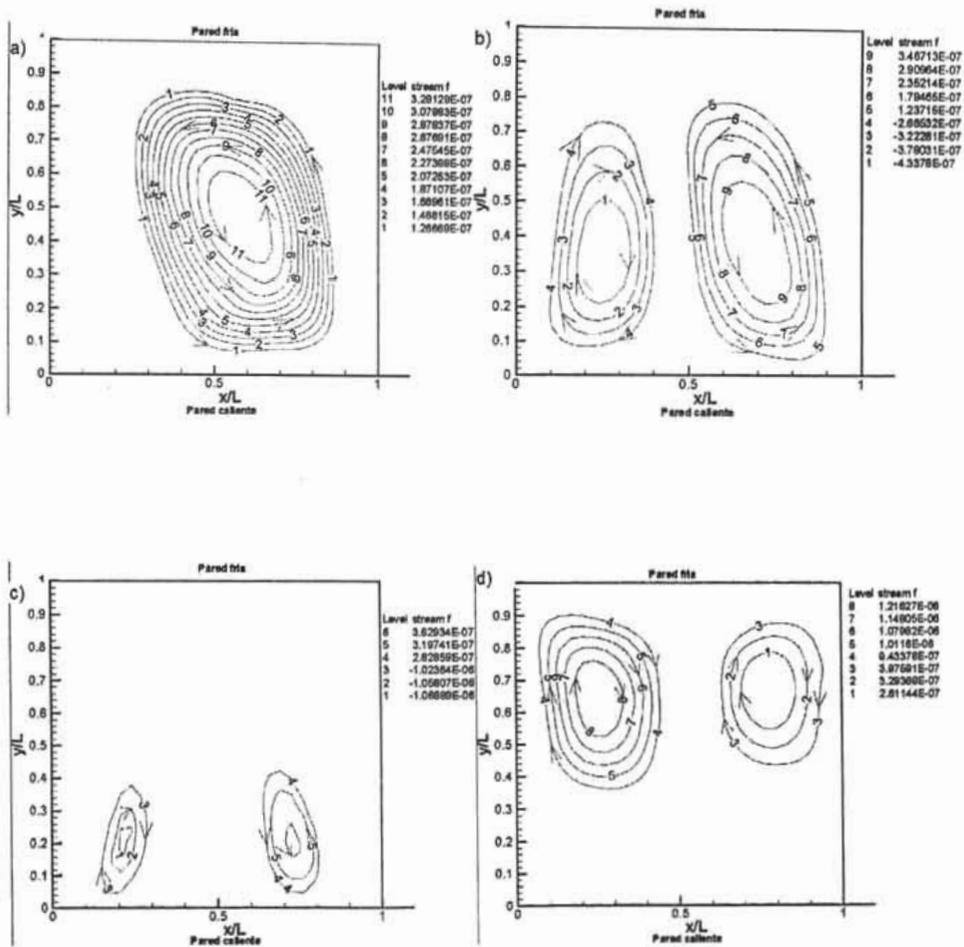


Figura 3.3. Líneas de corriente para $\theta=0^\circ$. a) $Ra = 3 \times 10^4$, b) $Ra = 6 \times 10^4$, c) $Ra = 8 \times 10^4$, d) $Ra = 1 \times 10^5$.

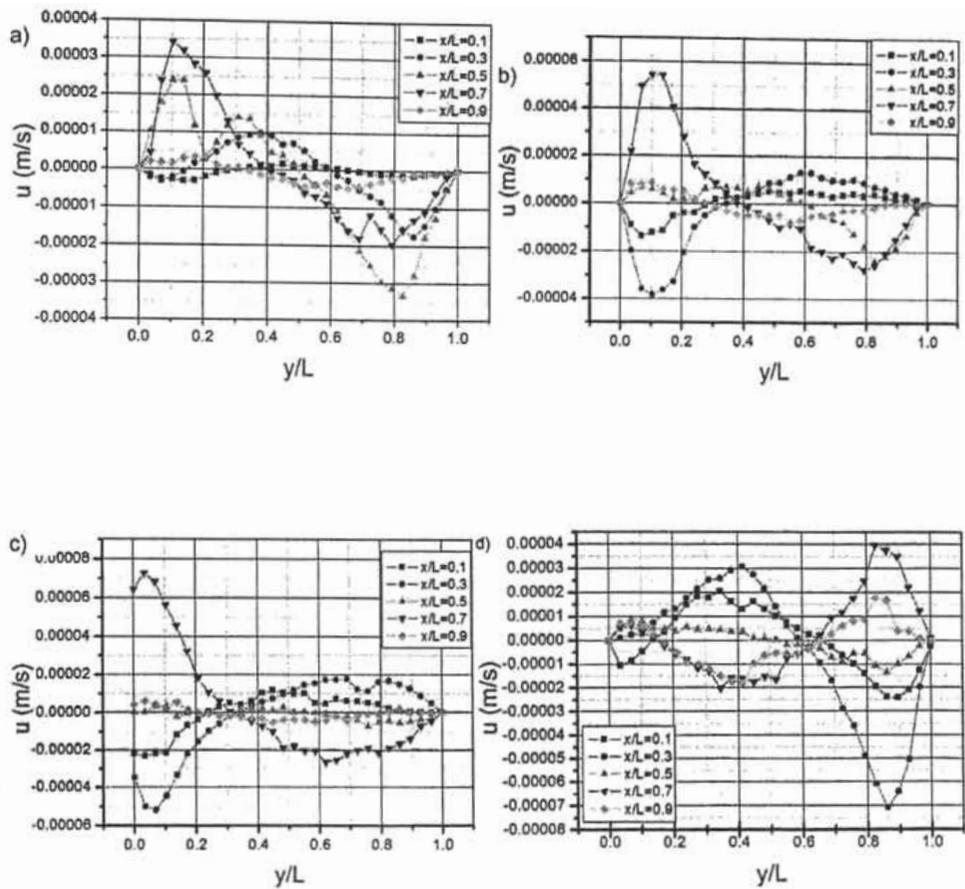


Figura 3.4. Perfiles de velocidad en la direcci3n x para $\theta=0^\circ$. a) $Ra = 3 \times 10^4$, b) $Ra = 6 \times 10^4$, c) $Ra = 8 \times 10^4$, d) $Ra = 1 \times 10^5$.

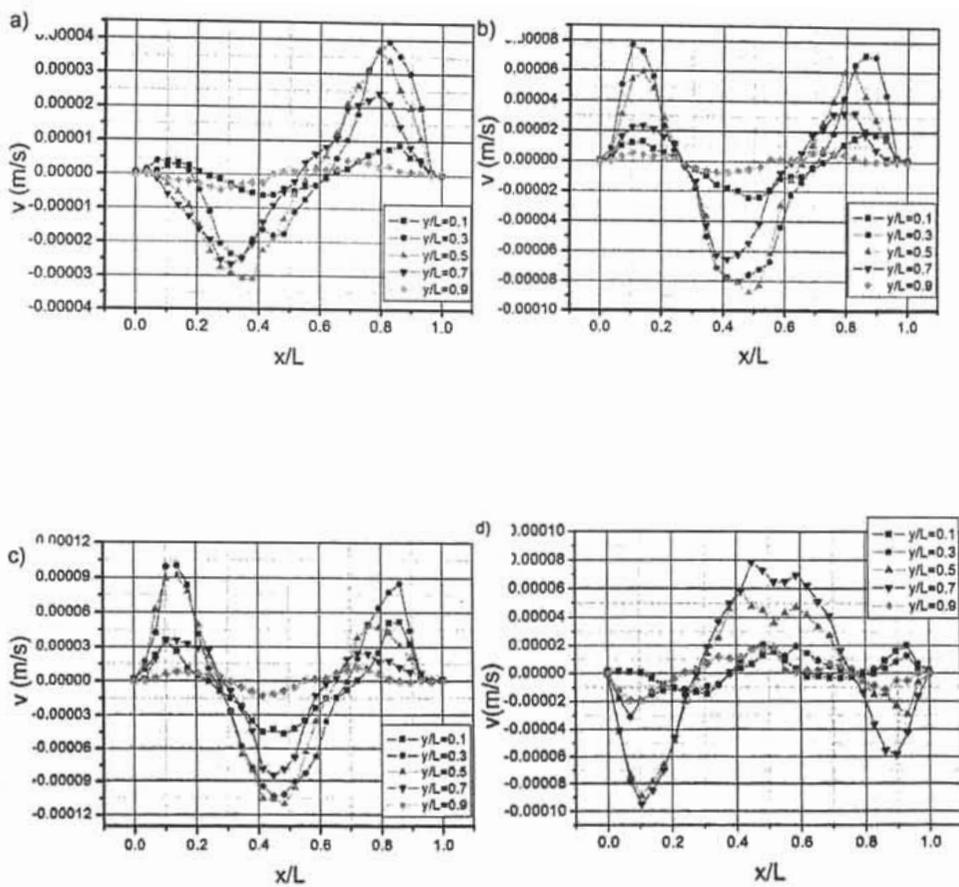


Figura 3.5. Perfiles de velocidad en dirección y y para $\theta=0^\circ$. a) $Ra = 3 \times 10^4$, b) $Ra = 6 \times 10^4$, c) $Ra = 8 \times 10^4$, d) $Ra = 1 \times 10^5$.

3.1. Dependencia con el número de Rayleigh.

Para este caso se considera θ constante en tanto que el número de Rayleigh varía. Los patrones de flujo y los campos de velocidades que se observaron dentro de la cavidad muestran que existe una gran dependencia con el número de Rayleigh. Para el ángulo de inclinación $\theta=0^\circ$, en las Figuras 3.1 a 3.5 se muestran las trazas, los campos de velocidades, las líneas de corriente y los perfiles de velocidad en la dirección x e y . Conforme aumenta el número de Rayleigh los patrones de flujo se vuelven cada vez más complejos. Para números de Rayleigh bajos, $Ra = 3 \times 10^4$, se presenta una estructura con una celda convectiva principal ligeramente inclinada sobre una de las diagonales de la cavidad y dos celdas convectivas secundarias localizadas en las esquinas superior e inferior opuestas. La celda convectiva secundaria inferior tiene un tamaño considerablemente mayor a la superior pero ambas tienen el sentido de giro igual al de las manecillas del reloj, en tanto que la celda convectiva principal presenta un sentido de giro inverso.

Conforme aumenta el número de Rayleigh el patrón de flujo evoluciona a una estructura que presenta dos celdas convectivas simétricas alargadas, presentándose esta estructura para $Ra = 6 \times 10^4$ y $Ra = 8 \times 10^4$. Mientras que para $Ra = 6 \times 10^4$, los ejes de rotación de las celdas convectivas están ligeramente desplazados debajo del plano medio de la cavidad, aproximadamente $y/L = 0.4$. En tanto que para $Ra = 8 \times 10^4$ el desplazamiento de los ejes de las celdas convectivas es mayor, $y/L = 0.3$ aproximadamente.

Para $Ra = 1 \times 10^5$ se presenta una estructura de cuatro celdas convectivas, Figura 3.1.d, en la que las celdas convectivas inferiores son más pequeñas que las superiores. Los ejes de rotación de las celdas convectivas inferiores se encuentran

a $y/L = 0.15$, mientras que para las celdas convectivas superiores los ejes se encuentran a $y/L = 0.65$.

