

## MEDIDAS DEL ESPESOR DE CAPA LÍMITE EN RECINTOS CERRADOS EMPLEANDO MÉTODOS ÓPTICOS

María Vilte, Irene De Paul

INENCO# Av. Bolivia 5150 - 4400 Salta- E-mail: viltem@unsa.edu.ar

### RESUMEN

El estudio de los procesos de transferencia de energía por convección natural en un local cerrado, calentado a través de una de sus paredes laterales, requiere un análisis detallado y preciso de la capa límite en la que se realiza efectivamente la transferencia. En este trabajo se presentan los resultados de las medidas del espesor de dicha capa sobre paredes y techo de un pequeño local, usando agua y aire como fluido convectivo, empleando la técnica óptica de Schlieren y tomando como parámetro la temperatura de la superficie del techo. Los valores obtenidos son del orden de unos pocos milímetros, observándose la evolución temporal del espesor durante el calentamiento.

Palabras claves: capa límite, estado estacionario, convección natural, temperatura.

### INTRODUCCIÓN

La determinación de los coeficientes de transferencia térmica convectiva  $h$  que actúan realmente en el interior de un recinto cerrado producidos por convección natural es un problema complejo y de gran importancia en el momento del diseño de un sistema. Procurando determinar experimentalmente los valores de  $h$  en el interior de un recinto cúbico calentado desde una pared vertical, usando agua como fluido convectivo, se encontraron algunas incongruencias. Así en la expresión de  $h$ :

$$h = \left( \frac{k}{e} \right) \frac{(T_{in} - T_{ex})}{(T_a - T_{ex})} \quad (1)$$

en la que  $T_{in}$  y  $T_{ex}$  son las temperaturas de las caras internas y externas de la superficie que se trate, de conductividad térmica  $k$  y espesor  $e$ , y  $T_a$  la temperatura del agua en las proximidades de la superficie; los valores medidos de  $T_a$  conducían a una transferencia térmica desde el agua al techo del recinto menor que la transferida por conducción hacia el aire exterior a través del techo (Vilte M., De Paul I., 2000; Vilte M., De Paul I., 2003; Vilte M., De Paul I., 2004). Habiendo comprobado que la conducción térmica a lo largo del techo del recinto no era responsable de este resultado se llegó a la conclusión que la posición en la que estaba ubicada la termocupla en el interior del agua debajo del techo a 0.005m, estaba fuera de la capa límite térmica desde la cual se realiza realmente la transferencia. A estos efectos se presentan a continuación una serie de experiencias en las cuales a través de técnicas ópticas se mide el espesor de la capa límite en el techo, en la pared caliente y fría de la cavidad, en los casos que el fluido convectivo es agua y aire y se comparan los resultados obtenidos.

### DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

En las experiencias se empleó un modelo cúbico de  $0,10 \times 0,10 \times 0,10 \text{ m}^3$  con paredes de vidrio flotado de  $3 \times 10^{-3} \text{ m}$  de espesor, techo y piso de acrílico de  $3 \times 10^{-3}$  y  $8 \times 10^{-3} \text{ m}$  de espesor respectivamente. Un calefactor que consiste en un devanado de constantán aislado convenientemente se fija a una pared lateral de la cavidad y se conecta a una fuente de tensión constante que suministra la potencia de calentamiento al sistema. Se empleó como fluido convectivo agua y aire. Para medir el espesor de la capa límite se usó la técnica de Schlieren o de "borde filoso", que consta de un dispositivo óptico que se muestra en la figura 2:

