

MERCOFRIO 2000 - CONGRESO DE AR CONDICIONADO, REFRIGERACAO, AQUECIMENTO E VENTILACAO DO MERCOSUL

MODELO PARA EL CALCULO DE LA PERDIDA DE CALOR POR UNA VENTANA

Dr. Adelqui Fissore Sch. - afissore@udec.cl

Universidad de Concepción, Fac. de Ingeniería. - Depto. Ing. Mecánica
Casilla 53-C, Concepción, Chile

M.Sc. Cristian Cuevas B. – ccuevas@udec.cl

***Resumen.** En el presente artículo se presenta un modelo semi - empírico para calcular el calor por convección y radiación de baja longitud de onda por el lado interior de una ventana, donde se incluye el efecto de cortinas o persianas. Con este modelo, es posible calcular el coeficiente convectivo y la temperatura del núcleo de aire existente en el espacio entre la persiana y el vidrio. La cortina fue simulada mediante una lámina de papel, debido a la baja inercia térmica que esta presenta. El modelo se basa en datos experimentales obtenidos para 4 separaciones diferentes entre el papel y la ventana. También se utilizaron resultados de una simulación numérica aplicada a este problema.*

***Palabras claves:** Ventanas, Diseño térmico construcciones, Calefacción*

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se enmarca dentro de un proyecto de investigación cuyo objetivo es crear un modelo detallado confiable para el cálculo del balance térmico de una ventana. Específicamente, en este artículo se presenta un modelo para calcular la pérdida de calor (en invierno) por convección y radiación de gran longitud de onda desde un recinto a través de la ventana, donde se incluye el efecto de los elementos de protección interior como cortina o persianas. El problema no se puede resolver sólo en forma teórica, ya que existen algunos parámetros como los coeficientes convectivos y el flujo de aire entre el vidrio y la cortina, que deben incluirse en forma de modelos semi empíricos.

En la literatura, existen una serie de estudios para obtener el coeficiente de transferencia de calor por convección en una placa plana (Churchill 1975, AHSRAE 1997) pero estos no son aplicables directamente al presente problema, sino que sólo serán utilizados como referencia. Los trabajos relacionados con coeficientes convectivos en recintos acondicionados (Awibi & Haltton 1999, Khalifa 1990, Daskalaki 1994, Peterson 1995) se basan principalmente en el cálculo de coeficientes convectivos en las paredes de un recinto, pero no están especialmente relacionados con la ventana. Los trabajos relacionados directamente con la ventana (Simko et al 1999, Zhao et al 1999) se preocupan en su mayoría de resolver el problema de la convección entre 2 vidrios y, en general, no se ocupan del efecto de las cortinas.

Ultimamente han aparecido en la literatura una serie de artículos directamente relacionados con la convección en una ventana y su relación con las cortinas (Harrison & Oosthuizen 1999, Larson et al 1999, Medved & Novak 1998), estos trabajos están basados en

simulaciones computacionales respaldadas por mediciones en laboratorio; sin embargo, aún se tratan de trabajos parciales o que se enfocan en problemas específicos.

Luego, después de la revisión de la literatura, queda claro que no es posible con la información existente, construir un modelo como el que se desea (Beausoleil & Strachan 1999); por lo tanto, se programó este proyecto de investigación que permite obtener en forma empírica estos coeficientes indicados anteriormente. El presente informe entrega los primeros resultados de esta investigación, que aunque todavía no permiten obtener un modelo general; si permite tener un modelo de aplicación restringido, permitiendo además darse cuenta de cual es la problemática a resolver y enfocar el trabajo a futuro.

2. DESCRIPCION DEL MODELO

La Fig. 1 muestra un esquema de las variables incluidas en el balance térmico de un vidrio de una ventana, donde se incluye además una superficie que simula el efecto de una cortina. El balance térmico del vidrio se puede expresar mediante la Ec. (1).

$$h_{c1}(T_v - T_{ae}) + \frac{\sigma(T_v^4 - T_{ose}^4)}{\frac{1}{\epsilon_v} + \frac{A_v}{A_{ose}} \frac{(1 - \epsilon_{ose})}{\epsilon_{ose}}} = h_{c2}(T_{av} - T_v) + \frac{\sigma(T_{mrt1}^4 - T_v^4)}{\frac{1}{\epsilon_v} + \frac{A_v}{A_1} \frac{(1 - \epsilon_1)}{\epsilon_1}} \quad (1)$$

Donde: T representa las temperaturas [K], hc los coeficientes convectivos [W/m^2K], A las áreas [m^2], ϵ las emisividades y σ la constante de Stefan-Boltzman. En los sub índices, v representana a la ventana, c a la cortina, av al espacio de aire entre la ventana y la cortina, ae al aire exterior, ai al aire interior, ose a las superficies exteriores que intercambian calor por radiación con la ventana y osi a las superficies interiores que intercambian calor por radiación con la cortina. T_{mrt1} se refiere a la temperatura media radiante de la superficie compuesta por la cortina y el marco de la ventana y que intercambia calor por radiación con la ventana.

