

# ANALISIS COMPUTACIONAL DE LA TRANSFERENCIA ACOPLADA DE CALOR Y HUMEDAD EN PAREDES DE TRES CONJUNTOS HABITACIONALES

Vicente Leonardo Volantino, Edgar Jorge Cornejo

División Habitabilidad Higrotérmica, Depto de Construcciones, INTI  
Casilla de correo 157 (1650) San Martín Prov. Buenos Aires ARGENTINA  
Fax: 753-5784 - Email : INTI@SPI-CIS.COM

## RESUMEN

Se presenta la aplicación de un modelo matemático que predice la transferencia acoplada de calor y humedad en paredes, de geometría unidimensional y bajo condiciones no isotérmicas. Los casos analizados corresponden a conjuntos urbanos de la zona de Buenos Aires, de los que se conocía su comportamiento por relevamientos y mediciones efectuadas anteriormente. Se dan los resultados obtenidos para uno de los casos, de la variación anual del contenido de humedad de los materiales y de las temperaturas de bulbo seco y de rocío.

## INTRODUCCION

La utilización de modelos computacionales, que predicen el comportamiento de la humedad en elementos constructivos tales como paredes, tiene siempre un considerable interés. Este es un modo particular de evaluación, para poder examinar el comportamiento de diferentes tipos de paredes, ya sean nuevos diseños o construcciones existentes, y que permite determinar si son propensos a la acumulación de humedad o con ciertos problemas relacionados, como ser la pudrición (en sistemas con madera por ejemplo) o el crecimiento de moho. La pudrición puede conducir a deterioros de tipo estructural, mientras que el crecimiento de moho puede ocasionar problemas de salud en los ocupantes.

A menudo, los expertos discrepan sobre las causas que generan problemas de humedad en las viviendas y las acciones correctivas a aplicar. Un factor de contribución a esta situación es que generalmente los modelos teóricos no son válidos para analizar el comportamiento de la humedad en elementos constructivos. La experimentación y la experiencia previa asociada al problema, son muchas veces el único modo de aproximarse a la solución.

De cualquier manera, existe una alternativa a la modelización, consistente en efectuar ensayos de campo o de laboratorio, sobre cada uno de los sistemas constructivos de interés y considerando un amplio rango de condiciones. Pero esta posibilidad demanda mucho más tiempo, es de mayor costo y generalmente, rara vez se lleva a cabo.

Existen diferentes modelos de variada sofisticación que se han desarrollado a nivel mundial, para estimar las condiciones de humedad en las paredes. Uno de estos modelos es el denominado MOIST [1], que fue desarrollado por el National Institute of Standards and Technology (NIST). Mediante un convenio marco existente entre el NIST y el INTI, se pudo conseguir dicho modelo computacional.

## FUNDAMENTOS TEORICOS

Dentro de cada capa de una pared de construcción, la transferencia de humedad es gobernada por la siguiente ecuación de conservación de masa unidimensional.

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[ D_{\gamma}(\gamma, T) \frac{\partial \gamma}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_T(\gamma, T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] = \frac{\partial \gamma}{\partial t} \quad (1)$$

La elección del contenido de humedad ( $\gamma$ ) y la temperatura ( $T$ ) como potenciales, tiene la ventaja que en la misma fórmula matemática se representan ambas transferencias : de difusión y de capilaridad. Esta fórmula es equivalente a usar la presión de vapor de agua como el potencial de la transferencia de humedad en el régimen de difusión y a la presión de succión en el régimen de flujo de capilaridad con una simple difusividad requerida.

La transferencia de calor es gobernada por la ecuación de conservación de energía unidimensional:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda(\gamma, T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] = \rho(C_d + \gamma \times C_w) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

El transporte latente de calor está incluido en los bordes de las capas. Los otros componentes del transporte de entalpía por el movimiento de humedad son generalmente pequeños y por lo tanto, son despreciables en el análisis. El término  $(C_d + \gamma \times C_w)$  incluye el efecto de almacenamiento de energía en el material seco y en la humedad acumulada.

En las ecuaciones (1) y (2), existe un fuerte acoplamiento entre la transferencia de calor y humedad. Ambas difusividades, tanto para el gradiente de humedad ( $D_{\gamma}$ ) como para el gradiente de temperatura ( $D_T$ ) son fuertemente dependientes del contenido de humedad y de la temperatura. La conductividad térmica ( $\lambda$ ) también puede ser función de la humedad y de la temperatura, pero para este análisis se asume como constante.