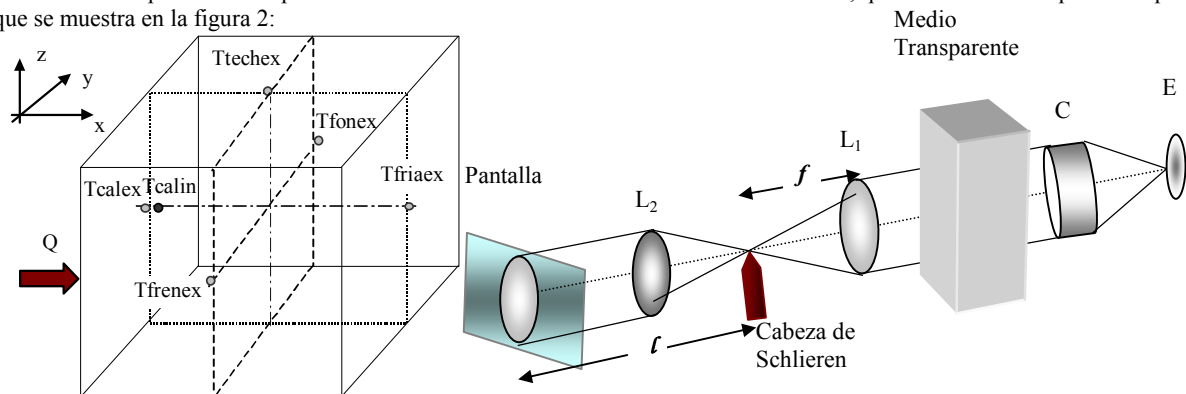


Figura 1. Esquema de los sensores de temperaturas en la cavidad. Figura 2. Esquema óptico empleado para medir el espesor de la capa límite.

En el dispositivo experimental se usó un láser de 13 mW de potencia de Helio Neón, un expansor E, un colimador C de 0.0025 m, una lente L1 de distancia focal es de 0.0125 m, una lente L2 cuya distancia focal es de 0.05 m. La cabeza de Schlieren es una hoja metálica de borde filoso, el medio transparente es el modelo cúbico lleno de agua o aire. La pantalla es superficie blanca sobre la que se adhirió una regla como referencia para los registros fotográficos. En todos los casos  $f=0.125$  m,  $l=2.47$  m. (Figura 2).

Cuando se genera una capa límite térmica sobre una superficie se establece un gradiente térmico que produce a su vez un gradiente en el índice de refracción del medio. Esta situación se visualiza en la pantalla como una sucesión de franjas de interferencia que se diluye a medida que la temperatura del fluido se homogeniza. Midiendo el espesor de franjas de interferencia sobre la pantalla,  $\Delta x$ , se puede conocer el espesor de la capa límite térmica en el fluido  $\delta$  con la siguiente expresión:

$$\delta_p = \Delta x \cdot \frac{f}{l} \quad (2)$$

donde  $\Delta x$  es el espesor de la capa límite medida sobre la pantalla,  $f$  es la distancia focal de la lente L1 y  $l$  es la distancia desde la cabeza de Schlieren hasta la pantalla.

Para medir la capa límite se obtuvieron registros fotográficos con una cámara digital SONY; luego se procesaron en blanco y negro, se obtuvo el negativo y finalmente se mejoró el brillo y contraste con el fin de tener mayor definición en la imagen. Se usó el procesador de imágenes GIMP que permite medir sobre la imagen procesada distancias, ángulos etc.. Usando una regla como referencia sobre la pantalla P se pudo calcular el espesor de la capa límite sobre la misma y usando la expresión anterior determinar el espesor de capa límite sobre cualquiera de las paredes de la cavidad. El error se pudo determinar aplicando propagación de errores a la expresión anterior

En cada experiencia se sacó una foto de referencia antes de calentar el sistema; el calentamiento se realizó con un valor de potencia que en el estado estacionario establecía un valor de temperatura en el centro de la pared caliente en el interior de la cavidad entre 30 y 35 °C. Durante toda la experiencia se siguió la evolución temporal de esta temperatura con una termocupla conectada a una datalogger. Se hicieron registros fotográficos a intervalos de tiempo  $\Delta t$ , lo que permitió determinar la evolución del espesor de capa límite hasta alcanzar el estado estacionario. En cada registro fotográfico se midieron las condiciones externas de temperatura, más precisamente las temperaturas en las superficies exteriores de la cavidad con una pistola infrarroja RAYTEK.  $\Delta t$  depende de la inercia térmica del sistema, por tanto es mayor en el caso del agua que en el aire. Se midieron los espesores de la capa límite generadas sobre la pared caliente, debajo de la superficie del techo y sobre la pared fría opuesta a aquella en que se realiza el calentamiento.

