



ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 15, 2011. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184

MÉTODO DE ANÁLISIS PARA VERIFICAR LOS RIESGOS DE CONDENSACIÓN SUPERFICIAL E INTERSTICIAL EN SISTEMAS CONSTRUCTIVOS VERTICALES

Vicente Leonardo Volantino

Unidad Técnica Habitabilidad, INTI Construcciones

Av. Gral. Paz 5445, Parque Tecnológico Miguelete, San Martín (1650) Prov. Buenos Aires

Casilla de correo 157 B1650WAB Fax: (011) 4753-5784 - E-mail: vvolanti@inti.gov.ar

RESUMEN: Se presenta un procedimiento experimental y analítico que permite realizar una evaluación del comportamiento higrotérmico de sistemas constructivos. Se adoptaron como ejemplos dos casos típicos de muros utilizados en la construcción de edificios, sobre los que se le efectuó el ensayo de transmitancia térmica y luego, se los simuló numéricamente mediante un conjunto de programas que analizan la transferencia de calor y masa en geometría bidimensional. El estudio se hizo para las condiciones climáticas correspondientes al conurbano Bonaerense, mientras que al ambiente interior se fijaron tanto la temperatura como la humedad relativa, para un nivel mínimo de confort higrotérmico. El objetivo principal que se persigue es la verificación de los riesgos de condensación de humedad, tanto superficial como intersticial, y su evaluación en el tiempo. Adicionalmente, se agrega un listado con otros sistemas constructivos analizados bajo la misma metodología, de los que se brindan la síntesis de los resultados obtenidos.

Palabras clave: comportamiento higrotérmico, condensación, sistemas constructivos.

INTRODUCCIÓN

Es sumamente importante efectuar en la etapa de diseño de los edificios, un análisis preciso sobre los riesgos de condensación, tanto superficial como intersticial, con el objeto de evitar los efectos dañinos que esta patología constructiva puede causar por la existencia de humedad sobre los elementos de la envolvente y además, como contribución para proveer una adecuada calidad del aire interior.

El método de cálculo propuesto por la Normativa Nacional en este tema, consiste en considerar una evaluación numérica unidireccional en régimen estacionario de la transferencia de calor y masa (vapor de agua) y establecer una clasificación tipo pasa – no pasa. En la actualidad existen programas de cálculo que efectúan un análisis en geometrías 2-D y 3-D, que permiten detectar tales patologías higrotérmicas, tanto en régimen estacionario como variable. Asimismo, los riesgos de condensación pueden resultar un fenómeno que aparece temporalmente en coincidencia con la época invernal o con días correspondientes a “olas de frío”, desapareciendo a medida que la temperatura exterior va en aumento generando reevaporación hacia el medio exterior. En otros casos, la condensación puede ser permanente, no alcanzando a reevaporarse durante los días más cálidos y en cada invierno su caudal de condensado se va incrementando. Para determinar que forma de condensación es la que padece el sistema constructivo bajo análisis, se emplean programas de cálculo diseñados para tal objetivo.

Por otra parte, cada vez que se deban analizar los fenómenos de transferencia de calor y humedad, que suceden en cualquier sistema constructivo, es indispensable conocer las propiedades físicas de los materiales componentes, que intervienen en las ecuaciones de balance de energía y transporte de masa. Tales propiedades pueden ser halladas experimentalmente, mediante ensayos que determinan la conductividad térmica y la permeabilidad al vapor de agua de los materiales de construcción. Estos datos son los que se utilizan en la evaluación higrotérmica del sistema constructivo, ya sea con el objeto de prevenir riesgos de condensación en la etapa de diseño, o para detectar la causa que provoca una determinada patología de este origen en un edificio construido.

En este trabajo, se presenta una metodología desarrollada en nuestra Unidad Técnica empleando un conjunto de programas de cálculo aplicados a geometría 2-D (Volantino et al, 1999); que está destinado a la verificación de los riesgos de condensación que se desarrollan íntegramente sobre dos casos tomados como ejemplo. Adicionalmente, se agrega un listado con otros sistemas constructivos analizados bajo la misma metodología, de los que se brindan la síntesis de los resultados obtenidos.

DESCRIPCION DEL MÉTODO

En primer lugar se realiza un ensayo para determinar la transmitancia térmica del sistema constructivo. Para ello, se construye una probeta de 2,40 m por 2,40 m y se la somete al ensayo de la caja caliente con caja de guarda (IRAM 11564, 1997), la que permite obtener su performance térmica bajo condiciones de régimen permanente de temperaturas. Las mismas se establecen con una diferencia de 30 °C como mínimo entre las caras opuestas del muro y tales que la temperatura media de éste sea de aproximadamente 25 °C. Si se trata de un proyecto, la transmitancia térmica se obtiene por simulación numérica de la transferencia de calor en geometría bidimensional.

En segundo lugar, se analizan los posibles riesgos de condensación de humedad, mediante un conjunto de programas de computación que permiten realizar el estudio de los sistemas constructivos en geometría 2-D. Para el caso de la verificación de los riesgos de condensación superficial, se emplea el software denominado BISCO basado en la resolución de la ecuación de FOURIER de transmisión de calor, en geometría bidimensional de múltiples materiales. El mismo permite determinar la distribución de isoterma en el sistema constructivo que se halla expuesto bajo determinadas condiciones de borde. El método considera la influencia de los puentes térmicos si los hubiera.

El estudio teórico correspondiente a la verificación de los riesgos de condensación intersticial, se realiza mediante el programa denominado “PUENTES”, resultante de un desarrollo realizado a partir del software TAP 01 (SAP Users Group, 1979). El mismo considera la resolución de las ecuaciones diferenciales de FOURIER (Standaert, 1996) (Physibel, 1985) y de FICK, en geometría de dos dimensiones, que permite obtener simultáneamente la distribución de temperatura de bulbo seco y la distribución de presiones de vapor en la configuración analizada. Sobre la base de éstas, calcula la distribución de las temperaturas de rocío y la superpone geométricamente sobre la de bulbo seco a fin de determinar posibles zonas de condensación intersticial.

Para hallar el o los planos de condensación en su ubicación real dentro del sistema constructivo se emplea el programa GLASTA, basado en la resolución del método de GLASER, el que permite a su vez hallar el caudal másico de condensado. Es complementado mediante la utilización del denominado método de GLASER Extendido, el cual permite realizar un análisis de la cantidad de condensación acumulada a través de un número de ciclos predeterminados (meses, años, periodos entre estaciones, etc.), teniendo en cuenta la capacidad de los materiales componentes de admitir condensación, es decir, que en el proceso de humidificación y evaporación se involucran, no sólo las intercapas entre los materiales componentes, sino también las capas propias de los mismos, contemplando su contenido inicial de humedad y la posibilidad de humidificación por condensación.