Conforme se aumenta el número de Rayleigh se presenta un incremento en la velocidad del flujo en ambas componentes, u y v , como se observa en las Figuras 3.4 y 3.5, pero cuando se llega a $Ra = 1 \times 10^5$ se presenta una ligera caída en la velocidad, esto debido al cambio de estructura presente la cavidad.

La evolución de diversos patrones de flujo dentro de una cavidad calentada por debajo, o convección de Rayleigh-Bénard, se debe a que el flujo es muy inestable y las características finales de las celdas convectivas dependen en gran medida de las condiciones iniciales de los experimentos.

Para $\theta = 30^\circ$ la dependencia del número de Rayleigh sobre los patrones de flujo es menor, debido que el fenómeno es más estable y para todo el rango del número de Rayleigh manejado se presenta una estructura de una sola celda convectiva orientada hacia una de las diagonales de la cavidad. Para $Ra = 3 \times 10^4$, Figura 3.6.a, la celda convectiva está alargada hacia las paredes caliente y fría. Conforme el número de Rayleigh aumenta la deformación de la celda convectiva aumenta, Figura 3.6.d y Figura 3.8.d, extendiéndose sobre la diagonal de la cavidad. La velocidad del fluido es mayor cuando el flujo es paralelo a las paredes laterales y a las paredes caliente y fría de la cavidad, mientras que en las esquinas y en la región central de la cavidad se tienen velocidades considerablemente menores, Figura 3.9. En la esquina superior de la cavidad se presenta la mayor caída de velocidad, $y/L = 1$ y $x/L = 1$, para todos los Rayleigh manejados, Figura 3.7.

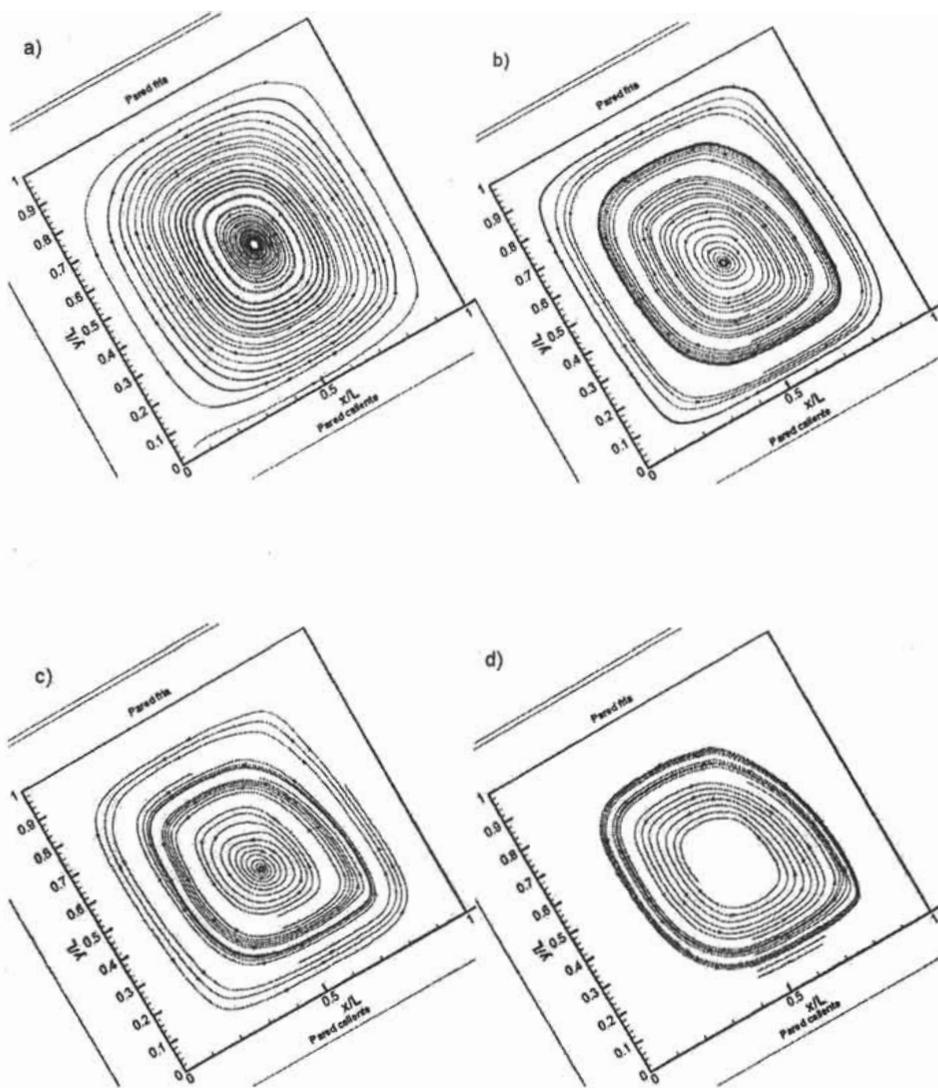


Figura 3.6. Trazas para $\theta=30^\circ$. a) $Ra = 3 \times 10^4$, b) $Ra = 6 \times 10^4$, c) $Ra = 8 \times 10^4$, d) $Ra = 1 \times 10^5$.

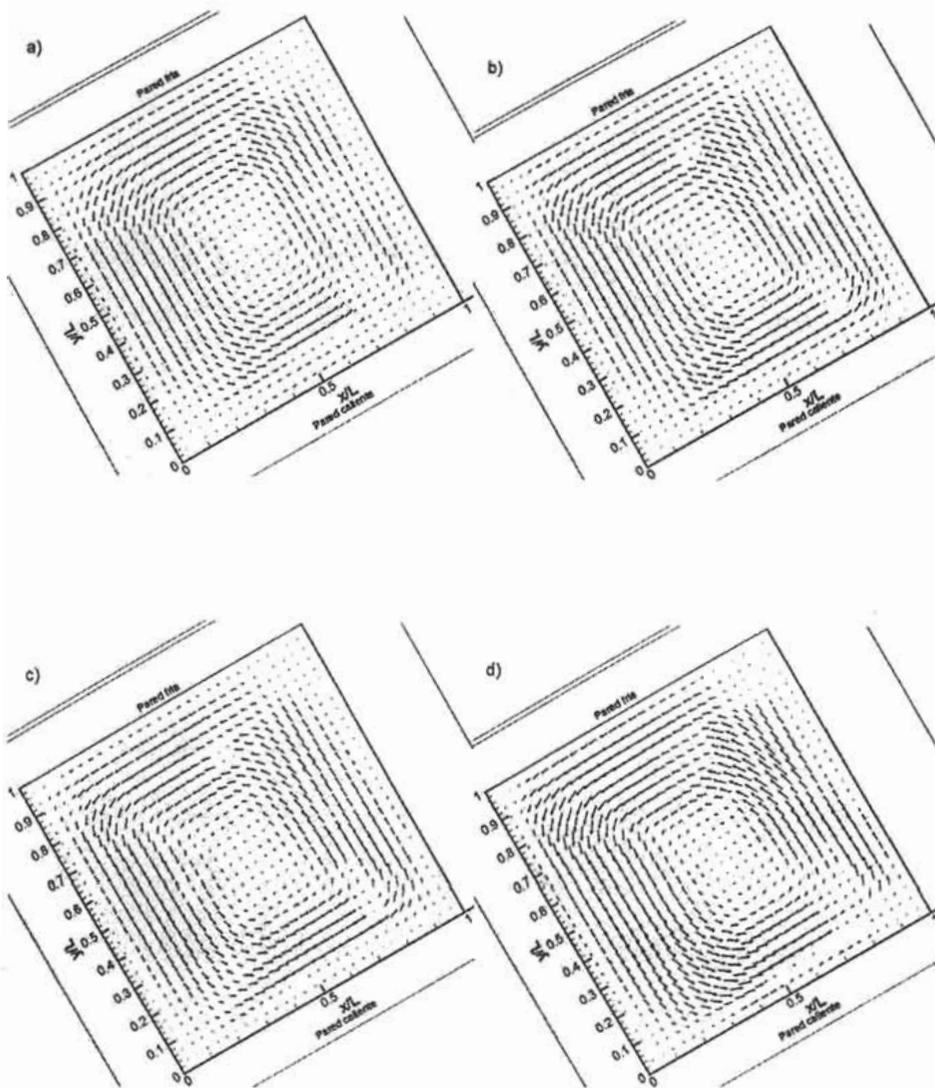


Figura 3.7. Campos de velocidad para $\theta=30^\circ$. a) $Ra = 3 \times 10^4$, b) $Ra = 6 \times 10^4$, c) $Ra = 8 \times 10^4$, d) $Ra = 1 \times 10^5$.

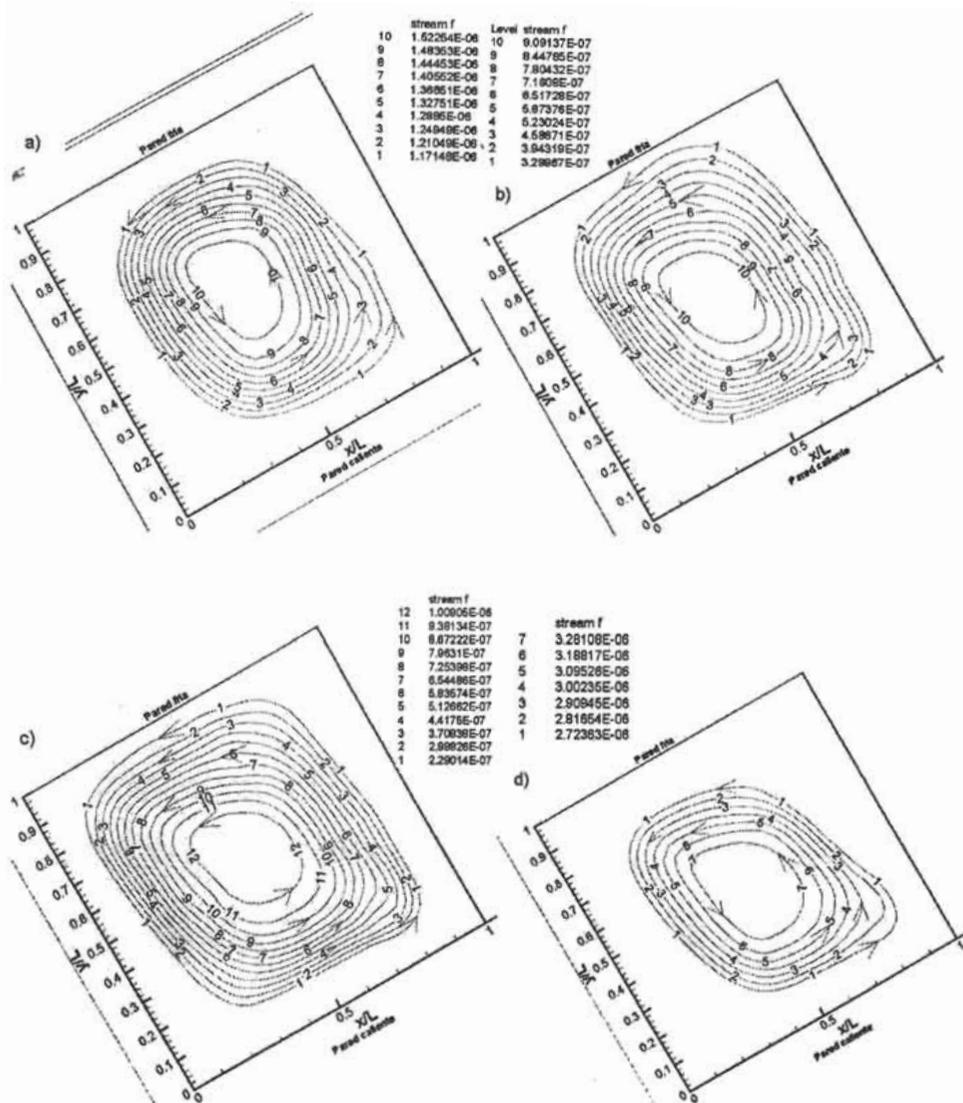


Figura 3.8. Líneas de corriente para $\theta=30^\circ$. a) $Ra = 3 \times 10^4$, b) $Ra = 6 \times 10^4$, c) $Ra = 8 \times 10^4$, d) $Ra = 1 \times 10^5$.

