



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

Programa de Posgrado en Ingeniería

Visualización de rollos convectivos en la convección  
natural en una cavidad inclinada

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA

(TERMOFLUIDOS)

PRESENTA:

*Edgar Mauricio Gutiérrez Vázquez*



DIRECTOR: DR. FRANCISCO JAVIER SOLORIO ORDAZ

MÉXICO, DF.;

JUNIO DE 2007

## Agradecimientos

*Quiero empezar mencionando a las personas que gracias a su apoyo y amistad desinteresada hicieron posible que realizara mis estudios de Maestría en Ingeniería Mecánica. A mis profesores: Jaime Cervantes, Federico Méndez, Cesar Treviño, Rubén Ávila, Jorge Naude, Vicente López, Rina Aguirre y a Francisco Solorio, por todo el apoyo y confianza que me han brindado.*

*De igual manera para mis compañeros y amigos de la Maestría: Abraham, Cristóbal, Israel, Enrique, Eduardo, Federico, Juan Ángel, Luís, Iván, Mario, Rafael C. y Roberto. De Licenciatura a Abel, José Luís, Iveth, Ignacio, Jazmín, Alfonso, Héctor y Rafael. A mis amigos de Preparatoria: Adriana, Itziart, Marisela, Socorro, Javier, Eliasib, Gilberto y Eduardo. Al maestro Fernando Galán, Daniel Ramírez y Concepción Cortés. Gracias a todos por su amistad sincera. A Carlos Palacios por su gran ayuda en **PIV**.*

*Así mismo agradezco a mi madre y mis hermanos todo el apoyo y el cariño que me han brindado.*

# Índice

Agradecimientos	
Resumen	
Introducción.....	1
<b><i>Capítulo 1</i></b>	
Antecedentes y objetivo.....	2
<b><i>Capítulo 2</i></b>	
Diseño y construcción del dispositivo experimental	
2.1 Descripción del problema.....	4
2.2 Descripción del diseño.....	8
2.3 Pruebas.....	12
<b><i>Capítulo 3</i></b>	
Resultados y discusión	
Visualización para el estado transitorio.....	14
Resultados para el estado permanente.....	17
<b><i>Capítulo 4</i></b>	
Conclusiones.....	28
Referencias.....	29
Apéndices.....	30

## Introducción

El problema de la convección natural en cavidades calentadas por debajo y enfriadas por arriba ha sido motivo de estudios analíticos, numéricos y experimentales, en los que se han variado razón de aspecto, fluido utilizado, condiciones fronteras, etc. Los flujos en cavidades se encuentran en procesos de fundición en donde la formación de cristales durante la solidificación el movimiento del fluido afecta el crecimiento del cristal [1]; además son importantes en problemas de aire acondicionado, ventilación de espacios, colectores solares, etc. Aun cuando existen numerosos estudios analíticos y numéricos sobre el tema, la parte experimental sigue siendo importante para validar los modelos y para estudiar aspectos nuevos.

En esta tesis se estudia una cavidad calentada por abajo a una temperatura constante  $T_h$  y enfriada por arriba a una temperatura constante  $T_c$ , el resto de las paredes están a temperatura ambiente y tienen una conductividad finita. La razón de aspecto de la cavidad  $A_x$ , definida como la razón entre la longitud  $L$  con la altura  $H$ , y la razón de aspecto  $A_z$  definida como la razón de la profundidad  $W$  con la altura  $H$ , es de 1:4:8 respectivamente. Se tienen como objetivos diseñar y construir un dispositivo que permita la visualización de la convección natural en cavidades inclinadas, en las que se formen rollos convectivos, de manera particular los que presenten una estructura ordenada. Se reportan el número de rollos en función del número de Rayleigh y el ángulo de inclinación.

La tesis se organiza de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se presentan los antecedentes sobre convección natural en cavidades inclinadas. En el capítulo 2 se presenta el diseño del dispositivo experimental y las consideraciones hechas para definir el tamaño de la cavidad. En el capítulo 3 se reportan las pruebas realizadas al dispositivo y la visualización del patrón del flujo dentro de la cavidad. Finalmente en el capítulo 4 se dan las conclusiones sobre el trabajo de tesis.

## Resumen

En esta tesis se presenta la visualización de los rollos convectivos longitudinales en una cavidad rectangular de dimensiones 25x100x200mm, calentada por abajo y enfriada por arriba a temperatura constante, para 0, 5, 10, 15 y 20 grados de inclinación, y números de Rayleigh de 10000, 16000, 30000 y 51000. Como fluido de prueba se empleó glicerina con un sembrado de partículas de poliamida. La visualización realizada durante las pruebas permite observar la formación y evolución de los rollos convectivos en estado transitorio y en estado permanente. Además se presentan los campos de velocidad y líneas de corrientes obtenidos mediante PIV.

Se hace una descripción del diseño y construcción del dispositivo experimental así como de las características de los equipos utilizados para la visualización. Los resultados en estado permanente muestran como el número de rollos está en función tanto del número de Rayleigh como del ángulo de inclinación; el número de rollos siempre es par para esta razón de aspecto.

# Capítulo 1

## Antecedentes

La convección natural tiene su importancia debido a que es un fenómeno que se presenta de manera frecuente en la naturaleza y en procesos en la industria, pues solo basta contar con un gradiente de temperatura entre dos frentes conteniendo un fluido para que se manifieste.

Se pueden encontrar un sin número de soluciones analíticas y numéricas para la convección natural en cavidades inclinadas, que se aplican a ciertas razones de aspecto, ángulos de inclinación, condiciones de frontera, formas de calentamiento, generación de calor interna, etc. No obstante, la parte experimental no pierde importancia debido a que permite estudiar aspectos nuevos y validar los modelos teóricos.

Corcione [2] estudia de manera numérica los efectos de las condiciones de frontera en cavidades calentadas por abajo y enfriadas por arriba en 2 dimensiones. Presenta 6 combinaciones en las condiciones de frontera de las paredes laterales que son: adiabática-adiabática, adiabática-caliente, adiabática-fría, caliente-caliente, caliente-fría, fría-fría.

Wang y Hamed [3] estudian de manera numérica la influencia del gradiente térmico generado por las paredes laterales (conductoras y adiabáticas), en una cavidad con una razón de aspecto  $Ax = 4$ . Los resultados que reportan son para números de Rayleigh entre 1000-10000 y ángulos de inclinación entre 0 y 90, considerando el estado estacionario.

Delgado [4] estudia de manera numérica una cavidad inclinada en 2-D y 3-D para bajos números de Prandtl y  $10^\circ$  de inclinación. Muestran la formación de 3 celdas convectivas para un Rayleigh de 100. En el caso 2-D, la razón de aspecto es  $Ax = 1/4$  y para el caso 3-D es de  $Ax = 1/4$  y  $Az = 1/6$ .

En un estudio experimental realizado por Arnold [5] en una cavidad inclinada calentada por arriba y enfriada por abajo, con razones de aspecto  $Ax = 1, 3, 6$  y  $12$ , se presenta resultados para variaciones angulares entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$ . Obtiene la siguiente correlación para números de Rayleigh entre 1000 y 100000 y ángulos de inclinación entre  $90^\circ$  y  $180^\circ$ .

$$Nu(\phi) = 1 + [Nu(\phi = 90) - 1] \cdot \sin \phi.$$

Ozoe [6] reporta resultados experimentales para una cavidad inclinada entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , calentada por abajo y enfriada por arriba y paredes laterales adiabáticas, obteniendo un número de Nusselt promedio máximo para un ángulo de  $50^\circ$ . El rango del número de Rayleigh es de 2000 a 8000.

Lir [7] para una cavidad llena con aire y humo con una razón de aspecto de  $A_x = 16$  y  $A_z = 20$ , muestra rollos convectivos para un Rayleigh ligeramente menor al crítico y ligeramente mayor al crítico, en donde para el primer caso se forman los rollos sólo en el centro de la cavidad y con una forma de serpentín mientras que en el segundo caso se tienen rollos rectos transversales en toda la cavidad.

Upton [8] realiza un estudio experimental para una cavidad inclinada con una razón de aspecto de 1. Obtiene los campos de temperatura y velocidad para los ángulos de  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $135^\circ$ . La técnica que utiliza para el campo de temperaturas es interferometría y para el campo de velocidad es mediante PIV. Considera el estado transitorio y el permanente para un número de Prandtl de 6.38 y un Rayleigh de 15000.

Ozoe [9], en un estudio experimental para una cavidad de  $20 \times 40 \times 240 \text{ mm}$  con glicerina como fluido de trabajo, muestra la formación de rollos transversales para un Rayleigh de 12000. Para inclinaciones entre  $0^\circ$  y  $5^\circ$  los rollos presentan una pequeña inclinación y un incremento en el número de Nusselt mientras que para inclinaciones entre  $5^\circ$  y  $6^\circ$  el patrón de circulación cambia a rollos oblicuos con lo que el número de Nusselt baja. Finalmente, para inclinaciones mayores a  $7^\circ$ , los rollos presentan una forma casi bidimensional.

El objetivo de ésta tesis es diseñar y construir un sistema experimental que permita hacer la visualización y el análisis de los rollos convectivos en cavidades inclinadas en la que se pueda variar con relativa facilidad la razón de forma, el ángulo de inclinación, el fluido de trabajo y el número de Rayleigh.

## Capítulo 2

### Diseño y construcción del dispositivo experimental

#### 2.1 Descripción del problema

El objetivo de este capítulo es indicar los pasos y consideraciones tomadas para el diseño de la cavidad y demás elementos del dispositivo del dispositivo experimental.

La descripción del problema y la definición del sistema de coordenadas se muestran en la Figura 2.1.1. Dos paredes de la cavidad permanecen a temperatura constante, la pared fría está a  $T_c$  y la pared caliente está a  $T_h$ , el resto de las paredes se encuentran a una temperatura cercana a la del ambiente y tienen una conductividad térmica finita. El ángulo de inclinación  $\theta$  se mide desde la horizontal hasta una superficie paralela a la pared caliente. El plano de luz láser se ubica en el centro de la cavidad y es perpendicular a las paredes caliente y fría.

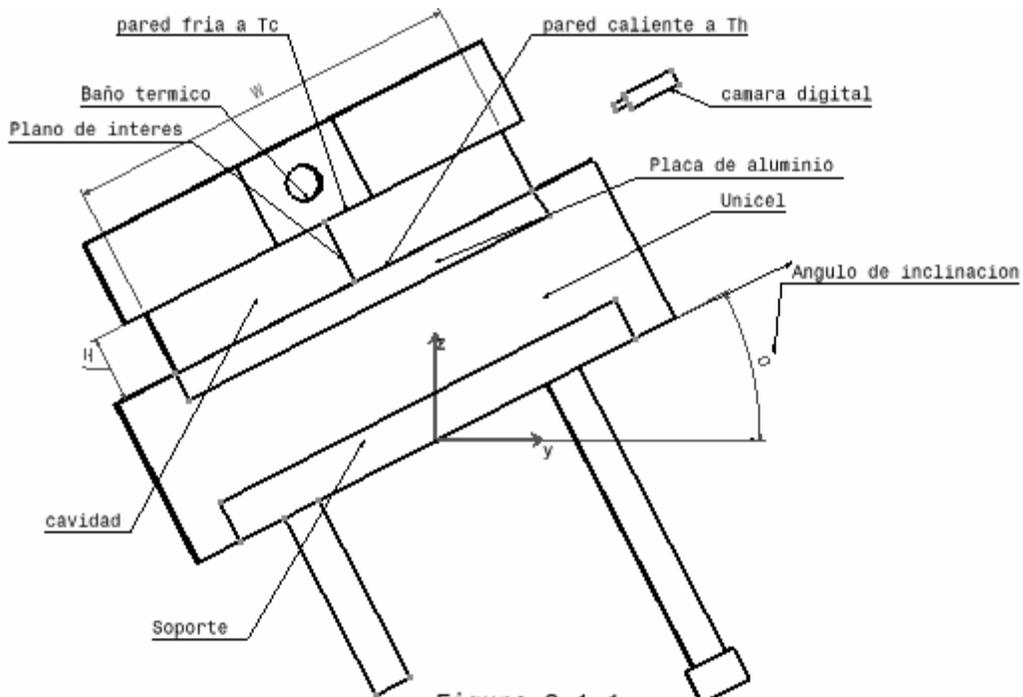


Figura 2.1.1

Como ya se menciona, la razón de aspecto  $A_x$  está definida como la razón entre la longitud de la cavidad  $L$  y la altura  $H$ , es decir,  $A_x = L/H$ ,  $A_z$  es la razón de la profundidad  $W$  con la altura  $H$ , es decir  $A_z = W/L$ . La pared fría a temperatura  $T_c$  se obtiene mediante el uso de un baño térmico, y la pared caliente a temperatura  $T_h$  se obtiene mediante el suministro de una potencia eléctrica DC. a una resistencia colocada dentro de una placa de aluminio; con éstas condiciones se establece un gradiente de temperatura constante y uniforme.