La ecuación anterior presenta 3 incógnitas, que son: T_v , T_{av} y T_{mrt1} . Luego es necesario plantear 2 ecuaciones más para cerrar el sistema, estas son la ecuación del balance térmico de la cortina (Ec. 2) y de la masa de aire que está contenido entre la ventana y la persiana (Ec. 3).

$$h_{c3}(T_c - T_{av}) + \frac{\sigma(T_c^4 - T_{mrt2}^4)}{\frac{1}{\epsilon_c} + \frac{A_c}{A_2} \frac{(1 - \epsilon_2)}{\epsilon_2}} = h_{c4}(T_{ai} - T_c) + \frac{\sigma(T_{mrt3}^4 - T_c^4)}{\frac{1}{\epsilon_c} + \frac{A_c}{A_3} \frac{(1 - \epsilon_3)}{\epsilon_3}} \quad (2)$$

$$h_{c3}(T_c - T_{av}) = h_{c2}(T_{ai} - T_v) + \dot{m}c_p(T_e - T_s) \quad (3)$$

Donde: \dot{m} es el flujo de aire que ingresa a la zona comprendida entre la persiana y la cortina [Kg/s] y T_e y T_s son las temperaturas promedio del aire que ingresa y sale de esta zona.

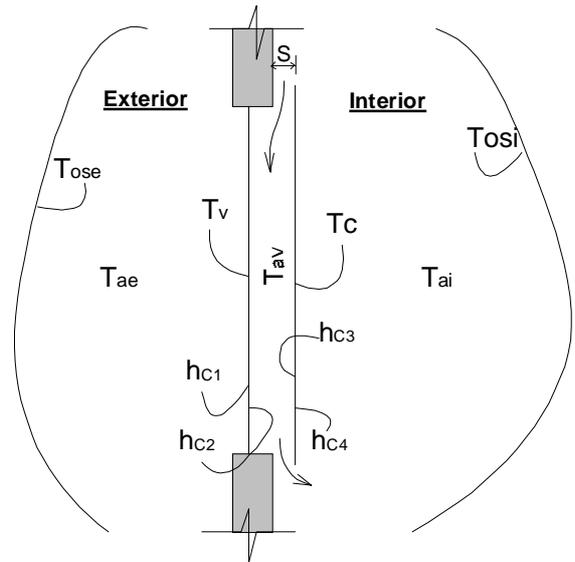


Figura 1. Variables del balance térmico de un vidrio

La temperatura T_{mrt1} estará principalmente influenciada por la temperatura de la cortina, pero también estará influenciada por las temperaturas del marco de la ventana. Por su parte, T_{mrt2} dependerá principalmente de la temperatura de la ventana y en forma secundaria de la temperatura de este mismo marco de la ventana. Finalmente, T_{mrt3} estará influenciada por todas las paredes del recinto, las cuales deberán ser calculadas a partir de un balance térmico del recinto en régimen transiente. En este artículo, nuestro interés es concentrarse en el efecto de una cortina en el balance térmico de una ventana, por lo que para simplificar el análisis supondremos que $T_{mrt1} = T_C$, $T_{mrt2} = T_V$ y $T_{mrt3} = T_{ai}$. Sin embargo, se debe tener presente que estas aproximaciones no son válidas si se desea analizar una situación en particular.

El sistema de ecuaciones formado por las Ec. (1), (2) y (3) se debe resolver en forma simultánea para calcular T_V , T_C y \dot{m} . Sin embargo, existen una serie de otros parámetros como h_{c2} , h_{c3} , \dot{m} y T_S , los cuales son bastante difíciles de estimar en forma teórica y deben ser estimados en forma empírica. Se ha demostrado que si no se tiene una buena estimación de estos parámetros, los resultados pueden ser bastante deficientes. Por tal motivo, se ha realizado una investigación basada en trabajo experimental en laboratorio y en análisis con un programa de resolución numérica de mecánica de fluidos, para poder determinar correlaciones para estos parámetros faltantes. A continuación, se explicará cada uno de estos trabajos; sin embargo, se hará en forma muy breve para poder concentrarse en los resultados y las correlaciones finalmente obtenidas.