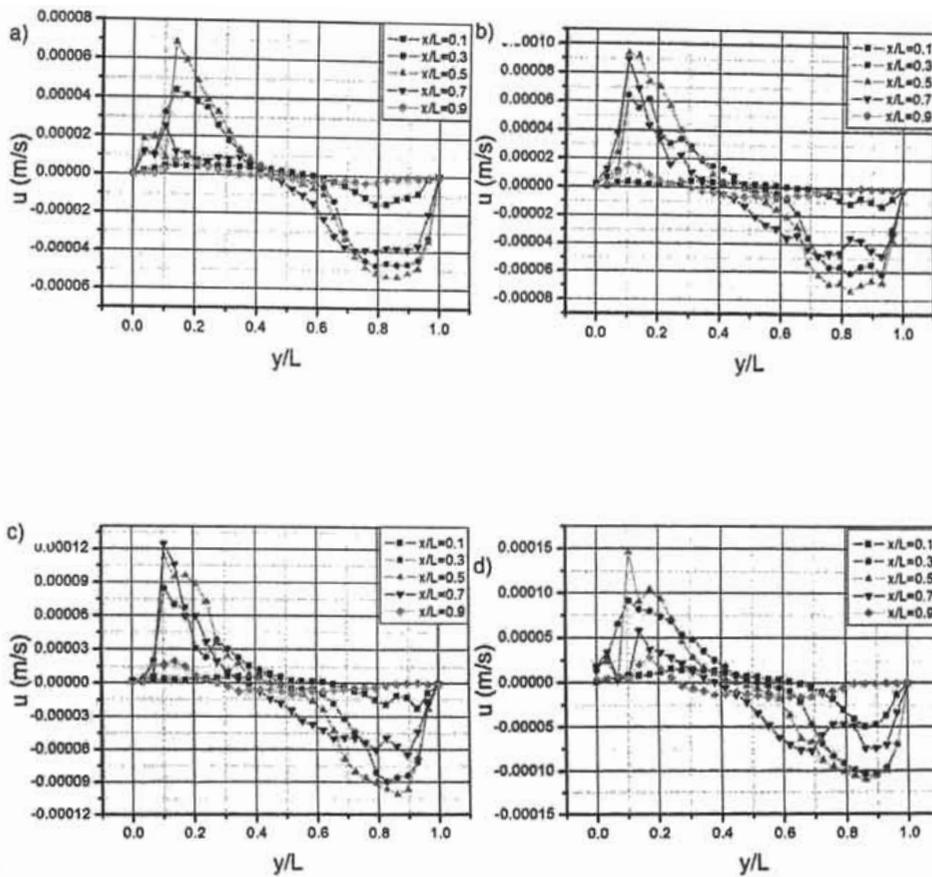


Figura 3.9. Perfiles de velocidad en la dirección x para $\theta=30^\circ$. a) $Ra = 3 \times 10^4$, b) $Ra = 6 \times 10^4$, c) $Ra = 8 \times 10^4$, d) $Ra = 1 \times 10^5$.

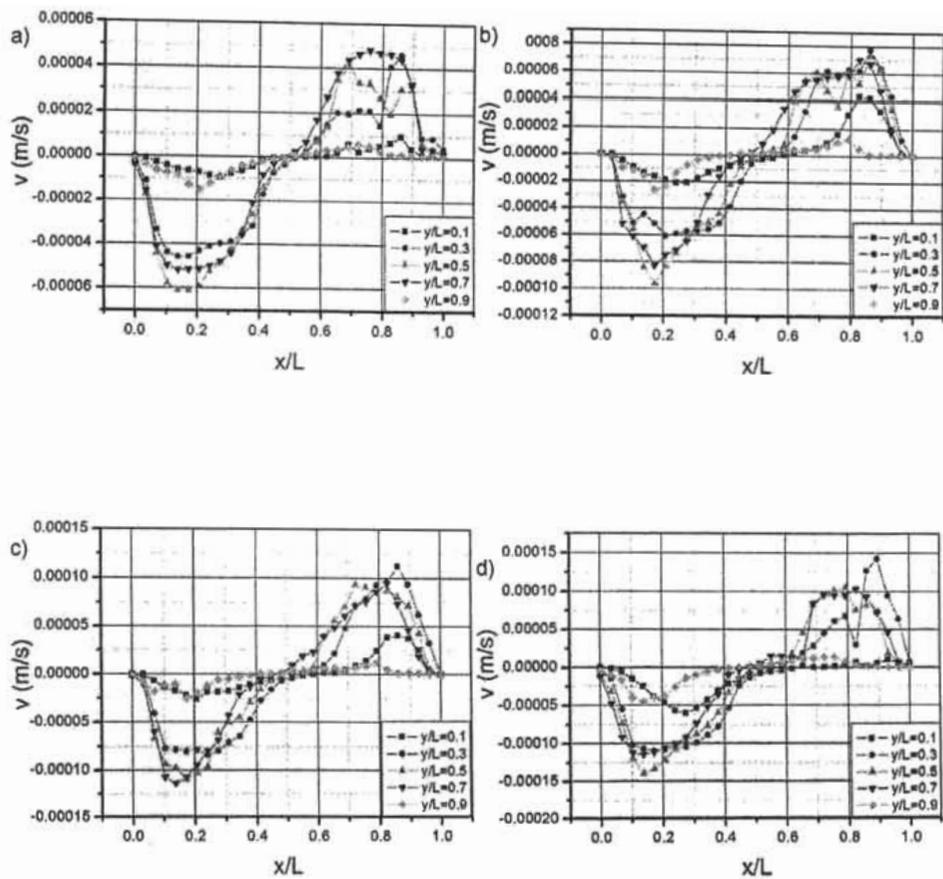


Figura 3.10. Perfiles de velocidad en direcci3n y para $\theta=30^\circ$. a) $Ra = 3 \times 10^4$, b) $Ra = 6 \times 10^4$, c) $Ra = 8 \times 10^4$, d) $Ra = 1 \times 10^5$.

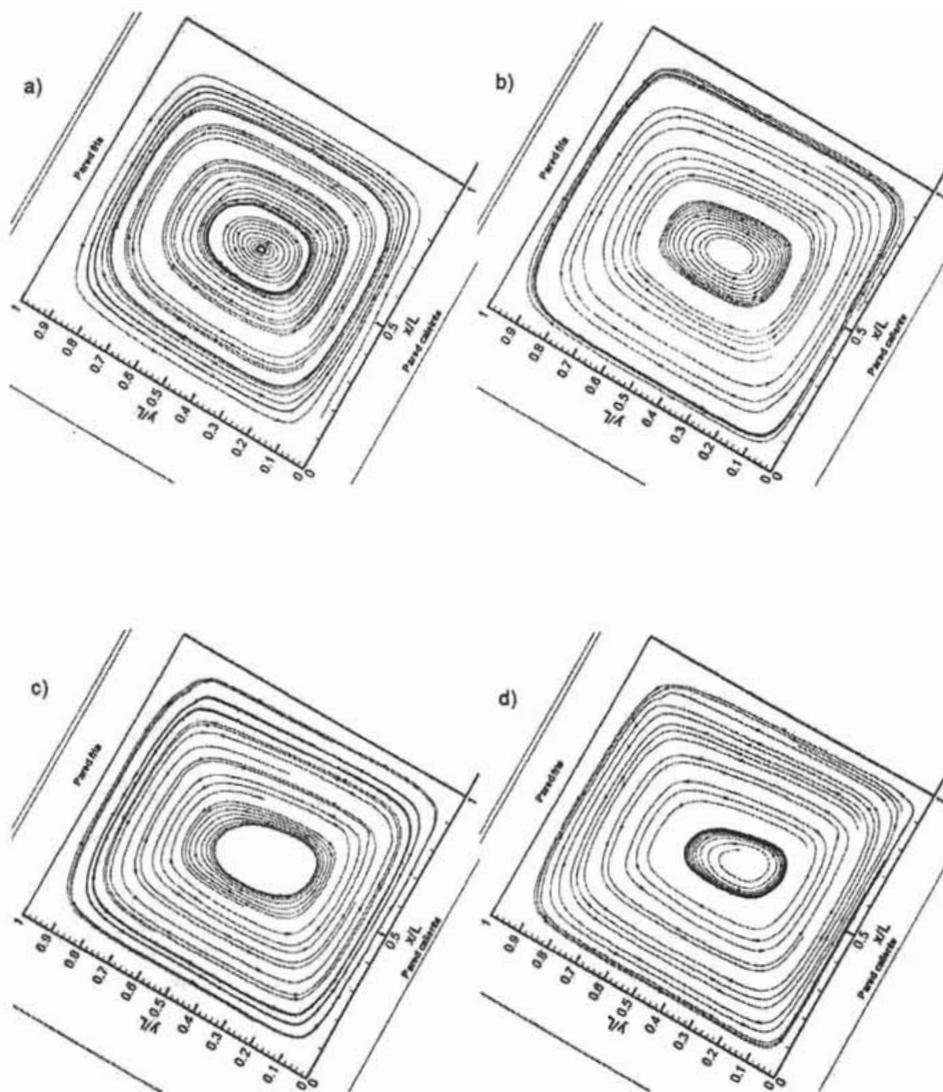


Figura 3.11. Trazas para $\theta=60^\circ$. a) $Ra = 3 \times 10^4$, b) $Ra = 6 \times 10^4$, c) $Ra = 8 \times 10^4$, d) $Ra = 1 \times 10^5$.