CONDICIONES DE CÁLCULO

A modo de ejemplo, se presenta la evaluación de los casos analizados para las condiciones climáticas de San Miguel, Provincia de Buenos Aires, adoptada como localidad referente del Gran Buenos Aires. Esta ciudad pertenece a la **Zona Bioambiental IIIb**, según clasificación de la Norma **IRAM 11603**, en la que se establece además la temperatura mínima de diseño (**Te**) en 1,3 °C. La temperatura interior (**Ti**) en 18°C y la humedad relativa exterior (**HRE**) en 90%, se adoptaron de acuerdo a lo establecido en la Norma **IRAM 11625**, mientras que la humedad relativa interior de diseño (**HRI**) se obtuvo en función de la temperatura exterior, utilizando la figura 5 definida en esta misma norma, siendo su valor 71,1%

Para la condición exterior se utilizó un coeficiente global de transferencia de calor superficial, $h_e=25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, correspondiente a una resistencia superficial exterior de $0,04 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ (Norma IRAM 11601); mientras que para el interior se utilizó $h_i=5,9 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, correspondiente a una resistencia superficial interior de $0,17 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ (Norma IRAM 11625).

A los diferentes sistemas constructivos estudiados, se le incorporaron los datos de conductividad térmica y permeabilidad al vapor de agua de los materiales intervinientes, cuyos valores fueron medidos en su mayoría oportunamente en los laboratorios del INTI, bajo métodos normalizados de ensayo (ASTM C 177 y ASTM C 518 en el caso de conductividad térmica, y ASTM E 96 / IRAM 1735 para los de transmisión de vapor de agua). Para el análisis térmico, se comparó el resultado de transmitancia térmica obtenido numéricamente con el correspondiente al del ensayo, y cuando existían diferencias entre las mismas, se ajustaron ciertos valores de conductividad térmica de algunos materiales que no habían sido determinados experimentalmente, de modo de alcanzar la igualdad de los coeficientes de transmisión de calor.

EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Para demostrar el método de evaluación integral, se seleccionaron dos ejemplos clásicos de muros utilizados en la construcción de edificios residenciales:

- 1er. caso: una pared de ladrillos portantes cerámicos huecos de 18 x 19 x 33 cm, con juntas horizontales interrumpidas y sin juntas verticales, con revoque común del lado interior y revoque hidrófugo del lado exterior.
- 2do. caso: una pared de bloques de hormigón huecos portantes de 19 x 19 x 39cm, con juntas verticales y horizontales interrumpidas formando cámara de aire, con revoque del lado interior.

Primer Caso: pared de ladrillos portantes cerámicos huecos de 18 x 19 x 33 cm

Para la realización del estudio correspondiente se consideró la sección del muro definido por dos ejes de simetría tales que delimitan un módulo repetitivo del mismo (Figura 1). Para el trazado de las isoterma se emplean los valores de temperatura de aire adoptados: 18 °C para el interior y 1,3 °C para el exterior.

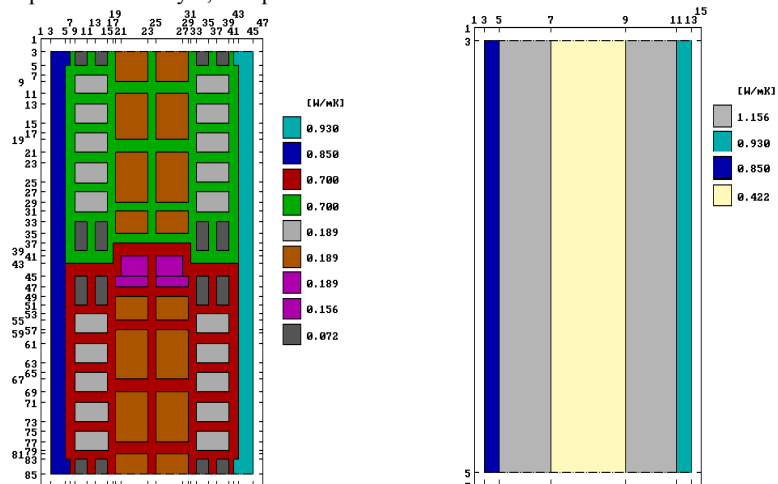


Figura 1: Módulo de análisis en el plano del ladrillo (a) y en el de la junta horizontal (b)

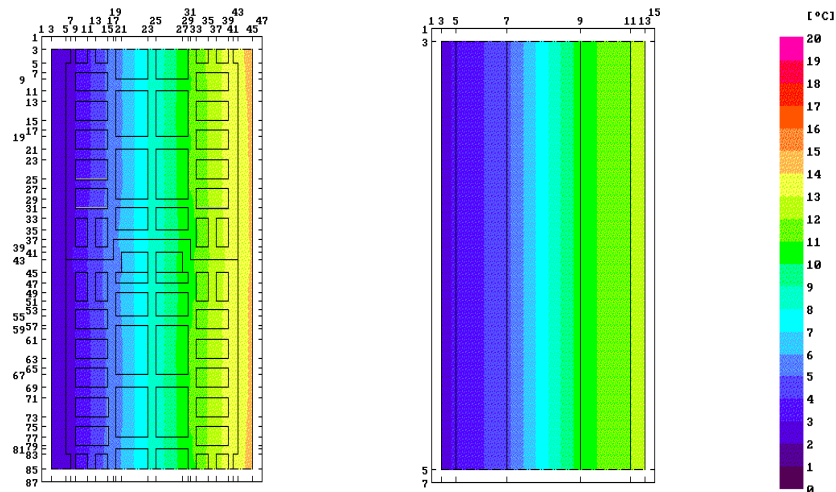


Figura 2: Distribución de isotermas en los planos (a) y (b) respectivamente y escala de temperatura

En la Figura 2, se muestra la distribución de isotermas sobre la sección analizada y la distribución de las temperaturas en la superficie interior. El valor de la transmitancia térmica global del muro, que se determina haciendo el promedio ponderado considerando la junta horizontal, se obtiene como consecuencia de haber considerado los diferentes caminos de transmisión de calor existentes. El valor global de la misma resultó ser de $K = 1,48 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, siendo el $K_{\text{Mín}} = 1,37 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ y el $K_{\text{Máx}} = 2,11 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Del cálculo, también se obtuvo la temperatura superficial interior mínima ($T_{\text{si min}}$), la que arrojó un valor de $12,5 \text{ }^\circ\text{C}$, como se puede observar en la Figura 2 (b). Considerando las condiciones ambientales del aire interior, $18 \text{ }^\circ\text{C}$ y $71,1 \text{ \% HR}$, resulta una temperatura de rocío de $12,7 \text{ }^\circ\text{C}$, lo que infiere que se verifican riesgos de condensación superficial, tal vez de mínimo caudal de condensado, pero existentes para la Norma IRAM 11625.