3. ANALISIS EXPERIMENTAL

Las experiencias se realizaron en una cámara climática, dentro de la cual se instaló una cámara interior (de 4,5 x 3,2 m de base por 2,2 m de altura) que simulaba la oficina o recinto en donde se encontraba la ventana. La ventana se simuló mediante una placa de aluminio de 0,85 m de ancho por 1 m de alto y 6 mm de espesor. La placa fue pulida de tal forma de obtener un bajo índice de emisividad (aproximadamente $\varepsilon=0.03$). La Fig. 2 muestra una sección de la cámara de ensayos. Mayores detalles de esta investigación experimental se pueden encontrar en Cuevas (1999) y Cuevas y Fissore (1999).

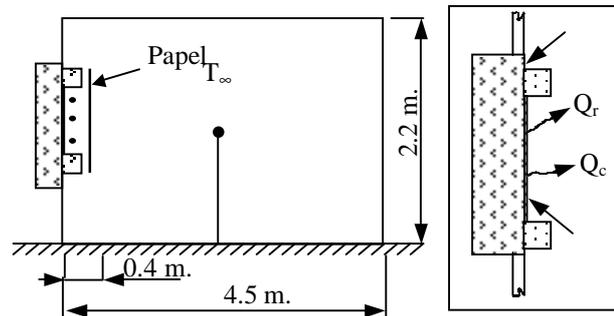


Figura 2. Cámara climática y modelo experimental

Las experiencias consistían en enfriar la placa de aluminio para después dejarla calentarse en forma natural con el medio. Midiendo la temperatura de la placa en función del tiempo, se puede obtener el calor ganado por la placa de aluminio y de esta forma calcular los coeficientes convectivos involucrados.

Para poder limitar los errores de medición, dentro de valores aceptables, se ha debido trabajar con una placa de aluminio pulida de muy baja emisividad, lo cual ha tenido la desventaja de que se ha debido trabajar con intercambios por radiación que no corresponden a la realidad. Sin embargo, esto no es grave, ya que el intercambio de calor por radiación es un fenómeno bastante conocido y se puede agregar posteriormente al modelo en forma teórica.

Se realizaron ensayos para todo el rango normal de diferencia de temperaturas que se encuentra en este tipo de aplicación y para diferentes tipos de cortinas e instalación. Las configuraciones ensayadas son las siguientes:

- Vidrio sin marco.
- Vidrio con marco.
- Vidrio con marco y lámina de papel (como se muestra en Fig. 3) para diferentes separaciones de la lámina de papel con respecto al marco.
- Diferentes tipos de cortinas y persianas. Las persianas se instalaron tanto dentro como fuera del marco.

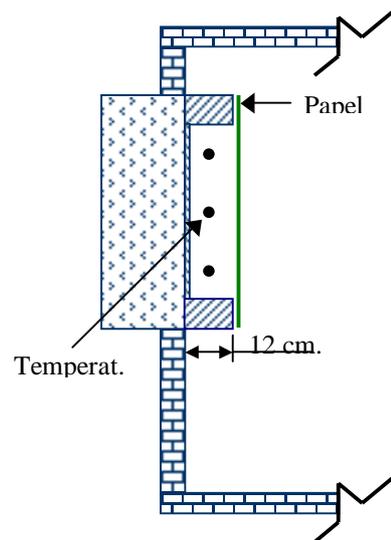


Figura 3. Configuración ensayada con lámina de papel.

Los resultados de estas experiencias se presentarán más adelante. Antes de esto, se mostraran algunos resultados de los cálculos por volúmenes finitos, ya que esto nos entregará información muy útil para el análisis de los presentes resultados experimentales.

4. ANALISIS MEDIANTE RESOLUCION NUMERICA DE LAS ECUACIONES DE MECANICA DE FLUIDOS.

El análisis se hace utilizando un programa comercial (FLUENT). Hasta el momento sólo se ha utilizado el programa para comprender mejor los fenómenos que suceden, ya que la información que entrega contiene una mayor cantidad de detalle que las mediciones. Posteriormente, se espera aplicar los resultados del análisis mediante volúmenes finitos para mejorar y generalizar el modelo que aquí se plantea.

Primero se realizó una validación de los resultados del programa, comparándolo con los resultados de las mediciones. Las diferencias en el flujo de calor obtenido por el programa y por las mediciones eran del orden de 10%, con diferencias máximas del orden de 20%.