## RESULTADOS OBTENIDOS

### 1. AGUA

La potencia de calentamiento del local en las experiencias es de 12 W. Por trabajos anteriores (Vilte M., De Paul I., 2000) se sabe que la inercia del sistema es de aproximadamente 8 horas, por lo que los registros fotográficos se realizan a intervalos de 1 hora, durante aproximadamente 10 horas.

#### A. TECHO

Se visualiza que el espesor de la capa límite es más o menos regular a lo largo de la coordenada x, como se observa en la figura 3.

- A las 2 horas de iniciado el calentamiento se tienen las siguientes condiciones de temperatura:

$T_a=17.5$  °C,  $V_c=17.8$  V  $T_{inca}=27$ °C  
 $T_{friaex}=26$ °C  $T_{fonex} = T_{frenex} =27$ °C  $T_{techex}$   
 $=28$ °C  $T_{calex}=33$  °C, y se mide el siguiente valor de espesor de capa límite:

$$(0.89 \pm 0.07) \times 10^{-3} m .$$

- A las 8 horas de iniciado el calentamiento, en el estado estacionario, las condiciones térmicas son las siguientes:

$T_a=18$  °C,  $V_c=17.8$  V  
 $T_{calin}=33.9$ °C  $T_{friaex} = T_{fonex} = T_{frenex} =32$ °C  
 $T_{techex}=33$ °C  $T_{calex}=38$ °C y se mide el siguiente espesor::

$$\delta_{tech} = (1.6 \pm 0.1) \times 10^{-3} m$$

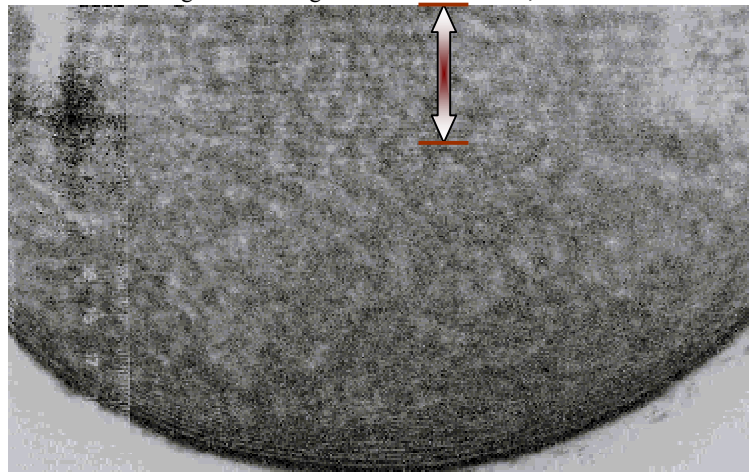


Figura 3. Espesor de capa límite en el techo de la cavidad con agua.

De este modo se evidenció en principio una evolución temporal del espesor de capa límite en el período de tiempo que va desde que desde que se inicia el calentamiento hasta que el sistema alcanza el estado estacionario. Esta variación temporal

fue verificada por medio de la repetición de la experiencia, en este caso las condiciones alcanzadas en el estado estacionario son las siguientes:

$$T_a=14.5\text{ °C}, V_c=17.8\text{ V} \quad T_{\text{calin}}=33.5\text{ °C} \quad T_{\text{friaex}} = T_{\text{fonex}} = T_{\text{firenex}} =29\text{ °C} \quad T_{\text{techex}}=30\text{ °C} \quad T_{\text{calex}}=38\text{ °C}$$

La variación temporal es la que se muestra en el gráfico de la Figura 4. Se puede observar un crecimiento en principio exponencial; el valor de la capa límite alcanzado en el estado estacionario es algo menor al anteriormente determinado, esto seguramente se debe a que se mide en un punto de la coordenada  $x=\text{constante}$  y se observa la evolución en el tiempo del espesor de la capa límite; por otro lado en esta última experiencia la temperatura ambiente era mucho más baja de aproximadamente  $14.5\text{ °C}$  en el laboratorio.