Para hallar el caudal másico de condensado superficial, se efectuó el producto de la diferencia entre la presión de vapor del aire interior y la presión de vapor correspondiente a la temperatura mínima de la superficie interior, por el coeficiente de la transferencia de masa β ó permeabilidad al vapor de agua de la capa de aire en contacto con el muro, cuyo valor es de $97,5 \text{ g/h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kPa}$ para la condición de aire interior (Lotersztajn, 1970).

$$g = \beta \times (P_{vi} - P_{vsi}) \quad (1)$$

Luego, se calculó la cantidad de horas estimadas, en que la temperatura superficial es inferior a la temperatura de rocío, para poder determinar el caudal másico de condensado de vapor de agua por unidad de superficie. Esto se realiza obteniendo la relación entre la amplitud térmica que presenta la temperatura superficial interior y la amplitud térmica diaria de la temperatura de diseño del aire exterior (A_{si}/A_e) para la transmitancia térmica K de la pared correspondiente (Figura 3) y del parámetro $l^2/2a$ en horas, siendo l el espesor de la pared, en metros y a la difusividad térmica, en m^2/h (Lotersztajn, 1970) (Billington, 1967). Una vez hallada la relación A_{si}/A_e , se deduce el valor de A_{si} y por ende, la respuesta sinusoidal de T_{si} , pudiéndose determinar el tiempo que esta temperatura es inferior a la de rocío.

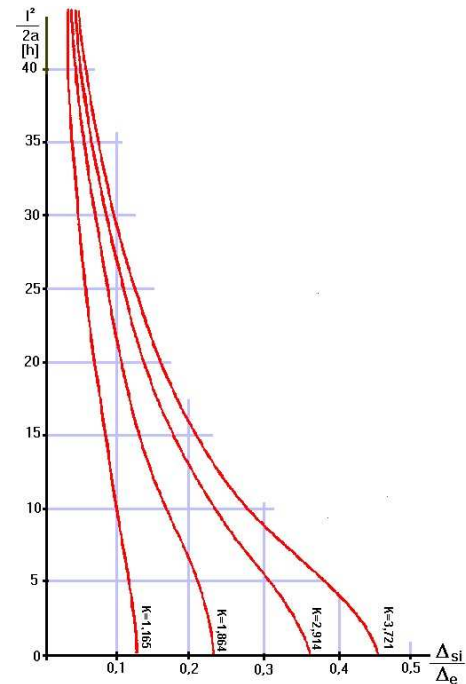


Figura 3: Representación de la ecuación diferencial de la relación A_{si}/A_e en función de la transmitancia térmica

En este caso, el caudal másico de condensado superficial fue de $1,8 \text{ g/m}^2\cdot\text{h}$ y la cantidad estimada de ocurrencia diaria de 9 horas. Como la condensación superficial se produce en el revoque, se debe comparar la cantidad de gramos de condensación de humedad (calculada como el producto del caudal másico por las horas de ocurrencia) con la cantidad límite de condensación del material (Q_{amm}), siendo este un valor función del producto del espesor por la densidad. Para el revoque el factor de multiplicación es 30 (Aghemo, 1996), resultando $Q_{amm} = 900 \text{ g/m}^2$, que es mucho mayor que los $16,2 \text{ g/m}^2$ que presenta el cálculo de condensación. Por lo que se concluye, que la condensación superficial que manifiesta es un caudal másico despreciable.

Para la verificación de los riesgos de condensación intersticial, se utilizó el programa de cálculo "PUENTES" que permite obtener tanto las temperaturas de bulbo seco como las presiones de vapor (y por ende, las temperaturas de rocío) en el seno del sistema constructivo.

De acuerdo con las condiciones higrotérmicas adoptadas, tanto para exterior como para interior, se obtuvo la distribución de temperaturas de bulbo seco (líneas de color rojo) y de rocío (líneas de color verde) en el interior del componente constructivo

(Figura 4). Se producirá condensación en aquellas zonas del componente, en las que la temperatura de bulbo seco sea inferior a la temperatura de rocío. Tales zonas se muestran por el área coloreada, cuya superficie no debe entenderse como una cuantificación de la misma, sino sólo indicativas de su extensión. En dicha Figura, se muestra un corte transversal de la pared en geometría bidimensional, donde se puede apreciar la existencia de riesgos de condensación intersticial, para las condiciones de temperatura y de humedad relativa adoptadas, tanto para un corte efectuado en el ladrillo como por la junta.

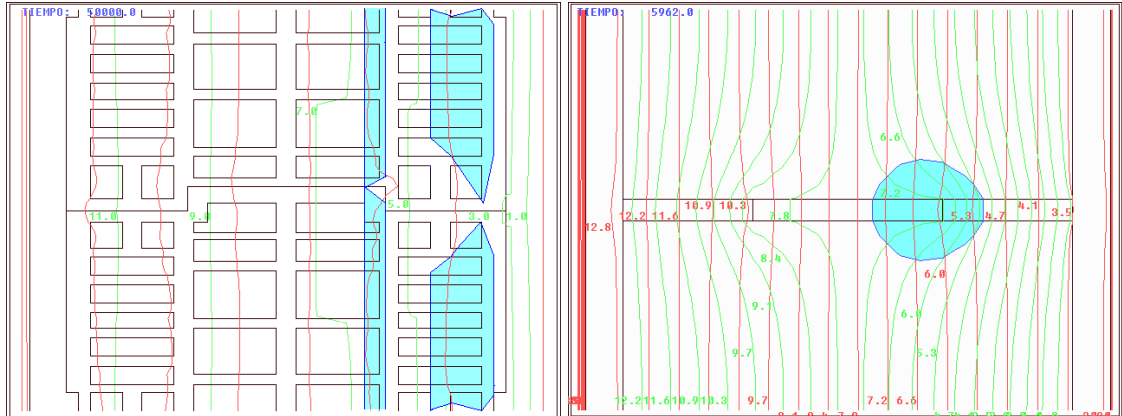


Figura 4: Distribución de isotermas de bulbo seco (rojo) y de rocío (verde) y la zona de condensación intersticial (celeste), en el ladrillo y en la junta horizontal

Para el cálculo del caudal másico de condensación intersticial, se grafican la variación de la presión de vapor saturado (PV_s), correspondiente a cada una de las temperaturas de bulbo seco en las interfaces (línea roja) y la recta que une las condiciones internas y externas de presión de vapor (línea verde), en función de la resistencia al vapor de agua de las capas (R_v) que componen la geometría del componente constructivo analizado (Figura 5). Mediante la aplicación del método de Glaser, se trazaron las tangentes desde PV_i y PV_e a la función $PV_s = F(R_v)$, cuya intersección define al plano de condensación.