La placa de aluminio se encuentra aislada térmicamente con unicel para evitar gradientes de temperatura internos que puedan influir en una distribución de temperatura no uniforme y para disminuir las pérdidas de calor al ambiente. El plano de luz se genera con un rayo láser que cruza una varilla de vidrio colocada cerca de la pared lateral de la cavidad ( $W \times H$ ) (Figura 2.1.2). La cámara digital se coloca a 15cm de una de las caras de la cavidad ( $W \times L$ ) para enfocar el plano de luz (Figura 2.1.1).

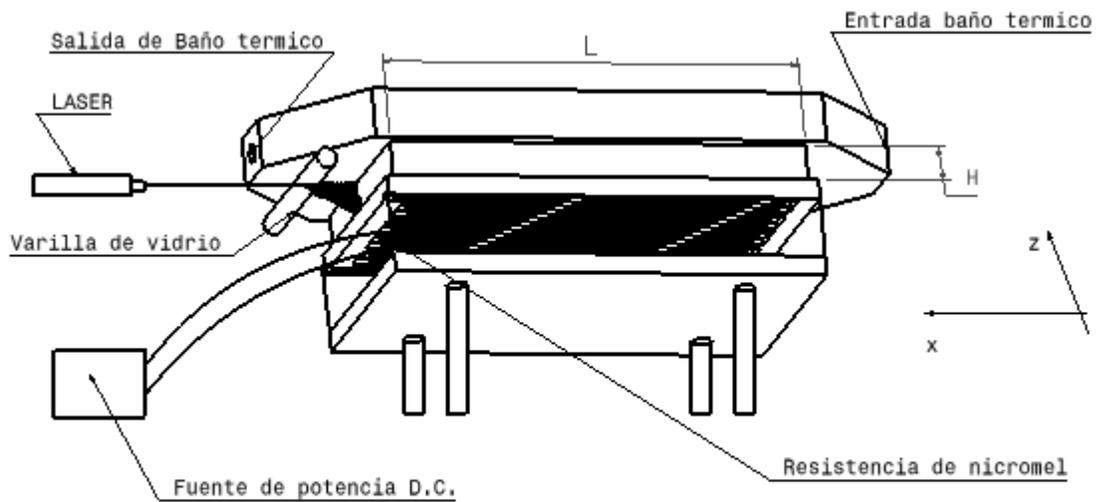


Figura 2.1.2

Finalmente, el ángulo de inclinación se obtiene mediante un soporte con tornillos con los cuales se varía la altura de estos para dar un ángulo en particular. Las fotografías tomadas durante las pruebas son procesadas con un software para anemometría por imágenes de partículas (PIV) por sus siglas en ingles.

En éste trabajo de tesis se estudia una cavidad rectangular inclinada cuyas dimensiones son: 25mm de altura **H**, 100mm de profundidad **W** y 200mm de longitud **L**, con lo que se tiene una razón de aspecto  $A_x = 100/25=4$ , y  $A_z = 200/25=8$  como se muestra en la Figura 2.1.3

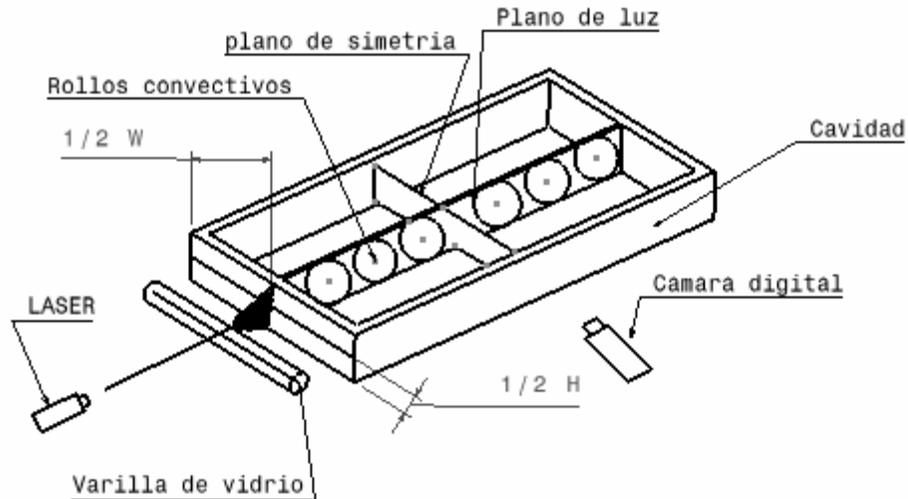


Figura 2.1.3

La cavidad contiene como fluido de prueba glicerina y para la visualización, cuenta con un sembrado de partículas de poliamida de 20 micrómetros. El plano de luz se genera con un láser tipo Helio-Neón de 35mW, la varilla generadora del plano de luz debe colocarse de tal manera que su eje coincida en la mitad de la altura **H** para que el plano sea uniforme y se tenga una buena iluminación.

Para la pared fría se usó un baño térmico con una precisión de  $\pm 0.1$  grado Celsius y una capacidad de 4ltrs. de agua destilada. La pared caliente se mantuvo en 22 grados Celsius para todos los casos de estudio que se presentan, con el fin de minimizar pérdidas con el ambiente.

La fuente de potencia eléctrica DC suministra la corriente eléctrica a una resistencia de nicromel de 6.7 omh, la cual se encuentra dentro de la placa de aluminio como ya se mencionó anteriormente y mediante la variación de la potencia eléctrica se regula  $T_h$ , y por lo tanto el número de Rayleigh, ya que las propiedades del fluido se consideran constantes

y las dimensiones de la cavidad son fijas. La temperatura de la pared caliente  $T_h$  que se maneja para las pruebas realizadas varía en un rango de 30 a 45 grados Celsius.

El número de Rayleigh está definido como  $Ra_H = g\beta H^3(T_h - T_c)/\nu\alpha$ , donde  $g$  es la gravedad,  $\beta$  el coeficiente de expansión térmica,  $H$  es la altura de la cavidad,  $\nu$  es la viscosidad cinemática y  $\alpha$  es la difusividad térmica.

El soporte permite variar el ángulo de 0 a 30 grados de inclinación aunque en este trabajo solo se realizaron pruebas hasta 20 grados.

La cámara digital toma video a 30 cuadros por segundos con una resolución de 320x240 píxeles y en modo de cámara fotográfica tiene una resolución de 320x240, 640x480 y 1024x920 píxeles. Para este caso se usó el modo de cámara fotográfica con resolución de 640x420 píxeles ya que para hacer el PIV sólo con esa resolución se obtienen resultados confiables para las dimensiones de la cavidad de este caso en particular.

Para el procesamiento de imágenes se usó un software comercial (*flow-manager 3.1*) de DANTEC que admite casi cualquier resolución en fotografía digital. Este software funciona con pares de imágenes para hacer una correlación cruzada que permita calcular el desplazamiento promedio de las partículas  $\delta s$ . Las fotografías se dividen en áreas de interrogación que van de 8, 16 o 32 píxeles y mediante un algoritmo “sigue” a las partículas (poliamida en este caso) entre un par de imágenes tomadas en un determinado intervalo de tiempo  $\delta t$ , el cual debe ser conocido para el cálculo de la velocidad ( $v = \delta s / \delta t$ ), además de conocer la relación entre longitud y píxeles es decir,  $v = \delta s / \delta t$  donde  $\delta s$  es la longitud recorrida por una partícula en el tiempo entre un par de fotos.

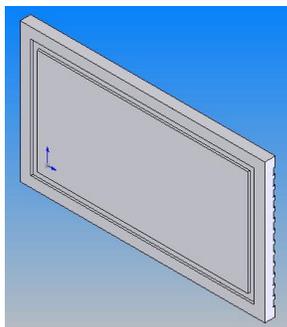
El estado transitorio toma cerca de 3 horas por lo que para resultados en estado permanente se tomó video y fotografías después de 4 horas.

## 2.2 Descripción del diseño

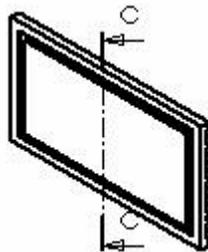
Empezaremos con la pared caliente, que debe garantizar una distribución de temperatura estrictamente uniforme en la superficie que estará en contacto con el fluido y que será parte de la cavidad. Para ello se escogió como material una placa de aluminio, por su propiedad de alta conductividad térmica, para que la distribución de temperatura sea lo más uniforme posible.

La superficie calentada es de aluminio de 1cm de espesor por 12cm de ancho y 22cm de largo. Para poder garantizar una temperatura uniforme, todas las caras excepto la interior, que es parte de la cavidad, están aisladas térmicamente mediante una capa de unicel para evitar gradientes de temperatura. Los canales donde se colocó la resistencia eléctrica tienen un ancho de  $\frac{1}{4}$  de pulgada y están separados 3mm uno de otro, con una profundidad de 3mm para colocar la resina epóxica para fijar la resistencia y aislarla eléctricamente para evitar corto circuito, ya que el aluminio es un conductor (Fig.2.2.1c plano de corte CC'). En la superficie opuesta, se realizó un canal de  $\frac{1}{4}$  de pulgada y 2mm de profundidad en forma de rectángulo para garantizar las dimensiones, el ensamble, el sellado y la forma de la cavidad (Figura 2.2.1 b).

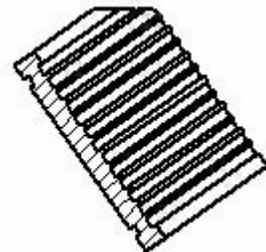
El resto de las paredes de la cavidad son de acrílico de  $\frac{1}{4}$  de pulgada de espesor. Para las paredes laterales de la cavidad se tiene un bastidor (Figura 2.2.2) que ensambla en las paredes a  $T_h$  y  $T_c$ ; la manera como está diseñado el dispositivo permite variar la altura de la cavidad para estudiar diferentes razones de aspecto. Además, representa una ventaja para el reemplazo o la limpieza de la misma ya que con el tiempo las paredes presentan raspaduras o el material de visualización se pega. Para este caso se escogió un bastidor que mantuviera una razón de aspecto de 1:4:8 para lograr estos valores la altura  $H$  es de 2.5cm el ancho  $W$  es de 10cm y el largo  $L$  es de 20cm.



a) Superficie a  $T_h$



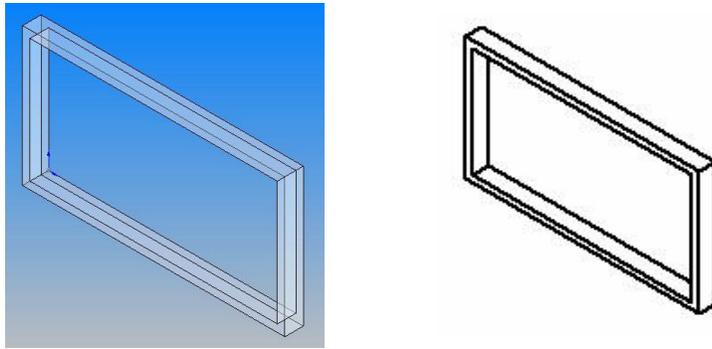
b) plano de corte



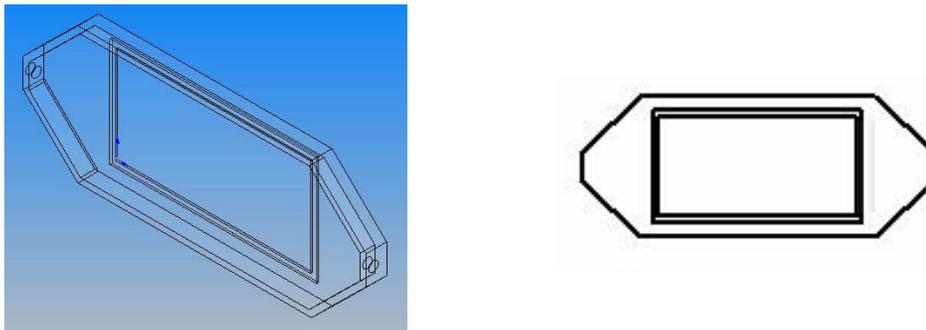
c) detalle CC

Figura 2.2.1

Para la construcción de la cámara de enfriamiento, considerando la necesidad de hacer visualización en un plano paralelo a la superficie fría, se utiliza acrílico de  $\frac{1}{4}$  de pulgada. Cuenta con una forma en ángulo, tanto en la entrada del flujo como a la salida, para que converja el fluido de enfriamiento en las mangueras del baño térmico (Fig. 2.2.3). Además se maquinó un canal rectangular de 20x10cm de perímetro interior, para facilitar el ensamble, el sellado, garantizar la forma y dimensiones de la cavidad. El canal tiene  $\frac{1}{4}$  de pulgada de ancho, que es el tamaño del espesor del acrílico, y una profundidad de 3mm.