Cuando el contenido de humedad de un material es menor que la saturación de la fibra, la difusividad para el gradiente de temperatura ( $D_T$ ), se calcula por las relaciones:

$$D_{\gamma} = \frac{\delta(\phi) \times P_{vs}(T)}{\rho_d \frac{\partial f(\phi)}{\partial \phi}} \quad \text{y} \quad D_T = \frac{\delta(\phi) \times \phi \times \frac{P_{vs}(T)}{\partial T}}{\rho_d} \quad (3)$$

Las ecuaciones (3) pueden ser derivadas para introducir la función isotérmica de la absorción  $f(\phi)$  y aplicando la regla (en cadena) de la ecuación de difusión de Fick en régimen estacionario, con el gradiente de la presión de vapor como el potencial de la fuerza de conducción.

Cuando el contenido de humedad de un material es mayor que la saturación de la fibra, una difusividad líquida ( $D_{\gamma}$ ) es usada en la ecuación (1). Esta es calculada usando los procedimientos dados en Burch y Thomas [1]. La difusividad para el gradiente de temperatura ( $D_T$ ) se calcula según la segunda relación de la ecuación (3)

### DESCRIPCION DEL MODELO

El programa MOIST predice la transferencia acoplada de calor y humedad, de elementos constructivos en geometría unidimensional. El mismo incluye la transferencia de humedad de difusión, el flujo de capilaridad y la convección de aire; la radiación solar incidente sobre la superficies que tienen diferentes azimut, orientación e inclinación.

Posee una base de datos con las propiedades de 32 materiales de construcción, que incluye los coeficientes de absorción y de capilaridad, las propiedades de transferencias de calor (densidad seca, calor específico y conductividad térmica seca) y de permeabilidad al vapor de agua.

Los datos de absorción isotérmica utilizados en el análisis, son los determinados por Richards et al. [2], que determinó una ecuación de la forma:

$$\gamma = \frac{B_1 \cdot \phi}{(1 + B_2 \cdot \phi) \cdot (1 - B_3 \cdot \phi)} \quad (4)$$

donde los coeficientes  $B_1$ ,  $B_2$  y  $B_3$ , se hallaron analíticamente mediante una regresión.

Por su parte, los valores de permeabilidad al vapor de agua, fueron hallados por Burch et al. [3], realizando mediciones para diferentes humedades relativas media del material. Como resultado de las experiencias efectuadas sobre distintos materiales, halló una expresión del tipo:

$$\delta = \exp(C_1 + C_2 \cdot \phi + C_3 \cdot \phi^2) \quad (5)$$

donde los coeficientes  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$ , se determinaron mediante un análisis de regresión.

Los datos de entrada que se pueden ingresar son los siguientes: tipo de solución (isotérmica o no isotérmica), coeficientes de convección interior y exterior (sin considerar el aporte por radiación solar), criterios de convergencia, cantidad de iteraciones, absorción solar exterior, inclinación y azimut en la superficie, temperatura y humedad relativa interior, permeancia de las pinturas de la superficie interior y exterior y las condiciones climáticas externas. Para esto último, el modelo posee los datos climáticos normales anuales, presentados a intervalos de promedios semanales, para seis localidades diferentes.

El modelo permite incluir capas no acumuladoras (por ej. un espacio de aire, aislación de fibra de vidrio, retardante al vapor, etc.), las que deben hallarse intercaladas entre dos capas acumuladoras. Además una capa no acumuladora puede estar conectada convectivamente al aire interior o exterior.