La presión de vapor en ese plano se designa como PV_0 . El caudal másico de condensado se determinó efectuando la diferencia entre el caudal másico de vapor de agua entrante g_e y el saliente g_s

Siendo, el caudal másico entrante:
$$g_e = \Delta_1 \cdot (PV_i - PV_0) \text{ [g/m}^2 \text{ h]} \quad (2)$$

y el caudal másico saliente:
$$g_s = \Delta_2 \cdot (PV_0 - PV_e) \text{ [g/m}^2 \text{ h]} \quad (3)$$

donde Δ_1 , es la permeancia de las capas comprendidas entre la superficie interior y el plano de condensación, Δ_2 es la permeancia de las capas comprendidas entre el plano de condensación y la superficie exterior (Davies, 1973). Los datos utilizados se detallan en la Tabla 1

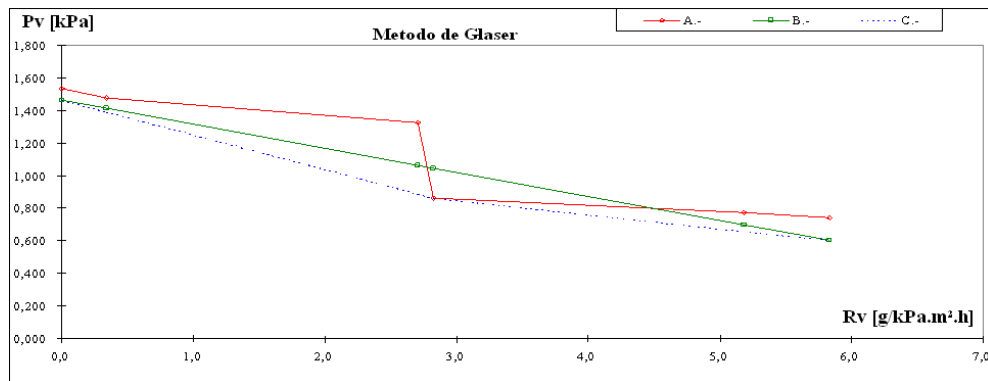


Figura 5: Método de Glaser para determinar el plano de condensación intersticial

Pv_i	PV_0	Pv_e	Δ_1	Δ_2
1,47	1,18	0,60	0,293	0,320

Tabla 1: Presiones de vapor y permeancias utilizadas en el cálculo del caudal másico de condensado

Luego, el caudal másico de condensado resulta:
$$g_c = g_e - g_s \text{ [g/m}^2 \text{.h]} \quad (4)$$

y el caudal másico de condensado diario:
$$g_d = 24 \cdot g_c \text{ [g/m}^2 \text{.día]} \quad (5)$$

En consecuencia, el caudal másico de vapor de agua condensado obtenido para el caso analizado, se presentan en la Tabla 2.

g_e [g/m ² h]	g_s [g/m ² h]	g_c [g/m ² .h]	g_d [g/m ² .día]
0,93	0,17	0,76	18,2

Tabla 2: Valores del caudal másico de vapor entrante y saliente y el caudal de condensado

Cálculo del caudal másico de condensado total (método simplificado)

En la Figura 6, se representa el diagrama de Glaser simple a lo largo de un ciclo (un año calendario), desarrollado mediante sucesivos subciclos (mensuales). El número del ciclo (año) y el número del período (mes) se indican en la parte inferior de cada diagrama. La función de color azul es el perfil de presión de vapor y la función de color rojo es el correspondiente a la temperatura de bulbo seco. La flecha inferior (azul) que aparece en determinados períodos (desde el mes 4 al mes 10), indica la existencia de riesgos de condensación y su ubicación en el muro. La flecha superior (roja), en cambio representa la ocurrencia de secado y reevaporación al medio ambiente y su ubicación en el muro, que es coincidente con el plano de condensación. El secado, que se manifiesta en una etapa posterior a la condensación, se desarrolla en el período comprendido desde mes el 11 al mes 2 más 2,6 días.

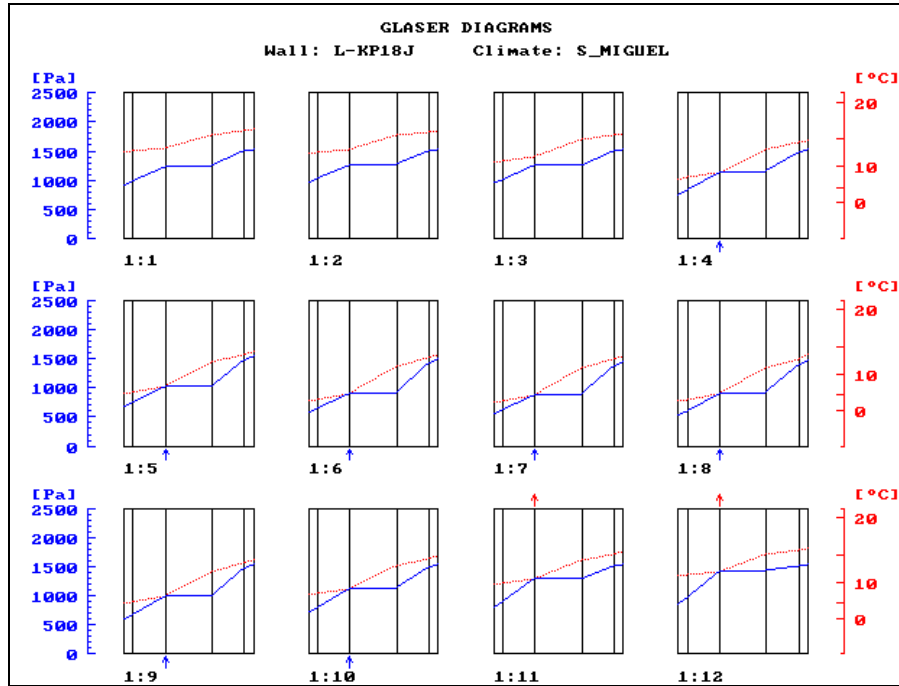


Figura 6. Diagrama de Glaser extendido a lo largo de un año calendario

En la Figura 7, muestra la cantidad total de agua (kg/m²) presente en el muro, en función del tiempo, la que se halla definida por un diagrama de línea llena. Se utiliza una escala logarítmica en el eje de ordenadas, para representar la masa de agua. La línea horizontal corresponden al valor de máxima cantidad de condensación anual permitido, para el material que se encuentre afectado por la zona de condensación. Este límite se determina en función de la densidad y el espesor de material, el cual resultó ser superior al máximo obtenido durante la evolución en el tiempo.

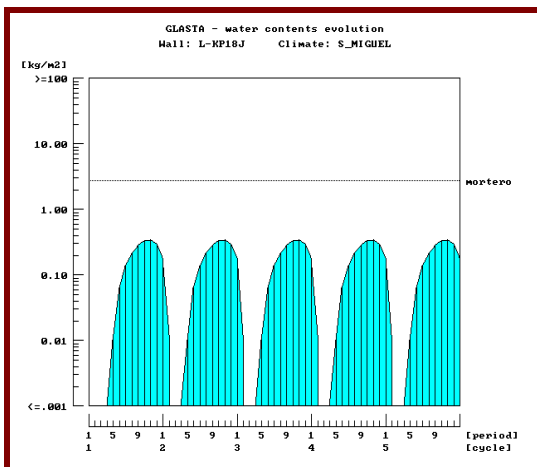


Figura 7: Evolución del contenido de agua para 5 años

GLASTA summary		Wall: L-KP18J	Climate: S_MIGUEL
From: Cycle 1 - period 1 (ENERO)			
Until: Cycle 5 - period 12 (DICIEMBRE)			
Duration: 1825,0 days			
Calculation method: GLASER normal			
Total condensation	:	1.718	kg/m ²
Total drying	:	1.541	kg/m ²
Ratio drying/condensation	:	0.897	
Vapour flows [kg/m ²]:			
	OUTSIDE	INSIDE	
entering	0.000	6.095	
leaving	5.902	0.016	
Total (in-out)	-5.902	6.079	
	wmax [kg/m ³]	dmax [m] humid	wmax [kg/m ²] % -time humid
OUTSIDE			
rev impermeable			
junta			
camara de aire		0.344	82.7
junta			
rev comun			
INSIDE			
Total wall		0.344	82.7