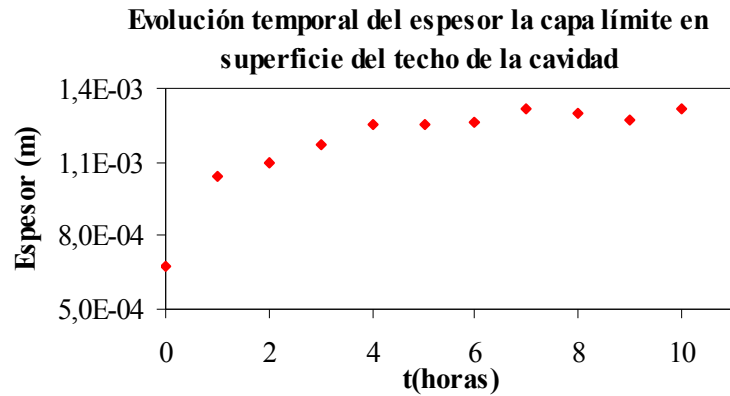
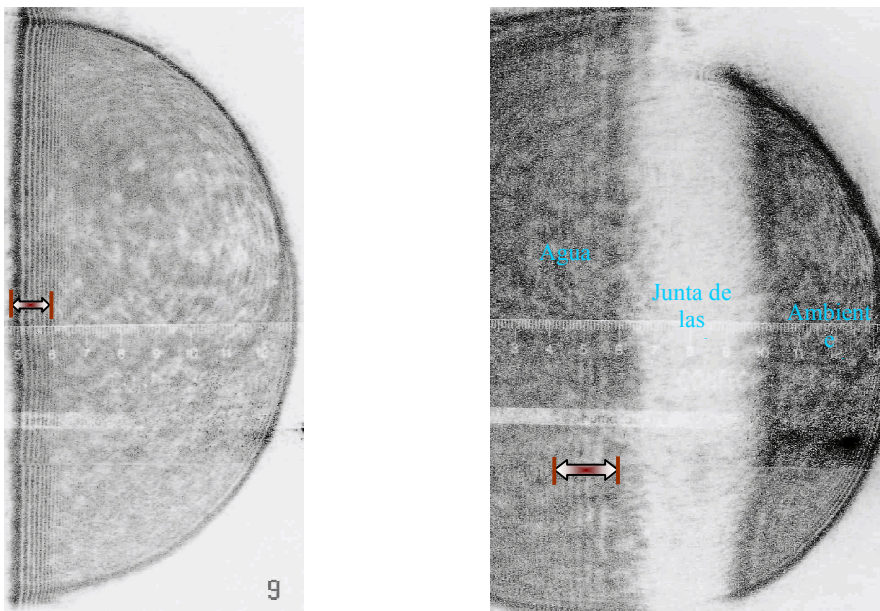


Figura 4. Crecimiento de la capa límite en el tiempo que el sistema alcanza el estado estacionario.

**B. PARED CALIENTE:**

La determinación del espesor en esta pared de la cavidad es la más precisa ya que la imagen obtenida sobre la pantalla es muy clara y definida. Se observa que el espesor es prácticamente el mismo a lo largo de la pared según se muestra en la figura 5. Además las franjas presentan un ancho definido y constante.



Figuras 5 y 6. Espesor de la capa límite en la pared caliente y en la pared fría de la cavidad con agua respectivamente.