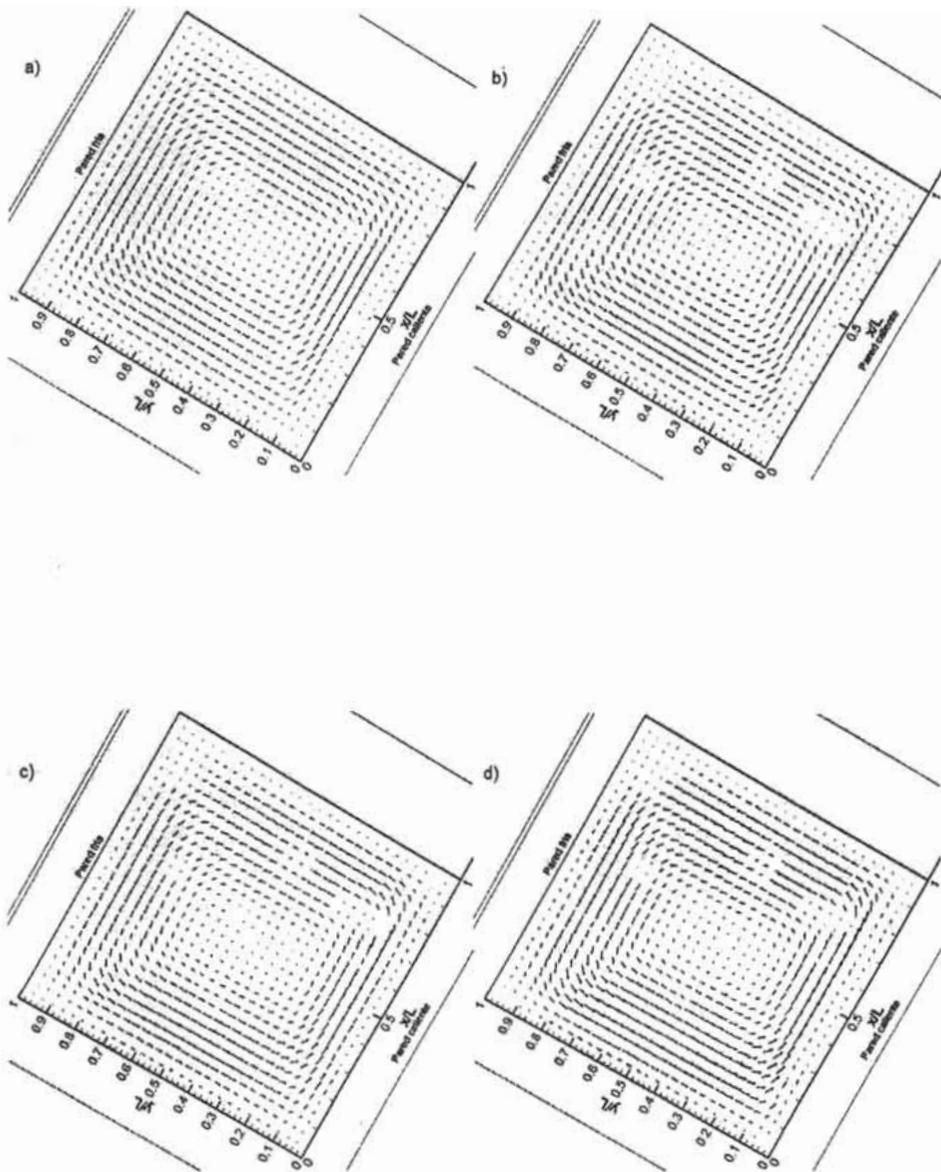


Figura 3.12. Campos de velocidad para $\theta=60^\circ$. a) $Ra = 3 \times 10^4$, b) $Ra = 6 \times 10^4$, c) $Ra = 8 \times 10^4$, d) $Ra = 1 \times 10^5$.

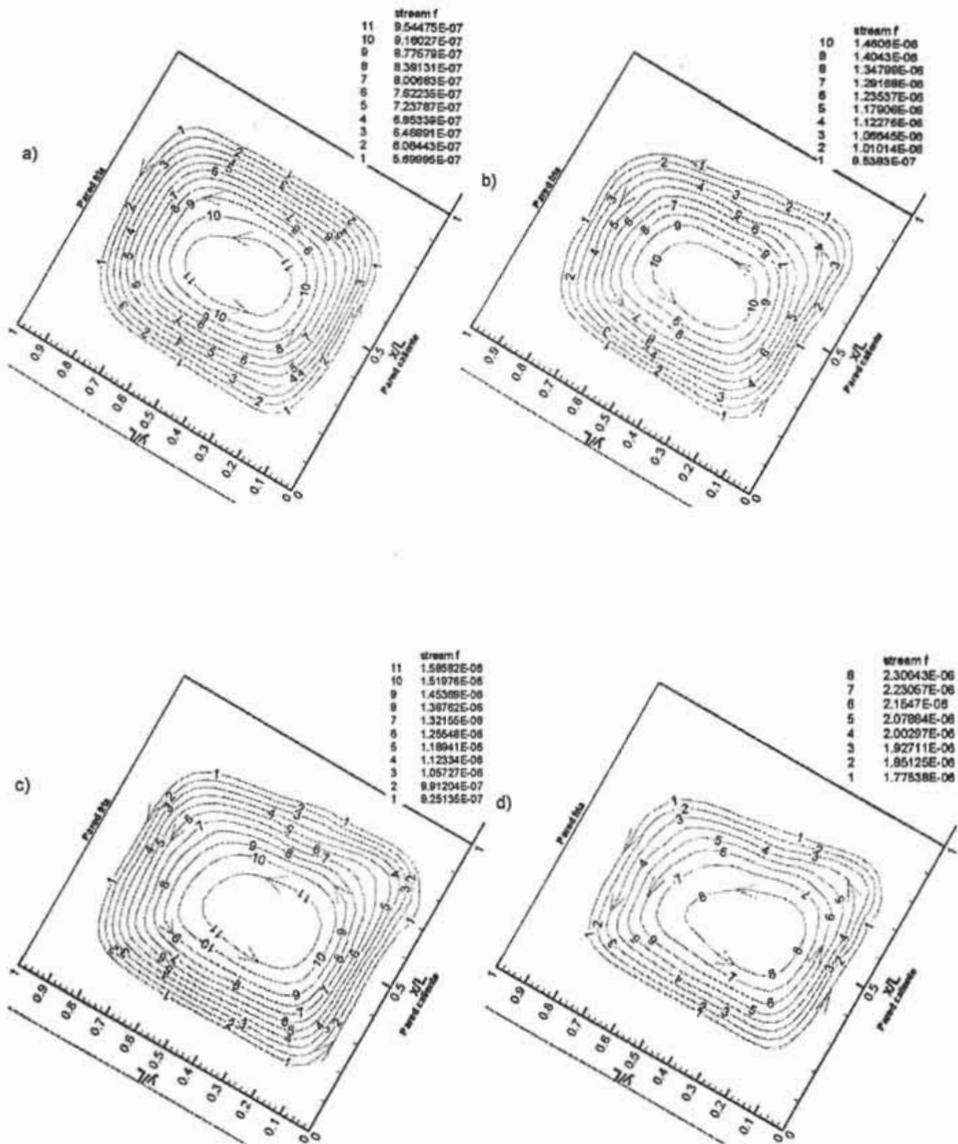


Figura 3.13. Líneas de corriente para $\theta=60^\circ$. a) $Ra = 3 \times 10^4$, b) $Ra = 6 \times 10^4$, c) $Ra = 8 \times 10^4$, d) $Ra = 1 \times 10^5$.

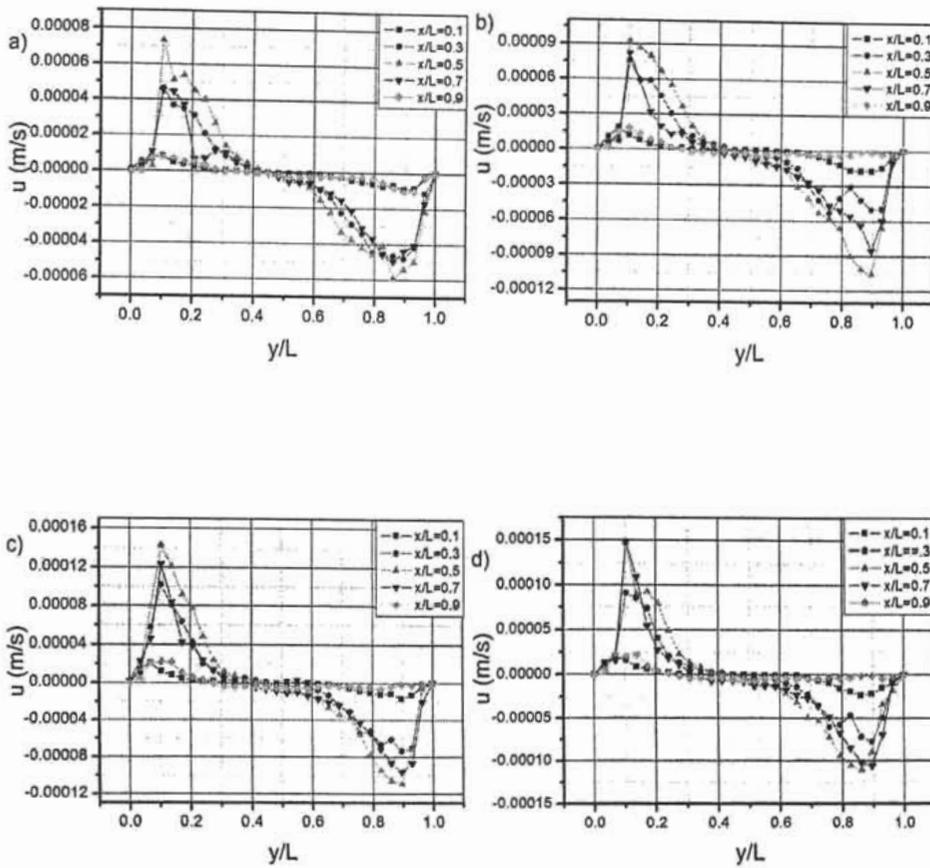


Figura 3.14. Perfiles de velocidad en la direcci3n x para $\theta=60^\circ$. a) $Ra = 3 \times 10^4$, b) $Ra = 6 \times 10^4$, c) $Ra = 8 \times 10^4$, d) $Ra = 1 \times 10^5$.

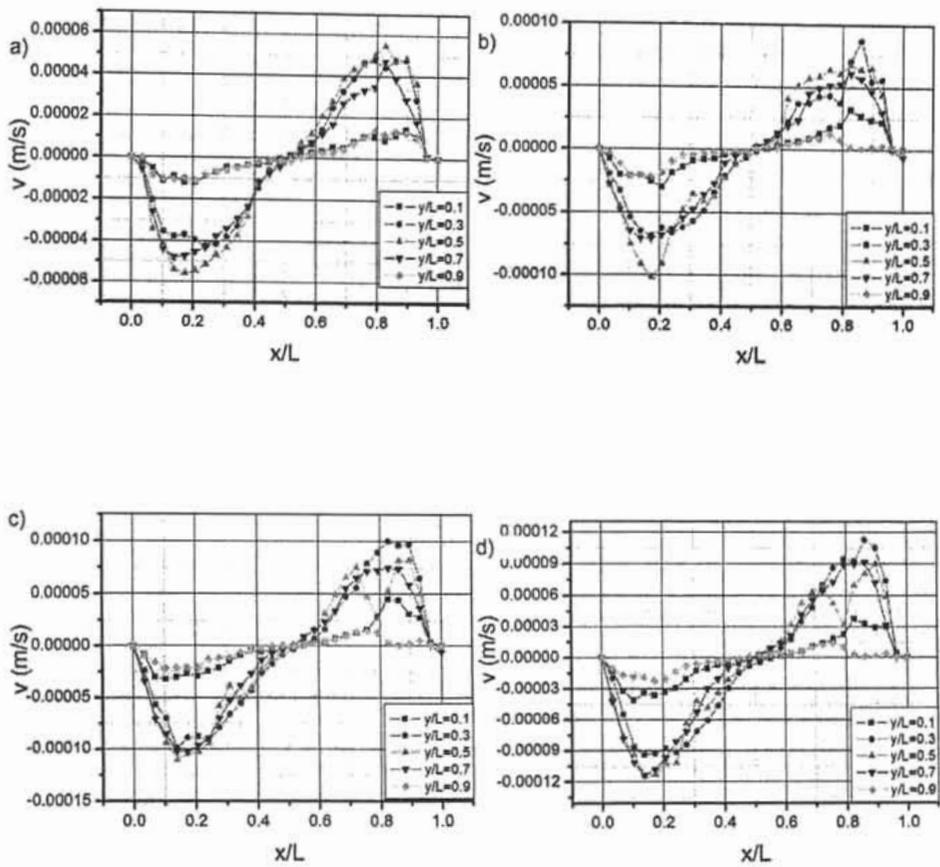


Figura 3.15. Perfiles de velocidad en la direcci3n y para $\theta=60^\circ$. a) $Ra = 3 \times 10^4$, b) $Ra = 6 \times 10^4$, c) $Ra = 8 \times 10^4$, d) $Ra = 1 \times 10^5$.