Figura 8: Resumen analítico del cálculo de condensación

En la Figura 8, se resume la información resultante para el total del período analizado. En ella se puede observar, los datos de entrada (sistema constructivo y clima), comienzo y finalización del período y su duración en días, el método de cálculo

(Glaser normal), la cantidad total de condensado y de secado, ambas en kg/m^2 , la relación secado-condensación, el flujo de vapor entrante, el saliente y el total del muro por ambas caras. Para cada capa de material se describe, su identificación, el contenido de agua máximo permitido por volumen (en kg/m^3), el máximo espesor de zona húmeda encontrado (estos dos últimos datos se definen para el caso de condensación en un material), el máximo contenido de agua en kg/m^2 y el porcentaje de tiempo en que se halla húmeda respecto del período analizado. Para el sistema constructivo completo, se informan el máximo contenido de agua detectado y el porcentaje de tiempo húmedo correspondiente.

Para este caso, se verifican riesgos de condensación intersticial en la intercapa mortero de junta – cámara de aire, en forma intermitente y cíclica anual con condensación casi continua (82,7% del tiempo), con alta posibilidad de reevaporar el total de condensado (89,7%). El máximo valor de condensación es de 344 g/m^2 que es inferior a la capacidad límite de condensación.

Segundo Caso: pared de bloques de hormigón huecos portantes de $19 \times 19 \times 39 \text{ cm}$

En las Figuras 9 y 10, se presenta el esquema del bloque utilizado para el análisis y la distribución de isotermas sobre la sección analizada y la distribución de las temperaturas en la superficie interior.

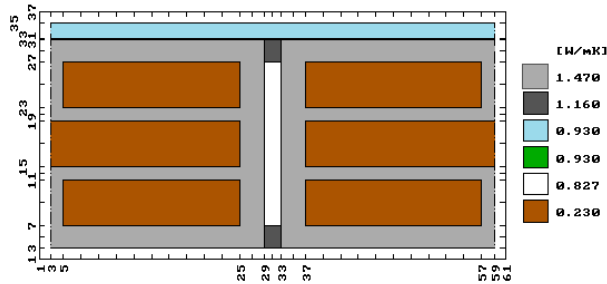


Figura 9: Módulo de análisis del bloque de hormigón

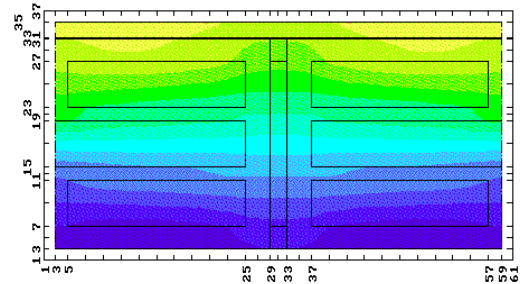


Figura 10: Distribución de isotermas en el muro

Para este caso, el valor global de transmitancia térmica obtenido fue $K = 1,87 \text{ W/m}^2\text{K}$, (con un $K_{\text{Mín}} = 1,65 \text{ W/m}^2\text{K}$ y un $K_{\text{Máx}} = 2,31 \text{ W/m}^2\text{K}$), mientras que la temperatura superficial interior mínima resultó ser $T_{\text{si mín}} = 11,9 \text{ }^\circ\text{C}$, lo que indica la verificación de riesgos de condensación superficial. El caudal másico de condensación superficial hallado aplicando la expresión (1), fue de $4,1 \text{ g/m}^2\text{h}$, mientras que el tiempo de ocurrencia de la condensación fue de 6 horas diarias, para las condiciones de borde antes mencionadas.

La Figura 11 muestra la verificación de riesgos de condensación intersticial en geometría bidimensional

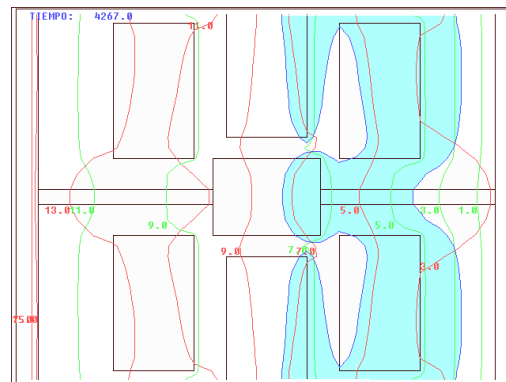


Figura 11: Distribución de isotermas de bulbo seco (rojo) y de rocío (verde) y la zona de condensación intersticial (celeste)

La Figura 12 de este caso, representa el diagrama de Glaser simple a lo largo de un ciclo (un año calendario), desarrollado mediante sucesivos subciclos (mensuales), para el camino de difusión de vapor que representa la situación más desfavorable desde el punto de vista de la condensación (puente térmico existente en el bloque). Del mismo se puede observar que el plano de condensación se encuentra ubicado en la intercapa entre el revoco y el bloque, y también en la superficie interior del muro, lo que esta última indica que la condensación que se genera es además superficial.

La Figura 13, muestra la cantidad total de agua (kg/m^2) presente en el muro en función del tiempo (1 año), la que se halla definida por un diagrama de línea llena. La línea horizontal correspondiente a la máxima cantidad de condensación anual permitida, para el material que se encuentre afectado por la zona de condensación, que en este caso es el hormigón del bloque. El límite permitido es inferior a los máximos obtenidos para el muro.

La Figura 14 resume las informaciones resultantes para el total del período analizado, del que se destaca el máximo contenido de agua detectado y el porcentaje de tiempo húmedo correspondiente. Se verifican riesgos de condensación superficial en el bloque de hormigón, en forma continua y con tendencia incremental (75,3% del tiempo), con menor posibilidad de reevaporar el total de condensado (46,2%). El máximo valor de condensación es mayor a 3200 g/m^2 que es supera ampliamente la capacidad límite de condensación.

