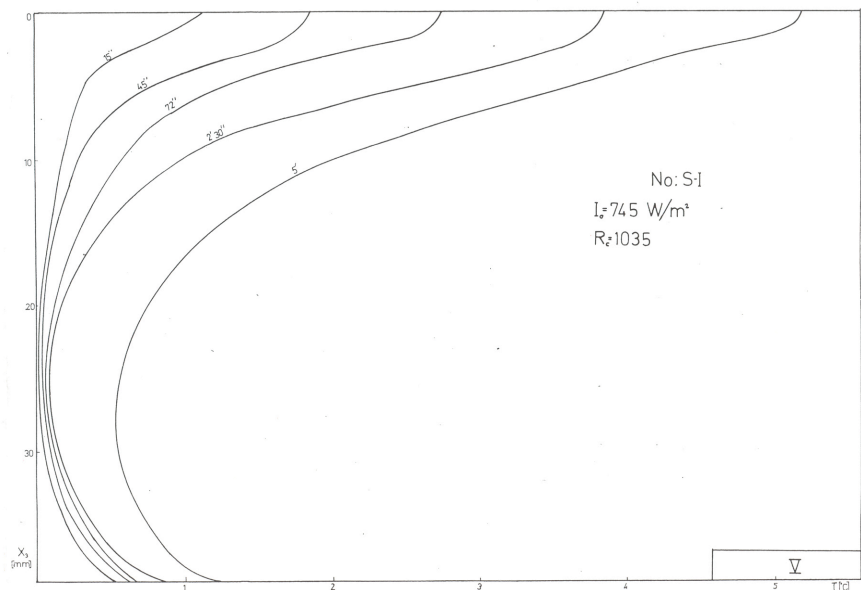


## CAPÍTULO 7

## EVALUACIÓN DE LA CAPA LÍMITE TÉRMICA

## 7.1 Medición de la capa límite térmica

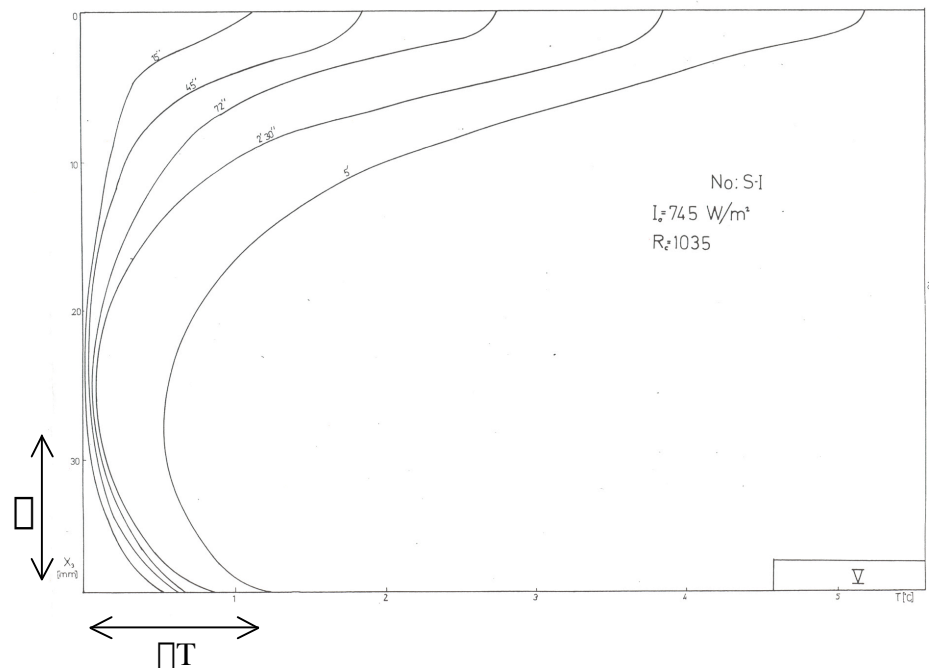
Con una serie de gráficas que representan la distribución de temperaturas en función de la profundidad del contenedor del fluido, obtenidas de los experimentos realizados con anterioridad y descritos en el capítulo 5, se procedió a medir el grosor de la capa límite térmica para cada una de dichas gráficas.