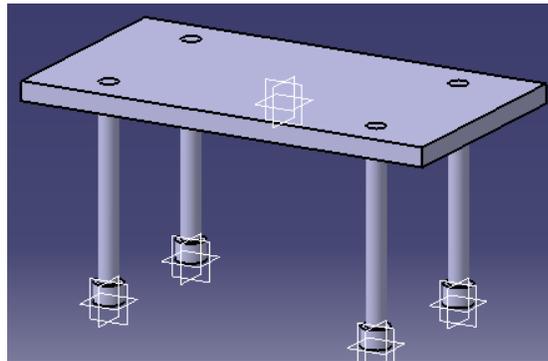
**Bastidor de la cavidad**  
**Figura 2.2.2**



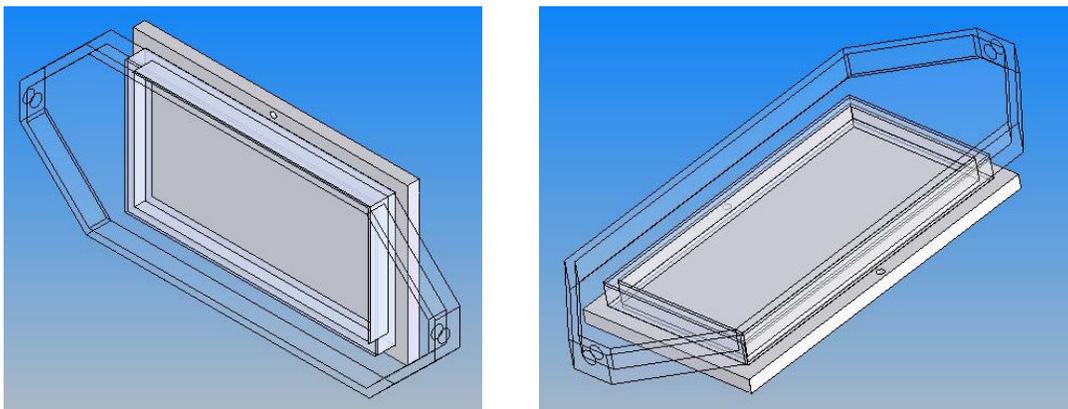
**Cámara de enfriamiento y canal rectangular para el ensamble**  
**Figura 2.2.3**

El dispositivo para variar el ángulo de la cavidad es de aluminio, sus dimensiones permiten probar cavidades de hasta 16x8 pulgadas y ángulos de inclinación de 0-30 grados. Consiste en una estructura en forma de plataforma de aluminio, a la que se le hicieron 4 barrenos para colocar tornillos que permitan dar el ángulo requerido; con este diseño se puede variar el ángulo en dos ejes (x, y). La Figura 2.2.4 muestra la forma del dispositivo.

El ensamble de la cavidad se muestra en la Figura 2.2.5 que incluye a la placa de aluminio, el bastidor y la cámara de enfriamiento.

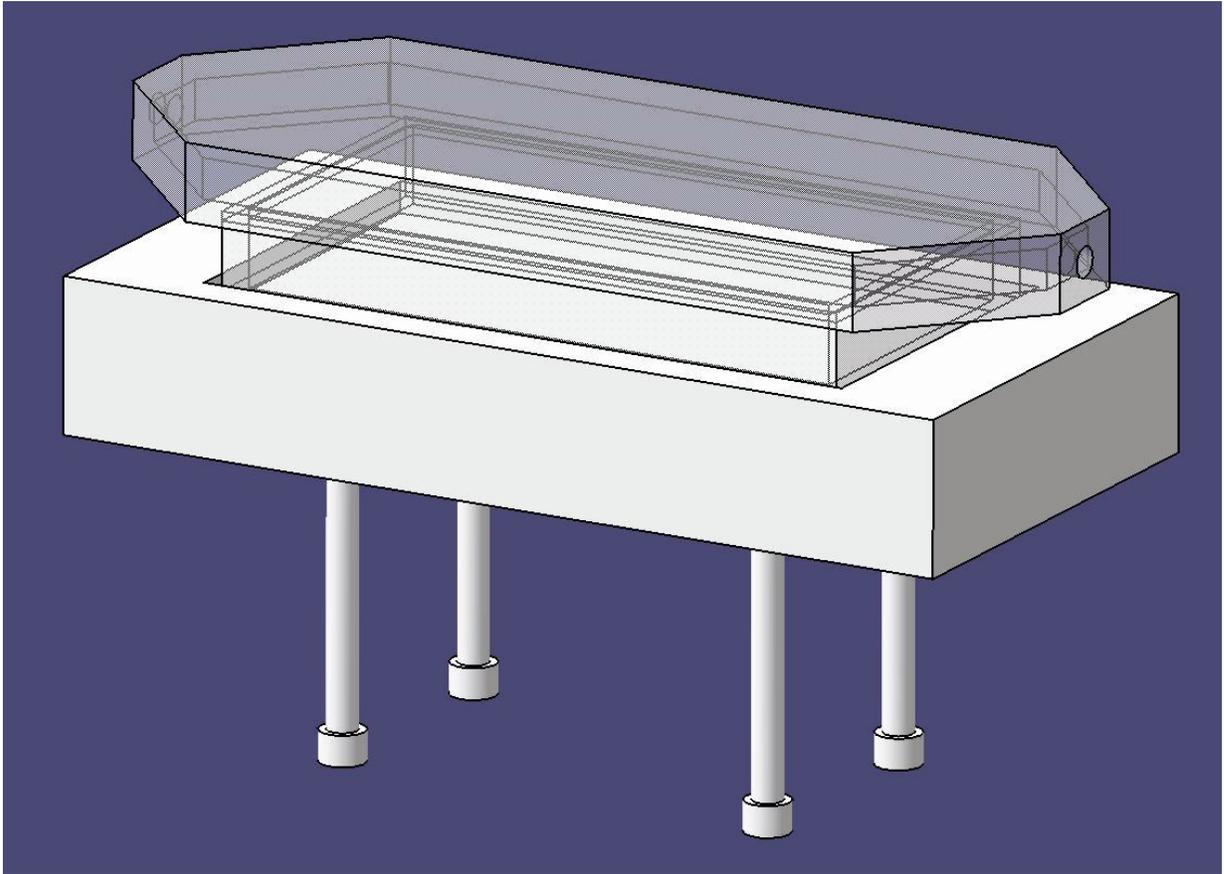


**Vista del soporte. Figura 2.2.4**



**Vista de la cámara de enfriamiento, el bastidor y la placa de aluminio  
Figura 2.2.5**

Y el ensamble del sistema completo queda como se muestra en la Figura 2.2.6.



**Ensamble del dispositivo experimental. Figura 2.2.6**

## 2.3 Pruebas

Teniendo la superficie de temperatura caliente y la superficie de temperatura fría, se ensambla el bastidor en las ranuras maquinadas en las dos superficies, y se sellan con silicón para evitar fugas y fijar las partes; previo a éste paso, se limpian todas las paredes interiores de la cavidad con un líquido limpiador especial para CDs, con el objetivo de mejorar el paso de luz y que no se creen burbujas de aire al llenar la cavidad con el fluido (glicerina). Al tenerse el ensamble de la cavidad se procede al llenado de la misma mediante una jeringa de plástico a través de un barreno hecho en una cara de la cavidad, al termino de esto se coloca un tornillo con cinta teflón en el barreno para evitar fugas. Habiendo realizado la operación de llenado, se colocan las mangueras del baño térmico en la cámara de enfriamiento, para ello, se coloca un codo de bronce con cuerda en los barrenos de entrada y salida de la cámara de enfriamiento (Figura 2.3.1 y Figura 2.3.2). Después, se coloca la cavidad en el soporte con el ángulo de inclinación dado previamente. Se conecta la resistencia eléctrica a la fuente de poder DC. Con todo esto, queda lista la cavidad para funcionar, solo falta la generación del plano de luz.

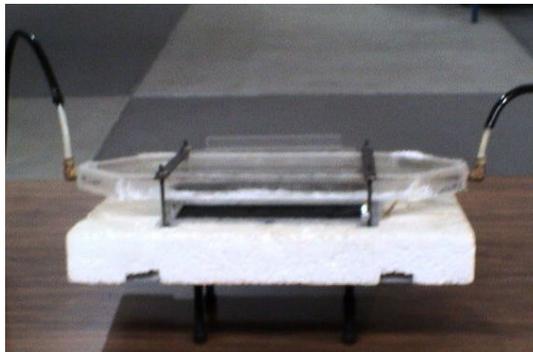


Figura 2.3.1. Fotografía de la cavidad ensamblada vista de frente



Figura 2.3.2. Fotografía de la cavidad vista de perfil

Para el plano de luz se ajusta el rayo láser en el centro de la pared lateral de la cavidad y después se coloca la varilla de vidrio en la misma pared como se menciono anteriormente (Figura 2.1.2). La cámara digital se coloca en un tripie y se enfoca el plano de luz dentro de la cavidad. Habiendo realizado todos estos pasos, se enciende la fuente de poder DC, y el baño térmico. Los dos equipos se ajustan para generar el número de Rayleigh deseado.

Con las fotografías de las pruebas (de 640x480 píxeles de resolución) lo que sigue es el procesamiento de estas con un software para PIV con lo que se obtiene los campos de velocidad y líneas de corriente para los diferentes casos estudiados aunque no se reporta la magnitud de la velocidad debido a que el software trabaja con pares de fotos y requiere el tiempo entre estas y la cámara fotográfica con la que se realizaron las pruebas no cuenta con la característica de control de tiempo entre fotografías y en el formato de video, aunque se puede conocer el tiempo entre fotogramas, la resolución es de 320x240 píxeles que es un valor muy bajo para hacer PIV por lo que sólo se reportan resultados cualitativos.

Las pruebas se realizaron dentro de un cuarto donde se tiene control de la iluminación y la temperatura dentro del mismo, esta última se mantuvo con un valor constante de 24.8° C durante todas las pruebas. El baño térmico se fijo, para todas las pruebas, a una temperatura de 22° C, por lo que el número de Rayleigh fue regulado únicamente con la fuente de poder DC.

## Capítulo 3

### Resultados y discusión

#### 3.1 Visualización para el estado transitorio

A continuación se muestran resultados de la visualización en estado transitorio de los rollos longitudinales para el caso de  $5^\circ$  de inclinación y un  $Ra = 10000$ ; se ve de manera clara la formación y evolución de los rollos.

En la Figura 3.1.1 se muestra una fotografía tomada 20 minutos después de iniciada la prueba. Puede observarse el inicio y la distribución de los rollos dentro de la cavidad, así como el movimiento y dirección de las corrientes del fluido. También es fácil observar la dimensión de los rollos con la respecto a la altura  $H$ . En la parte lateral derecha, la formación del rollo convectivo no es tan marcada. En este lado de la cavidad, la terminal de corriente eléctrica conectada a la fuente es la negativa y está la entrada del baño térmico. El plano de luz láser atraviesa de izquierda a derecha. El hecho de que no se forme el rollo en esa parte, probablemente se deba a que en la pared caliente se tenga una temperatura no uniforme causada por la terminal eléctrica y/o a alguna perturbación provocada por la circulación del baño, ya que el baño térmico mantiene la temperatura uniforme y el láser no afecta el fenómeno.