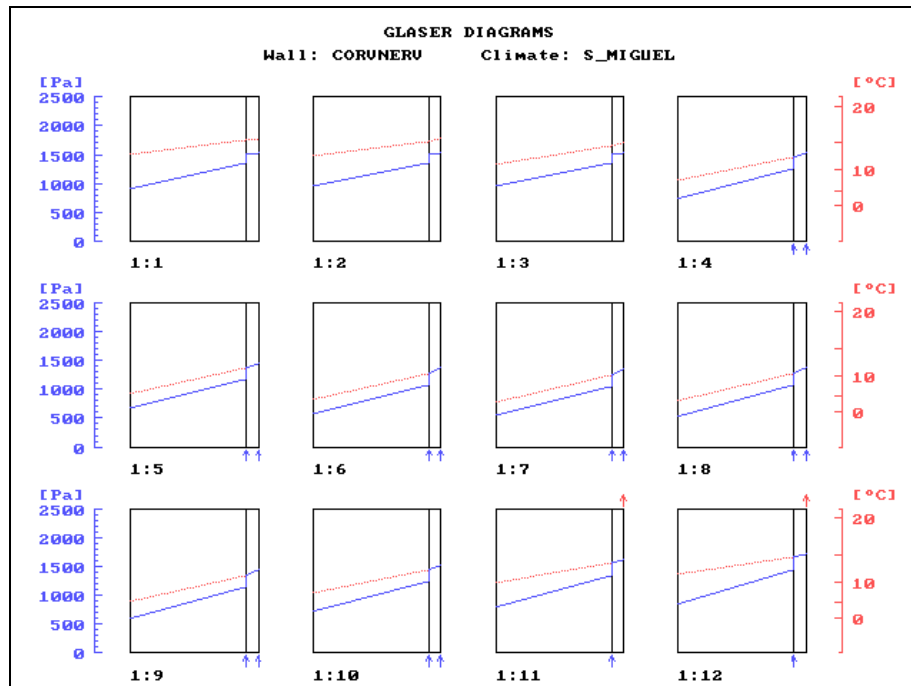


Figura 12: Diagrama de Glaser extendido a lo largo de un año calendario

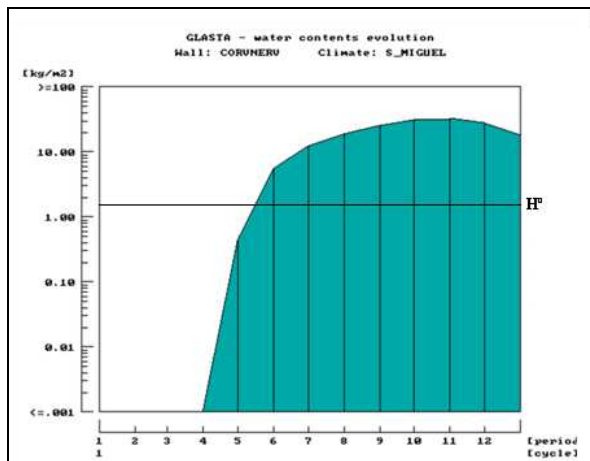


Figura 13: Evolución del contenido de agua para un año

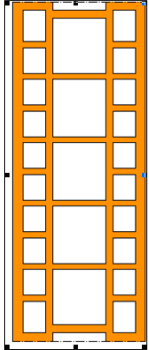
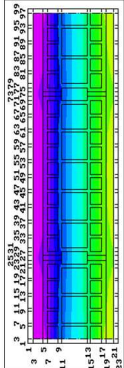
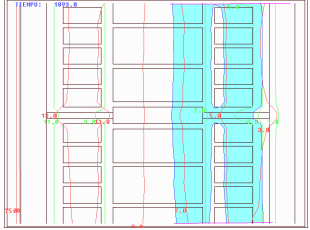
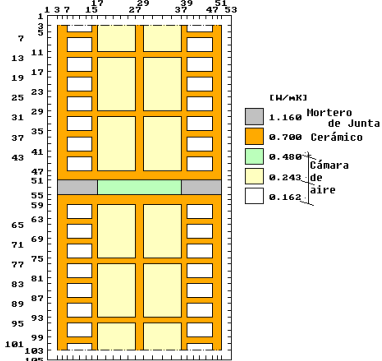
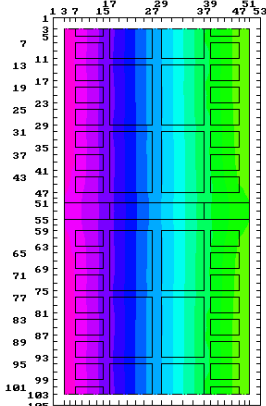
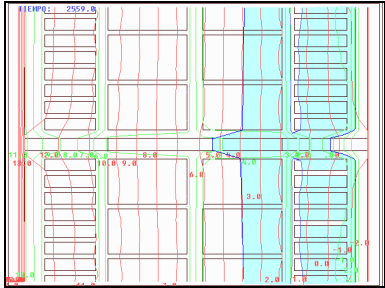
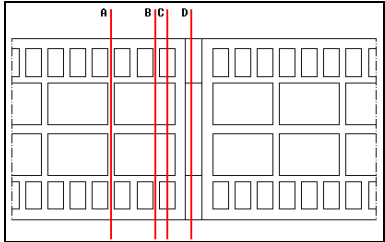
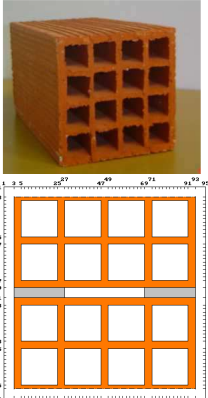
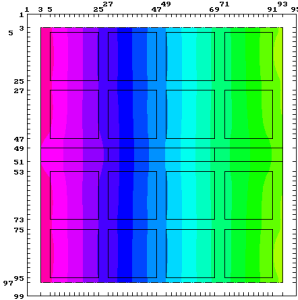
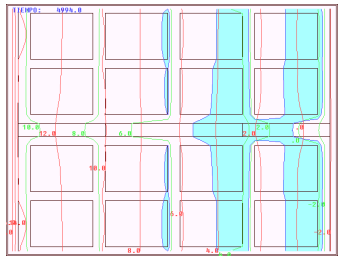

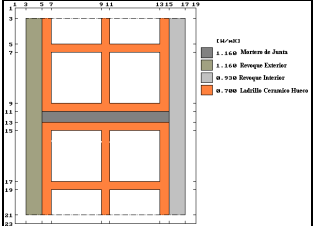
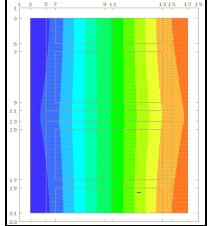
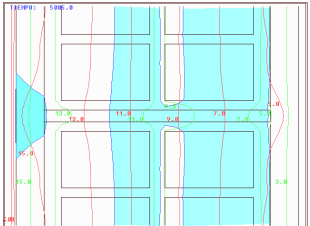
GLASTA summary		Wall: CORUNERU	Climate: S_MIGUEL
From: Cycle 1 - period 1 (ENERO)			
Until: Cycle 1 - period 12 (DICIEMBRE)			
Duration: 365.0 days			
Calculation method: GLASER normal			
Total condensation	:	3.294	kg/m2
Total drying	:	1.522	kg/m2
Ratio drying/condensation	:	0.462	
Vapour flows [kg/m2]:			
		OUTSIDE	INSIDE
entering		0.000	33.344
leaving		0.490	15.131
Total (in-out)		-0.490	18.213
		u _{max}	d _{max} [m]
		[kg/m3]	humid
			W _{max}
			%-time
			humid
		OUTSIDE	
		rev h h	
		bv	
		rev exterior	0.628 75.3
		INSIDE	3.239 75.3
		Total wall	3.297 75.3