**Figura7.1** Gráfica de distribución de temperaturas S-I [2]

Primero se midió el cambio de temperatura  $\Delta T$  en el eje de las abscisas de cada una de las curvas que representan diferentes

distribuciones de temperatura en diferentes instantes. Luego, se obtiene el grosor de la capa límite térmica que es la distancia de el fondo del estanque a el punto tangente de la curva. Esta tangente a la curva es paralela al eje de las ordenadas. Finalmente, se encontraron los diferenciales de temperatura  $\partial T$  y profundidad  $\partial x$ , evaluados en  $x=0$  (en el fondo del estanque), para posteriormente con ellos se obtenga el coeficiente de transferencia de calor por convección y los números de Nusselt, Grashof y Raileigh.

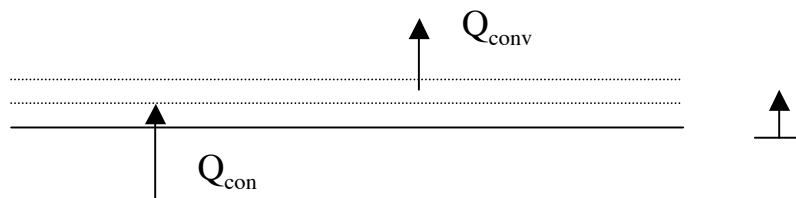


**Figura 7.2.** Ejemplo de la medida del grosor de la capa límite térmica y su diferencial de temperatura para la curva a los 5".

En el análisis de transferencia de calor sobre la superficie del fluido, se tomó un volumen de control del cual obtenemos la siguiente ecuación:

$$Q_{\text{cond}} = Q_{\text{conv}} \quad (7.1)$$

El análisis del volumen de control se realiza en el fluido, a través de la placa que contiene el fluido se tiene un régimen de conducción que es igual al régimen de convección en el fluido, es decir, la transferencia de calor por conducción que va entrando al fluido se convierte en transferencia de calor por convección dentro del fluido.



**Figura 7.3.** Transferencia de calor en el fluido

La ecuación anterior se puede representar por:

$$Ak \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = Ah(T_s - T) \quad (7.2)$$

Finalmente, de esta forma podemos encontrar el coeficiente de transferencia de calor por convección empleando un coeficiente de conducción evaluado a la temperatura de 21°C del agua,

$$h = \frac{k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0}}{T_s - T} \quad (7.3)$$

Las propiedades del agua utilizadas para encontrar los números de Grashof, Nusselt y Raileigh fueron evaluadas a 21°C,

$$k=0.6046\text{W/m}^\circ\text{C}$$

$$\nu=96.5\text{E-}8\text{m}^2/\text{s}$$

$$\beta=216.73\text{E-}6/\text{K}$$

$$\text{Pr}=6.658$$

La tabla 7.1 presenta los resultados obtenidos de la evaluación de la capa límite térmica en los datos experimentales.

Tabla 7.1 Resultados de la evaluación de la capa límite térmica

	Tiempo	$\Delta T$ [°C]	$\Delta$ [mm]	dT [°C]	dx [mm]	dT/dx [°C/m]
<b>S-I</b>	72'	0.6145	15.42	0.6626	6.25	106.02
	2' 30"	0.771	14.86	0.8554	3.194	267.81
	5'	0.6988	12.5	1.204	3.88	310.31
<b>S-II</b>	3'	0.1	7.013	0.975	35.84	27.20
	10'	0.225	7.013	3.65	55.8	65.41
	20"	0.2	5.065	4.05	59.09	68.54
<b>S-III</b>	1' 30"	0.33	15.77	1.51	19.74	76.49
	2' 30"	0.487	11.66	1.92	26.92	71.32
	5'	0.33	9.74	3.74	62.4	59.94
<b>S-IV</b>	30"	0.75	17.65	0.822	3.08	266.88
	1' 15"	0.759	18.38	1	6.03	165.84
	1' 30"	0.721	17.2	1.05	6.76	155.33
	2' 05"	0.772	16.76	1.2	5.88	204.08
<b>S-V</b>	60"	0.886	17.53	1.974	12.46	158.43
	1' 35"	1.012	13.11	2.43	11.81	205.76
	2'	1.113	15.97	1.088	13.11	82.99
<b>SG-I</b>	60"	0.43	20	0.506	8.97	56.41
	3' 15"	0.481	18.2	0.658	8.71	75.55
	10'	0.582	11.79	1.49	15.64	95.27