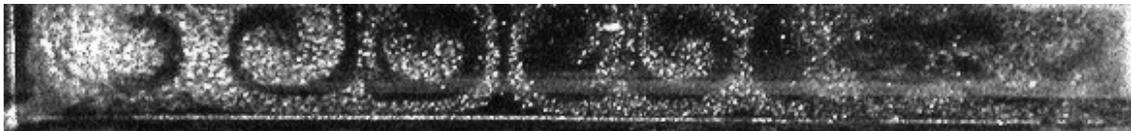


Figura 3.1.1 Fotografía a los 20 minutos de iniciado la prueba experimental de todo el plano de luz

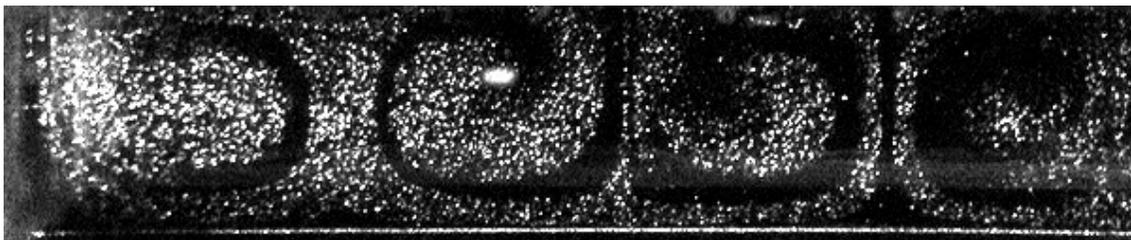


Figura 3.1.2 Fotografía para los 4 rollos de izquierda a derecha a los 20 minutos

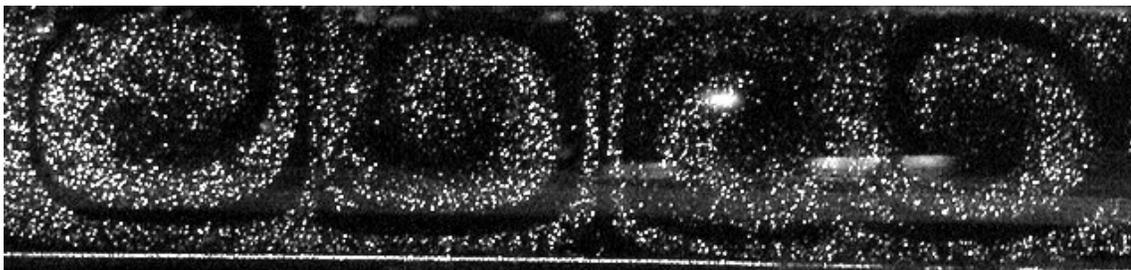
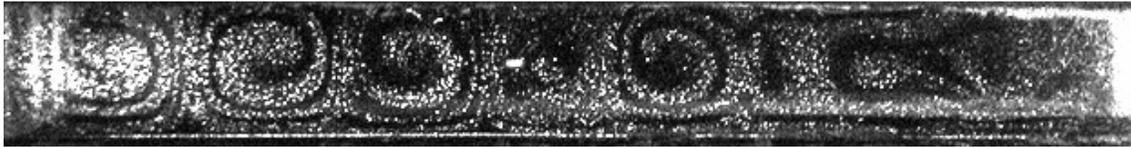


Figura 3.1.3 Fotografía para los 4 rollos centrales de la cavidad a los 20 minutos

En la Figura 3.1.2 es de un acercamiento a los 4 rollos de izquierda a derecha. Aquí se observa la dirección en el giro del rollo en contacto con la pared lateral izquierda, que muestra que el flujo desciende cerca de la pared. Este hecho se presenta siempre en ambas paredes laterales y para todos los casos estudiados en esta tesis, debido a que la dirección de los rollos (independientemente del número que se formen) depende de la generación de los gradientes de temperatura que se tienen hacia el centro de la cavidad.

En la Figura 3.1.4 se tiene una fotografía para 50 minutos. En ella se observa como los rollos han completado alrededor de 3 vueltas. Todos los rollos casi tienen la misma dimensión y conservan la misma velocidad de giro, es decir, cuando el primer rollo completa una vuelta, el resto también lo hace. Tal vez sea válido hacer la analogía con el caso de un tren de engranes con una relación de diámetros de 1. En el caso del tren de engranes, existe un eje (o punto) de contacto entre engrane y engrane donde la velocidad y la potencia de transmisión son la misma, independientemente de la relación de diámetros. Para el caso de los rollos existe una superficie (o línea) entre rollo y rollo donde la velocidad es la misma para ambos, independientemente del tamaño relativo entre rollos.



**Figura 3.1.4 Fotografía a los 50 minutos para toda la cavidad**

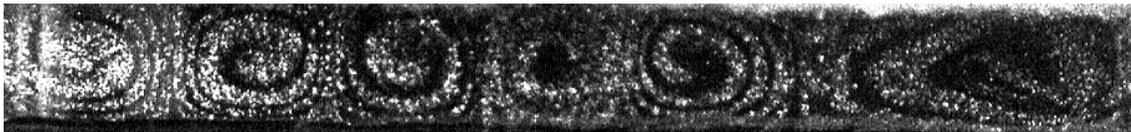


**Figura 3.1.5 Fotografía a los 50 minutos para los 5 rollos de izquierda a derecha**

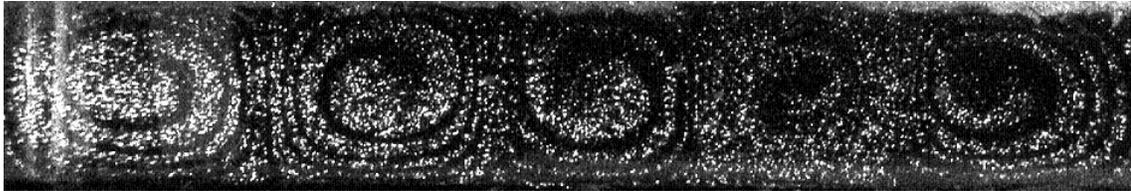
Para la Figura 3.1.6 se tiene una fotografía para 60 minutos. Para este tiempo el rollo lateral derecho empieza a mostrar su forma de manera más clara y su escala para el estado permanente. También se observa como los demás rollos mantienen el patrón de circulación y el número de giros por cada uno es el mismo.

Finalmente, en la Figura 3.1.7, para 80 minutos, los rollos han dado aproximadamente 5 giros y en la Figura 3.1.8 se observa la evolución del rollo lateral derecho, que parece conserva la información de los demás, a pesar de ser el ultimo en formarse.

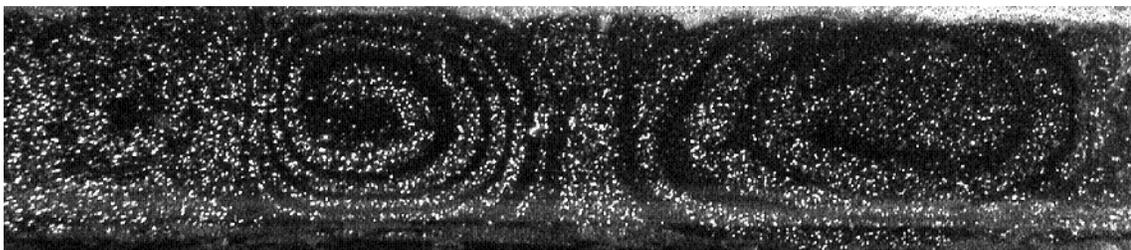
Como se observa en las fotografías, el número de rollos para el caso de  $5^\circ$  de inclinación y un Rayleigh de 10000, es de 6.



**Figura 3.1.6 Fotografía para 60 minutos de toda la cavidad**



**Figura 3.1.7 Fotografía para 80 minutos y los 5 rollos de izquierda a derecha**



**Figura 3.1.8 Fotografía para 80 minutos y los rollos de la zona lateral derecha**

### 3.2 Resultados para el estado permanente

Los resultados que se presentan a continuación muestran el número de rollos convectivos que se forman para 0, 5, 10, 15 y 20 grados de inclinación a diferentes números de Rayleigh de 10,000 16,000 30,000 y 51,000.

Para obtener este tipo de resultados la calidad de la fotografía es muy importante, factores como la iluminación del plano, la resolución de la cámara y el área de enfoque determinan la confiabilidad del **PIV**. A continuación se muestra dos fotografías para dar una idea del tipo de imágenes procesadas mediante **PIV** y el sembrado de partículas (Figura 3.2.1 y Figura 3.2.2).

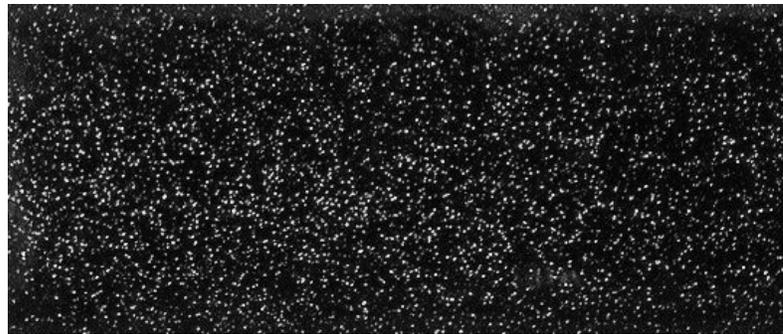


Figura 3.2.1. Fotografía del sembrado de partículas en estado permanente

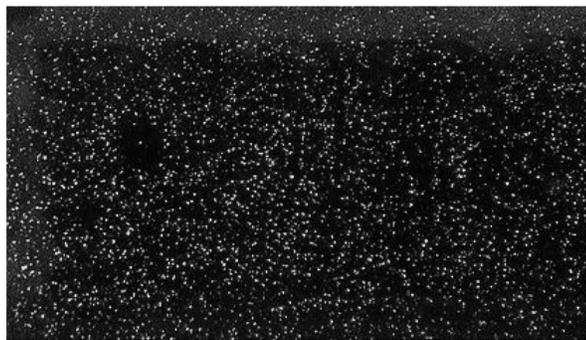


Figura 3.2.2. Fotografía del sembrado a 3 horas de empezada la prueba

Para 0° de inclinación se presentan resultados para números de Rayleigh de 10000, 16000, 30000 y 51000, Figura 3.2.3, Figura 3.2.4, Figura 3.2.5 y Figura 3.2.6 respectivamente. En este caso, al variar el Rayleigh, solo varía la velocidad, ya que el número de rollos es de 6 en los cuatro casos. Sólo se presentan la mitad de los rollos ya que tiene simetría en el plano medio vertical.

Para el caso de 5° de inclinación se presentan resultados para números de Rayleigh de 10000 y 30000, Figura 3.2.7 y Figura 3.2.8 respectivamente. Aquí también el número de rollos es de 6, los cuales presentan un ligero desplazamiento hacia la pared fría. También puede observarse el plano de simetría, así como la tendencia de los rollos a ser cuadrados.

Cabe mencionar que se tomó una fotografía por rollo convectivo y se procuró enfocar uno a la vez pero al mover la cámara fotográfica no se conocía la ubicación exacta de cada rollo, lo que generó un error en las tomas de los 2 rollos de la derecha. Es por esto que no resulta tan clara la simetría, pero existe.

Para el caso de 10° de inclinación se presentan resultados para números de Rayleigh de 16000, 30000 y 51000, Figura 3.2.9, Figura 3.2.10 y Figura 3.2.11 respectivamente, en las cuales se observa que el número de rollos es de 10.

Para el caso de 15° de inclinación se presentan resultados para números de Rayleigh de 10000 y 30000, Figura 3.2.12 y Figura 3.2.13 respectivamente, en las cuales se tiene la formación de 10 rollos al igual que en el caso de 10° de inclinación. Sólo se presenta la mitad de los rollos por la simetría que presenta.

Para el caso de 20° de inclinación se tiene la Figura 3.2.14 para un número de Rayleigh de 16000, en la cual se tiene la formación de 12 rollos convectivos, pero sólo se presenta la mitad, ya que en todos los casos se tiene una simetría. En la Figura 3.2.15 se tiene el mismo ángulo de 20 pero un Rayleigh de 51000. El número, forma y distribución de los rollos cambia completamente en comparación con todos los demás casos expuestos, ya que el número de rollos es de 14 y se tienen zonas en las cuales se presentan rollos encimados. A pesar del aparente desorden, existe el mismo plano de simetría y los rollos de los extremos conservan la misma escala y dirección de giro.