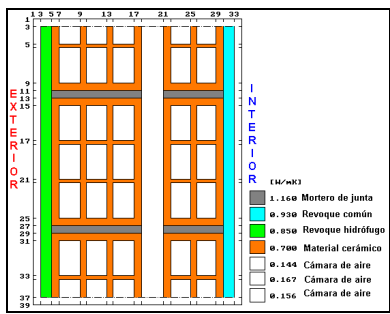
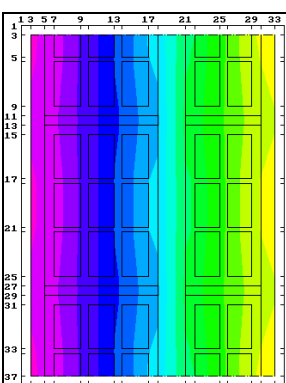
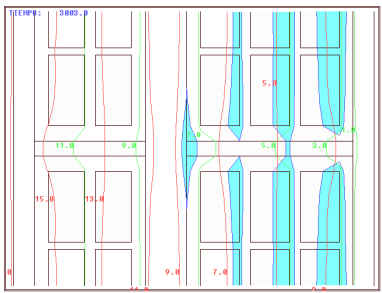
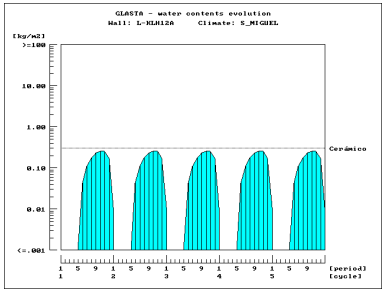
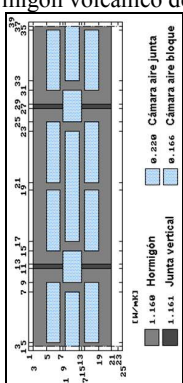
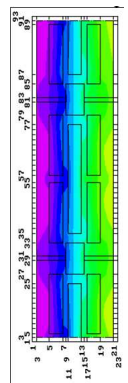
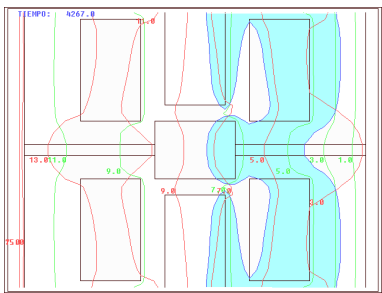
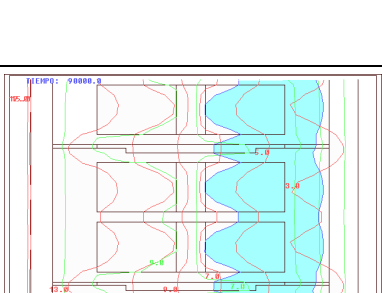
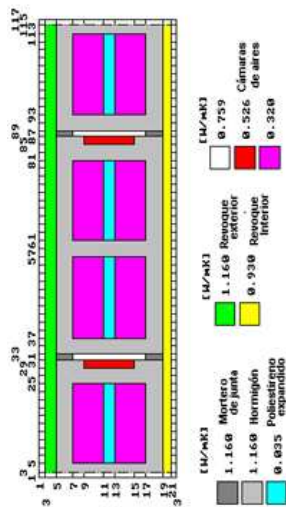
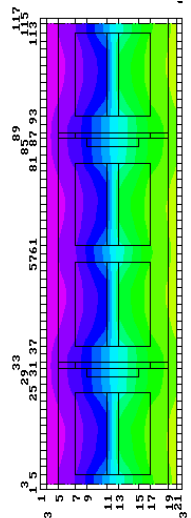
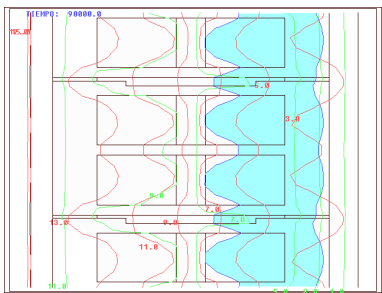
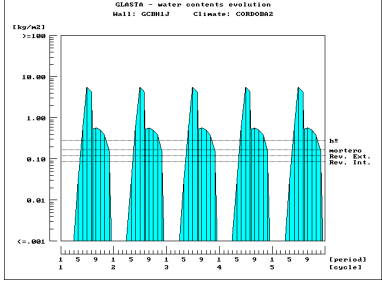
Figura 14: Resumen analítico del cálculo de condensación

Los dos casos analizados, verifican riesgos de condensación aplicando la Norma IRAM 11625, pero en el muro de ladrillos cerámicos huecos la cantidad de condensado es despreciable si se emplea la metodología de evaluación expuesta en este trabajo. No sucede lo mismo para el muro de bloques de hormigón en que el caudal de condensado es muy superior a la capacidad límite de condensación que posee el material. Por lo tanto, para un estudio más preciso y que permita ajustarse a un real comportamiento higrotérmico, se requiere profundizar en el cálculo a través de métodos de simulación avanzados.

OTROS CASOS ANALIZADOS

A modo ilustrativo, se presentan algunos otros ejemplos de sistemas constructivos oportunamente analizados, que por razones de espacio se muestran los resultados obtenidos de manera resumida (Figura 15). En ella se puede observar para cada caso, el valor de transmitancia térmica, la distribución de isotermas y la temperatura superficial mínima, si se verifican riesgos de condensación superficial, la existencia de condensación intersticial y el caudal másico de condensado. En algunos ejemplos, se brinda además, la evolución del contenido de humedad en el tiempo (cinco años).

Sistema constructivo (Transmitancia térmica)	Distribución de isotermas Temp superficial interior mínima Condensación superficial	Condensación intersticial Caudal de condensado
<p>ladrillo cerámico hueco portante de 13,5x19x33 cm</p>  <p>$K = 1,74 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Mín: 1,68; Máx: 1,88)</p>	 <p>Tsi mín = 13,1 °C</p> <p>NO CONDENSA</p>	 <p>7,4 g/m².día</p>
<p>ladrillos portantes cerámicos huecos de 18cmx19cmx33cm</p>  <p>$K = 1,61 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (Mín: 1,52; Máx: 1,93)</p>	 <p>Tsi mín = 12,9°C</p> <p>NO CONDENSA</p>	  <p>A=0; B=1,7; C=3,3; D=7,9 (g/m².día)</p>
<p>ladrillo cerámico hueco de 18cmx18cmx33cm</p>  <p>$K = 1,52 \text{ W/m}^2.\text{K}$ (Mín: 1,43; Máx: 1,77)</p>	 <p>Tsi mín = 13,4°C</p> <p>NO CONDENSA</p>	  <p>g/m².día</p> <p>1 0,82</p> <p>3 6,84</p> <p>2 3,48</p>
<p>ladrillo cerámico hueco de 12cmx18cmx33cm con revoques</p>  <p>$K = 1,83 \text{ W/m}^2.\text{K}$ (Mín: 1,69; Máx: 1,99)</p>	 <p>Tsi mín = 12,5°C</p> <p>Condensación superficial: 4,5 g/m²h</p>	