	Tiempo	h [W/m <sup>2</sup> °C]	Gr	Nusselt	Ra	ln(Ra)	ln(Nu)
<b>S-I</b>	72'	104.31	5144.09	2.66	34249	10.441	0.978
	2' 30"	210.01	5776.23	5.16	38458	10.557	1.641
	5'	268.48	3116.14	5.55	20747	9.940	1.714
<b>S-II</b>	3'	164.48	78.75	1.91	524	6.262	0.646
	10'	175.77	177.19	2.04	1180	7.073	0.712
	20"	207.19	59.33	1.74	395	5.979	0.551
<b>S-III</b>	1' 30"	140.15	2954.90	3.66	19674	9.887	1.296
	2' 30"	88.55	1762.62	1.71	11736	9.370	0.535
	5'	109.81	696.18	1.77	4635.20	8.441	0.570
<b>S-IV</b>	30"	215.14	9415.18	6.28	62686	11.046	1.837
	1' 15"	132.10	10759.99	4.02	71640	11.179	1.390
	1' 30"	130.25	8376.33	3.71	55770	10.929	1.310
	2' 05"	159.83	8297.99	4.43	55248	10.920	1.489
<b>S-V</b>	60"	108.11	10897.15	3.13	72553	11.192	1.142
	1' 35"	122.93	5206.21	2.67	34663	10.453	0.980
	2'	45.08	10350.07	1.19	68911	11.141	0.175
<b>SG-I</b>	60"	79.32	7854.02	2.62	52292	10.865	0.965
	3' 15"	94.96	6620.53	2.86	44079	10.694	1.050
	10'	98.97	2177.70	1.93	14499	9.582	0.657

En la tabla 7.1 también se observa que se obtuvo apartir del grosor de capa límite y la diferencia de temperatura, el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección (h) para posteriormente obtener los números de Nusselt, Grashof y Raileigh.

De Restrepo y Glicksman (1974) se tiene una serie de datos de la longitud de la capa límite térmica en función de Rayleigh. Los resultados se presentan en la tabla 7.2.

**Tabla 7.2.** Grosor de la capa límite térmica según Restrepo y Glicksman (1974), [13]

<i>Lados fríos</i>		<i>Lados calientes</i>		<i>Extensiones aisladas</i>	
$\delta$ [in]	Ra	$\delta$ [in]	Ra	$\delta$ [in]	Ra
0.83	1.66E6	0.81	2.02E6	0.94	2.42E6
0.82	2.12E6	0.75	2.44E6	0.81	2.92E6
0.80	2.58E6	0.68	2.70E6		
0.76	2.93E6	0.58	2.86E6		
0.68	3.19E6	0.55	2.81E6		

En los datos mostrados se tiene Rayleigh en función de la longitud característica,  $L_c$ , tomada por el autor.

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T \frac{L^3}{8}}{\nu^2} \tag{7.1}$$

donde,  $L_c=7$  pulgadas.

Entonces, apartir de la ecuación mostrada podemos encontrar el factor,  $\frac{g\Delta T}{\Gamma}$ , que utilizaremos para encontrar Rayleigh usando el grosor de la capa límite térmica como longitud característica. De esta forma se tiene la siguiente ecuación para Rayleigh modificado,  $Ra_{\Gamma}$ ;

$$Ra_{\Gamma} = \frac{g\Delta T\Gamma^3}{\Gamma} \quad (7.2)$$

Ahora a partir de nuestros datos se desarrolla la tabla 7.3, tomando en cuenta los tres casos, lados fríos, lados calientes y extensiones aisladas, considerados por Restrepo y Glicksman [13].

**Tabla 7.3.** Capa límite térmica en función de  $Ra_{\Gamma}$ , según Restrepo y Glicksman (1974)

$\Gamma$ [m]	$Ra_{\Gamma}$
0.02108	22137.99
0.02083	27262.98
0.02032	30809.56
0.01930	29998.83
0.01727	23394.47
0.02057	25038.15
0.01905	24008.75
0.01727	19800.97
0.01473	13015.05
0.01397	10904.11
0.02388	46880.78
0.02057	36193.77

De forma similar se procedió con los datos experimentales para obtener los datos mostrados en la tabla 7.4.