Luego de 16 horas de calentamiento se establecen las siguientes condiciones de temperatura:

$$T_a=18\text{ °C}, V_c=17.8\text{ V} \quad T_{\text{friaex}}=32\text{ °C} \quad T_{\text{fonex}}=32\text{ °C} \quad T_{\text{firenex}}=32\text{ °C} \quad T_{\text{techex}}=33\text{ °C} \quad T_{\text{calex}}=38\text{ °C}$$

En este caso se midieron los valores de temperatura a diferentes alturas de la pared caliente:

$$T(x=0, y=5, z=0.5)=31.5\text{ °C}, \quad T(x=0, y=5, z=5)=T_{\text{calin}}=34.6\text{ °C}; \quad T(x=0, y=5, z=8)=35.8\text{ °C} \quad T(x=0, y=5, z=9.55)=37.1\text{ °C}$$

En estas condiciones el espesor de la capa límite la capa límite medido es:

$$\delta_{pc} = (0.96 \pm 0.07) \times 10^{-3} \text{ m}$$

### C. PARED FRÍA

En esta pared la capa límite tiene un espesor considerable y no se presenta tan definida como en el caso de la pared caliente según lo muestra la Figura 6; por otro lado la unión entre la pared fría y las del fondo o frente reflejan la luz del láser y dificultan la observación. El espesor se mide en las mismas condiciones de temperatura de la pared caliente.

$$\delta_{pf} = (1.14 \pm 0.08) \times 10^{-3} \text{ m}$$

La región izquierda de la figura 6 muestra la imagen de la capa límite sobre la pantalla. La zona blanquecina en la imagen corresponde a la unión entre las paredes fría y las del frente o el fondo y la de la derecha al aire exterior a la cavidad.

### 2. AIRE

En las experiencias con aire, primeramente se ensayaron distintos valores de potencia de calentamiento de modo de alcanzar un valor aproximado de temperatura en el centro de la pared caliente igual al caso en el que el fluido que convecta es agua. Así la potencia aplicada en las experiencias con aire es de 4.3 W. Estas mismas experiencias permitieron establecer la inercia del sistema. El tiempo que el sistema requiere luego de iniciado el calentamiento para alcanzar el estado estacionario es de alrededor de 2,5 horas como puede visualizarse en la evolución temporal de la temperatura registrada en el centro de la pared caliente (Figura 7).

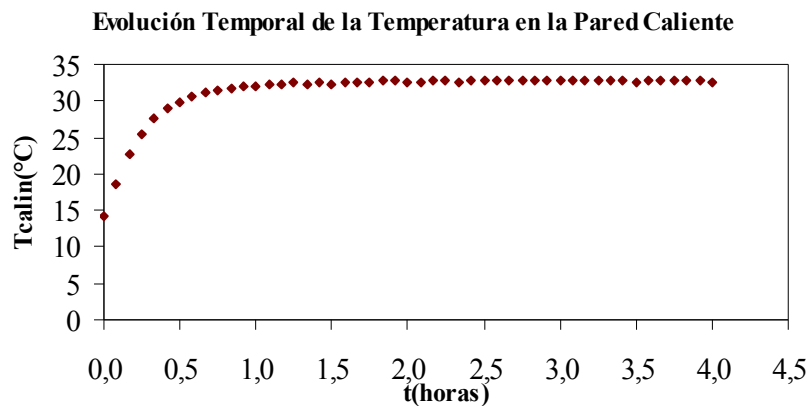


Figura 7. Evolución de la temperatura en la pared caliente en las experiencias con aire.

Con estos resultados en cada experiencia de medición de la capa límite se realiza a través de registros fotográficos que se toman cada 30 minutos, para cada registro se mide la temperatura en el centro de la pared caliente, las temperaturas en las superficies exteriores de la cavidad y la temperatura ambiente ( $T_a$ ).

### A. TECHO

En esta zona la capa límite observada es de un espesor variable con la posición sobre la coordenada horizontal  $x$ ; , cerca de la pared se diluye, mientras que en la zona central tiene un espesor apreciable. Posiblemente las zonas donde la capa límite resulta indistinguible, estén asociadas a zonas de desprendimiento de vórtices desde la superficie.