Como se mencionó anteriormente, la razón de aspecto es  $Ax = 8$ , y se observa que el número de rollos oscila alrededor de este valor para números ligeramente mayor al valor del Rayleigh crítico ( $Rac = 1708$ ). Esto se debe a que los rollos tienden a ser cuadrados. En la tabla 3.2a muestra de manera sintetizada el número de rollos en función del número de Rayleigh y el ángulo de inclinación para los casos estudiados en esta tesis.

**Tabla 3.2a**

Número de Rayleigh x 10 <sup>4</sup> Angulo de Inclinación $\theta$				
	<b>1.0</b>	<b>1.6</b>	<b>3.0</b>	<b>5.1</b>
<b>0</b>	<i>6 rollos</i>	<i>6 rollos</i>	<i>6 rollos</i>	<i>6 rollos</i>
<b>5</b>	<i>6 rollos</i>		<i>6 rollos</i>	
<b>10</b>		<i>10 rollos</i>	<i>10 rollos</i>	<i>10 rollos</i>
<b>15</b>	<i>10 rollos</i>		<i>10 rollos</i>	
<b>20</b>		<i>12 rollos</i>		<i>14 rollos</i>

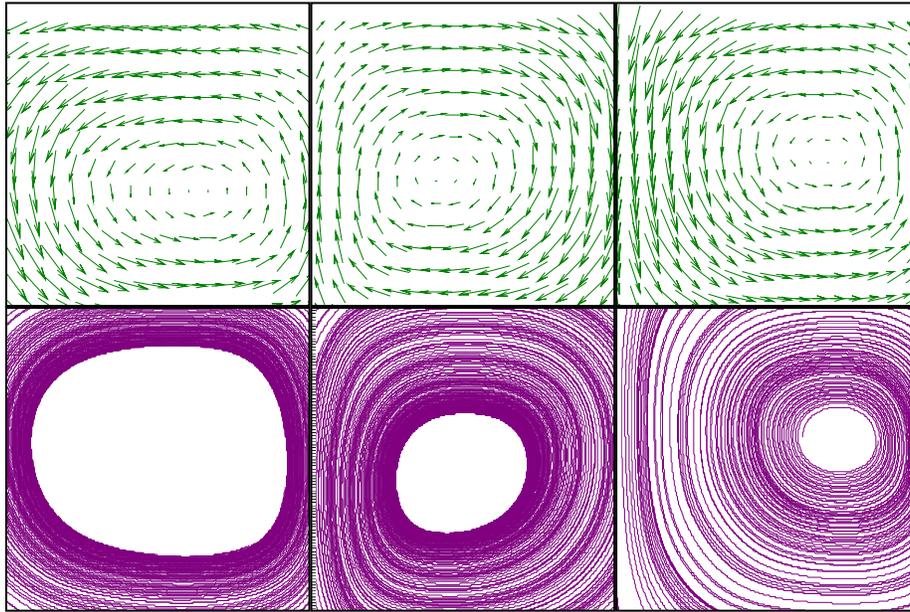


Figura 3.2.3 Rollos convectivos para 0 grados de inclinación y un  $Ra = 10000$  vistos de izquierda a derecha en el plano frontal central. Para estas condiciones se forman 6 rollos con simetría en el plano medio perpendicular a las superficies donde se genera el gradiente de temperatura. Se muestran el campo de velocidad y las líneas de corriente para la mitad de los rollos por la simetría que presenta.

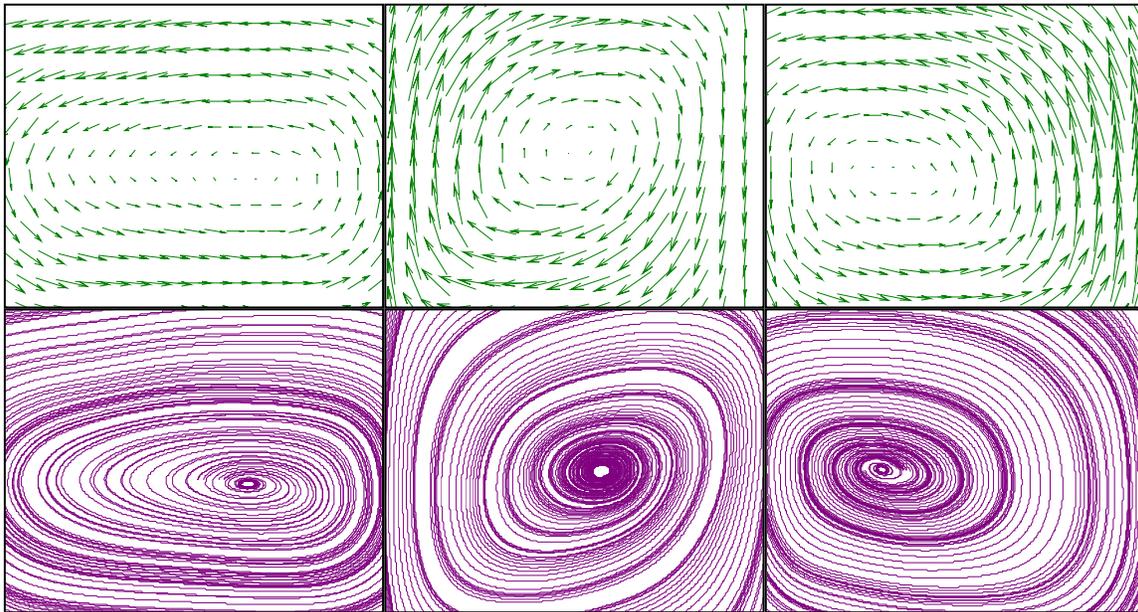
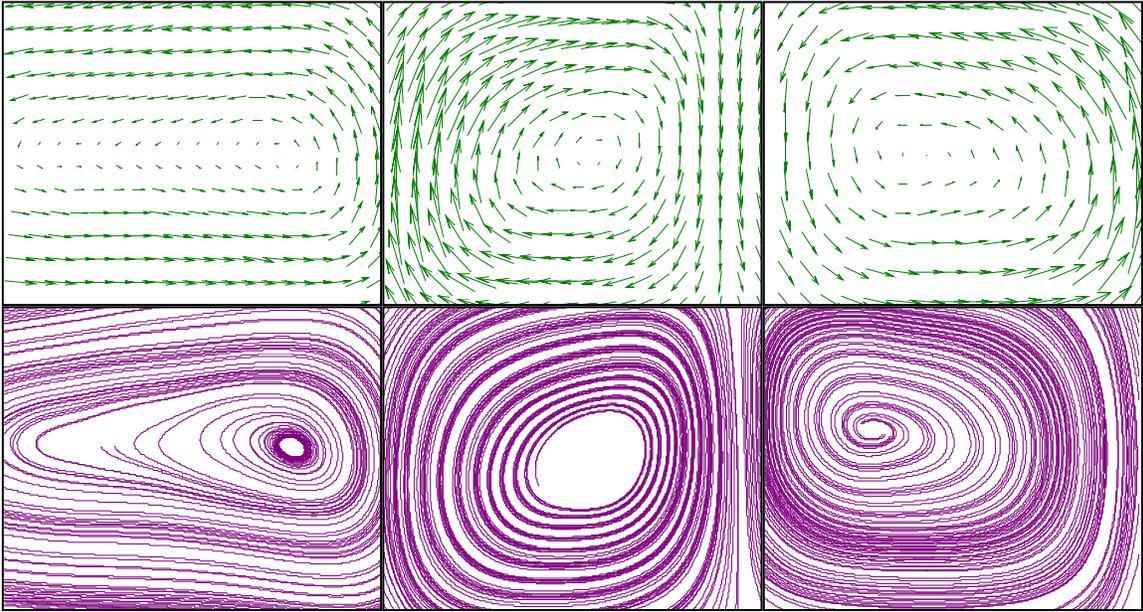
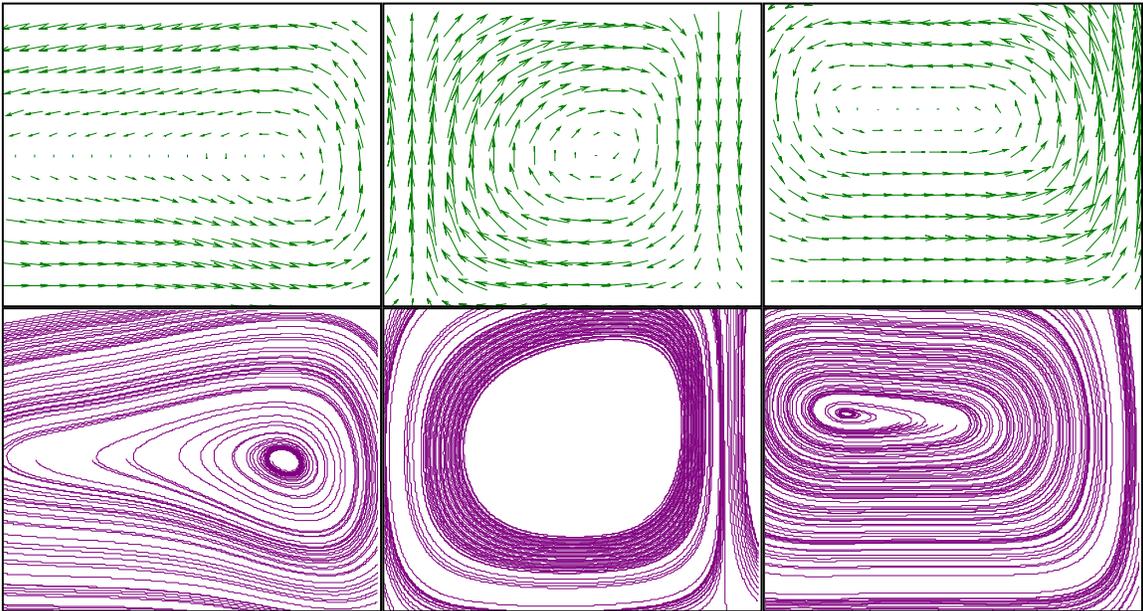


Figura 3.2.4 Rollos convectivos para 0 grados de inclinación y un  $Ra = 16000$  vistos de izquierda a derecha en el plano frontal central. Para estas condiciones se forman 6 rollos con simetría en el plano medio perpendicular a las superficies donde se genera el gradiente de temperatura. Se muestran el campo de velocidad y las líneas de corriente para la mitad de los rollos por la simetría que presenta.



**Figura 3.2.5 Rollos convectivos para 0 grados de inclinación y un  $Ra=30000$  vistos de izquierda a derecha en el plano frontal central. Para estas condiciones se forman 6 rollos con simetría en el plano medio perpendicular a las superficies donde se genera el gradiente de temperatura. Se muestran el campo de velocidad y las líneas de corriente para la mitad de los rollos por la simetría que presenta.**



**Figura 3.2.6 Rollos convectivos para 0 grados de inclinación y un  $Ra=51000$  vistos de izquierda a derecha en el plano frontal central. Para estas condiciones se forman 6 rollos con simetría en el plano medio perpendicular a las superficies donde se genera el gradiente de temperatura. Se muestran el campo de velocidad y las líneas de corriente para la mitad de los rollos por la simetría que presenta.**