Sistema constructivo (Transmitancia térmica)	Distribución de isotermas Temp superficial interior mínima Condensación superficial	Condensación intersticial Caudal de condensado
 <p>$K = 1,04 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Mín: 1,10; Máx: 0,96)</p>	 <p>Tsi min = 15,0 °C NO CONDENSA</p>	 <p>5,0 g/m².día</p> 
<p>Bloque de hormigón volcánico de 17x19x35cm</p>  <p>$K = 1,79 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Mín: 1,74; Máx: 2,18)</p>	 <p>Tsi min = 12,3 °C Condensación superficial: 3,7 g/m²h</p>	 <p>7,4 g/m².día</p> 
<p>Bloque hueco de hormigón con inserto de 2 cm de poliestireno expandido (20kg/m³)</p>  <p>$K = 1,77 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Mín: 1,62; Máx: 2,35)</p>	 <p>Tsi min = 11,9 °C Condensación superficial: 7,3 g/m²h</p>	 <p>11,7 g/m².día</p> 

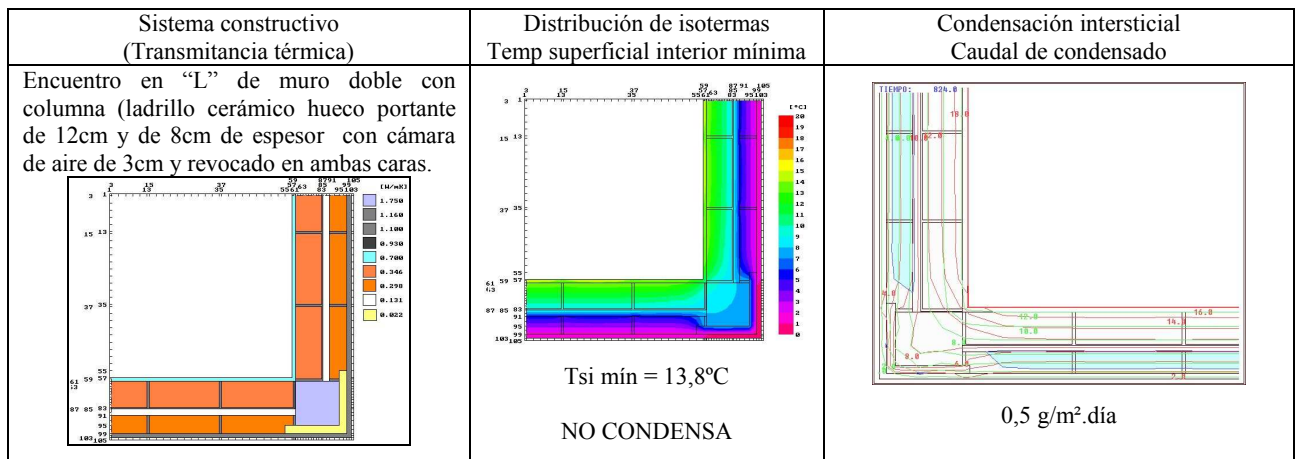


Figura 15: Diferentes sistemas constructivos analizados higrotérmicamente: condensación superficial e intersticial

CONCLUSIONES

El estudio realizado sobre los dos sistemas constructivos que se presenta, muestra que si bien en ambos existen riesgos de condensación cuando se analizan aplicando la Norma IRAM 11625, en uno de ellos (ladrillo cerámico hueco portante) puede considerarse despreciable el caudal másico de condensado que representa y por el nivel de ocurrencia cíclica, que se verifica en épocas invernales y se reevapora para temperaturas superiores. Diferente es la situación del segundo caso (bloque hueco de hormigón), en que la condensación es continua con tendencia incremental en el tiempo y con baja posibilidad de reevaporar el total de condensado. Por lo expuesto, se deduce que el método de la Norma IRAM 11625 es más exigente que cualquier análisis higrotérmico más elaborado que se haga, aunque en este trabajo se evaluó sólo en condiciones de régimen permanente.

El procedimiento desarrollado en esta presentación, responde a una metodología de evaluación de los riesgos de condensación en sistemas constructivos, con las herramientas que se disponen en el laboratorio. No obstante, existen otros métodos de simulación que permiten determinar el comportamiento en régimen variable y que consideran más parámetros físicos de los materiales componentes. Con respecto al listado de casos que se presentan en la Figura 15, es parte de un trabajo en elaboración en que se pretende mostrar el comportamiento higrotérmico que se manifiesta en distintos muros exteriores. En ellos se encuentran casos que condensan tanto superficial como intersticialmente y otros, en los que no hay riesgos de condensación superficial pero sí intersticial.

En definitiva, cada ejemplo que se evalúe merece un tratamiento particular, de modo de analizar si su comportamiento higrotérmico es satisfactorio para las condiciones de borde impuestas, o es factible de convertirse en una patología. En aquellos casos que se hallan en la etapa de diseño y se detecta la existencia de una patología higrotérmica, tanto superficial como intersticialmente, se propone una solución al problema existente, el que es tratado con la misma rigurosidad que el sistema original, de manera tal de demostrar que la misma está exento de tener riesgos de condensación.

REFERENCIAS

- IRAM 11564 .(1997) Determinación de las Propiedades de Transmisión de Calor en Régimen Estacionario de los Elementos de Construcción. Método de la caja caliente con caja de guarda.
- Physibel .(1996) Consulting engineers. Research. Advice. Software. Bélgica
- Standaert P. (1985) Thermal bridges: a two-dimensional and three-dimensional transient thermal analysis, ASHRAE/DOE/BTECC Conference. USA.
- SAP Users Group (1979) "TAP 6 Thermal Analyzer Computer Program", University of Southern California, Dept. of Civil Engineering, Los Angeles, California
- NORMAS IRAM sobre "Aislamiento Térmico de Edificios" N° 11601, 11603, 11605 y 11625.
- Billington N. S. (1967) Building Physics: Heat. Pergamon Press, Oxford.
- Lotersztain I. (1970) Condensación de humedad en viviendas, Publicación INTI.
- Davies M. G. (1973) Computing the rate of superficial and interstitial condensation, Building Science Volume 8, Issue 2, June 1973, Pages 97-104
- Aghemo C., Azzolino C. (1996) Il Progetto Dell'Elemento Di Involucro Opaco, LAMSA, Italia
- Volantino V. L., Villarroel Z., Moruga J. V. (1999) Método de evaluación integral del comportamiento higrotérmico de sistemas constructivos Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 3, N° 1, 1999, 08.37-08.40 (22^a)

ABSTRACT: An analytical-experimental method is presented for the evaluation of the hygrothermal performance of building systems. Two typical cases of walls used in building construction were adopted as examples. These were submitted to thermal transmittance test and then to numerical simulation by heat and mass transfer software for two-dimensional geometry. The study was carried out for weather conditions of Buenos Aires suburbs while indoor temperature and relative humidity were fixed at a minimum level of hygrothermal comfort. The main objective pursued is the verification of superficial and interstitial moisture condensation risks and its time evolution. A list of results obtained for other building systems analysed with the same method is included.

Keywords: hygrothermal behavior, condensation, construction systems