Para $\theta=60^\circ$ también se presenta una estructura de una celda convectiva orientada con una de las diagonales de la cavidad, pero en esta ocasión las celdas convectivas presentan una deformación mayor y la región central se asemeja a una elipse, Figura 3.11.a. Conforme el número de Rayleigh aumenta la deformación, que se extiende más sobre la diagonal de la cavidad.

Aunque la diferencia de velocidades es mínima comparada con $\theta=30^\circ$, para $\theta=60^\circ$ no se presentan caídas de velocidad muy significativas en las esquinas de la cavidad ya que el tamaño de estas regiones de baja velocidad es mucho menor.

Para 30° y 60° las velocidades mayores se presentan dentro de una franja cercana a las paredes laterales y a las paredes caliente y fría. Aunque para 60° el ancho de esta franja mucho menor que para 30° .

Para $\theta=90^\circ$ se presenta una estructura de una celda convectiva alargada hacia las paredes caliente y fría. Para $Ra = 3 \times 10^4$ eje de giro se encuentra en la parte central de la cavidad. Conforme se incrementa el valor del número de Rayleigh el eje de rotación se desplaza ligeramente a la pared caliente y el flujo presenta una mayor deformación. Conforme el número de Rayleigh se incrementa, Figuras 3.16 y 3.17, crece una región de baja velocidad en el interior del flujo.

Conforme aumenta el número de Rayleigh se presenta un incremento en la velocidad del flujo dentro de la cavidad, a excepción para el $Ra = 1 \times 10^5$ que presenta una ligera disminución en la velocidad, Figuras 3.19.d y 3.20.d. Por lo que la franja donde se presentan las mayores velocidades disminuye de espesor, principalmente en la zona cerca de la pared caliente. Se presentan bajas velocidades en las cuatro esquinas y en las diagonales de la cavidad, debido al cambio de dirección del flujo.

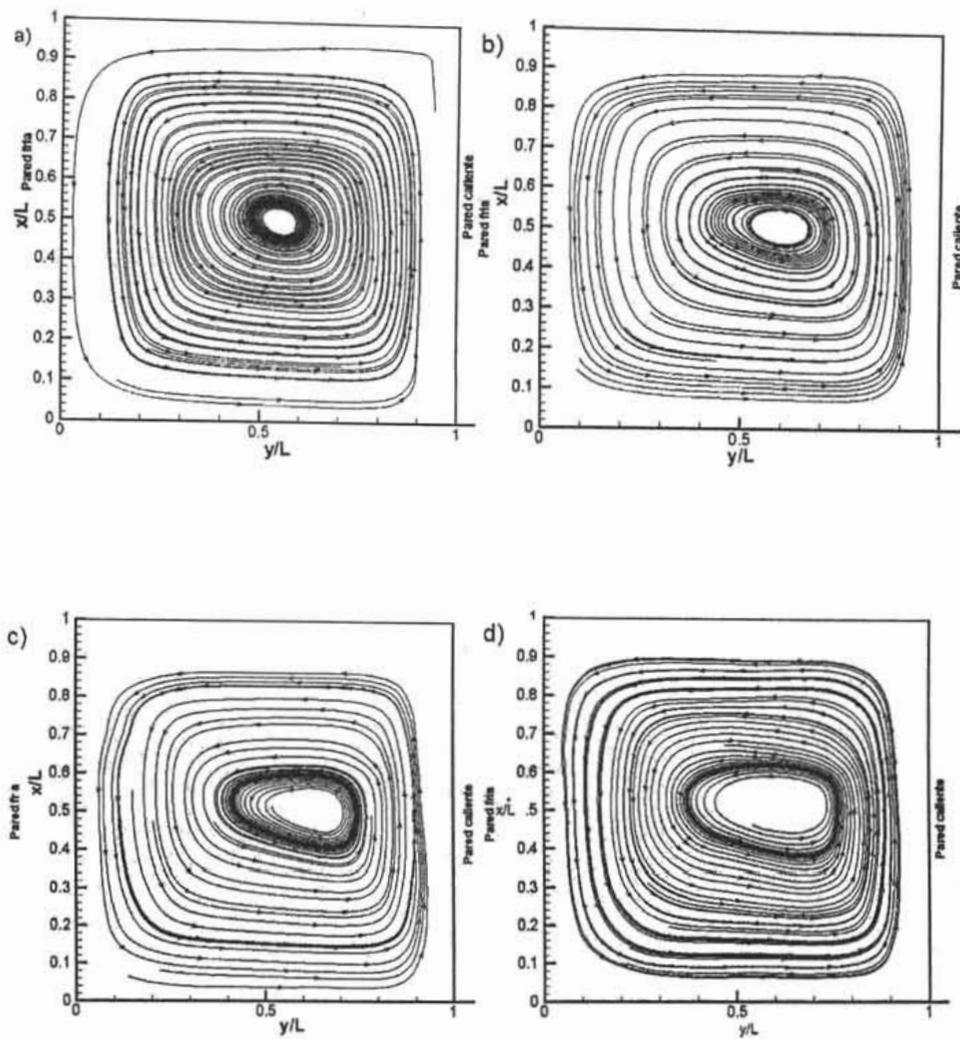


Figura 3.16. Trazas para $\theta=90^\circ$. a) $Ra = 3 \times 10^4$, b) $Ra = 6 \times 10^4$, c) $Ra = 8 \times 10^4$, d) $Ra = 1 \times 10^5$.

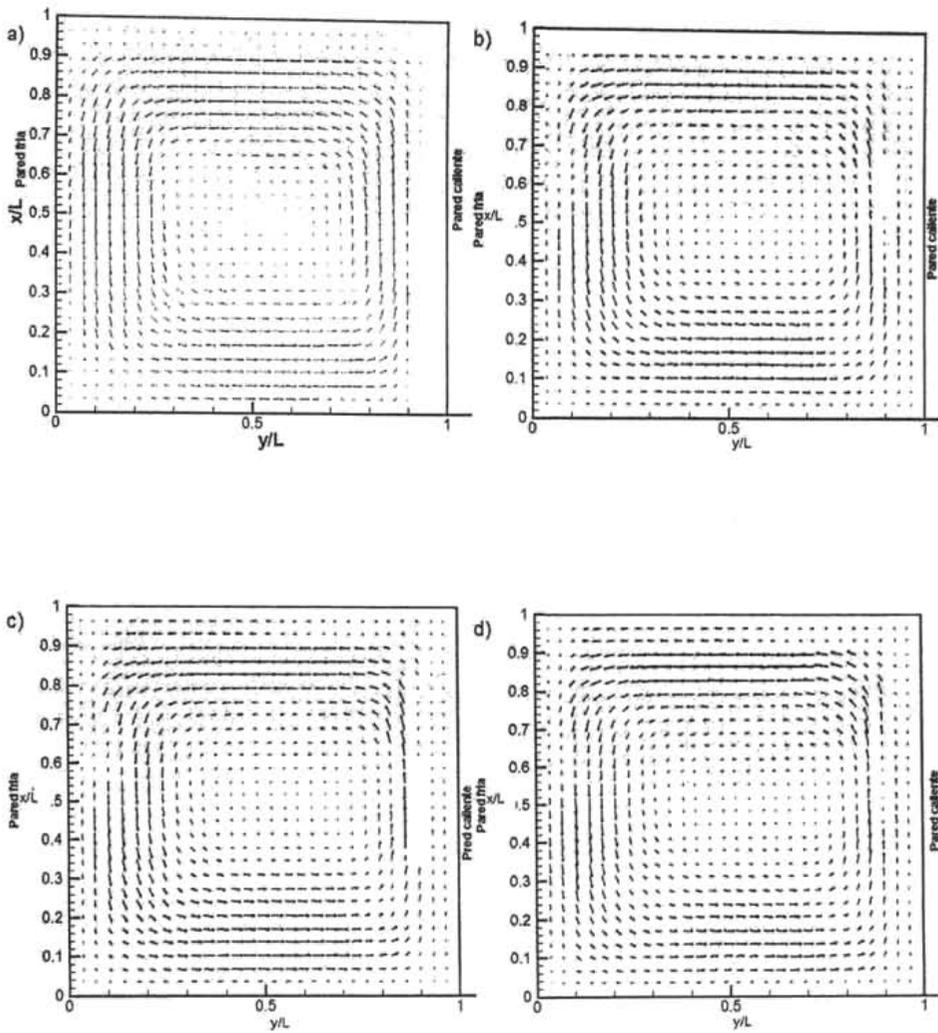


Figura 3.17. Campos de velocidad para $\theta=90^\circ$. a) $Ra = 3 \times 10^4$, b) $Ra = 6 \times 10^4$, c) $Ra = 8 \times 10^4$, d) $Ra = 1 \times 10^5$.