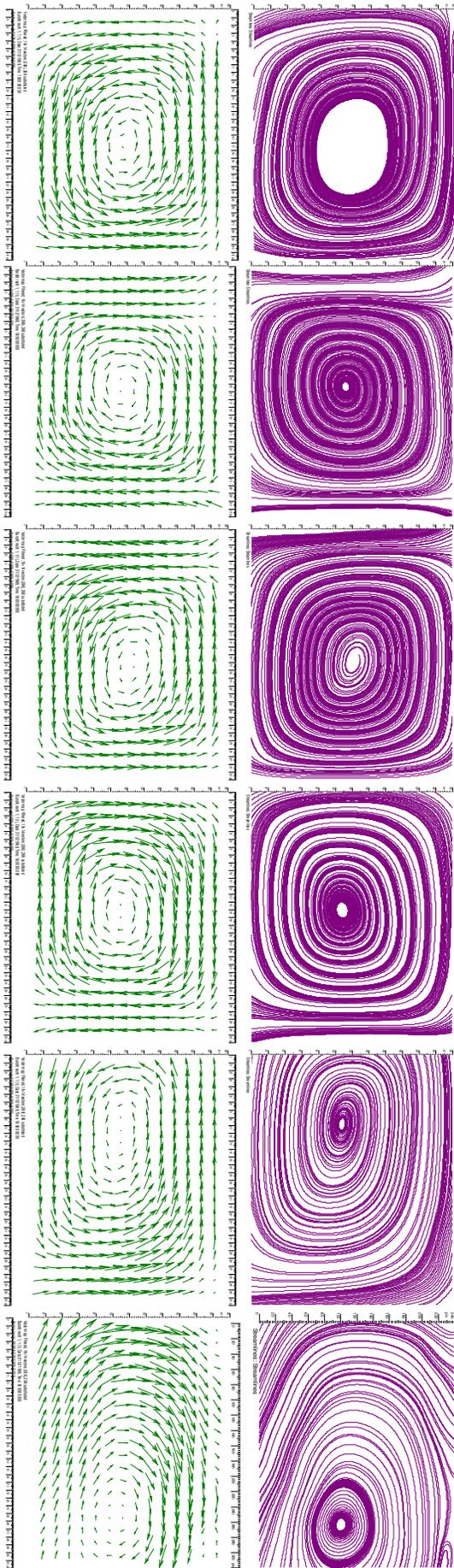
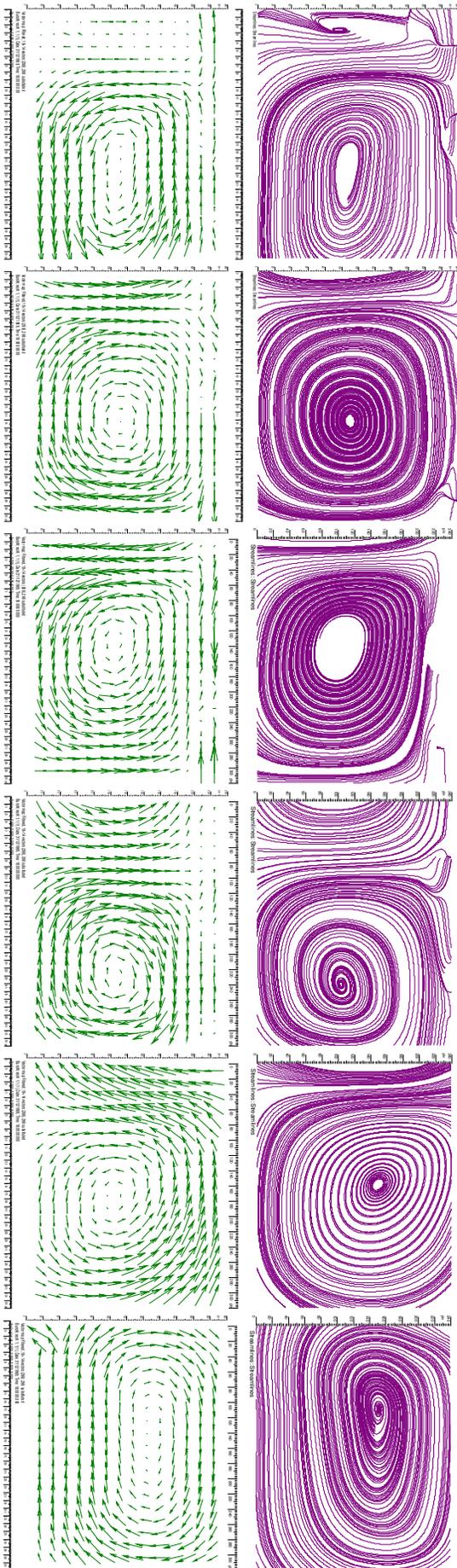


Figura 3.2.7 Rollos convectivos para 5 grados de inclinación y un  $Ra=10000$  vistos de izquierda a derecha en el plano frontal central. Para estas condiciones se forman 6 rollos con simetría en el plano medio perpendicular a las superficies donde se genera el gradiente de temperatura. Se muestran el campo de velocidad y las líneas de corriente para todo el ancho de la cavidad.



**Figura 3.2.8** Rollos convectivos para 5 grados de inclinación y un  $Ra=30000$  vistos de izquierda a derecha en el plano frontal central. Para estas condiciones se forman 6 rollos con simetría en el plano medio perpendicular a las superficies donde se genera el gradiente de temperatura. Se muestran el campo de velocidad y las líneas de corriente para todo el ancho de la cavidad.

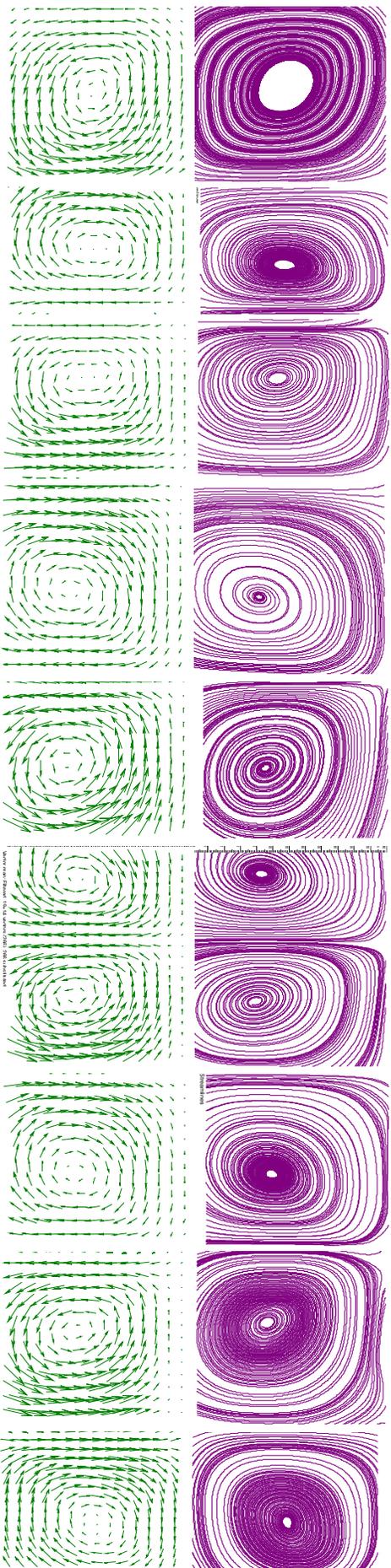
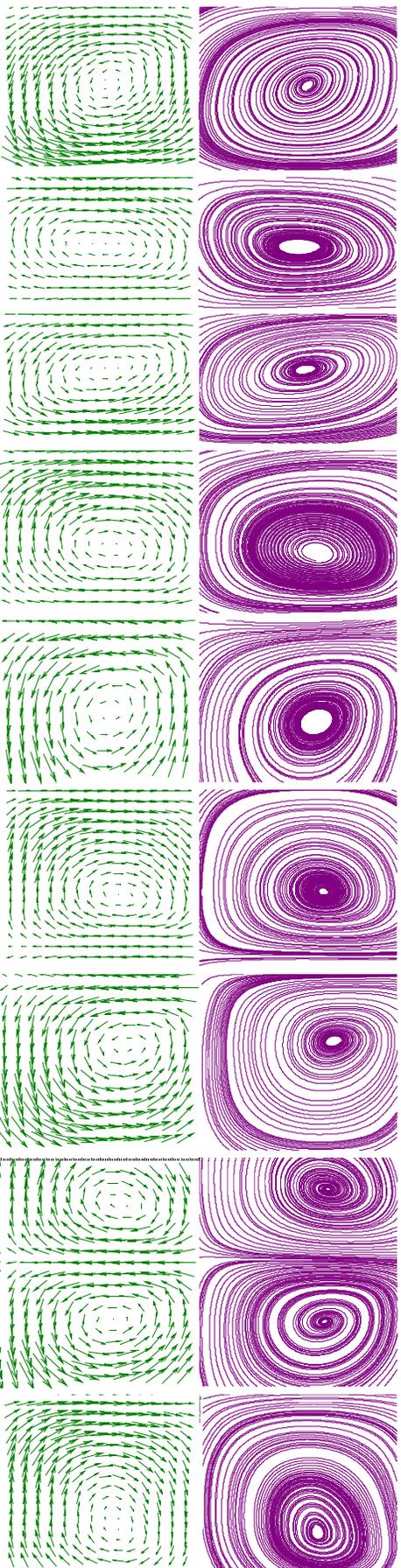
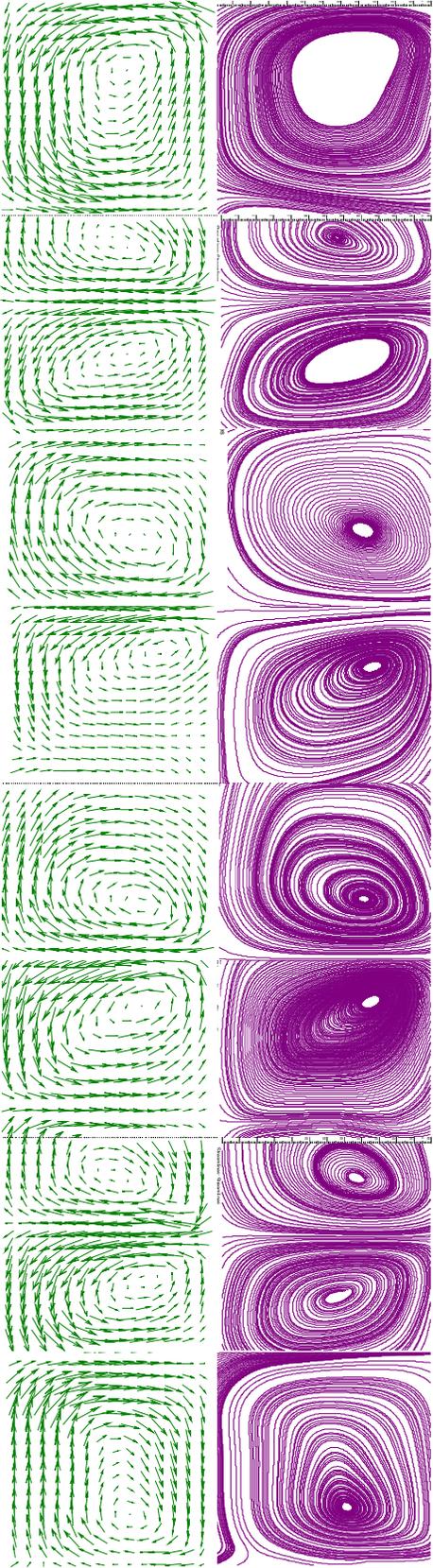


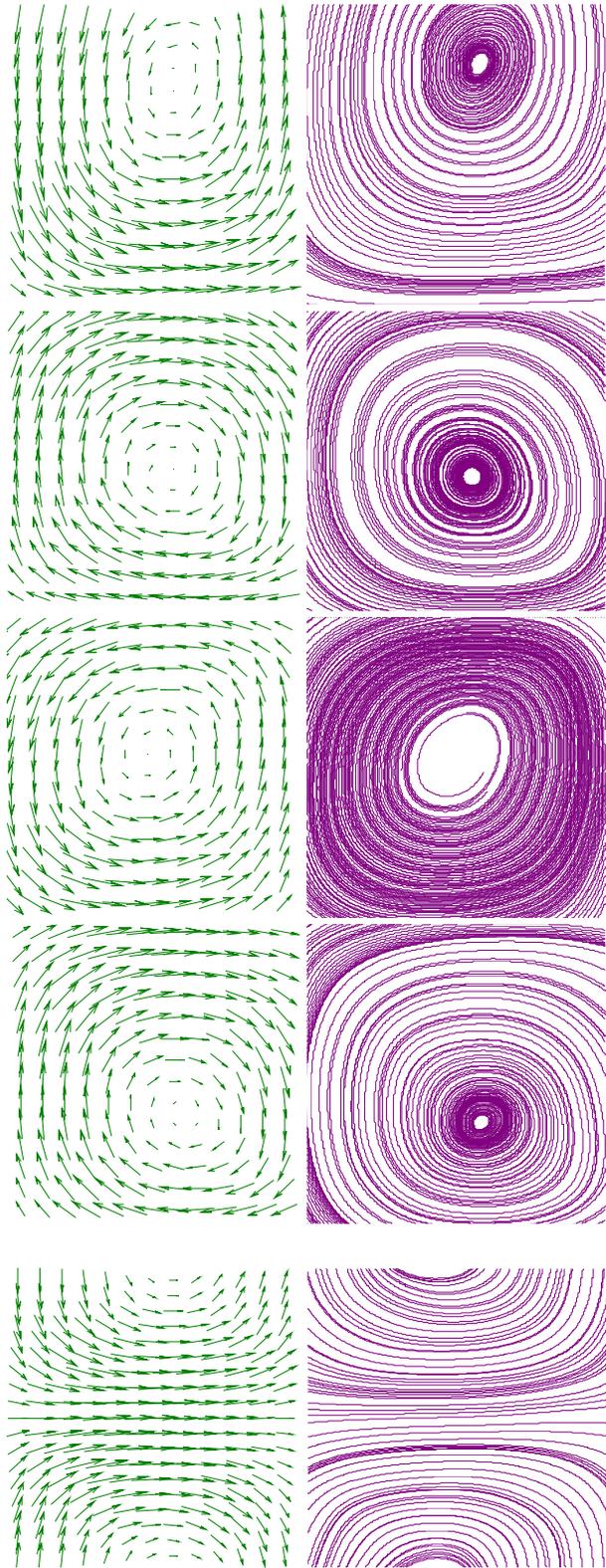
Figura 3.2.9 Rollos convectivos para 10 grados de inclinación y un  $Ra=16000$  vistos de izquierda a derecha en el plano frontal central. Para estas condiciones se forman 10 rollos con simetría en el plano medio perpendicular a las superficies donde se genera el gradiente de temperatura. Se muestran el campo de velocidad y las líneas de corriente para todo el ancho de la cavidad