A continuación se discuten algunos de los resultados obtenidos (Figuroa 2000). En la Fig. 4 se muestran los campos de velocidades en el sector ubicado entre la ventana, el marco y la lámina de papel (simulando la cortina) para el caso en que la separación entre el papel y el marco es de 1cm y para el caso en que la separación es de 5 cm. En este caso las simulaciones se han realizado con la ventana a una temperatura mayor que la habitación (ya que así se realizaron los ensayos del laboratorio para evitar los problemas de condensación del vapor de agua del aire); sin embargo, el análisis puede ser fácilmente extrapolable al caso con la ventana fría. En la Fig. 4 se puede observar claramente que para la separación de 1 cm el flujo se comporta muy similar al flujo en una cavidad, aunque con una perturbación en las zonas de entrada y salida. Cuando el papel se aleja del marco,

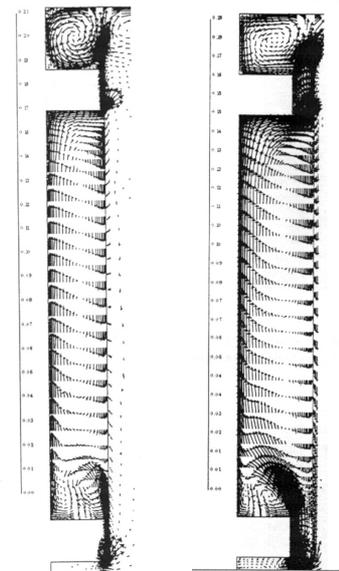


Figura 4. Vectores de velocidad para 2 de los casos estudiados

los perfiles de velocidades se deforman y se comportan mas bien como el flujo normal que se tiene en la ventana con marco sin lámina de papel.

La Fig. 5 muestra los perfiles de temperatura para estas mismas simulaciones. El color rojo indica la temperatura de la ventana, que para las 2 simulaciones es de 20,5 y 22.5°C respectivamente. El color azul corresponde a la temperatura del centro del recinto que corresponde a 13.8 y 14.1°C para cada una de las experiencias. Como se observa, para la separación de 1 cm se aprecia un campo de temperaturas similar al que se podría encontrar en una cavidad; sin embargo, para el caso de la separación de 5 cm, la temperatura en la cavidad (fuera de la capa límite del flujo cerca de la ventana) es bastante homogénea y prácticamente igual a la temperatura del recinto fuera de la cavidad.

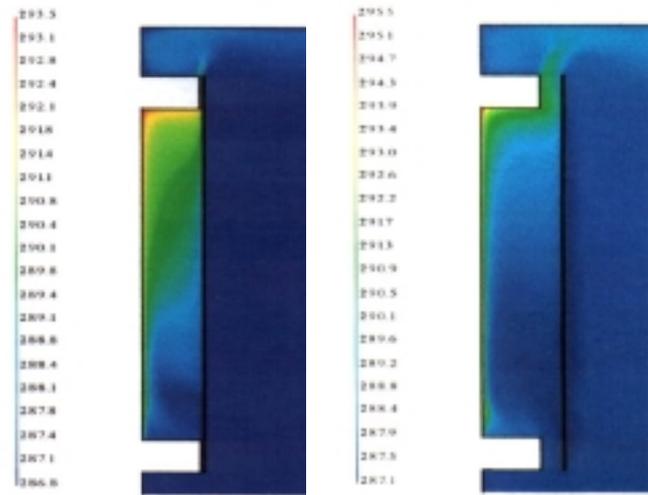


Figura 5. Perfiles de temperatura para 2 simulaciones.

Se puede observar además que, si bien es cierto, la temperatura del aire que ingresa a la cavidad es muy similar a la temperatura fuera de la cavidad (del recinto), la temperatura del aire que sale, no esta relacionada con ninguna temperatura que sea relativamente fácil de identificar (como por ejemplo la temperatura media de la cavidad), por lo que es posible darse cuenta desde ya, que el cálculo de esta temperatura (T_{av} para la Ec. 3) podría ser bastante complejo.

5. ANALISIS DE RESULTADOS

5.1. Cálculo de la temperatura del espacio de aire entre el vidrio y la cortina

Tanto los resultados experimentales como los de la simulación muestran que, por un lado, para la mayor cantidad de los casos, la diferencia de temperaturas entre el recinto y la zona entre la cortina y el vidrio es muy pequeña. Por otro lado, se ha indicado también que sería bastante difícil tratar de obtener una temperatura representativa para el aire que sale del sector de la cortina; por lo tanto, se desechó la idea de utilizar la Ec. 3 para calcular la temperatura de esta zona y en su lugar, se propone una ecuación puramente empírica para el cálculo de T_{av} . La ecuación obtenida a partir de los resultados experimentales es:

$$T_{av} - T_{ai} = (T_v - T_{ai}) \frac{1}{2 + 1801S^{1.425}} \quad (4)$$

Donde S es la separación entre el papel y el marco de la ventana. En los ensayos experimentales se consideraron valores de S entre 1 a 8 cm. La Fig. 6 muestra la calidad del ajuste obtenido, en función de la variable adimensional X [$X = (T_{av} - T_{ai}) / (T_v - T_{ai})$]. En el gráfico se muestra la Ec. 4 y los valores obtenidos de las mediciones. En el gráfico se muestran 34 puntos de medición, pero no se observan claramente, ya que muchos de ellos están superpuestos. La desviación promedio entre la ecuación y los datos experimentales es de $X=0.012$.

5.2. Cálculo de los coeficientes convectivos para el vidrio

En la literatura especializada se encuentran correlaciones de la siguiente forma:

$$\text{Placa plana: } Nu_L = C_1 + C_2 Gr_L^{0.25} \quad (5)$$

$$\text{Cavidad: } Nu_b = C_1 Gr_b^{1/3} \left(\frac{L}{b} \right)^{-0.11} \quad (6)$$

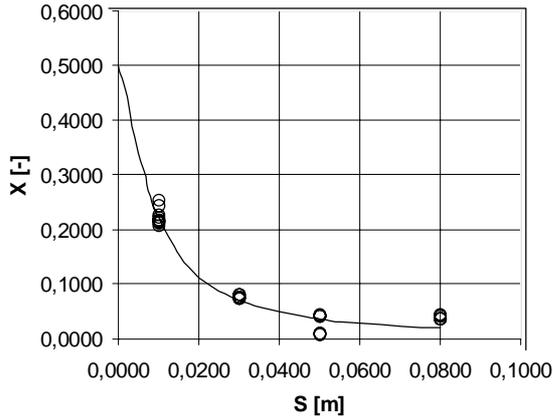


Figura 6. Relación entre la Ec. (4) y los valores medidos

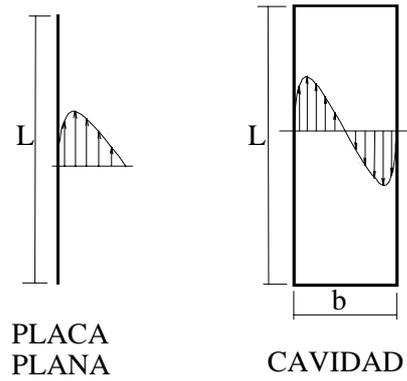


Figura 7. Definiciones para el cálculo de Nu

En el presente trabajo se utilizó una ecuación de la forma de la Ec. (5) tanto para el vidrio sin marco y sin cortinas como para el vidrio con marco y sin cortinas.

Para el caso con cortina, del análisis por el método de los volúmenes finitos se pudo constatar de que para separaciones pequeñas la situación era más parecida a la circulación en una cavidad; y para separaciones grandes, la situación se aproximaba a una placa plana. En el presente trabajo se decidió que la solución se obtendrá mediante una interpolación entre el h calculado como placa plana y el h calculado como cavidad. Las correlaciones obtenidas a partir de los resultados experimentales son las siguientes:

$$\text{Ventana sin marco y sin cortina: } Nu_L = 0.68 + 0.59 Gr_L^{0.25} \quad (7)$$

$$\text{Ventana con marco y sin cortina: } Nu_L = 0.68 + 0.522 Gr_L^{0.25} \quad (8)$$

Ventana con marco y con cortina:

$$\text{si } s < 0.06, \quad h = h_L + (h_b - h_L) \left(\frac{1}{0.958 + 74325 S^{3.55}} \right) + [5.06 \times 10^{-8} Gr_b - 0.126] \quad (9)$$

$$\text{si } s > 0.06, \quad h = h_L$$

Donde $h_L = \frac{Nu_L \lambda}{L}$ y Nu_L se obtiene de la Ec.7. Además, $h_b = \frac{2\lambda Nu_b}{b}$ y Nu_b se obtiene de la Ec. 10

$$Nu_b = 0.076 Gr_b^{1/3} \left(\frac{L}{b} \right)^{-0.11} \quad (10)$$

En el cálculo de Gr_L se utiliza L como longitud característica (Ver Fig. 7) y $T_V - T_{aire}$ como diferencia de temperaturas. Para el cálculo de Gr_b se utiliza b como longitud característica y la diferencia entre las temperaturas superficiales como ΔT . Debido a esta última definición, se ha debido agregar el factor “2” para el cálculo de h_b y poder compatibilizar así el hecho de que para el cálculo del calor transferido utilizando el h de la ecuación 9, se utilice la diferencia de temperatura entre la superficie y el aire como ΔT . Luego, en todos los casos, $q [W/m^2]$ se calcula como:

$$q_{conveccion} = h(T_{superficie} - T_{aire}) \quad (11)$$

Parece lógico que el parámetro $(h - h_L)/(h_b - h_L)$ sea una función de S en la Ec. (9). Sin embargo, al analizar los residuos se encontró que estos además estaban relacionados con el Gr_b , lo cual no tiene una explicación demasiado clara; sin embargo, se decidió agregar una corrección en función de Gr_b a la Ec. (9). En todo caso, la magnitud de esta corrección no es muy grande. En los estudios posteriores se debería analizar por que se hace necesaria esta corrección.

La dispersión promedio entre los valores medidos y los calculados por la Ec. (9) es del orden de 1.4% y para la Ec. (8) es de 1,2%. Sin embargo, el análisis de error de las experiencias indica que el error para el cálculo del h para la mayoría de los casos es del orden del 20% (Cuevas 1999). Esta diferencia se debe en parte a la existencia de errores sistemáticos y en parte a una sobre estimación del error teórico.

5.3. Cálculo de los coeficientes convectivos para la cortina

Como la transferencia de calor por convección en la cortina misma no es muy importante en el balance térmico de la ventana (debido a la pequeña diferencia entre la temperatura de la cortina y del aire que la rodea), el trabajo experimental no consideró obtener este parámetro. Sin embargo, como el modelo lo requiere, se utilizaran las mismas ecuaciones que para la ventana. Esta es una buena aproximación para la estimación del hc_4 que se calcula considerando una placa plana, sin embargo, para el cálculo de hc_3 la aproximación no sería muy buena, debido a que los perfiles de velocidades están deformados con respecto a los obtenidos en el lado de la ventana (ver Fig. 4). En todo caso, como se dijo antes, esto no debería ser un problema mayor, debido a que la convección en la cortina no es muy importante en el contexto del modelo general.

5.4. Resumen del modelo

Finalmente, el modelo para calcular el calor perdido por una ventana incluyendo la presencia de una cortina se calcula mediante las Ec. (1) y (2). T_{av} se calcula mediante la Ec. (4), hc_2 y hc_3 se calculan con las Ec. (9) y hc_4 con la Ec. (5). Una vez calculado todos los valores anteriores, el calor perdido por la ventana (q_v) se obtiene mediante la Ec. (12)

$$q_v = h_{c4}(T_{ai} - T_C) + \frac{\sigma(T_{mrt3}^4 - T_C^4)}{\frac{1}{\epsilon_C} + \frac{A_C}{A_3} \frac{(1 - \epsilon_3)}{\epsilon_3}} \quad (12)$$

Para estimar la precisión final del modelo, se ha calculado el calor por convección mediante el modelo explicado más arriba y se ha comparado con los valores medidos en las experiencias. La Fig. 8 muestra esta comparación. En el gráfico se muestran los valores de q

calculados en función de los valores de q medidos. La línea recta corresponde a los puntos en que el q medido es igual al q calculado; luego, la distancia de los puntos con respecto a esta recta indican la diferencia entre el valor medido y el valor calculado. La diferencia promedio de todas las experiencias es de 3%.

6. EJEMPLO DE CALCULO CONSIDERANDO LA RADIACION

En el análisis anterior, los cálculos fueron realizados utilizando un valor muy bajo para emisividad de la ventana ($\epsilon=0.03$), ya que ésta era la condición en que se realizaron los ensayos. Sin embargo, el modelo acepta cualquier valor de emisividad, por lo que a continuación se hará un cálculo considerando la emisividad real de una ventana. El cálculo se realizó para una temperatura del vidrio de 10°C , una temperatura del aire del recinto de 21°C y para una geometría similar a la de los ensayos experimentales. En la Fig. 9 se puede observar que para una separación pequeña de la lámina de papel (1 cm), la diferencia entre la pérdida de calor con o sin cortinas es de 25%, a medida que aumenta la separación, esta diferencia disminuye, quedando en un valor fijo del orden de 16% para valores de separación mayores que 3 cm.

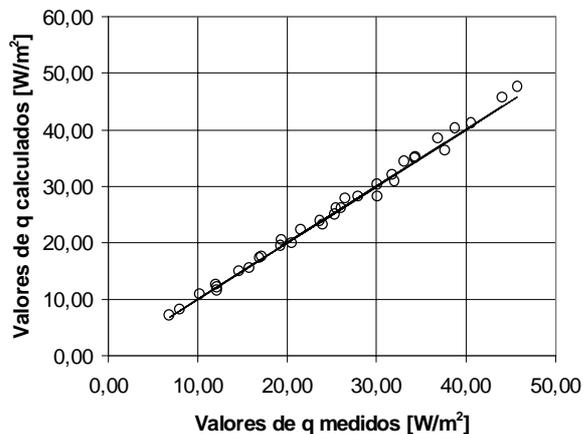


Figura 8. Comparación entre los resultados del modelo y de las mediciones.

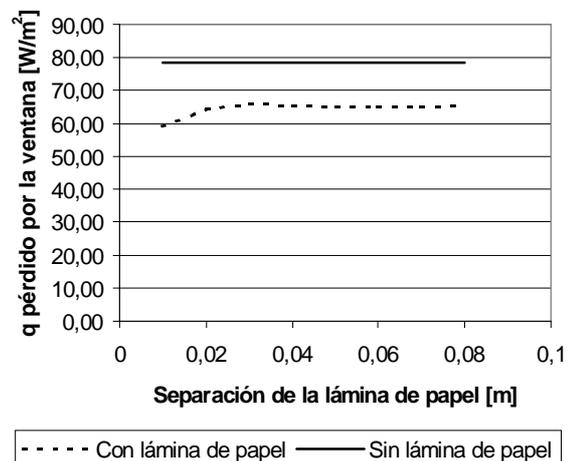


Figura 9. Pérdida de calor por la ventana en función de la separación de la lámina de papel.

Esto demuestra que el efecto de aislación térmica de la cortina es más por radiación que por convección. El aire debería estar muy confinado en el interior del espacio entre la cortina y el vidrio para que el efecto convectivo tenga una influencia importante en la pérdida de calor.

De lo anterior se desprende que si se desea disminuir la pérdida de calor por una ventana mediante cortinas, se debería disminuir la emisividad de estas. En efecto, si para el caso de una separación de 8 cm se utiliza una cortina con baja emisividad por ambos lados ($\epsilon=0.1$), la pérdida de calor disminuye en valores del orden de 40% con respecto al caso con cortina con emisividad de 0.9 y en valores del orden de 50% con respecto al caso sin cortinas.

7. RANGO DE VALIDEZ DEL MODELO

En todo el análisis anterior se trabajó con una lámina de papel perfectamente estirada y ubicada a una cierta distancia del marco de la ventana. Aunque el efecto es similar al de una cortina real, existen ciertas características de las cortinas reales que son un poco diferentes al

caso de la lámina de papel, y que vale la pena analizar. Inicialmente se pensó que todas las cortinas reales podían caracterizarse una separación equivalente, pero esto no se ha podido hacer, ya que en el presente modelo, la separación de la lámina de papel influye tanto en el flujo de aire en la zona confinada como en los coeficientes convectivos. Sin embargo, en algunos otros tipos de cortinas reales, se deben separar ambos efectos.

Por ejemplo, para el caso de una persiana veneciana instalada por dentro del marco de la ventana, y si se mantiene un buen ajuste entre la persiana y el marco de la ventana, se puede esperar que desde el punto de vista de la circulación de aire (cálculo de h) la situación sea muy similar al problema de la cavidad, pero del punto de vista del flujo de aire, la situación no es similar a un problema con separación nula, ya que el aire ingresa por los espacios entre las láminas de las persianas.

En el marco del presente trabajo experimental, además de las experiencias con la lámina de papel se realizaron alrededor de 100 ensayos con distintos tipos de cortinas y persianas reales, distintas formas de instalación y diferentes valores de diferencia de temperaturas. Estos datos aún se están analizando y se piensa hacer una extensión del modelo para que considere todos estos tipos de protecciones internas. Por el momento, se puede indicar que el modelo tal como se presenta acá, funciona bastante bien para cortinas y cualquier elemento que se instale por el exterior del marco y que no permita el paso de una gran cantidad de aire a través de ella. Para las persianas instaladas dentro del marco, los resultados indican que los flujos de aire son, en general, menores que para el caso de separación de 1 cm, pero los parámetros específicos para este tipo de persianas aún no están disponibles.

Otra de las limitaciones del modelo es el tamaño de la ventana. Aunque la mayoría de las correlaciones utilizadas son adimensionales, por lo que se podría esperar que sea de validez general, la ecuación para el cálculo de la temperatura en el espacio confinado no lo es. Luego, en principio, no se puede aplicar a otro tamaño de ventana. Mediante la utilización del programa de volúmenes finitos, se piensa analizar cual es el efecto del tamaño de la ventana. Por lo tanto, por el momento, sólo se recomienda utilizar el modelo en tamaños de ventanas similares a las ensayadas, o en casos en que la temperatura de la zona confinada no sea preponderante en el balance térmico de la ventana.

8. CONCLUSIONES

Se ha creado un modelo de cálculo para el balance térmico de una ventana donde se incluye el efecto de una cortina. La validez del modelo se limita a elementos de protección instalados por fuera del marco de la ventana y en situaciones en que la separación promedio entre este elemento y el marco de la ventana sea superior a 3 cm para ventanas chicas ($\approx 1\text{m}^2$) o a valores de 8 cm para ventanas más grandes.

Del análisis de los resultados se puede indicar que el principal parámetro a manejar si se desea aumentar el efecto de aislación de la cortina es la radiación y más precisamente la emisividad de la cortina. Se mostró que si se usa una cortina con emisividad igual a 0.1 en las dos caras, la pérdida de calor por la ventana disminuye en alrededor de 40% con respecto a la cortina con emisividad de 0.9 y de 50% con respecto a una situación sin cortinas.

Si se desea aumentar el efecto de la aislación mediante la disminución de la convección, los resultados son mucho menos efectivos. En este caso, lo que más se debe cuidar es el sello del espacio confinado existente entre la cortina (o persiana) y el marco.

La continuación del trabajo incluye una adaptación al modelo que permita considerar un rango mucho más amplio de ventanas.

Agradecimientos: Los autores agradecen al CONICYT Chile por el financiamiento prestado para la presente investigación, lo cual fue realizado a través del proyecto Fondecyt: Modelo para el diseño óptimo de ventanas en la construcción.

REFERENCIAS

- ASHRAE. 1997. ASHRAE Handbook-Fundamentals, ASHRAE, Chapter 3.
- Awbi, H.B., Hatton, A., 1999, Natural convection from heated room surfaces, Energy and Building 30, pp. 233-244.
- Beausoleil, I., Strachan, P., 1999, On the significance of modeling internal surface convection in dynamic whole-building simulation programs, ASHRAE Trans. Vol. 105 Parte 2, pp. 929-940.
- Churchill, S. and Chu, H. 1975. "Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate". Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 18, pp. 1323-1329.
- Cuevas C., 1999 Estudio experimental del coeficiente de convección en el interior de una ventana. Informe para optar al grado de Magister en Ingeniería Mecánica. Universidad de Concepción.
- Cuevas, C. y Fissore, A. 1999, Estudio experimental del coeficiente de convección en la superficie interior de una ventana, XVI Jornadas de Transferencia de Calor y Materia. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Dascalaki et al. 1994. "Natural Convection Heat Transfer Coefficients from Vertical and Horizontal Surfaces for Buildings Applications". Energy and Buildings, Vol. 20, pp. 243-249.
- Figueroa Felipe. 2000. Análisis numérico del coeficiente convectivo en el interior de una ventana. Informe de Memoria de Título Ingeniería Civil Mecánica. Universidad de Concepción
- Harrison S.J., Oosthuizen, P.H., 1999, Convective heat transfer from a window with a venetian blind: detailed modeling, ASHRAE Trans. Vol. 105 Parte 2.
- Khalifa, A. J. , Marshall R. H. 1990. "Validation of Heat Transfer Coefficients on Interior Building Surfaces Using a Real-Sized Indoor Test Cell", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 33, N° 10, pp. 2219-2236.
- Larson, U., Moshfegh, B., Sandberg, M., 1999, Thermal analysis of super insulated windows (numerical and experimental investigations), Energy and Building 29, pp. 121-128.
- Medved, S., Novak, P., 1998, Heat transfer through a double pane window with an insulation screen open at top, Energy and Building 28, pp. 257-268.
- Peterson, F. and Shia-Hui, P. 1995. "Convection from a Cold Window with Simulated Floor Heating by Means a Transiently Heated Flat Unit". Energy and Buildings, Vol. 23, pp. 95-103.
- Simko, T.M., Elmahdy, A.H., Collins, R.E. 1999, Determination of the overall heat transmission coefficient (U value) of vacuum glazing. ASHRAE Trans. Vol. 105 Parte 2, pp. 891-899.
- Zhao Y., Crucija, D., Gross, W.P., 1999, Convective heat transfer correlation for fenestration glazing cavities, ASHRAE Trans. Vol. 105 Parte 2.

MATHEMATICAL MODEL FOR HEAT LOSS CALCULATION THROUGH A WINDOW

Summary: *In the present work a semi-empirical model for heat loss by convection at an indoor window surface with curtain or blind is given. With this model, the convection heat transfer coefficient and temperature of the air at confined space between the curtain and the glass can be calculated. The curtain was modeled with a paper due to the low thermal inertia that it has. The model is based on experimental data obtained for four separations between the paper and the window. Data from numerical simulation program are also used.*

Key - Words: *Fenestration, Thermal design of buildings, heating.*