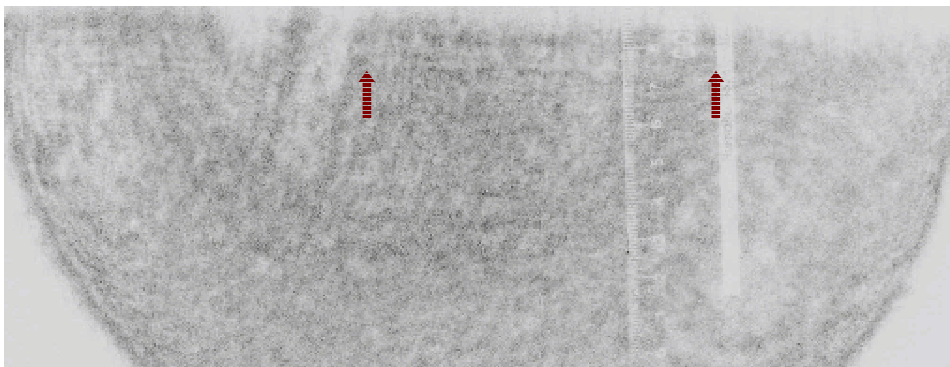


Figura 8. Capa límite en el techo en la cavidad con aire.

Las condiciones térmicas alcanzadas son:

$$T_a = 14 \text{ } ^\circ\text{C}, V_c = 10.5 \text{ V}; T_{calin} = 32.7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{friaex} = T_{fonex} = T_{frenex} = 18 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{techex} = 19 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{calex} = 36.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

En la figura 8 en la que se muestra la capa límite del techo, se indica con flechas las zonas en que se visualiza dicha capa. Sobre 6 registros fotográficos determinados a intervalos de 30 minutos en el lapso de 4 horas que supera ampliamente el tiempo en el que el sistema alcanza el estado estacionario, el espesor alcanza los siguientes valores:

$$\delta_{tech \min} = (0.73 \pm 0.08) \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\delta_{tech \max} = (0.88 \pm 0.09) \times 10^{-3} \text{ m}$$

Por lo que se concluye que el espesor de la capa límite en el techo no llega a ser de 1mm y presenta pequeñas oscilaciones en el tiempo.

## B. PARED CALIENTE:

- Primero se midió la capa límite en la zona por debajo de  $z=5$  cm. Se observa que el espesor de la capa límite es uniforme a lo largo de la pared en la zona indicada; de espesor casi constante según lo muestra la Figura 9.

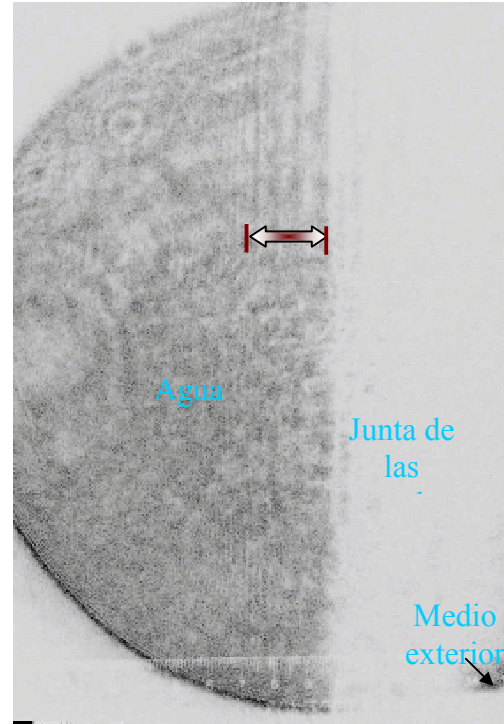
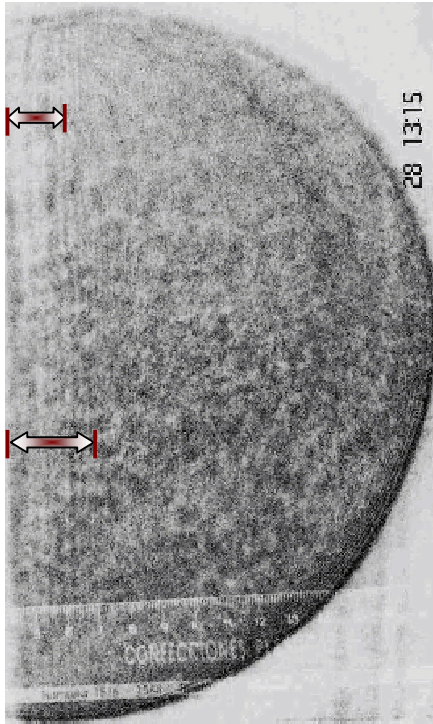


Figura 9. Capa límite en la pared caliente en la cavidad con aire. Figura 10. Capa límite en la pared fría en la cavidad con aire.