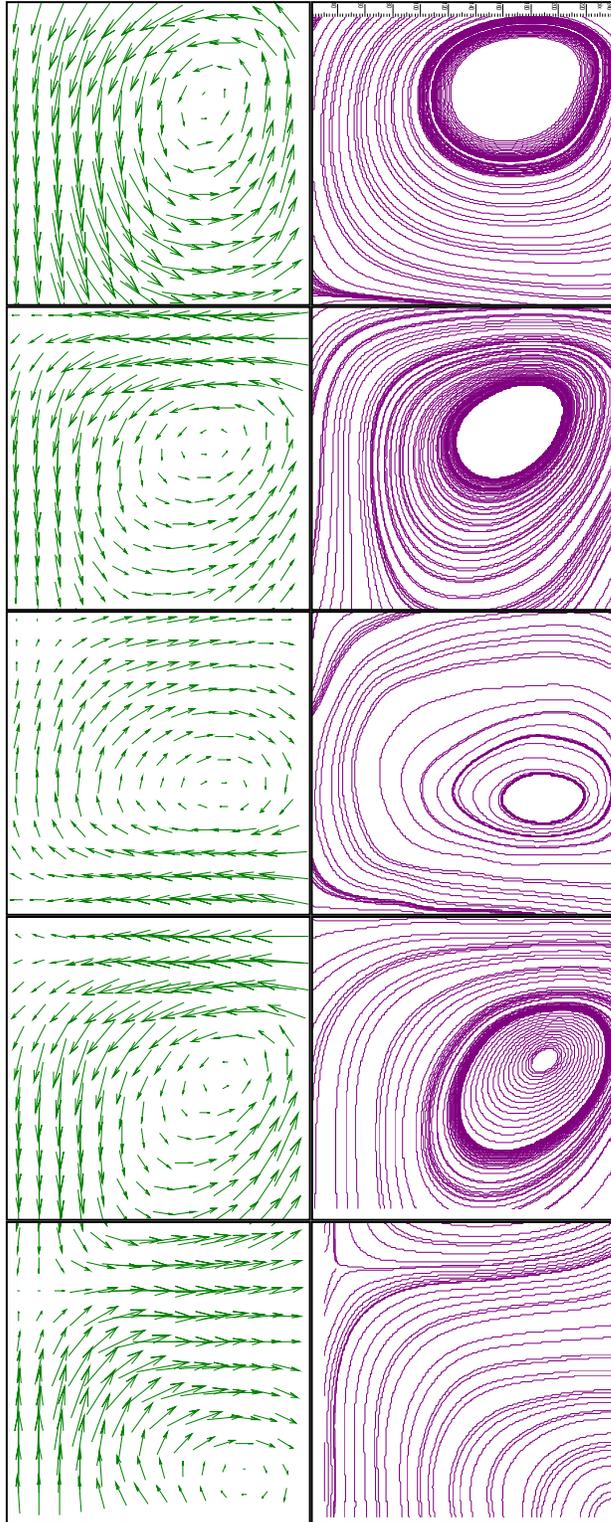
**Figura 3.2.10** Rollos convectivos para 10 grados de inclinación y un  $Ra=30000$  vistos de izquierda a derecha en el plano frontal central. Para estas condiciones se forman 10 rollos con simetría en el plano medio perpendicular a las superficies donde se genera el gradiente de temperatura. Se muestran el campo de velocidad y las líneas de corriente para todo el ancho de la cavidad.



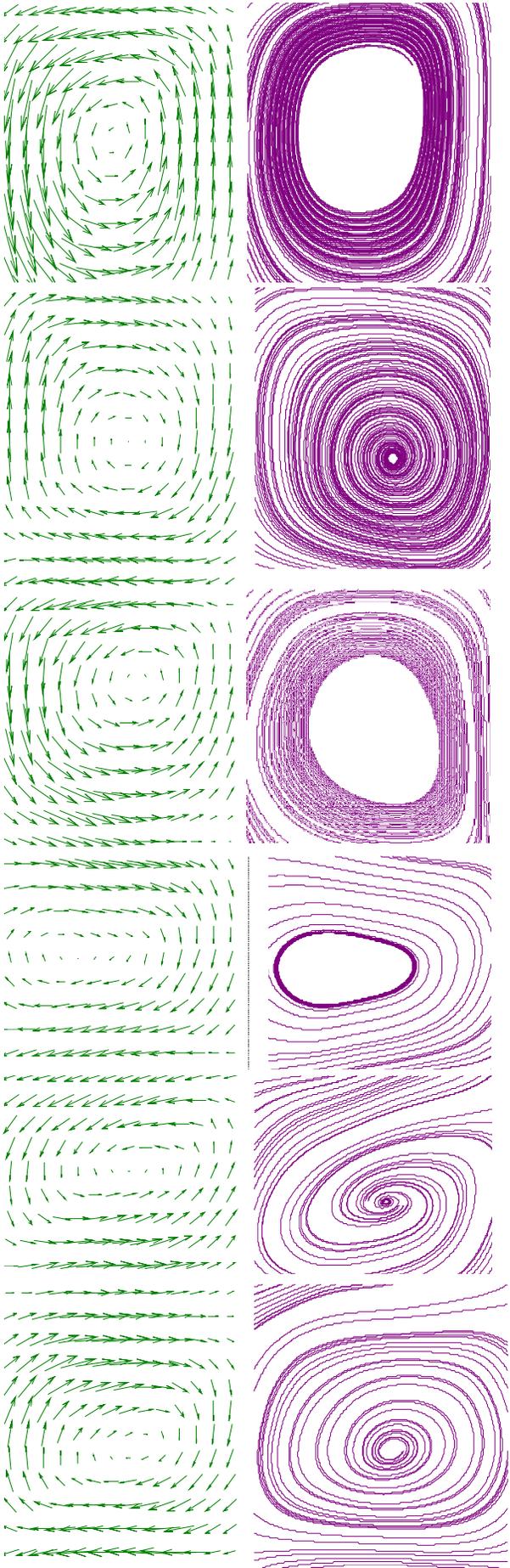
**Figura 3.2.11 Rollos convectivos para 10 grados de inclinación y un  $Ra=51000$  vistos de izquierda a derecha en el plano frontal central. Para estas condiciones se forman 10 rollos con simetría en el plano medio perpendicular a las superficies donde se genera el gradiente de temperatura. Se muestran el campo de velocidad y las líneas de corriente para todo el ancho de la cavidad.**



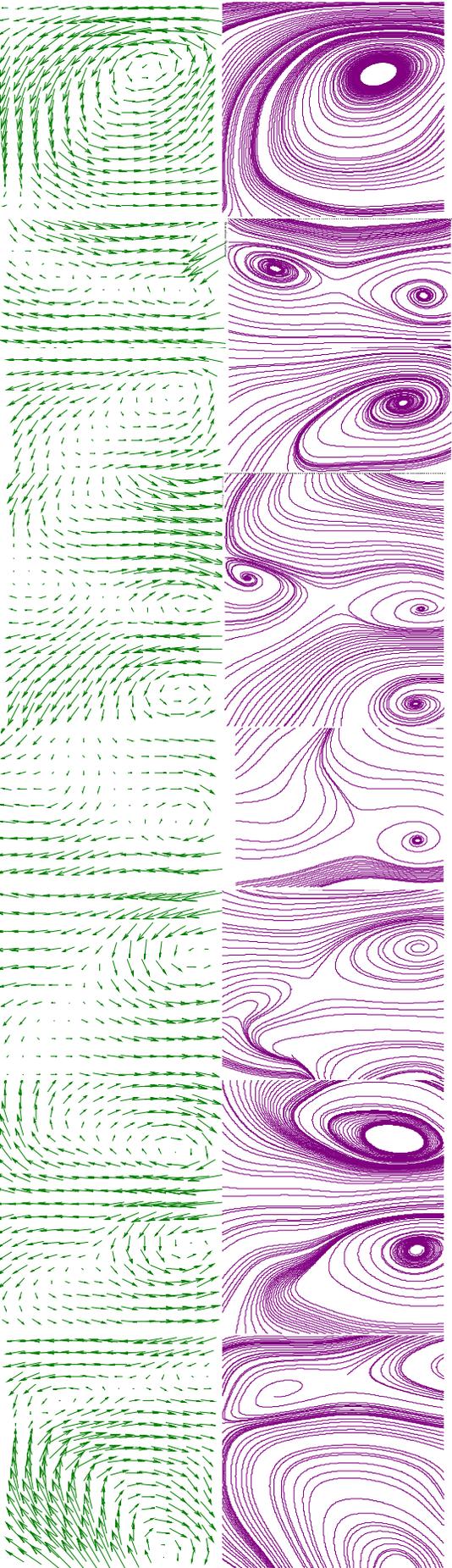
**Figura 3.2.12 Rollos convectivos para 15 grados de inclinación y un  $Ra=10000$  vistos de izquierda a derecha en el plano frontal central. Para estas condiciones se forman 10 rollos con simetría en el plano medio perpendicular a las superficies donde se genera el gradiente de temperatura. Se muestran el campo de velocidad y las líneas de corriente para la mitad de los rollos por la simetría que presenta.**



**Figura 3.2.13 Rollos convectivos para 15 grados de inclinación y un  $Ra=30000$  vistos de izquierda a derecha en el plano frontal central. Para estas condiciones se forman 10 rollos con simetría en el plano medio perpendicular a las superficies donde se genera el gradiente de temperatura. Se muestran el campo de velocidad y las líneas de corriente para la mitad de los rollos por la simetría que presenta.**



**Figura 3.2.14 Rollos convectivos para 20 grados de inclinación y un  $Ra=16000$  vistos de izquierda a derecha en el plano frontal central. Para estas condiciones de forman 12 rollos con simetría en el plano medio perpendicular a las superficies donde se genera el gradiente de temperatura. Se muestran el campo de velocidad y las líneas de corriente para la mitad de los rollos por la simetría que presenta.**



**Figura 3.2.15 Rollos convectivos para 20 grados de inclinación y un  $Ra=51000$  vistos de izquierda a derecha en el plano frontal central. Para estas condiciones se forman 14 rollos y se presentan rollos en la parte media inferior y superior. Se muestran el campo de velocidad y las líneas de corriente para todo lo ancho de la cavidad.**

## Capítulo 4

### Conclusiones

En el presente estudio de la convección natural en una cavidad inclinada se muestra que el número de rollos convectivos longitudinales es función del número de Rayleigh y del ángulo de inclinación. El número de rollos se incrementa al aumentar el ángulo de inclinación y/o el número de Rayleigh, ya que para los casos horizontal y  $5^\circ$  de inclinación se presenta 6 rollos para todo el rango de Rayleigh estudiado, mientras que para el caso de  $10^\circ$  y  $15^\circ$  de inclinación se tiene la formación de 10 rollos. Para el caso de  $20^\circ$  se presentan 12 rollos para un Rayleigh de 16000 pero, para un Rayleigh de 51000 se tiene 14 rollos con zonas en las que un rollo esta arriba de otro.