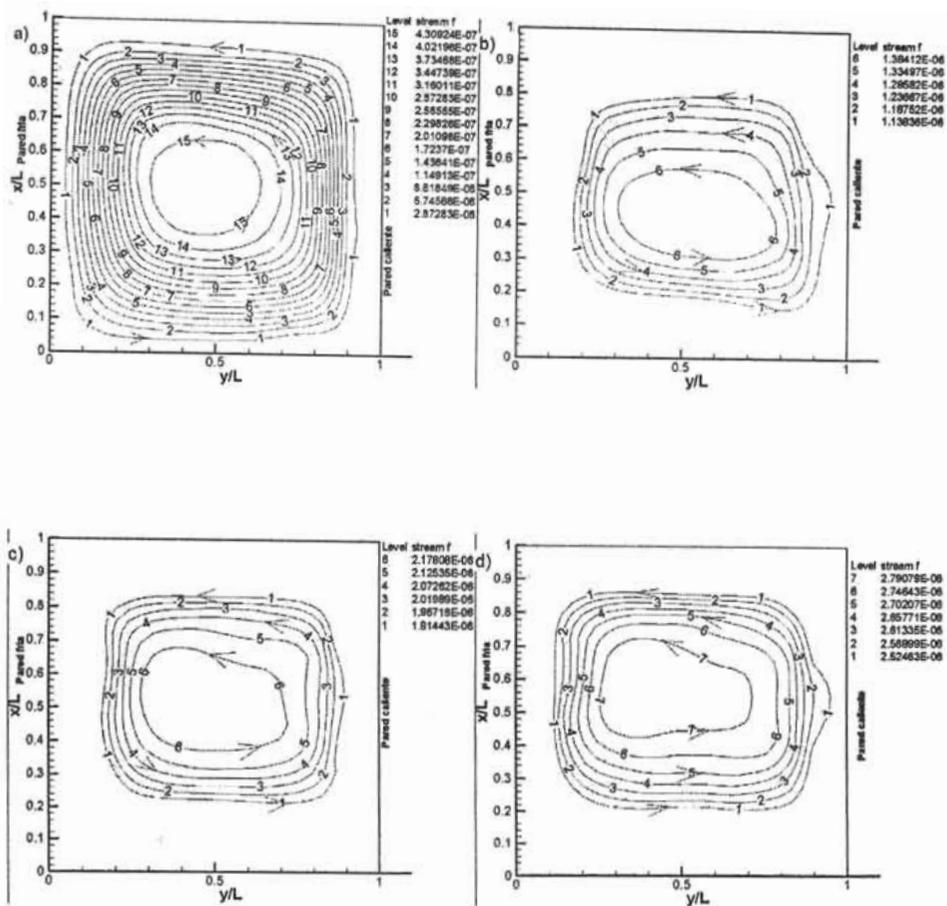


Figura 3.18. Líneas de corriente para $\theta=90^\circ$. a) $Ra = 3 \times 10^4$, b) $Ra = 6 \times 10^4$, c) $Ra = 8 \times 10^4$, d) $Ra = 1 \times 10^5$.

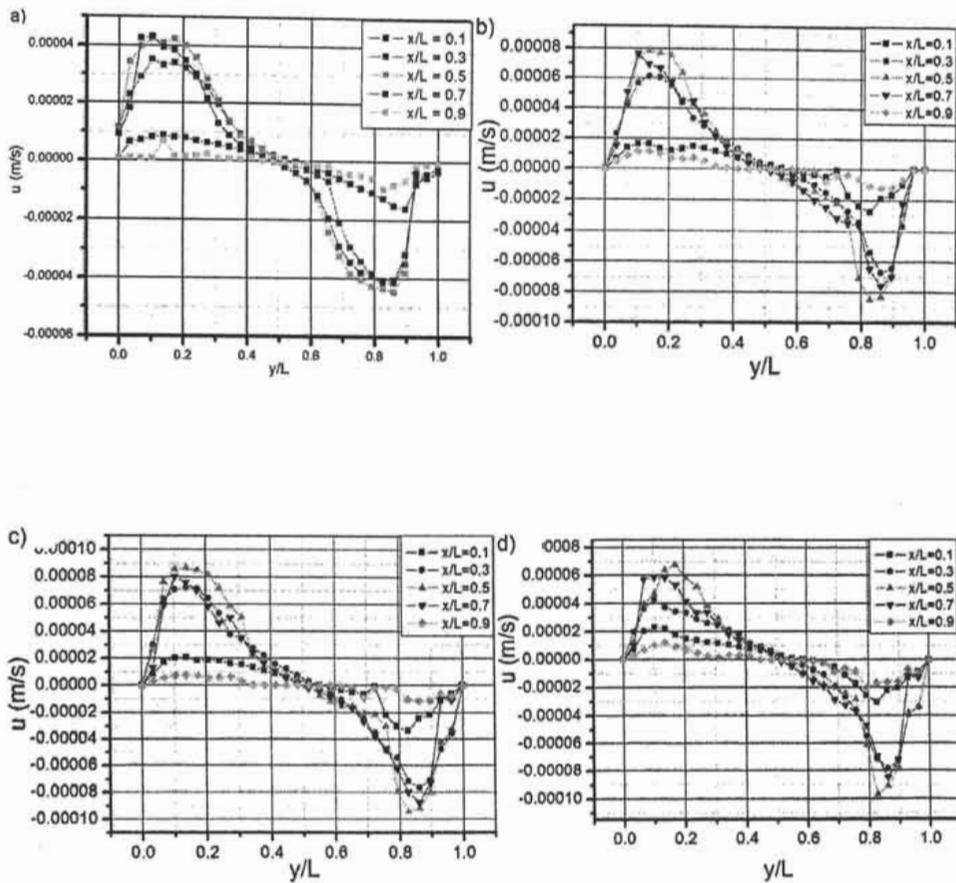


Figura 3.19. Perfiles de velocidad en la direcci3n x para $\theta=90^\circ$. a) $Ra = 3 \times 10^4$, b) $Ra = 6 \times 10^4$, c) $Ra = 8 \times 10^4$, d) $Ra = 1 \times 10^5$.

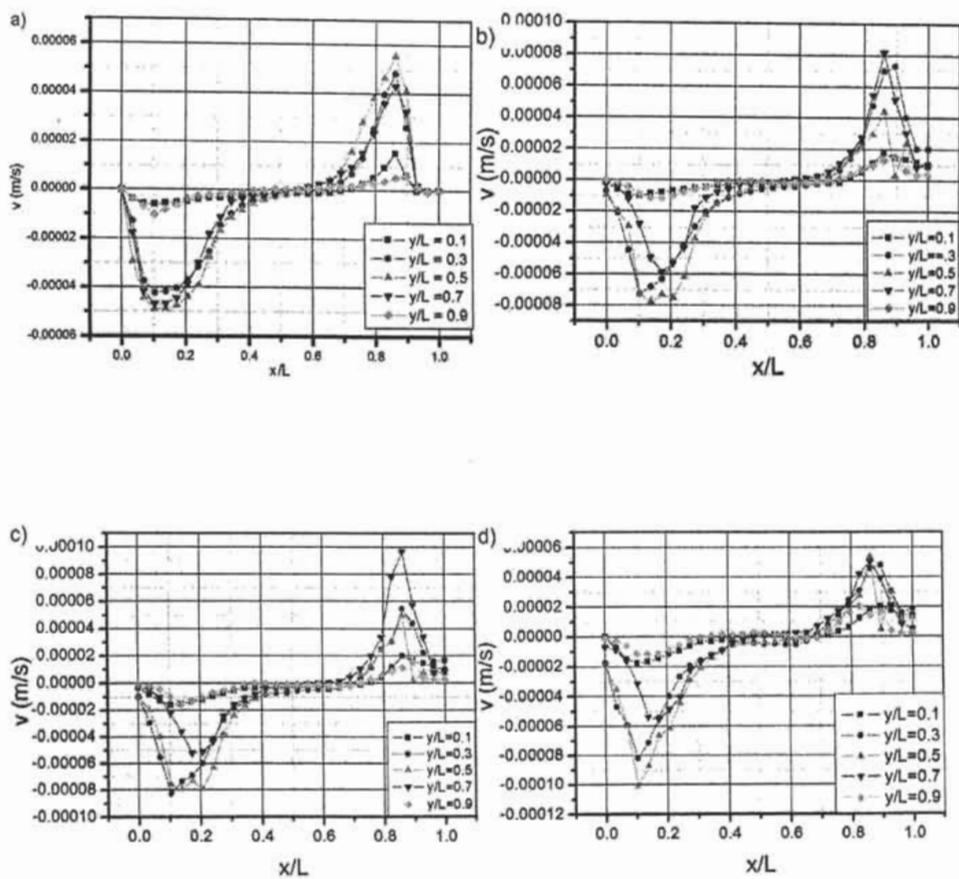


Figura 3.20. Perfiles de velocidad en la dirección y y para $\theta=90^\circ$. a) $Ra = 3 \times 10^4$, b) $Ra = 6 \times 10^4$, c) $Ra = 8 \times 10^4$, d) $Ra = 1 \times 10^5$.

3.2. Influencia del ángulo de inclinación.

En esta ocasión se considera al número de Rayleigh constante, mientras que el ángulo de inclinación varía. Para $Ra = 3 \times 10^4$ la variación del ángulo de inclinación influye de manera importante en la estructura que presenta el flujo ya que para $\theta=0^\circ$ presenta una estructura de un celda convectiva principal, Figura 3.1.a, y dos celda convectivas secundarias en las esquinas opuestas para evolucionar a una estructura de una celda convectiva alargada hacia una de las diagonales de la cavidad, Figura 3.6.a.

Con forme aumenta el ángulo de inclinación, la velocidad del flujo se incrementa hasta presentarse un máximo en $\theta=60^\circ$, mientras que en $\theta=90^\circ$ se presenta una disminución en la velocidad del flujo. Además existe de una región de baja velocidad en la parte central de la cavidad que crece de tamaño conforme aumenta el ángulo de inclinación.

Para $Ra = 6 \times 10^4$ el cambio más significativo en la velocidad del flujo se presenta de $\theta=0^\circ$ a $\theta=30^\circ$, Figuras 3.1.b y 3.6.b, ya que el flujo pasa de tener una estructura de dos celdas convectivas simétricas alargadas a una estructura con una celda convectiva, cuyo eje de rotación tiende a acercarse a la pared caliente de la cavidad con el aumento del ángulo de inclinación. De forma similar, la región de baja velocidad en la parte central de la cavidad aumenta de tamaño con θ .

De igual forma, conforme aumenta el ángulo de inclinación aumenta la velocidad del flujo, teniéndose el cambio más significativo en la velocidad de $\theta=0^\circ$ a $\theta=30^\circ$, Figuras 3.4.b, 3.5.b, 3.9.b y 3.10.a, hasta presentarse un máximo en $\theta=60^\circ$, Figuras 3.14.c y 3.15.c, y disminuyendo levemente en $\theta=90^\circ$, Figuras 3.14.d y 3.15.d.