Las ecuaciones (1) y (2) son reformuladas por diferencias finitas usando un espaciado uniforme entre nodos definidos dentro de cada material (capa) del sistema constructivo que se analice. Una técnica de solución implícita con acoplamiento entre las dos ecuaciones de conservación se usaron para la resolución del problema

### APLICACION A CASOS REALES

Se analizaron tres paredes correspondientes a conjuntos habitacionales situados uno en la Capital Federal (Barrio Piedrabuena) y dos en el conurbano (Claypole, Partido de Almirante Brown y Villa Tranquila, Partido de Avellaneda)

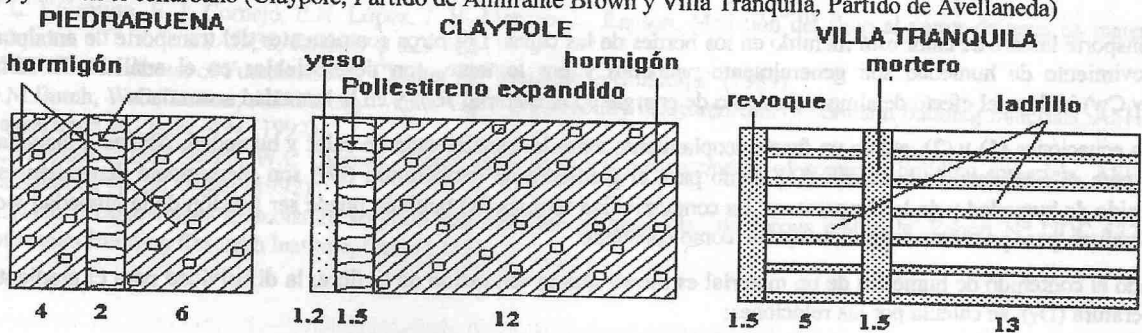


Figura 1. Esquemas de las paredes analizadas

Se analizaron considerando a las paredes con orientación sur y la absorción solar de las superficies exteriores se adoptó en 0.7, ya que este valor coincide tanto para el hormigón como para el ladrillo cerámico.

Las condiciones exteriores que se adoptaron, son las correspondientes a uno de los archivos existentes en el MOIST, habiéndose seleccionado el que posee la latitud más próxima a Buenos Aires.

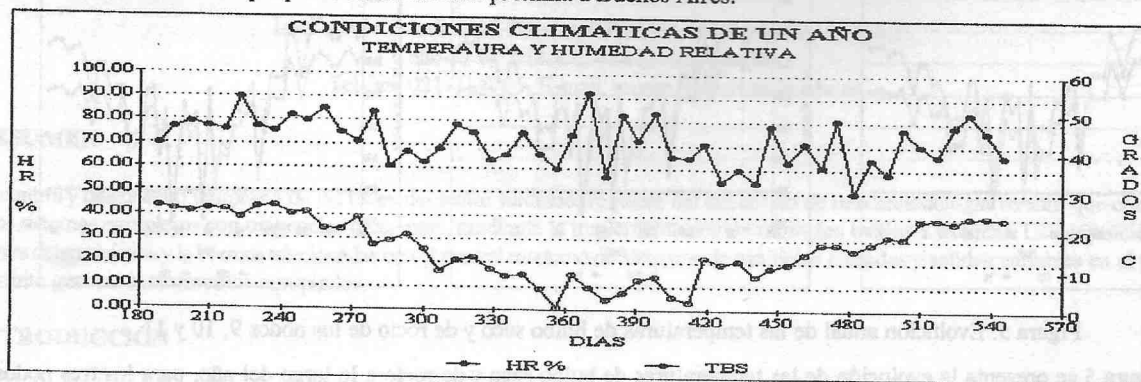


Figura 2. Temperatura y humedad relativa exteriores durante el año de simulación

Las condiciones interiores se mantuvieron constantes durante toda la simulación, en 20°C y 50%HR.

Se ingresa la temperatura y el contenido de humedad inicial en cada capa constructiva. Los primeros seis meses de datos climáticos (preacondicionamiento) son empleados para reducir el efecto de tales condiciones iniciales; los datos correspondientes a un año posterior son los utilizados para obtener los resultados.

### RESULTADOS OBTENIDOS

Por razones de espacio, en este trabajo se presentan solamente los resultados hallados en uno de los tres sistemas constructivos analizados (el primero de la izquierda de la Figura 1). Para una pared dada, se enumeran las capas correlativamente desde el lado interior hacia el exterior. En cada capa se define una determinada cantidad de nodos, en función del espesor de la capa y de la precisión que se requiera de la información; por ejemplo, analizar un gran número de planos en el material aislante térmico. En este caso se eligieron 3 nodos para la primera capa, 5 para la segunda y 5 para la tercera.