El número de rollos siempre es par, es decir, la formación de rollos se da por múltiplos de dos para esta razón de aspecto y mantienen una simetría con respecto a un plano perpendicular a las paredes caliente y fría, que pasa por el centro de la longitud de la cavidad (L). El patrón de flujo que presentan los rollos en las paredes laterales siempre es hacia abajo debido a que las paredes de la cavidad tienen una conductividad térmica finita y mantienen la misma escala. Los rollos presentan un desplazamiento hacia la pared superior conforme el ángulo de inclinación y el Rayleigh se incrementan.

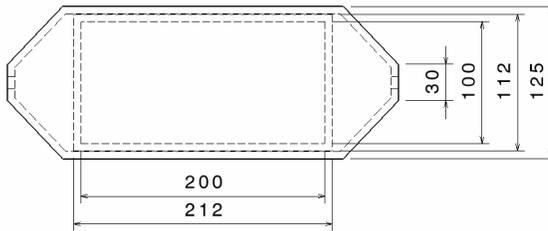
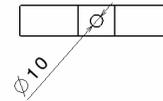
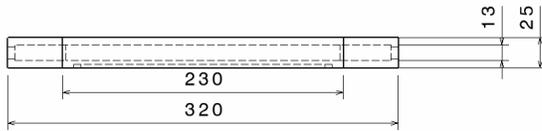
La visualización permite conocer la formación y evolución de los rollos dentro de la cavidad, así como la obtención de los campos de velocidad y líneas de corriente mediante PIV. El hecho de que no se reporte la magnitud de estos campos se debe a que es necesario conocer el tiempo entre los pares de fotografías y la cámara digital utilizada no cuenta con esta función; y en modo de cámara de video la resolución de  $320 \times 240$  resulta muy baja por lo que sólo se presentan resultados cualitativos. No obstante, solo basta con tomar video con una cámara de resolución de  $640 \times 480$  píxeles o superior para poder calcular la magnitud de los campos.

La forma como se consideró el diseño permite estudiar cavidades con diferentes razones de aspecto y diferentes fluidos de trabajo, ya que sólo es necesario reemplazar el bastidor con la altura deseada y/o el fluido respectivamente. Aunque la razón de aspecto sólo es variable en función de la altura, en los planos de fabricación se tiene la flexibilidad de variar las demás dimensiones de la cavidad. También permite estudiar cavidades con paredes internas de alta o baja conductividad térmica, de altura y separación variable, como se pretende realizar en estudios posteriores.

# Apéndice

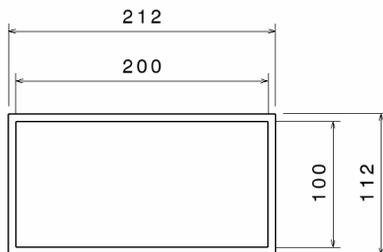
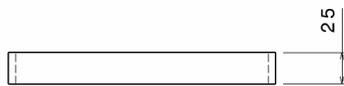
## Planos del dispositivo experimental

- Cámara de enfriamiento
- Bastidor de la cavidad
- Placa de aluminio
- Aislamiento
- Soporte



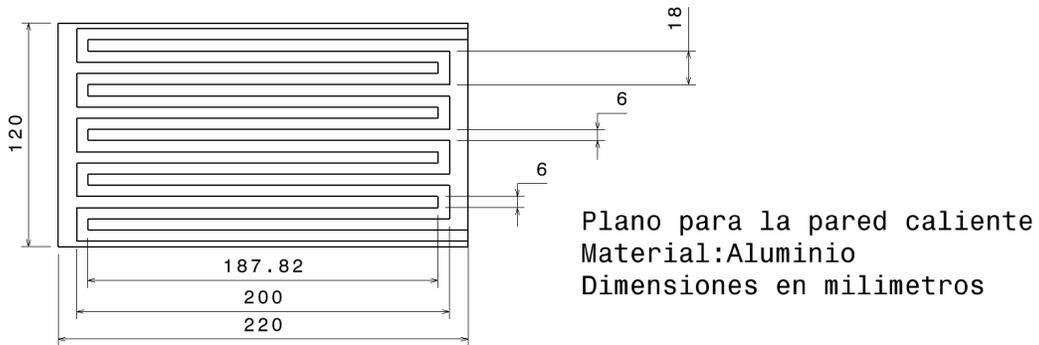
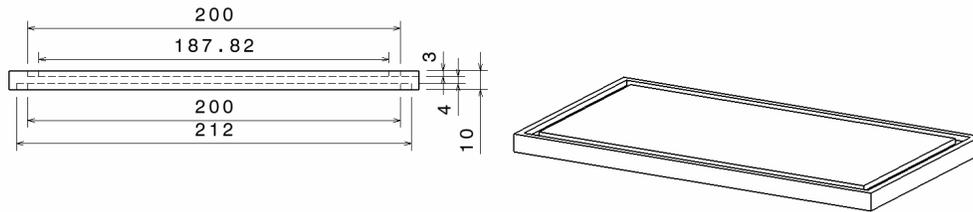
Planos de la camera de enfriamiento  
Material:acrilico de 1/4in  
Dimensiones en milimetros

## Camara de enfriamiento

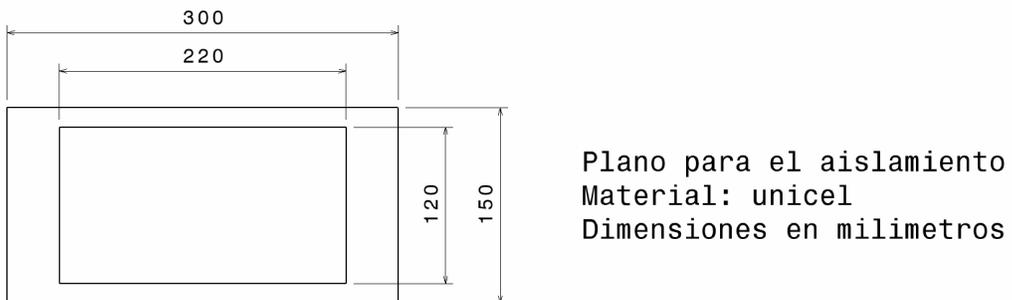
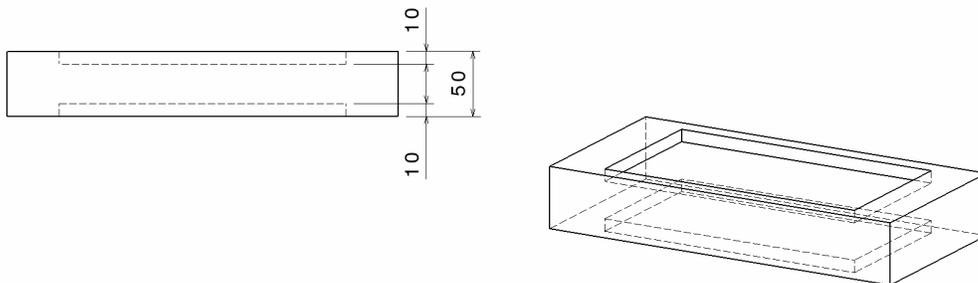


Planos para bastidor de la cavidad  
Material:acrilico de 1/4 in  
dimensiones en milimetros

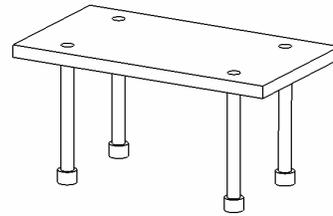
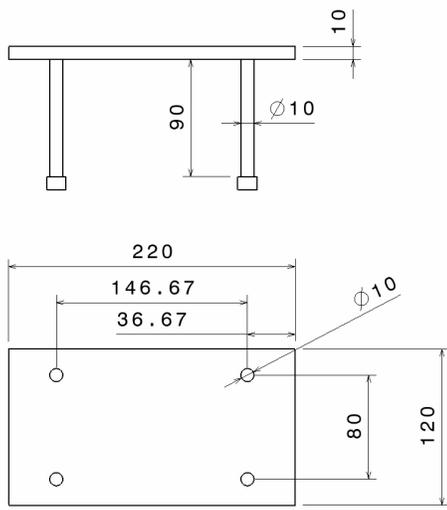
## Bastidor



Placa de aluminio

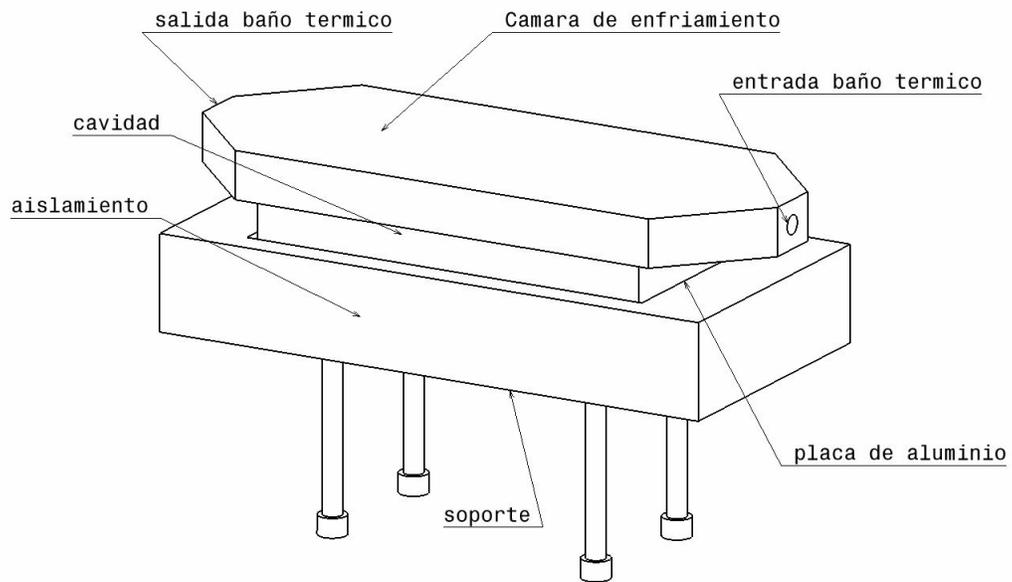


Sistema de aislamiento



Plano para el soporte  
Material:Aluminio  
Dimensiones en milímetros

## SOPORTE



## Ensamble del dispositivo

## Referencias

- [1] D.T.J. Hurle, in: *Crystal Growth and Materials*, Eds. E. Kaldis and H.J. Scheel (North-Holland, Amsterdam, 1977) p. 550
- [2] Massimo Corcione, Effects of the thermal boundary conditions at the sidewalls upon natural convection in rectangular enclosures heated from below and cooled from above, *International Journal of Thermal Sciences* 42 (2003) 199–208
- [3] Flow mode-transition of natural convection in inclined rectangular enclosures subjected to bidirectional temperature gradients, H. Wang, M.S. Hamed, *International Journal of Thermal Sciences* 2006
- [4] Flow transitions of a low-Prandtl-number fluid in an inclined 3D cavity, Rafael Delgado-Buscalioni, Emilia Crespo del Arco, Patrick Bontoux, *Eur. J. Mech. B - Fluids* 20 (2001) 657–672
- [5] J. N. Arnold, I. Catton and D. K. Edwards, Experimental investigation of natural convection in inclined rectangular regions of differing aspect ratios, *J. Heat Transfer* 98, 67–71 (1976).
- [6] H. Ozoe, H. Sayama and S. W. Churchill, Natural convection in an inclined square channel, *Int. J. Heat and Mass Transfer* 17, 401–406 (1974).
- [7] J.T. Lir, T.F. Lin, Visualization of roll patterns in Rayleigh-Benard convection of air in a rectangular shallow cavity, *Int. J. Heat and Mass Transfer* 44 (2001) 2889–2902
- [8] T.D. Upon and D.W. Watt, Experimental study of transient natural convection in an inclined rectangular enclosure, *Int. J. Heat and Mass Transfer* 49 2679–2690, 1997.
- [9] H. Ozoe and H. Sayama, Natural convection patterns in a long inclined rectangular box heated from below, *Int. J. Heat and Mass Transfer* 20 123–129, 1976.
- [10] J.N. Shadid and R.J. Goldstein, Visualization of longitudinal convection roll instabilities in an inclined enclosure heated from below, *J. Fluid Mechanics* vol. 215 pp.61–84 1990