**Tabla 7.4.** Capa límite térmica en función de  $Ra_{\square}$ , con los datos experimentales

$\square[m]$	$Ra_{\square}$
0.01542	34249
0.01486	38458
0.0125	20747
0.007013	524
0.007013	1180
0.005065	395
0.01577	19674
0.01166	11736
0.00974	4635
0.01765	62686
0.01838	71640
0.0172	55770
0.01676	55248
0.01753	72553
0.01311	34663
0.01597	68911
0.02	52292
0.0182	44079
0.01179	14499

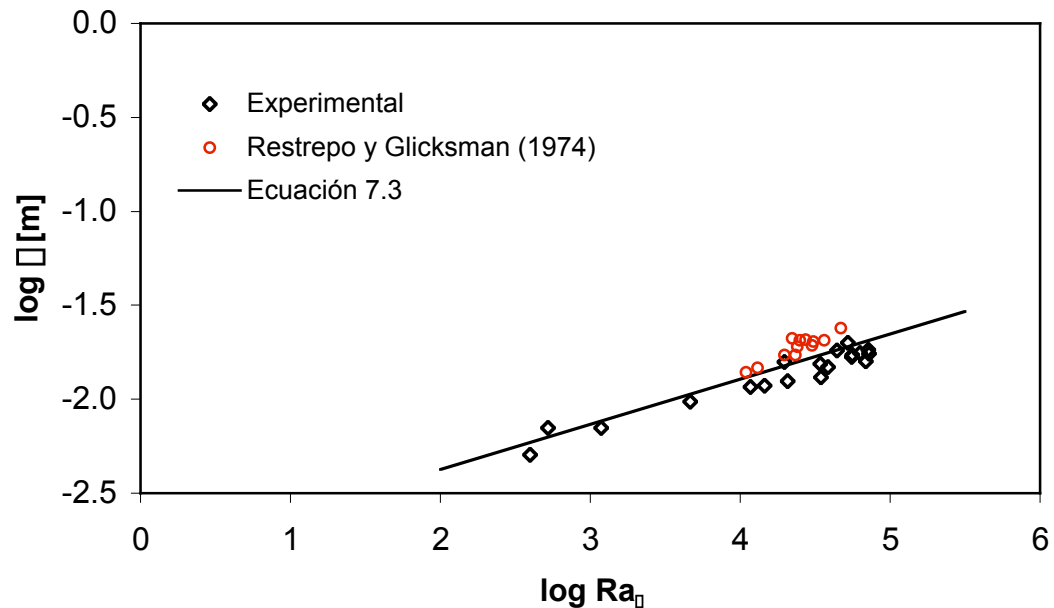
A través de un programa de ajuste de curvas se desarrollo la siguiente ecuación para ambos datos, experimental y según Restrepo y Glicksman (1974),



$$\delta = 0.0014 Ra_{\delta}^{0.24} \quad (7.3)$$

## 7.2. Representación gráfica de los grosores de la capa límite térmica

La figura 7.2 presenta la gráfica que se obtiene al comparar los grosores de la capa límite térmica de los datos experimentales y según Restrepo y Glicksman (1974)



**Figura 7.4.** Comparación de  $\delta=f(Ra_{\delta})$  de los datos experimentales y según Restrepo y Glicksman (1974)

Usando el programa de ajuste de curvas se obtuvo también la ecuación para  $\Delta = f(Ra_{\Delta})$  en los datos experimental y en los datos según Restrepo y Glicksman(1974). En los datos experimentales se tiene:

$$\Delta = 0.00149 Ra_{\Delta}^{0.222} \quad (7.4)$$

mientras que en los datos de Restrepo y Glicksman tenemos:

$$\Delta = 0.00053 Ra_{\Delta}^{0.35} \quad (7.5)$$

De esta forma tenemos tres ecuaciones adimensionales en términos del grosor de la capa límite térmica y Rayleigh modificado (Rayleigh con longitud característica  $\Delta$ ). En el capítulo siguiente se desarrollara la ecuación adimensional para el fenómeno de transferencia de calor en base a las ecuaciones anteriormente planteadas.