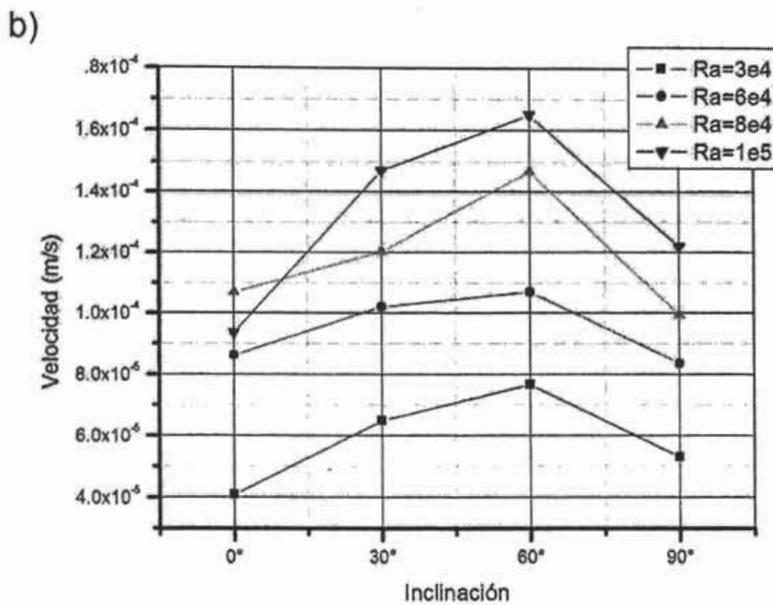
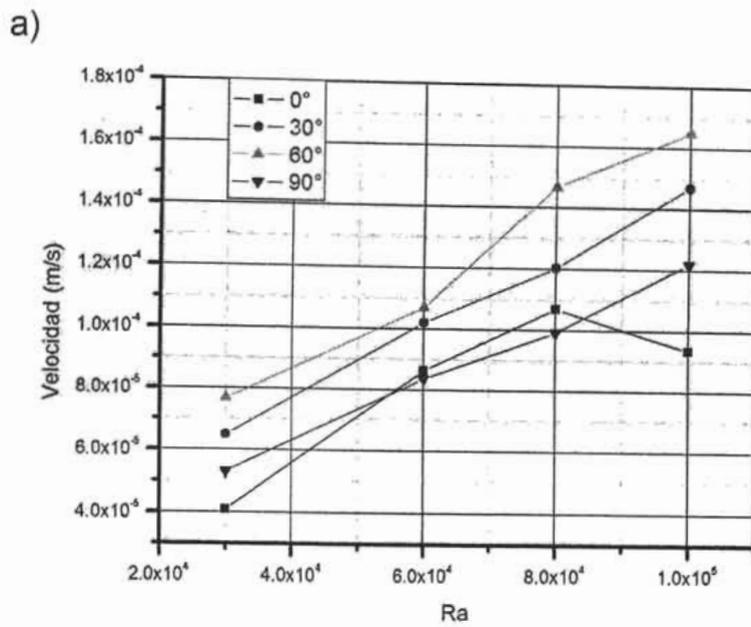


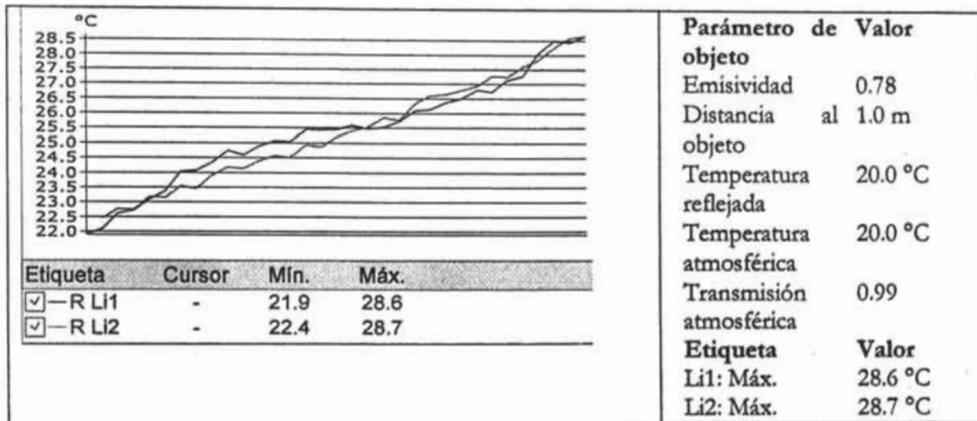
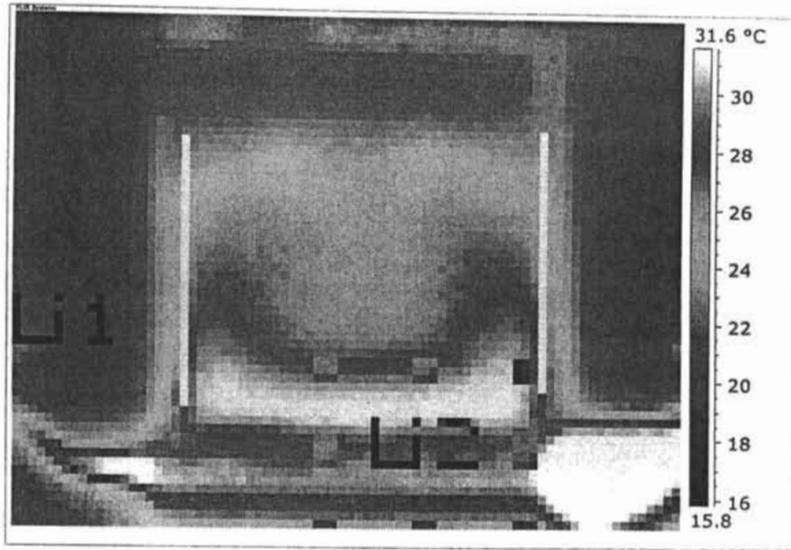
Figura 3.21. a) Ra Vs. Velocidad máxima, b) θ Vs. Velocidad máxima.

Para $Ra = 8 \times 10^4$ el flujo evoluciona desde una estructura con dos celdas convectivas a una estructura de una celda convectiva. Conforme aumenta el ángulo de inclinación aumenta de tamaño la región de baja velocidad en el flujo y ésta se acerca a la pared caliente de la cavidad. La velocidad del flujo presenta un máximo en $\theta=60^\circ$ y posteriormente disminuye en $\theta=90^\circ$.

Para $Ra = 1 \times 10^5$ se presenta una estructura con cuatro celdas convectivas, la cual evoluciona a una estructura con una celda convectiva, en la que conforme aumenta el número de Rayleigh aumenta de tamaño la región de baja velocidad en la parte central del celda convectiva. De igual forma la velocidad del flujo presenta un máximo en $\theta=60^\circ$ que disminuye en $\theta=90^\circ$.

En las Figuras 3.21.a y 3.21.b se puede observar de forma más clara el comportamiento de la velocidad dentro de la cavidad con respecto al ángulo de inclinación y al número de Rayleigh. En la Figura 3.21.a se grafica el número de Rayleigh contra la velocidad máxima del flujo, manteniendo el ángulo de inclinación constante, se puede observar que conforme aumenta el número de Rayleigh aumenta de forma gradual la velocidad máxima del flujo. En la Figura 3.21.b se grafica el ángulo de inclinación contra la velocidad máxima del flujo manteniendo al número de Rayleigh constante, se puede observar que conforme aumenta el ángulo de inclinación aumenta la velocidad máxima dentro de la cavidad hasta presentarse un máximo en $\theta=60^\circ$ que después disminuye en $\theta=90^\circ$, independientemente del número de Rayleigh manejado.

Cabe mencionar que los patrones de flujo obtenidos en el presente estudio concuerdan con los reportados por Hamady *et al.* [4] y Pallares *et al.* [5], los estudios reportados por ambos investigadores fueron hechos de forma experimental y sólo Hamady realizó una comparación con resultados numéricos.



Parámetro de objeto	Valor
Emissividad	0.78
Distancia al objeto	1.0 m
Temperatura reflejada	20.0 °C
Temperatura atmosférica	20.0 °C
Transmisión atmosférica	0.99
Etiqueta	Valor
Li1: Máx.	28.6 °C
Li2: Máx.	28.7 °C

Figura 3.22. Termografía de la cavidad para $Ra = 6 \times 10^4$ y $\theta = 0^\circ$.

Los resultados de Hamady *et al.* corresponden a una cavidad con un relación de forma de uno, calentada por arriba para 0° , para el rango del número de Rayleigh de 10^4 a 10^6 y una inclinación de 0° a 180° con incrementos de 30° , el fluido de trabajo es aire. Los resultados presentados por Pallares *et al.* son para una cavidad cúbica con paredes adiabáticas y conductoras calentada por debajo, para $Ra \leq 10^4$, se utilizó aceite silicón como fluido de trabajo ($Pr = 130$).

Comparando las Figuras 1.5.a y 1.5.b con las Figuras 3.1, 3.3, 3.6, 3.8, 3.11, 3.13, 3.16 y 3.18 se pueden observar pequeñas diferencias debido a que Hamady utiliza paredes laterales adiabáticas mientras que en este estudio se emplean paredes laterales conductoras, lo que prueba que el tipo de paredes laterales utilizadas en los experimentos afecta de manera importante la estructura que se presenta dentro de la cavidad inclinada. En tanto que Pallares presenta proyecciones de los patrones de flujo tridimensional para una cavidad calentada por debajo, a diferentes profundidades y las que mejor se asemejan a los patrones obtenidos son los correspondientes a $y=0.25$, utilizando paredes laterales conductoras.

Adicionalmente en la Figura 3.22 se muestra una termografía tomada a la cavidad para un $Ra = 6 \times 10^4$ y $\theta=0^\circ$, en la que se muestra la distribución de temperatura dentro de la cavidad, en las paredes laterales y en las paredes caliente y fría. Las paredes caliente y fría tienen una distribución uniforme de temperatura y en las paredes laterales una distribución de temperatura muy cercana a la lineal. Esta termografía fue tomada con una cámara térmica recién adquirida por el departamento de Termofluidos.

CAPÍTULO 4

Conclusiones.

Se han realizado diversos estudios sobre la convección natural en cavidades cerradas calentadas por debajo o en las paredes laterales, con diferentes razones de forma, fluidos de trabajo (glicerina, agua, aceite, silicón, aire, etc.), rangos del número de Rayleigh y condiciones de frontera. Sin embargo pocos estudios se han enfocado a la convección natural en cavidades cerradas inclinadas y solo en algunos de estos estudios se analiza el comportamiento de los campos y distribución de la velocidad que se presentan dentro de la cavidad. Por otro lado, gran parte de estos estudios se han hecho de forma numérica, en los que se toman diversas consideraciones para poder resolver las ecuaciones que gobiernan el fenómeno de la transferencia de calor como son: perfiles lineales de temperatura en las paredes laterales, flujo de calor o temperatura conocidos.

Si bien las simulaciones numéricas proporcionan características cualitativas importante del comportamiento del fenómeno, pero debido a las condiciones iniciales y de frontera a las que se encuentran impuestos dichos códigos, se tienen que realizar experimentos para validar los resultados de las simulaciones, motivo por el cual los estudios experimentales son de gran importancia ya que aportan valiosa información para tener una mejor comprensión de la convección natural en los problemas prácticos. Con el objetivo de mejorar la exactitud de los experimentos se han desarrollado una serie de técnicas e instrumentos de medición para obtener mejores resultados.

Una de las técnicas más usadas hoy en día para la medición de velocidades dentro de un fluido es la conocida como velocimetría por imágenes de partículas (PIV por sus siglas en inglés), de la cual existen muchas variantes como la DPIV (velocimetría por imágenes de partículas digital) en la que, a partir de dos imágenes, se calcula el desplazamiento de las partículas y mediante correlaciones se obtienen los campos de velocidad. Una de las grandes ventajas de este método es que el flujo no es perturbado de forma alguna ya que sólo se necesita tener iluminado el plano de interés dentro de la cavidad para realizar grabaciones del flujo y de esta forma obtener las imágenes para calcular la velocidad. En la actualidad este método ha evolucionado al grado de poder medir los campos de velocidad en tiempo real y poder medir las tres componentes de la velocidad en flujos tridimensionales, gracias a un arreglo estereoscópico de cámaras CCD.

En el presente trabajo se utilizó el método DPIV se determinaron los campos de velocidad del flujo dentro de la cavidad estudiada y se compararon los resultados obtenidos con los reportados en la literatura. Aunque se encontró una gran semejanza, no fue posible encontrar un estudio similar.