Las condiciones térmicas alcanzadas en el estado estacionario son:

$$T_a=12\text{ }^\circ\text{C}, V_c=10.5\text{ V} \quad T_{\text{calin}} = 30.5\text{ }^\circ\text{C} \quad T_{\text{friaex}}=T_{\text{fonex}}=T_{\text{frenex}}=16\text{ }^\circ\text{C} \quad T_{\text{techex}}=17\text{ }^\circ\text{C} \quad T_{\text{calex}}=33\text{ }^\circ\text{C}$$

El espesor de capa límite medido en el estado estacionario en el tramo indicado de la pared caliente es

$$\delta_{pc} = (1.48 \pm 0.08) \times 10^{-3}\text{ m}$$

- También se observó la capa límite sobre la misma pared caliente pero en la región adyacente al techo, aquí se observa variaciones en el espesor de la capa límite: en la zona próxima al techo y hasta 1 cm de esta superficie el espesor de capa límite tiene un valor casi constante de:

$$\delta_{pc \text{ min}} = (0.9 \pm 0.1) \times 10^{-3}\text{ m}$$

Luego en un tramo entre  $7 < z < 9$  la capa límite se diluye y para  $5 < z < 7$  luego reaparece con un espesor prácticamente constante de:

$$\delta_{pc \text{ max}} = (1.5 \pm 0.1) \times 10^{-3}\text{ m}$$

## C. PARED FRÍA

En esta pared se observa una capa límite uniforme de un espesor considerable en casi todo el tramo observado aunque existen pequeñas zonas en las que se diluye, pero en las zonas que aparece presenta un valor constante. La Figura 10 muestra la imagen de la capa límite en esta pared.

Las condiciones de temperaturas establecidas en el estado estacionario son:

$$T_a=13\text{ }^\circ\text{C}, V_c=10.5\text{ V}, ; T(x=0, y=5, z=0.5)=T_{\text{calin}}=30.9\text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{friaex}}=16\text{ }^\circ\text{C} \quad T_{\text{fonex}}=16\text{ }^\circ\text{C} \quad T_{\text{frenex}}=16\text{ }^\circ\text{C} \quad T_{\text{calex}}=17\text{ }^\circ\text{C} \quad T_{\text{techex}}=33\text{ }^\circ\text{C}$$

El espesor de capa límite medido en esta pared con 3 registros fotográficos en el estado estacionario es el siguiente:

$$\delta_{pf} = (1.73 \pm 0.07) \times 10^{-3}\text{ m}$$

## CONCLUSIONES

- Con la técnica empleada se pudo medir la capa límite térmica generada por convección natural en el interior de un recinto cúbico, empleando como fluidos convectivos agua y aire.
- Las experiencias realizadas confirman la hipótesis inicial, de que todos los espesores de capa límite medidos son menores que 0.005 m, que es la distancia respecto de la superficie del techo a la cual se colocó la termocupla para medir la temperatura del agua,  $T_a$ , a los efectos del cálculo de  $h$ . Por lo tanto es razonable pensar que la transferencia de calor desde el agua hacia al techo se hizo a una temperatura mayor, de acuerdo con el calor cedido por conducción a través del techo hacia el exterior, medido en las experiencias anteriores.
- En el techo se observa que el espesor de capa límite en el caso de convección en agua es regular y uniforme tanto en la coordenada espacial como en el tiempo. Se observa un crecimiento desde que se inicia el calentamiento hasta que alcanza el estacionario. En el caso del aire presenta oscilaciones en el tiempo y variaciones en la magnitud del espesor en la coordenada  $x$ , en determinadas zonas se diluye.
- En la pared caliente en ambos casos se observa una gran uniformidad del espesor de capa límite a lo largo de la coordenada vertical.
- Se plantea la necesidad de diseñar experiencias que permitan medir la temperatura del agua en contacto con la superficie empleando métodos ópticos, a fin de conocer la transferencia convectiva que realmente ocurre en el recinto.

## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- Ostrach, S. Natural convection in enclosures. *Advances in heat transfer* Vol 8, 161, (1972).
- De Vahl Davies, G. Natural convection of air in a square cavity: a bench mark numerical solution. *Int. Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 3, 249, (1983).
- Bohm, M. S. Experimental study of three dimensional natural convection at high Rayleigh number. *SERI Report*. (1985).
- Tric E. et al. A First incursion into the 3D structure of natural convection of air in a differentially heated cubic cavity, from accurate numerical solutions. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43 (2000) 4043-4056.
- W.J. Hiller et al. Visualization of 3D natural convection-comparison with numerical results. In: Ed. Esp. da Revista Brasileira de Ciencias Mecanicas Sao Paulo, Proc. of 11th ABCM Mech. Eng. Conf. Sao Paulo (Brasil), Dec. 1991, pp. 21-24
- Henkes, R.A.W.M., Lankhost, A. M. y Hoogendoorn, C. J., Structure of laminar natural convection flow in a square cavity heated from the side for infinitely large Rayleigh number. *Natural Convection in Enclosures, ASME, HTD – Vol 99, 9*, (1988).
- Khalighi, B., Braun, M. J., Freitas, C. J. (Editores) “*Flow visualization – 1989*”. *ASME Transactions*, (1989).
- Clausing, A. M., Lister, L. D., Waldvogel, J. M. Combined convection from isothermal cubical cavities with a variety of side-facing apertures. *Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.32, 8, 1565, (1989).
- Vilte M., De Paul I (2000). "Transferencia térmica por convección natural en un recinto cerrado en condiciones de equilibrio térmico y dinámico". *Avances de Energías Renovables y Medio Ambiente*, 4, 1, 2, 87-92.
- Vilte M., De Paul I (2002). "Convección natural en una cavidad: Comparación de una simulación numérica con resultados experimentales". *Avances de Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 6, Tomo II, Sección 08.19-24.
- Vilte M., De Paul I. "Cálculo de los coeficientes convectivos y balance termico en el interior de una cavidad cúbica". *Avances de Energías Renovables y Medio Ambiente*, revista de la Asociación Argentina de Energía Solar, Volumen 7, N° 2, Año 2003. ISSN 0329-5184. Sección 8, Pag. 19-23.
- Vilte M., De Paul I. "Convección natural en aire, medidas de temperatura y visualización del flujo". *Avances de Energías Renovables y Medio Ambiente*, revista de la Asociación Argentina de Energía Solar. Año 2004. ISSN 0329-5184. Volumen 8, N° 2, Pag. 25-30.
- Burmeister. “*Convective heat transfer*”. J. Wiley & Sons. Kansas. EE. UU.(1983)
- Merzkirch, W. “*Flow visualization*”. Academic Press Inc. (1974).
- H. W. Wong. “*Manual de formulas y Datos esenciales de TRANSFERENCIA DE CALOR PARA INGENIEROS*”. Geminis S.R. L. Buenos Aires. MCMLXXXI.
- Romero G. Tesis de Licenciatura “*Técnicas de Visualización de Flujos*”. Directora: Lic. Irene J. De Paul. Fac. de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de Salta. Marzo de 1992.
- Vest Ch. “*Holographic Interferometry*. J. Wiley & Sons. New York. EE. UU.(1979)

## ABSTRACT

The study of energy transfer processes by natural convection in a closed space heated from a lateral wall requires a detailed and precise analyse of the boundary layer in which the heat transfer is really done. In this work the results of the measurements of the layer thickness over walls and roof of the small local are presented. Water and air were used as convective fluids, taking the surface temperature as parameter. The optical method of Schlieren was used. The values of the thickness obtained are around few millimeters, observing the temporal evolution of the layer during the heating.