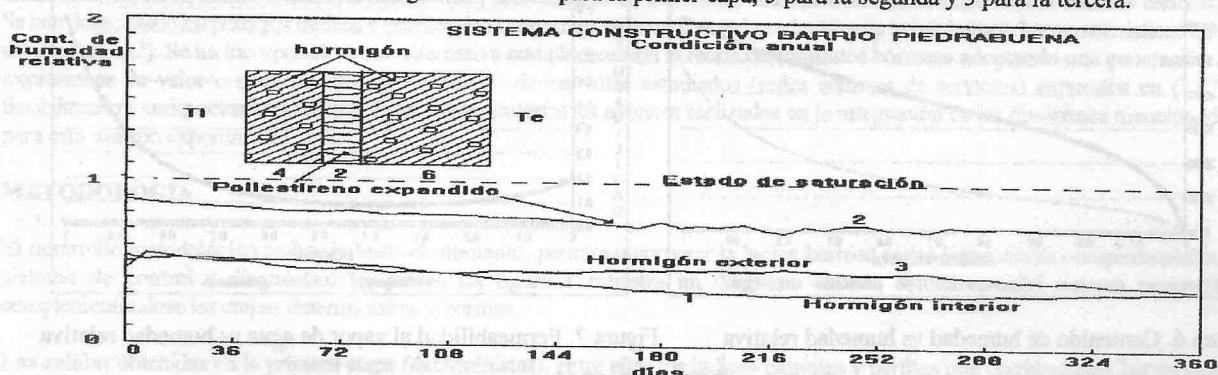


Figura 3. Evolución anual del contenido de humedad de los materiales constitutivos de la pared.

En la Figura 3, se muestra la variación del contenido de humedad de las distintas capas de la pared, en función del tiempo. El tiempo de simulación es de un año, habiendo comenzado el día 182, que corresponde al 1° de julio. La línea interrumpida horizontal indica el valor para el cual el material alcanza el estado de saturación. Se observa que el contenido de humedad del poliestireno expandido es mayor que las otras dos capas a lo largo de todo el año.

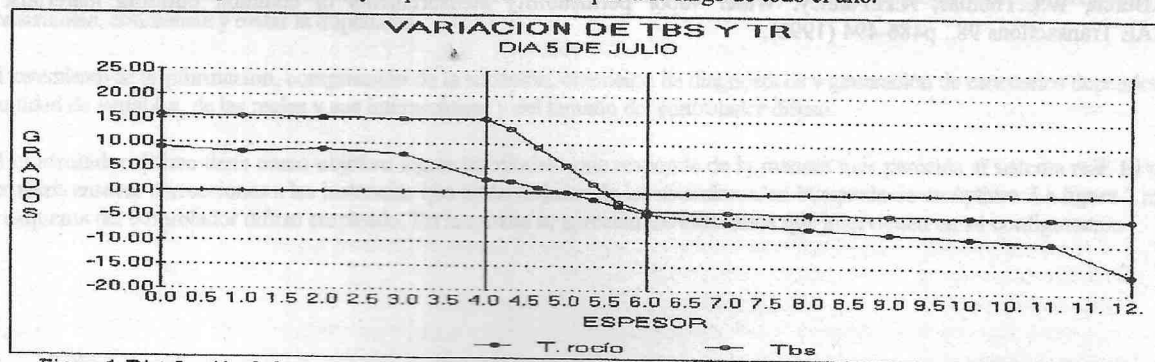


Figura 4. Distribución de las temperaturas de bulbo seco y de rocío en un corte transversal de la pared

Para verificar los riesgos de condensación, se selecciona un día de la Figura 3, tal que represente una condición desfavorable, es decir cuando el contenido de humedad del material aislante posee el mayor valor. Para ese día se grafica la distri-

bución de temperaturas de bulbo seco y de rocío, en cada una de las capas de la pared (Figura 4), ya que la salida del programa contiene los datos de temperatura y presión de vapor de cada nodo y para cada día analizado.

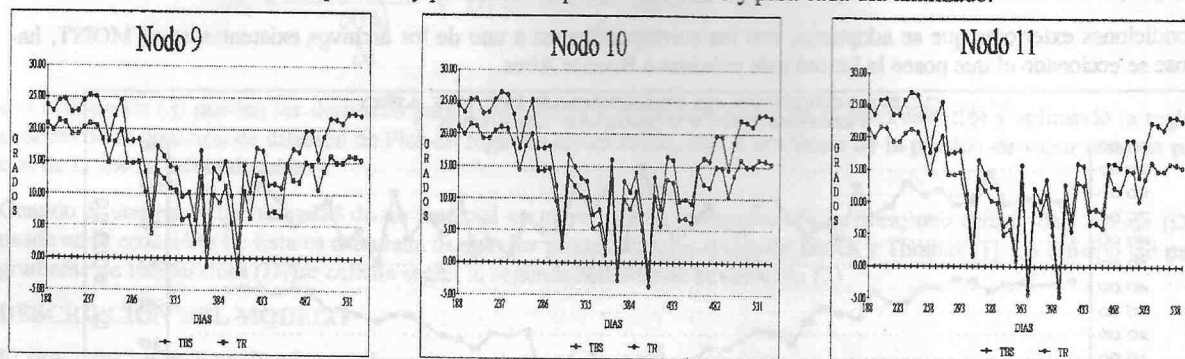


Figura 5. Evolución anual de las temperaturas de bulbo seco y de rocío de los nodos 9, 10 y 11

En la Figura 5 se presenta la evolución de las temperaturas de bulbo seco y de rocío a lo largo del año, para los tres nodos que se hallan más próximos del lado externo del poliestireno expandido.

## CONCLUSIONES

El hecho de haber utilizado un modelo matemático que predice la transferencia combinada de calor y humedad en paredes, permito realizar una evaluación del comportamiento higrotérmico más realista que si se emplea el método convencional de cálculo considerando los dos fenómenos separadamente. Los autores del modelo encontraron que los parámetros que más afectan al contenido de humedad durante el invierno son la humedad relativa interior y la exterior, en ese orden de importancia. Por tal razón, es necesario conocer como influye la humedad relativa sobre los coeficientes de absorción isotérmica y de permeabilidad al vapor de agua. En las Figuras 6 y 7 se observa la ley de variación cada una de ellos para los dos materiales intervinientes en la pared analizada. Se ve que a pesar de cumplir ambos materiales con las ecuaciones (4) y (5) respectivamente, la dependencia con la humedad pueden ser bien diferentes

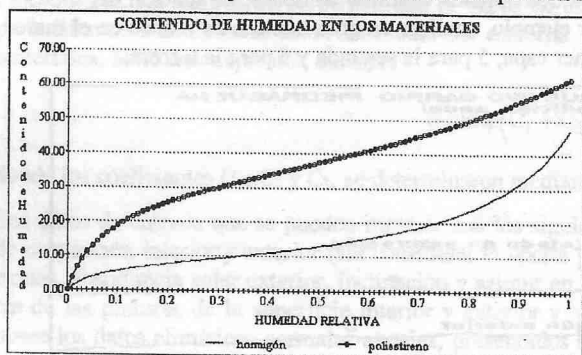


Figura 6. Contenido de humedad vs humedad relativa

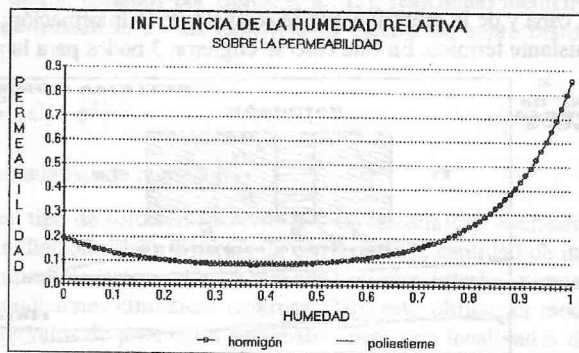


Figura 7. Permeabilidad al vapor de agua vs humedad relativa

## REFERENCIAS

1. D.M.Burch, W.C.Thomas. An analysis of moisture accumulation in a wood frame wall subjected to winter climate. National Institute of Standards and Technology. NISTIR 4674. (1991).
2. R.F.Richards, D.M.Burch, W.C.Thomas, Water vapor sorption measurements of common building materials. ASHRAE Transactions 98, p475-485 (1992).
3. D.M.Burch, W.C.Thomas, A.H.Fanney. Water vapor permeability measurements of common building materials. ASHRAE Transactions 98, p486-494 (1992).