Debido a complicaciones en la realización de los experimentos, se perdió valiosa información, principalmente en las zonas cercanas a las paredes de la cavidad; además, el uso de software para el análisis de los resultados implica agregar errores de tipo numérico que afectan a los resultados finales de los experimentos, los cuales se ven reflejados principalmente en las líneas de corriente. Figura 3.3.c.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo corresponden a una cavidad con una relación de forma $H/L = 1$ y $H/W = 4$, distribución uniforme de temperatura en las paredes caliente y fría, paredes laterales conductoras, para el rango del número de Rayleigh de $3 \times 10^4 \leq Ra \leq 1 \times 10^5$, y un ángulo de inclinación de $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ con un incremento de 30° . Se utilizó glicerina de alta pureza como fluido de trabajo.

Analizando los resultados obtenidos se pueden hacer las siguientes conclusiones:

Manteniendo el ángulo de inclinación constante y se varía el número de Rayleigh. Para $\theta=0^\circ$ el número de Rayleigh es muy importante para determinar el tipo de estructura que presentará el flujo. Para bajos números de Rayleigh, 3×10^4 , el flujo se caracteriza por tener una celda convectiva principal y dos secundarias en esquinas opuestas, el eje de giro de la celda convectiva principal se encuentra cerca de la región central de la cavidad. Conforme aumenta el número de Rayleigh, $Ra = 6 \times 10^4$, la estructura se vuelve más compleja y evoluciona a una estructura con dos celdas convectivas simétricas alargadas en dirección vertical. Para número de Rayleigh mayores, $Ra = 8 \times 10^4$, se sigue presentando la estructura con dos celdas convectivas alargadas pero el eje de rotación de las celdas convectivas se encuentra ligeramente desplazados hacia la pared caliente. Para $Ra = 1 \times 10^5$ el flujo evoluciona a una estructura con cuatro celdas convectivas, siendo las superiores las de mayor tamaño.

Con $\theta=30^\circ$ y 60° el número de Rayleigh tiene poca influencia en los patrones de flujo que se presentan dentro de la cavidad. Para todo el rango del número de Rayleigh manejado en este estudio se presenta una estructura con una celda convectiva alargada en dirección de una de las diagonales de la cavidad, esta deformación aumenta conforme el número de Rayleigh incrementa su valor. Además, es claro que la velocidad del flujo también aumenta cuando el número de Rayleigh incrementa su valor.

Para $\theta=90^\circ$ y números de Rayleigh bajos, 3×10^4 , se presenta una celda convectiva de forma elipsoidal alargada hacia las paredes laterales y cuyo eje de rotación se encuentra en la región central de la cavidad. Con un $Ra = 6 \times 10^4$ se sigue presentando la misma estructura elipsoidal, pero esta vez se encuentra a

largado hacia las paredes caliente y fría, y el eje de rotación se encuentra ligeramente desplazado hacia la pared caliente. Para $Ra = 8 \times 10^4$ se presenta una estructura de una celda convectiva alargada en la dirección horizontal, cuyo eje de rotación se encuentra desplazado hacia la pared caliente. La estructura para $Ra = 1 \times 10^5$ es de una celda convectiva alargada en dirección horizontal, el eje de rotación de la celda convectiva se encuentra cerca da la pared caliente y conforme aumenta el número de Rayleigh aumenta la velocidad del flujo.

Por otro lado, si mantenemos constante el número de Rayleigh y se varía el ángulo de inclinación desde 0° hasta 90° se observa que para todos los número de Rayleigh manejados se presenta un aumento en la velocidad hasta tenerse un máximo en $\theta=60^\circ$ y posteriormente disminuye levemente en $\theta=90^\circ$. Esto se debe a que para $\theta=60^\circ$ el efecto convectivo es máximo, para todo el rango del número de Rayleigh manejado, debido a que el efecto de la flotación aumenta con el incremento del ángulo de inclinación. La disminución de la velocidad en $\theta=90^\circ$ se debe a que la conducción comienza a jugar un papel importante en la transferencia de calor dentro de la cavidad y el efecto convectivo tiene menor importancia con forme aumenta más el ángulo de inclinación; además, para $\theta=90^\circ$ la flotación solo actúa en las paredes verticales (caliente y fría) mientras que en las paredes horizontales (paredes laterales) existe movimiento por continuidad. Se puede observar un comportamiento similar para el número Nusselt promedio de los resultados reportados por Hamady et al. [4] (Figura 1.3).

Finalmente, cabe mencionar que la convección natural es extremadamente sensible a cambios en la geometría de la cavidad y en las condiciones de frontera por lo que no es conveniente utilizar los resultados de problemas similares.¹

¹ Extraído de Ostrach [19] "natural convection is extremely sensitive to changes in the container configuration and the imposed boundary conditions so that the use of the results from similar problems is dangerous".

Apéndice A

Tabla A.1. Diferencia de temperaturas para diferentes números de Rayleigh y ángulos de inclinación.

Rayleigh	Ángulo de Inclinación			
	0°	30°	60°	90°
3×10^4	$\Delta T = 6.7^\circ \text{ C}$			
	5.908 W	3.344 W	3.216 – 3.57 W	3.349 – 3.971 W
6×10^4	$\Delta T = 13.1^\circ \text{ C}$	$\Delta T = 10.8^\circ \text{ C}$	$\Delta T = 10.9^\circ \text{ C}$	$\Delta T = 10.8^\circ \text{ C}$
	6.417 W	5.628 W	5.439 – 6.028 W	5.397 – 2.984 W
8×10^4	$\Delta T = 13.1^\circ \text{ C}$	$\Delta T = 13.1^\circ \text{ C}$	$\Delta T = 13.1^\circ \text{ C}$	$\Delta T = 13.2^\circ \text{ C}$
	7.825 W	7.176 – 7.2 W	6.864 – 7.248 W	6.532 – 7.625 W
1×10^5	$\Delta T = 15.1^\circ \text{ C}$	$\Delta T = 15^\circ \text{ C}$	$\Delta T = 15^\circ \text{ C}$	$\Delta T = 15.1^\circ \text{ C}$
	9.234 W	8.275 – 8.476 W	7.725 – 8.175 W	7.675 – 8.58 W

Nota: Esta tabla es sólo una guía para obtener el número de Rayleigh en la cavidad utilizada en los experimentos. La potencia aplicada a la resistencia por la fuente de alimentación puede variar, dependiendo de la temperatura ambiente (T_a). $T_f = 20^\circ \text{ C}$.

Apéndice B

Programa para el cálculo del número de Rayleigh.

```
#include<stdio.h>
#include<stdlib.h>
#include<math.h>
#include<conio.h>
#include<ctype.h>
#include<string.h>
#include<io.h>
float l,Tmin,Tmax,Tm,nu,alfa,Ra,L,dt,alfas;
main(void)
{

clrscr();

printf("Calculo número de Raleigh para glicerina \t\n");
printf("Longitud de la cavidad(cm): \t\n");
scanf("%f",&l);
printf("Temperatura minima (°C):\t\n ");
scanf("%f",&Tmin);
printf("Temperatura maxima (°C):\t\n ");
scanf("%f",&Tmax);
Tm =((Tmin+Tmax)/2)+273.15;
dt=Tmax-Tmin;
L=l/100;
nu = 0.000078+4461273765.76133*exp(-Tm/9.85208)+4461273753.48201*
    exp(-Tm/9.85208);
alfa=-1.8824*pow10(-5)+2.51005*pow10(-7)*Tm-1.24612*pow10(-9)*Tm*
Tm+2.74543*pow10(-12)*Tm*Tm*Tm-2.26662*pow10(-15)*Tm*Tm*Tm*Tm;
alfas=alfa*10000000;
Ra=(9.78*0.00047*dt*L*L*L)/(nu*alfa);

printf("el Ra es %f\t\n",Ra);

getche();
return(0);
}
```

Bibliografia.

- [1] T. E. Unny, *Thermal instability in differentially heated inclined fluids layers*, J. Appl. Mech., 39, 41 – 46 (1972).
- [2] S. H. Davis, *Convection in a box: linear theory*, J. Fluid Mech., 30, 464 – 478 (1967).
- [3] K. Stork y U. Müller, *Convection in boxes: experiments*, J. Fluid Mech., 54, 599 – 611 (1972).
- [4] F. J. Hamady, J. R. Lloyd and H. Q. Yang, K. T. Yang, *Study of local natural convection heat transfer in an inclined enclosure*, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 32, No. 9, pp 1697 – 1708, 1989.
- [5] J. Pallares, M. P. Arroyo, F. X. Grau, F. Giralt, *Experimental laminar Rayleigh-Bernard convection in a cubical cavity at moderate Rayleigh and Prandtl numbers*, Experiments in fluids, pp 208 – 218, 2001.
- [6] J. Pallares, M. P. Arroyo, F. X. Grau, F. Giralt, *Flow transitions in laminar Rayleigh-Bénard convection in a cubical cavity at moderate Rayleigh numbers*, Int. J. Heat Mass Trans 42 (1999) 753 – 769.
- [7] W. H. Leong, K. G. T. Hollands, A. P. Brunger, *On a physically-realizable benchmark problem natural convection*, Int. J. Heat Mass Transfer 41, pp 3817 – 3828, 1998.
- [8] W. H. Leong, K. G. T. Hollands, A. P. Brunger, *Experimental Nusselt numbers for a cubical-cavity benchmark problem in natural convection*, Int. J. Heat Mass Transfer 42, pp 1979 – 1989, 1999.
- [9] Le Quere, P., *Accurate solutions to the square thermally driven cavity at high Rayleigh number*, Computers in fluids, Vol. 20, No. 1, pp. 29-41, 1991.
- [10] Fusegui, T., Hyun, J. M., Kuwahaaras, K., Farouk, B. A., *A numerical study of three-dimensional natural convection in a differentially heated cubical enclosure*, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 34, No. 6, pp 1543 – 1557, 1991.
- [11] G. D. Raithby, H.H. Wong, *Heat transfer by natural convection across vertical air layers*, Num. Heat Transfer 4, pp 447 – 457, 1981.
- [12] M.A.H. Manum, W.H. Leong, K.G.T Hollands, D. A.. Johnson, *Cubical-cavity natural-convection benchmark experiments: an extension*, Int. J. Heat Mass Transfer 46, pp 3655 – 3660, 2003.
- [13] N. Ramesh, S.P. Venteshan, *Experimental study of natural convection in a square enclosure using differential interferometer*, Int. J. Heat Mass transfer., Vol. 44, pp 1107 – 1117, 2001.

- [14] Shinichiro Wakashima, Takeo S. Saitoh, *Benchmark solutions for natural convection in a cubic cavity using the high-order time-space method*, Int. J. Heat Mass transfer, Vol. 47, pp 853 – 864, 2004.
- [15] T. Fusegi, J. M. Hyun, K. Kawamura, B. Farouk, *A numerical study of three-dimensional natural convection in a differentially heated cubical enclosure*, Int. J. Heat Mass transfer, Vol. 34, pp 1543 – 1557, 1991.
- [16] J. Pallares, I. Cuesta, F. X. Grau y Francesc Giralt, *Natural convection in a cubical cavity heated from below at low Rayleigh numbers*, Int. J. Heat Mass transfer, Vol. 39, No. 15, pp 3233 – 3247, 1996.
- [17] <http://www.dantec.com>.
- [18] Dantec Information. Measurement Technology, No. 14. January 1995.
- [19] S. Ostrach, *Natural convection in enclosures*. ASME, J. Heat Transfer 110 (1998), 1175 - 1190.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA