

PATOLOGÍAS DE CONDENSACIÓN

diseño y uso del edificio

Facultad de Arquitectura

Verónica Chauvie
Alicia Picción

COMISIÓN SECTORIAL DE EDUCACIÓN PERMANENTE

AREA AGRARIA::
ING.AGR.OMAR CASANOVA

AREA ARTISTICA:
LIC. MARIA J.FORNARO

AREA CIENTÍFICO TECNOLÓGICA:
ING. GERARDO AGRESTA

ÁREA SALUD:
DR. ERNESTO BORGIA

ÁREA SOCIAL:
ING.AGR. FERNANDO MARTÍNEZ AGUSTONI

REGIONAL NORTE SALTO:
ESC. BEATRIZ INVERNIZZI

ORDEN EGRESADOS:
PSIC. TERESA GONZÁLEZ

ÓRDEN DOCENTES:
PSIC. MADELÓN CASAS

UNIDAD CENTRAL DE EDUCACIÓN PERMANENTE:
ING.AGR. MARIO JASO

DISEÑO GRÁFICO:
C. ESPINOSA
A. FOLGA
R. RODRÍGUEZ

ESTA PUBLICACIÓN FUE FINANCIADA POR LA
COMISIÓN SECTORIAL DE EDUCACIÓN PERMANENTE.

Deposito legal N°336983

PATOLOGÍAS DE CONDENSACIÓN

uso y diseño del edificio

CAPITULO 1. INTRODUCCION	05
.....	
CAPITULO 2. CONTROL DEL CLIMA INTERIOR	09
.....	
CAPITULO 3. EL FENOMENO DE CONDENSACION	17
.....	
CAPITULO 4. ANALISIS DEL FENOMENO DE CONDENSACION EN CERRAMIENTOS OPACOS	26
.....	
CAPITULO 5. ESTUDIO DE RIESGO DE CONDENSACION EN CERRAMIENTOS OPACOS PESADOS	33
.....	
CAPITULO 6. ESTUDIO DE RIESGO DE CONDENSACION EN CERRAMIENTOS OPACOS LIVIANOS	49
.....	
CAPITULO 7. ESTRATEGIAS PARA LA PREVENCION DE LA PATOLOGIA DE CONDENSACION	60
.....	
CAPITULO 8. CONCLUSIONES	63
.....	
CAPITULO 9. BIBLIOGRAFIA	64
.....	
ANEXOS	65
.....	

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Los recursos de la arquitectura con relación al confort y la calidad higrotérmica del edificio

Una de las funciones de la Arquitectura ha sido siempre la de refugio contra los agentes del medio exterior. Los edificios, espacios pensados para vivir en ellos y proporcionar bienestar a los usuarios, cualquiera sean las condiciones climáticas del lugar.

El hábitat humano se encuentra continuamente bajo la influencia de los agentes climáticos exteriores, pero su propia actividad produce también modificaciones que interactúan con los edificios (fig. 1.1).

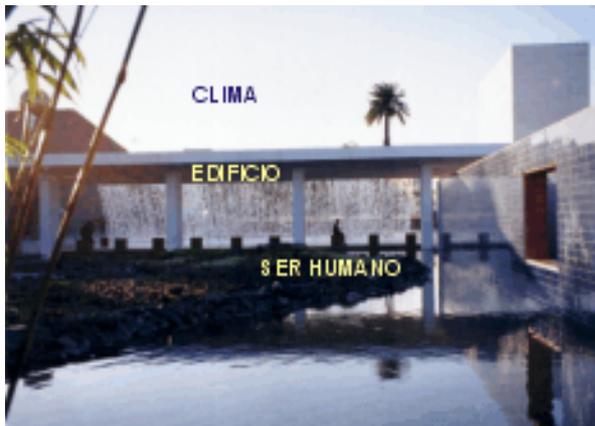


Fig.1.1- Interacción ser humano, edificio, clima.

Las características del entorno entre las que están el **clima** y el **microclima** influyen sobre la respuesta de la Arquitectura, que al actuar como filtro debe defenderse y aprovechar las características del ambiente que la rodean. A la vez la Arquitectura provoca modificaciones en el microclima y genera consecuencias sobre el ambiente.

A través del **diseño arquitectónico** podemos influir en el clima interior del ambiente creando condiciones más confortables y mejorando la calidad higrotérmica del edificio.

Para ello debemos conocer cómo “funcionan” el **edificio**, el **ser humano** y el **clima** y cómo estos tres niveles interactúan entre sí y generan acciones sobre el ambiente (fig.1.2).

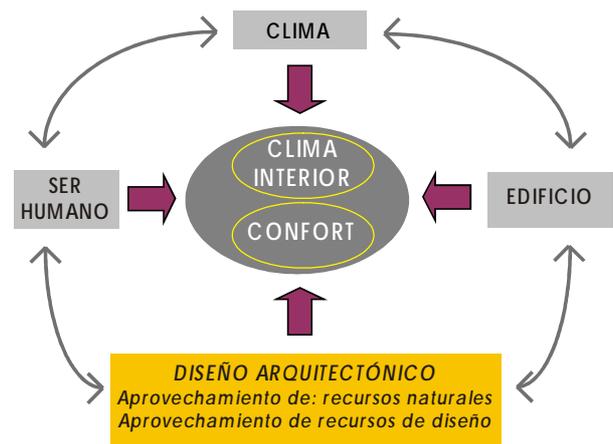


Fig.1.2- Importancia del diseño arquitectónico en la generación de un clima interior confortable.

Los edificios deben estar diseñados para que funcionen bien, pero cada proyecto es diferente, las condicionantes son diferentes, la gente, las técnicas y el clima.

Los errores de diseño desde el punto de vista térmico la mayoría de las veces se debe al desconocimiento de los principios básicos de estos tres niveles (edificio, ser humano y clima).

1.2 Clima

Para caracterizar los distintos tipos de clima se hace referencia a cuatro parámetros climáticos principales: temperatura del aire, humedad del aire, movimiento del aire (viento) y radiación solar.

El clima del Uruguay, templado, se caracteriza por un período caluroso y un período frío más riguroso debido a que las temperaturas medias

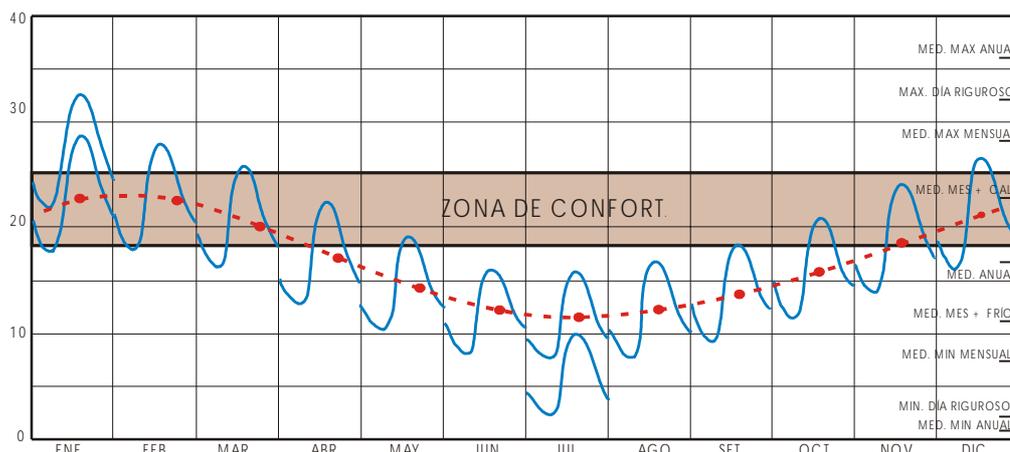


Fig.1.3- Variación de la temperatura a lo largo del año para la situación climática de la ciudad de Montevideo. En el período frío las temperaturas registradas se alejan más de la zona de confort que en el período caluroso.

se alejan más de la zona de confort que en el período caluroso (fig.1.3).

Presenta diferencias regionales debidas a la influencia de la cercanía al mar principalmente. En el norte del país, de influencia continental, el período caluroso es más largo y las amplitudes térmicas son mayores.

Además del clima se hace necesario estudiar las diferencias que se dan en zonas más pequeñas como consecuencia de distintos factores, altitud, relación tierra-agua, morfología del entorno próximo, áreas verdes, vías de comunicación, edificación, etc. Es lo que se llama **microclima** del lugar, donde las condiciones pueden ser muy diferentes.

Las características que definen nuestro clima, tomando en consideración las influencias del microclima, no pueden estudiarse por separado porque es el conjunto de ellas lo que hace que la Arquitectura de climas templados tenga una complejidad mayor que en los climas extremos. Tiene que adaptarse a condicionantes diferentes para ambos períodos, buscando el equilibrio. Esta condición exige mucho conocimiento y la hace más difícil desde el punto de vista del diseño. El edificio

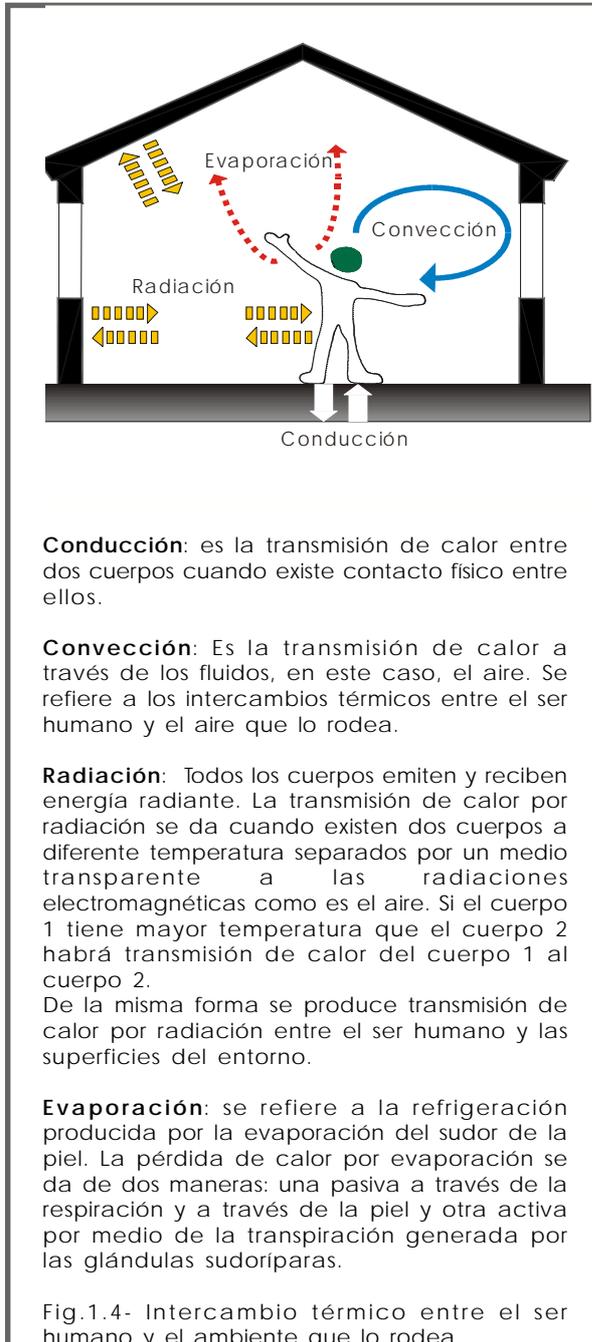
debe incorporar las ventajas o las protecciones al viento o al sol, debe proyectarse para aprovechar y para protegerse a la vez.

Esto significa soluciones y sistemas flexibles, atendiendo a los recursos de la Arquitectura como son: orientaciones, diseño de cerramientos opacos, transparentes fijos y/o móviles, espacios intermedios que pueden cambiar la acción de los parámetros climáticos según las circunstancias. No es lógico que los arquitectos adoptemos partidos arquitectónicos, formas, materiales y tecnologías o recursos estéticos que empeoren el clima, considerando que son los edificios los que deben brindar confort a sus ocupantes.

1.3 Confort térmico

El confort térmico que el ser humano percibe en un ambiente determinado es un fenómeno complejo porque intervienen a la vez las **características del ambiente** y las **características del ser humano** a partir de los intercambios de energía entre el cuerpo y el ambiente (fig.1.4) y las respuestas de los mecanismos de regulación.

Las características del ambiente que rodea a las personas e influyen sobre los mecanismos de intercambio de calor se pueden manejar a través del diseño arquitectónico.



El individuo está rodeado por aire y por las superficies de la envolvente del espacio en que se encuentra. De ahí que las variables de confort que dependen del ambiente son:

temperatura, humedad y velocidad del aire y temperatura radiante de las superficies.

El aire resume tres de las cuatro variables que condicionan la sensación térmica:

La **temperatura del aire**, también llamada de bulbo seco influye en el intercambio térmico por convección entre el aire y la superficie de la piel o de la ropa, por lo cual tiene gran influencia en la sensación térmica (frío o calor).

La **humedad relativa** indica la facilidad con que el aire evapora el agua y la transpiración a nivel de la piel y de la ropa y por lo tanto la eficacia del refrescamiento del sudor. Esta facilidad se acentúa con la velocidad del aire. Con temperaturas del aire altas la influencia de humedades relativas altas se hacen sentir más en el organismo, a través de la temperatura cutánea y del nivel de sudoración.

En cuanto a la **velocidad del aire** su efectividad está en estrecha relación con la temperatura. Los intercambios convectivos aumentan con la velocidad del aire por lo cual aumenta la sensación de "refrescamiento". Su efecto sobre el confort dependerá de la temperatura y de la humedad del aire. A temperaturas muy altas el refrescamiento producido por la evaporación del sudor no compensa el calor que se gana por convección por lo cual no resulta conveniente la ventilación en esta situación.

La **temperatura radiante de las superficies** afecta el intercambio de calor entre el individuo y estas superficies por intercambios de calor por radiación.

Esta variable también es de gran importancia ya que casi el 50% de los intercambios de energía entre el cuerpo y el ambiente se realizan por radiación, debido a que la velocidad del aire en los ambientes interiores es baja por lo general. Se recomienda que la

diferencia entre la temperatura del aire y la temperatura de los cerramientos no sea muy grande (4°C a 6°C según la norma que se consulte).

Los **factores de confort** que dependen del ser humano responden a las características de los usuarios de ese espacio y son muy importantes porque condicionan su percepción ambiental. Estos son:

Actividad: es muy importante porque influye en el metabolismo haciendo variar los requerimientos de confort. Por ejemplo, si un individuo se encuentra realizando alguna actividad de alta intensidad se va a encontrar en confort a una temperatura más baja que una persona en reposo.

Vestimenta: es una capa aislante que influye modificando los intercambios térmicos entre el cuerpo y su entorno y en su comportamiento al paso de la humedad.

Situación geográfica: se relaciona con la aclimatación de acuerdo al clima del lugar, es decir, la mayor resistencia al frío o calor de las personas que viven en los países de clima frío o caluroso.

Época del año: se relaciona con la aclimatación al frío en el período frío o al calor en el período caluroso que hace que un día frío en verano se perciba como mucho más frío que si un día con las mismas características

ocurriese en invierno.

Edad, sexo, educación: influyen sobre el grado de adaptación a las circunstancias climáticas.

Factores psicológicos: la variación en el tiempo de los parámetros es un factor positivo en el confort de las personas (ambientes dinámicos). Esta variabilidad de las condiciones hace que los márgenes de confort se amplíen. Se ha demostrado que aparecen más personas disconformes en ambientes estáticos donde la posibilidad de variabilidad es menor.

Desde el punto de vista del confort el trabajo básico del arquitecto es el diseño de ambientes conociendo siempre la influencia de las variables de confort, sobre las que puede actuar, y la influencia de los factores del usuario.

Por ello no parece lógico fijar valores estrictos de los parámetros sino manejarse en una zona de confort que puede estar entre 15 y 30°C de temperatura con la humedad relativa entre el 40 y el 70%, dentro de la cual el bienestar es posible, aunque siempre puede haber un porcentaje de personas disconformes.

2. CONTROL DEL CLIMA INTERIOR

2.1 Comportamiento higrotérmico de la envolvente

De acuerdo a la caracterización de nuestro clima, clima templado, un edificio responderá al correr del año a las exigencias climáticas del período frío y del período caluroso, a menudo contradictorias.

La envolvente es el filtro que separa un ambiente interior más constante de otro exterior más variable y más agresivo.

Nos referimos a la envolvente como filtro porque a través de ella se producen de forma continua intercambios o transferencias de calor y vapor de agua entre el ambiente interior y el exterior. Al actuar como filtro, la envolvente influye sobre la calidad del ambiente interior, determinando desde el punto de vista higrotérmico las condiciones de confort y habitabilidad del edificio (fig.2.1).

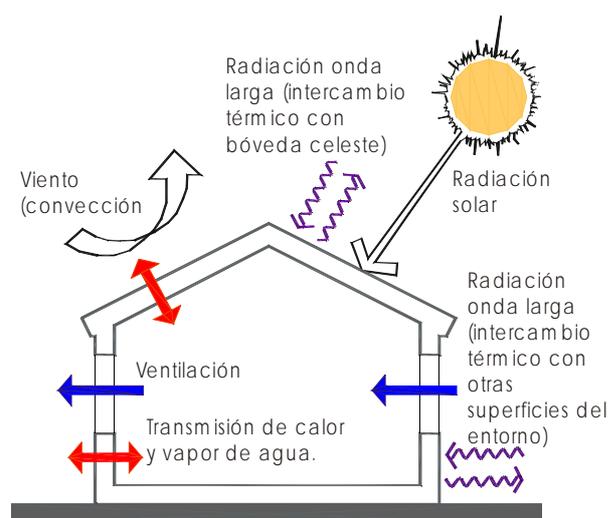


Fig.2.1- Intercambio térmico entre un edificio y su entorno.

La envolvente está compuesta por distintos tipos de cerramientos cuyas características

(opacos, transparentes, fijos, móviles) responden a las diferentes funciones que cumplen.

La característica principal de los cerramientos transparentes, la "transparencia", está ligada a sus funciones principales:

la *iluminación natural*

la *visibilidad* relacionada con factores psicológicos de percepción del mundo exterior y

la *ventilación natural* al poseer partes móviles que permiten la ventilación higiénica.

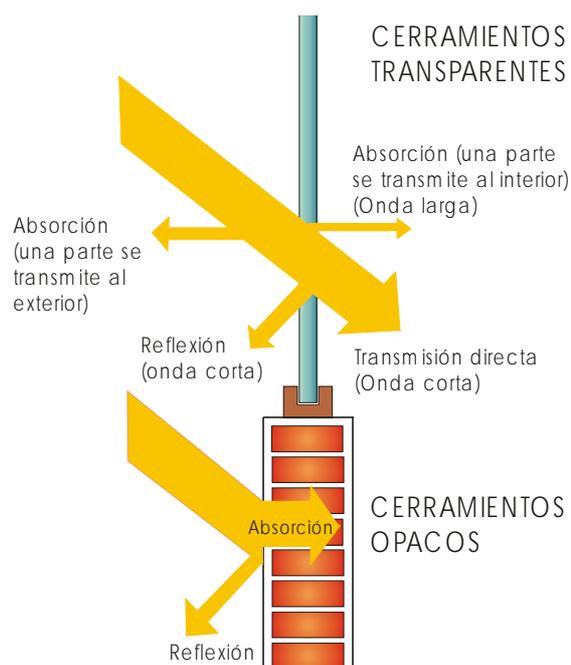


Fig.2.2- Comportamiento de cerramientos opacos y transparentes ante la radiación solar.

Los cerramientos transparentes permiten que la radiación solar se transmita directamente hacia el interior de los locales transformándose en calor cuando es absorbida por las superficies internas. El vidrio es opaco a las radiaciones de onda larga por lo cual la energía

emitida por las superficies de cerramientos y equipamientos queda “atrapada” produciéndose el “efecto invernadero”. La protección ante la radiación solar es entonces fundamental en verano para los cerramientos vidriados-

A diferencia de los cerramientos transparentes los opacos no dejan pasar la radiación pero sí el calor y la humedad. Parte de la radiación que incide en ellos es reflejada y parte es absorbida dependiendo de la terminación superficial (superficies claras reflejan más y por ende absorben menos). El cerramiento transmite parte del calor hacia el interior con un retardo y una amortiguación (según su inercia térmica) y finalmente lo cede al ambiente interior por radiación (onda larga) y por convección, calentando el aire (fig.2.2).

En ambos tipos de cerramientos, simultáneamente al efecto de la radiación solar, se produce transmisión de calor entre el aire exterior y el interior que están a diferentes temperaturas. La dirección del flujo de calor se da del cuerpo más caliente al más frío, por lo tanto se puede decir que en invierno se generan pérdidas de calor (si $t_e > t_i$) y en verano ganancias (si $t_e < t_i$).

La envolvente debe reducir estos flujos de calor de modo de reducir las pérdidas de calor en invierno y las ganancias en verano. **La estrategia para lograr este objetivo es el aislamiento térmico.**

El estudio teórico para definir el aislamiento térmico del cerramiento se hace en régimen estacionario, considerando que las temperaturas del aire exterior y el interior no varían y el flujo de calor que atraviesa el cerramiento es constante y perpendicular al cerramiento.

En la realidad las condiciones exteriores e interiores no son constantes sino que varían en el tiempo, sobre todo las temperaturas exteriores a las que se les debe sumar el efecto de la radiación solar.

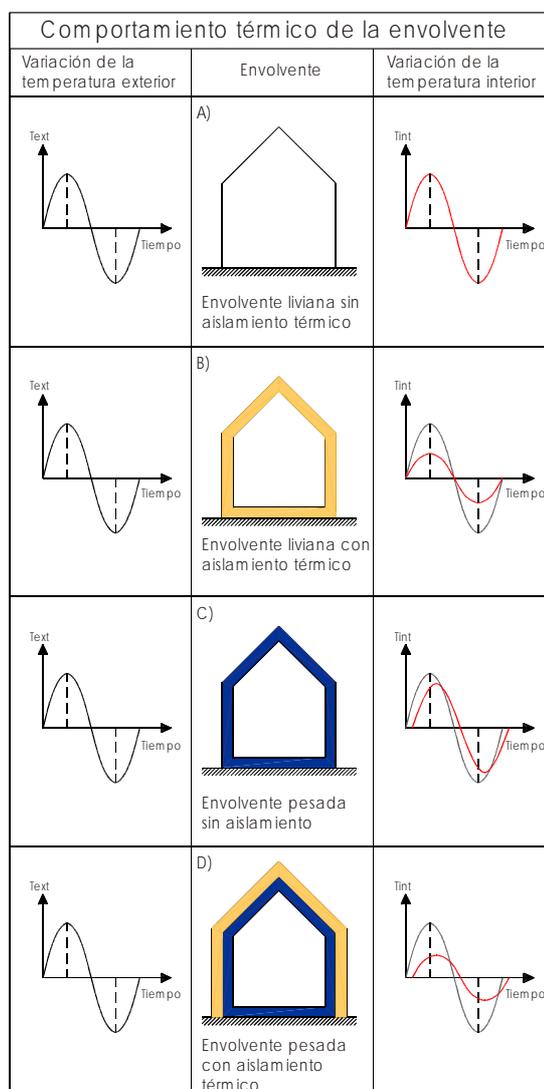


Fig.2.3- Comportamiento térmico de la envolvente. De: “L’isolation thermique de la toiture inclinée” SIMON F. HAUGLUSTAINE J.

La transmisión de calor a través de los cerramientos opacos en régimen variable depende de su inercia, concepto que se relaciona con la masa del cerramiento. La variación de temperatura interior de una envolvente liviana y sin aislamiento térmico es prácticamente igual a la evolución de la

temperatura exterior (fig.2.3a).

La envolvente de una casa antigua (muros anchos de materiales pesados) compensaban la falta de aislamiento térmico con una gran inercia térmica con lo que se logra una reducción de las oscilaciones de la temperatura exterior en la cara interior del cerramiento (amortiguación) y las desfasa en el tiempo (retardo), (fig.2.3c). Esto genera condiciones mucho más estables y menos rigurosas en el ambiente interior, tanto en la temperatura de las superficies como en la del aire.

Contrariamente para el caso de envolventes livianas y muy aisladas se reduce considerablemente el flujo térmico pero prácticamente no hay retraso (fig.2.3b).

La inercia térmica se puede combinar con el aislamiento térmico para obtener las ventajas respectivas de ambos recursos (fig.2.3d).

Las condiciones de temperatura y humedad del aire en el interior del edificio deberán ser diferentes y menos variables a las del ambiente exterior. Normalmente la temperatura y humedad medias son más altas que las del exterior debido a la generación de calor y de vapor por ocupación y a que el aire se mueve a velocidades más bajas.

De acuerdo a la época del año (período frío o caluroso) debemos actuar sobre la temperatura, aumentándola o disminuyéndola. Esta solución debe complementarse haciendo intervenir otra estrategia para la regulación de la humedad del aire interior: la ventilación para la renovación del aire interior.

Si la humedad es muy alta se ven afectados tanto el bienestar térmico y la calidad del aire interior como el edificio y

sus materiales, por el crecimiento acelerado de microorganismos y la aparición de condensaciones en las superficies y en las capas interiores de los cerramientos.

Si bien humedades relativas medias (tabla 2.1) del orden de 40 a 60% son indispensables para el correcto funcionamiento del sistema respiratorio, altos contenidos de humedad en los

ambientes aparecen consecuencias importantes para el propio edificio y para sus ocupantes, siendo uno de los aspectos más importantes de degradación de la calidad del aire interior. (CSTB Magazine 133 janvier-février 2001).

Un ambiente seco provoca malestar al individuo por sequedad cutáneo-mucosa y por aumento de la electricidad electrostática mientras que un ambiente excesivamente húmedo favorece el crecimiento de organismos biológicos (hongos, ácaros) causantes de diversas dolencias que afectan a los seres humanos (Trenchs V., Domingo A., García-Tornel S., Gaspá J., 2002).

Altos niveles de humedad también afectan la durabilidad de los materiales que componen los cerramientos provocando la aparición de condensaciones.

El riesgo de producción de condensaciones en los cerramientos depende de varios factores que se relacionan a:

100%	Saturado
80%	Muy húmedo
65%	Húmedo
40%	Seco
20%	Muy seco
0%	



Tabla 2.1- Percepción de la humedad ambiental.
De: Trenchs V. et al.

- el diseño de los edificios, de los cerramientos que conforman la envolvente y del sistema de ventilación,
- los patrones de uso por parte de los habitantes en cuanto a la generación y control de la humedad interior y a los hábitos de ventilación.

2.2- La responsabilidad del arquitecto- Búsqueda de la respuesta

Diseño de los cerramientos y del sistema de ventilación

Reafirmamos lo que dijimos desde el principio, el diseño arquitectónico define el comportamiento higrotérmico del edificio sea o no conciente de ello el arquitecto.

Ante la variabilidad de las condiciones ambientales, exteriores e interiores, la arquitectura tiene la posibilidad de adaptación al clima exterior con los propios recursos de diseño que el arquitecto maneja ineludiblemente de modo de controlar mejor el clima interior. **En este caso el diseño correcto de los cerramientos como de la ventilación son los elementos de control que modifican o regulan los parámetros del ambiente interior: temperatura, humedad y movimiento del aire y temperatura radiante de las superficies.**

Las condensaciones se producen en el período frío. El principal problema del frío es, como ya vimos, el control de las pérdidas del calor interno del local (a través de los cerramientos y de la renovación de aire del local) y la captación de energía solar que actúan sobre la temperatura de las superficies y la

temperatura del aire.

Para completar el control del clima interior de manera de evitar la ocurrencia de condensaciones debemos controlar la humedad del aire mediante estrategias de ventilación para invierno.

Las respuestas de la arquitectura para conseguir el control de temperatura y de la humedad son complejas en climas templados, ya que significa solucionar el caso de invierno cuya estrategia principal debe ser evitar las pérdidas de calor, pero sin empeorar el comportamiento del edificio en verano. Las soluciones complejas se darán especialmente en cuanto al diseño de las estrategias de ventilación y de captación solar que son de signo contrario al de invierno y que afecta tanto al diseño de los cerramientos transparentes y móviles como a la forma y orientación del edificio.

2.3 Diseño higrotérmico de los cerramientos

Para el diseño de la envolvente el arquitecto debe conocer diversos **parámetros que definen su comportamiento e influyen sobre el clima interior**

Del Ambiente exterior

Los parámetros climáticos más importantes a tener en cuenta son:

- la temperatura del aire t_a
- la humedad relativa del aire H_{re}
- la velocidad del aire (viento) v
- la radiación solar

Del Ambiente interior

Los parámetros más importantes a tener en cuenta son:

- la temperatura del aire t_i
- la humedad relativa del aire H_{ri}
- la velocidad del aire v
- las temperaturas radiantes (temperatura de las superficies interiores)

Es imposible para el proyectista actuar sobre el medio exterior pero sí puede actuar sobre el medio interior modificando los valores de los parámetros del ambiente interior, t_i , H_{ri} , v y t_{si} , con un diseño que tenga en cuenta estos aspectos. La acción del usuario también tiene importancia en este sentido debiendo apoyar, y no anular, el buen diseño mediante un uso adecuado.

Transmitancia térmica de la envolvente

La transmitancia térmica se define también como el flujo de calor transmitido de un medio a otro a través de la unidad de superficie de un cerramiento cuando la diferencia de temperaturas entre ambos medios es 1°C , en régimen estacionario.

La unidad es $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, siendo 1°C igual a 1K según normas ISO.

Se expresa a través del valor de **transmitancia térmica U** que puede definirse como el inverso de la **resistencia térmica total** del cerramiento (R_t). Un cerramiento bien aislado tendrá una R_t alta por lo tanto una U baja, es decir que cuanto menor es la transmitancia mejor es la calidad térmica del cerramiento.

La envolvente no es uniforme ni continua, está formada por los cerramientos opacos [que tienen generalmente zonas de menor

resistencia térmica por la presencia de puentes térmicos como los conformados por los elementos estructurales de hormigón armado] y por los cerramientos transparentes.

La transmitancia térmica U depende de:

las propiedades térmicas de los materiales que componen los cerramientos:

Conductividad térmica λ

Resistencia térmica R

el espesor e de cada capa del cerramiento la posición del cerramiento (horizontal o vertical).

Este parámetro define:

El comportamiento del cerramiento con relación a las pérdidas o ganancias de calor; en invierno reduce las pérdidas del calor generado en el interior y en verano reduce las ganancias cuando la temperatura exterior es mayor que la del aire interior.

La **temperatura superficial interior media** (t_{si}) que tiene incidencia en el confort del usuario y en la ocurrencia de condensaciones superficiales

Las superficies vidriadas tienen una transmitancia muy alta, del orden de $6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ para los vidrios simples (5 veces más alta que la de un cerramiento opaco con aislamiento térmico). El modo de reducir este valor es mediante la colocación de una protección móvil exterior o interior, recurso flexible y necesario para nuestro clima (aislamiento - protección) y/o el uso de vidrios dobles o doble aventanamiento. De todas formas debe cuidarse la relación entre el área de cerramiento vidriado y la envolvente expuesta del local.

Masa del cerramiento

En régimen estacionario, en el que se supone que las temperaturas interior y exterior son constantes a lo largo del tiempo, alcanzaría con la transmitancia U para definir la calidad térmica del cerramiento.

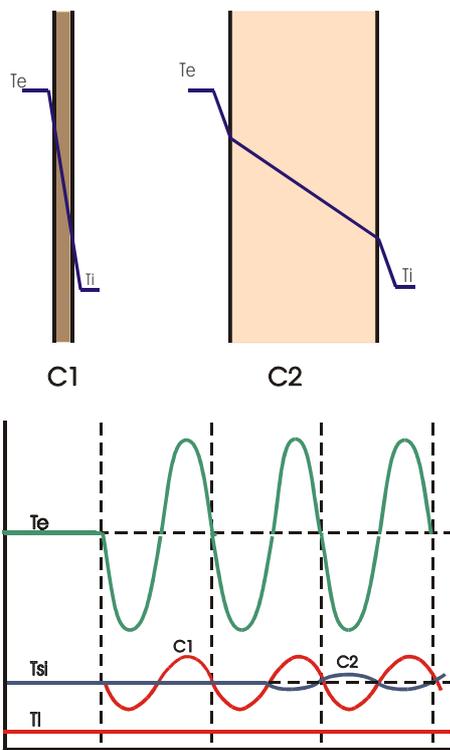


Fig.2.4- Caso de dos cerramientos de igual resistencia térmica y diferente capacidad de amortiguación.

Sin embargo cuando la temperatura exterior varía cíclicamente (régimen variable) la transmisión de calor está afectada por la inercia térmica del cerramiento. Ante las oscilaciones de las temperaturas y de los flujos de calor, los cerramientos opacos pesados funcionan como acumuladores térmicos, absorbiendo y desprendiendo calor al ambiente en el tiempo. Esta acción amortigua la amplitud de las oscilaciones y retrasa en el tiempo la ocurrencia de los picos de máxima-mínima temperatura en la cara interna, con lo que se consiguen condiciones térmicas más estables en el interior y un mejor comportamiento radiante de las superficies.

En la inercia del cerramiento intervienen la capacidad térmica de las capas y la resistencia térmica de las mismas.

La masa del cerramiento juega un papel importante y depende de

- la densidad ρ
- el espesor e
- el peso de los materiales que conforman cada capa del cerramiento.

La acción de la inercia térmica es favorable en el caso de climas cuya característica es la variabilidad de las condiciones climáticas exteriores, sean diarias o anuales, por lo que es aconsejable en nuestro clima y más si la ocupación del edificio es permanente.

En cambio no es fácil hacerlo con materiales livianos aunque se aumente su espesor.

Un cerramiento pesado y un cerramiento liviano pueden tener igual U teniendo distinta masa. La temperatura superficial interior media es igual para ambos casos pero la fluctuación de la temperatura superficial interior alrededor de esa media es diferente, será mayor para un cerramiento liviano (fig.2.4).

Existe además un corrimiento en horas del momento en que se producen los valores máximos y mínimos, siendo mayor en el muro pesado que en el liviano.

Los cerramientos livianos deberán tener una U menor que los cerramientos pesados para compensar, en cierta medida, la falta de inercia.

El DECCA en trabajos de asesoramiento para el BHU definió valores de transmitancia máxima de cerramientos atendiendo a su comportamiento en régimen variable: para

cerramientos cuya masa $m > 280 \text{ kg/m}^3$ se establece una exigencia de $U \leq 0.85 \text{ W/m}^2\text{K}$, para cerramientos de $m > 280 \text{ kg/m}^3$ se recomienda $U \leq 0.85 \text{ W/m}^2\text{K}$ y por último para cerramientos de masa $m < 100 \text{ kg/m}^3$ se recomienda $U \leq 0.40 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Superficie expuesta y factor de forma

Los intercambios térmicos por la envolvente serán proporcionales a su área expuesta al exterior en relación al volumen interior del local. Como recurso de diseño es importante porque expresa la aptitud de la forma para contener un volumen con la menor exposición posible, que se complementa con el mayor desarrollo de fachadas orientadas entre el NNE y el NNO.

Factor de huecos

Indica el porcentaje de área vidriada de la envolvente. Al aumentar el área vidriada suceden dos fenómenos: aumenta la captación de energía solar y a su vez aumenta la transmisión de energía de un medio a otro debido a la alta transmitancia U del vidrio. Este aumento, perjudicial en el período caluroso, puede ser beneficioso en el período frío. Sin embargo, es frecuente en este período que se registren días consecutivos de alta nubosidad por lo cual no sólo no habrá ganancia solar sino que se producirán grandes pérdidas de energía por transmisión. Se puede comprender, entonces, el riesgo que implica aumentar indiscriminadamente la superficie vidriada.

2.4 DISEÑO DE LA VENTILACIÓN

La ventilación se expresa en renovaciones de aire por hora y es la variable de mayor complejidad porque intervienen factores diversos.

Las condiciones de ventilación son determinantes de la salud y el bienestar humanos. Las funciones de la ventilación son las siguientes: mantener la calidad del aire interno generando renovaciones de acuerdo a los mínimos necesarios (ventilación higiénica de invierno), facilitar el intercambio térmico entre el usuario y su entorno (ventilación de confort o de verano) fig.2.5, enfriar las superfi-

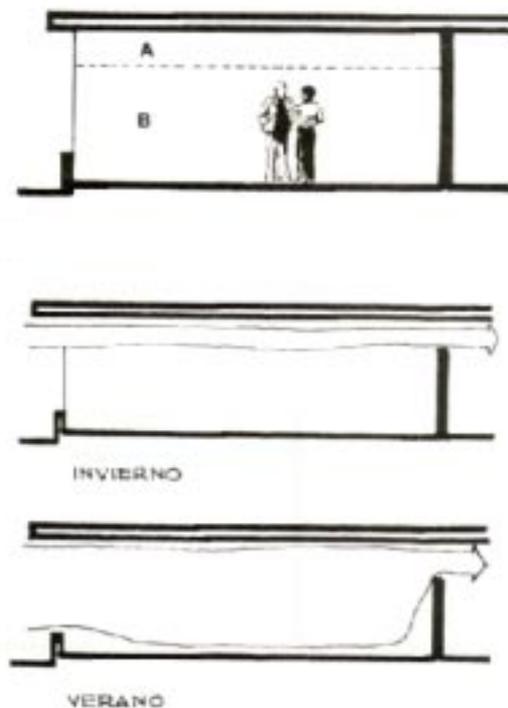


Fig.2.5- Ventilación diferenciada de verano e invierno. De: 'Arquitectura y Clima'. R.Rivero

cies de los locales (ventilación de enfriamiento estructural, verano). (Mimbacas, 1998).

Los factores que afectan la ventilación y que se deben tener en cuenta al diseñarla: condiciones del entorno donde se inserta el edificio (contexto urbano, vegetación entre otros), orientación de los edificios con relación a los vientos predominantes, diseño de las aberturas (tamaño, ubicación, partes móviles, tecnología), necesidades de ventilación de acuerdo a la cantidad de personas y actividades realizadas en los locales.

En invierno es importante controlar el caudal de ventilación porque el aire exterior más frío incrementa las pérdidas de calor bajando la temperatura del aire ambiente y la temperatura de las superficies. Existen tablas que establecen caudales mínimos de renovaciones de aire por hora desde el punto de vista higiénico para mantener una correcta calidad del aire y combatir los efectos negativos de la alta humedad interior. Tan importante como esto es diseñar las aberturas de modo que la corriente de aire pase por la parte superior del local de modo que no tenga acción directa sobre el cuerpo humano.

En verano sin embargo la estrategia principal es aprovechar al máximo los beneficios de la ventilación, que significa orientar las aberturas hacia el viento, prever aberturas en paredes opuestas sometidas a condiciones exteriores de temperatura y de viento distintas, asegurar salidas permanentes de aire en las partes altas del local, diseñar las aberturas de modo que dejen libre la mayor superficie de paso y que la corriente de aire "barra" el local y tenga acción directa sobre el cuerpo humano.

En climas como el nuestro, de inviernos fríos y húmedos, con locales de volumen cada vez más reducido porque la reglamentación lo permite y con alto nivel de ocupación, las estra-

tegias de ventilación son importantes para controlar la humedad.

Mantener condiciones de ventilación mínimas es bastante complejo y las soluciones son más complejas aún al tener que atender de manera diferente el verano del invierno, no bastando la determinación de un porcentaje móvil como lo reglamenta las Intendencias Municipales.

La normativa municipal reglamenta la ventilación exigiendo un área móvil como un porcentaje del área del piso. Pero no toma en cuenta otros factores igualmente importantes como son: la ubicación de las ventanas en relación al volumen del local y a la tipología edilicia; la dirección del flujo de aire ya que el vapor debe salir lo más directamente posible al exterior desde el local en que se genera sin atravesar otros locales; la forma de abrir de las ventanas que permita usar adecuadamente la ventilación de invierno y la de verano; el uso de extractores en baños y cocinas.

Para que los edificios funcionen correctamente desde el punto de vista higrotérmico estas estrategias de diseño deben estar necesariamente acompañadas por un correcto uso de los edificios por parte del usuario, tanto en el control de la humedad como en el manejo de las estrategias de ventilación.

3. EL FENÓMENO DE CONDENSACIÓN

El fenómeno de condensación se produce cuando el vapor de agua contenido en el aire cambia de fase y se condensa pasando del estado gaseoso al estado líquido.

3.1 Principios físicos

El aire atmosférico está compuesto por una mezcla de gases, principalmente nitrógeno, además de oxígeno, un poco de gas carbónico, gases raros y un porcentaje variable de vapor de agua.

(La niebla, lo que se ve salir de una caldera cuando el agua hierve no es vapor de agua ya que éste es invisible, sino que son pequeñas gotitas en suspensión de agua líquida que condensó).

Al contenido de vapor de agua en el aire se le llama **humedad absoluta (HA)** y se cuantifica en gramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco.

Cada uno de los gases que componen el aire se comporta como si se encontrara solo en la mezcla, podemos definir entonces una presión que ejerce cada gas denominada **presión parcial**, y una presión de la mezcla de gases que es la suma de las presiones parciales.

$$P_{\text{aire}} = P_{\text{nitrógeno}} + P_{\text{oxígeno}} + P_{\text{gases raros}} + P_{\text{vapor de agua}} \text{ (Pascal)}$$

Es por esto que se puede expresar el contenido de vapor de agua en el aire como presión parcial de vapor cuya unidad también es el Pascal. Para una presión atmosférica constante, la presión parcial de vapor aumenta al aumentar la HA del aire, pudiéndose establecer una relación entre ambas (Neila, J.).

El contenido de vapor de agua puede variar

desde cero (aire seco) hasta una cantidad máxima que depende de la temperatura del aire.

El límite de HA que el aire sería capaz de contener a una determinada temperatura, se le denomina **humedad absoluta de saturación (HAS)** o también puede ser referida como presión máxima o presión de saturación.

Si se grafica la variación de la HAS con relación a la temperatura del aire, se puede apreciar que la HAS aumenta con la temperatura del aire, es decir que a mayor temperatura el aire es capaz de contener mayor cantidad de vapor de agua (fig.3.1).

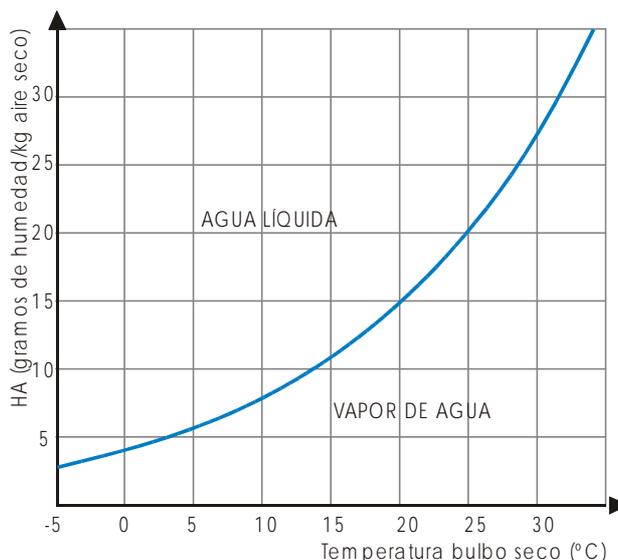


Fig.3.1- Variación de la HAS con relación a la temperatura del aire

Si al aire se le incorpora más vapor de agua del que puede contener, el vapor de agua que excede la HAS va a condensar.

Cuánto más cerca de la curva de saturación se ubique el aire ambiente tanto más alta será la sensación de humedad.

Para cuantificar las características del aire

húmedo al igual que la relación dinámica entre temperatura y humedad se utiliza el **diagrama psicrométrico** (anexo). En este diagrama se representan todos los posibles estados del aire con relación a la temperatura, contenido de vapor de agua y contenido de calor. En abscisas se dispone la temperatura seca del aire y en ordenadas la Humedad Absoluta

Este diagrama permite conocer la cantidad máxima de vapor de agua que el aire puede contener a una temperatura del aire dada. Ejemplo: un aire a 18°C admite aproximadamente 13 g/kg de vapor de agua [13 gramos de vapor de agua por kilo de aire seco] mientras que a 0°C sólo admite 4 g/kg (fig.3.2).

Este ejemplo demuestra que la humedad

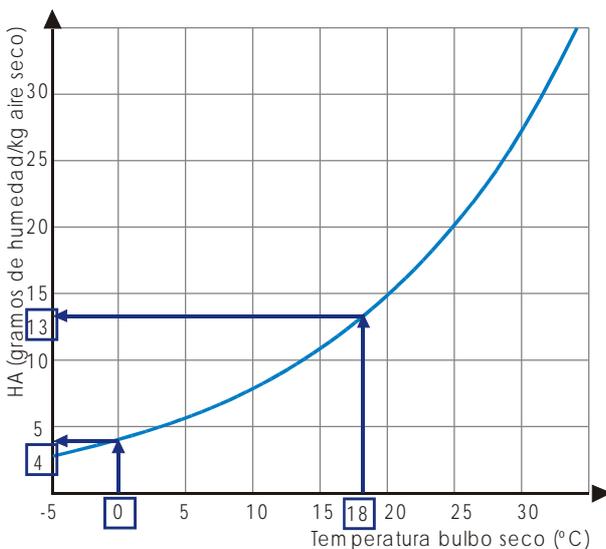


Fig.3.2- La HAS aumenta al incrementarse la temperatura del aire

absoluta del aire por sí sola no es ilustrativa de las condiciones reales de la humedad del aire. Es necesario conocer también su temperatura para saber si se está cerca de la saturación y poder apreciar si la humedad ambiente es alta o baja.

Suponiendo, por ejemplo, que una masa de

aire tiene una HA de 5 g/kg aire seco, analicemos que sucede en las siguientes situaciones (fig.3.3):

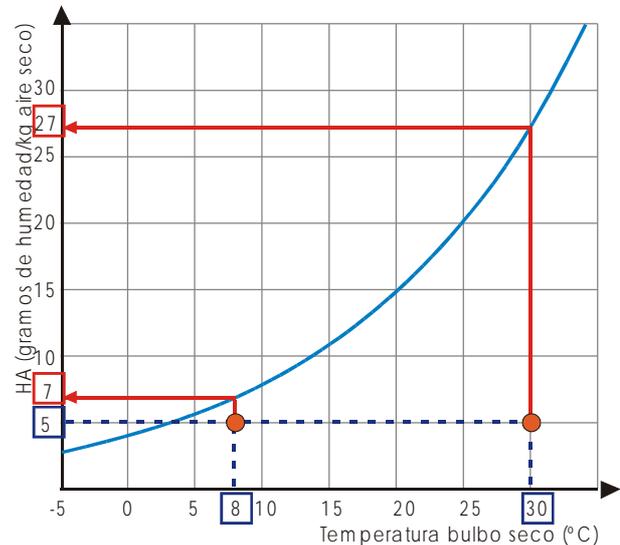


Fig.3.3- Si se mantiene la HA y aumenta la temperatura, HR disminuye.

Caso 1: la temperatura del aire es 10°C

Caso 2: la temperatura del aire es 30°C.

Siendo $HA_1 = HA_2 = 5 \text{ g/kg aire seco}$, $t_1 = 8^\circ\text{C}$ y $t_2 = 30^\circ\text{C}$, se obtienen en el diagrama psicrométrico los siguientes resultados de HAS para cada caso:

$$HAS_1 = 7 \text{ g/kg aire seco}$$

$$HAS_2 = 27 \text{ g/kg aire seco}$$

Por tanto en el caso 1 el aire se encuentra considerablemente más cerca de la saturación que en el caso 2.

A estos efectos se introduce el concepto de **humedad relativa (HR)**.

La humedad relativa del aire se puede definir como la relación entre el contenido real de humedad del aire (HA) con relación al máximo que podría contener (HAS), expresándose en forma de porcentaje (%):

$$HR (\%) = (HA / HAS) \times 100$$

Así, si la humedad relativa es 100% significa que el aire está saturado. Procediendo de esta manera punto a punto se construyen las líneas de igual humedad relativa, que se representan de 10 en 10% en el diagrama psicrométrico (fig.3.4).

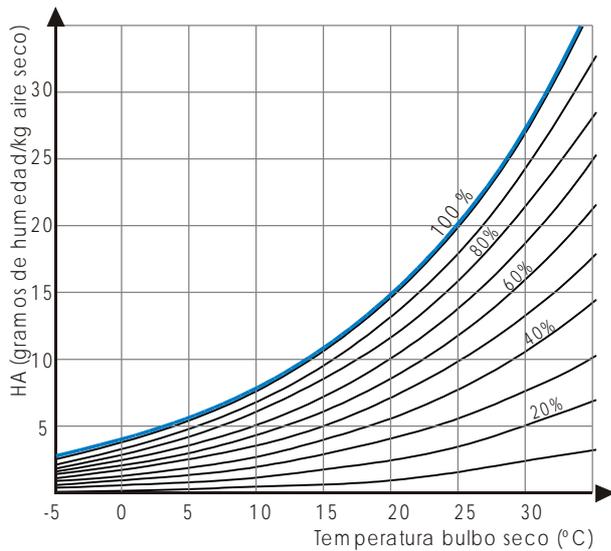


Fig.3.4- Diagrama psicrométrico con curvas de humedad relativa (HR).

Retomando el ejemplo anterior, si el aire a 10°C contiene 5 g/kg de vapor de agua, su humedad relativa será:

$$HR = (5/7) \times 100 = 71\%$$

En cambio si la temperatura es 30°C y la HA es la misma, tenemos que:

$$HR = (5/27) \times 100 = 19\%$$

Se puede apreciar, de acuerdo a estos resultados, que la humedad relativa ofrece una indicación directa de la cantidad de vapor de agua que una masa de aire puede admitir, sin necesidad de decir nada más. En el primer caso (HR=71%, ambiente húmedo, tabla 2.1.) la percepción de humedad ambiental es considerablemente más alta que en el segundo (HR=19%, ambiente seco, tabla 2.1).

Es por esto que la humedad relativa se considera el indicador más práctico y corriente

de la humedad del aire.

A partir del ejemplo anterior también se puede deducir que para un contenido constante de HA se tienen diferentes humedades relativas a diferentes temperaturas. De la misma forma, dada una determinada HA, un aumento de temperatura indica una reducción de la humedad relativa y viceversa.

A continuación veremos que sucede cuando se enfría una masa de aire con determinadas condiciones de temperatura y humedad, manteniendo constante su HA (fig. 3.5).

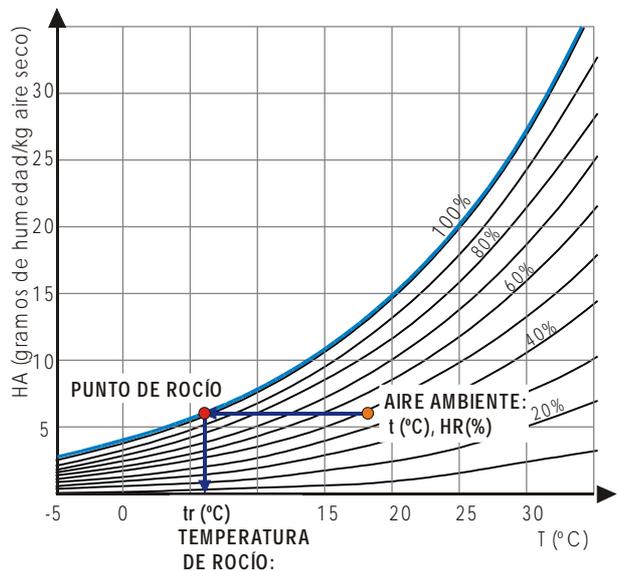


Fig.3.5- Temperatura de rocío.

Al bajar la temperatura del aire sin modificar la humedad absoluta, en el diagrama psicrométrico nos desplazamos en línea recta hacia la izquierda interceptando curvas de humedad relativa cada vez mayores hasta llegar a la curva de saturación [HR = 100%]. Ese punto se llama **punto de rocío** porque es el punto a partir del cual comienza a producirse el fenómeno de condensación.

La temperatura límite correspondiente a este punto es la **temperatura de rocío** y se

obtiene trazando la vertical por el punto de rocío, leyendo su valor en abscisas (fig. 3.5). Es decir que a temperaturas iguales o menores que la temperatura de rocío comienzan a producirse condensaciones. Entonces, si en el entorno existen cerramientos cuya temperatura superficial es menor que la temperatura de rocío el vapor de agua del aire en contacto con esa superficie va a condensar pasando a estado líquido.

El aire puede alcanzar la temperatura de rocío cuando sucede alguna o una combinación de los siguientes aspectos:

- que existan superficies muy frías en contacto con la masa de aire (es decir que la temperatura de la superficie sea menor que la temperatura de rocío),
- que se produzca un aumento de la cantidad de vapor de agua en el aire (debido a una producción de vapor alta y/o una tasa de ventilación insuficiente).
- que la temperatura ambiente sea baja (el fenómeno de condensación es más proclive a presentarse en el período frío).

Este fenómeno puede producirse en el interior del cerramiento (condensación intersticial) o en la superficie interior del cerramiento (condensación superficial).

3.2 Causas determinantes de la condensación

Las causas más comunes para la ocurrencia del fenómeno de condensación están asociadas a uno o más de los siguientes factores:

- A. alta producción de vapor de agua,
- B. bajas temperaturas del ambiente,
- C. tasa de ventilación insuficiente y
- D. cerramientos con aislamiento térmico insuficiente.

A. Alta producción de vapor de agua

La producción de vapor de agua en el interior de los ambientes es inherente al hecho de habitarlos. La humedad ambiente depende de la tasa de producción de vapor y de su control y evacuación por parte del usuario. Entre los orígenes más frecuentes de la producción de vapor se tiene: el ser humano y sus actividades, animales, plantas, determinados tipos de calefacción.

Las personas y sus actividades

La cantidad de vapor de agua generado por las personas y sus actividades depende de las características de ocupación de los locales, las actividades que se desarrollen, la cantidad y edad de las personas que ocupan los espacios (tabla 3.1).

Por individuo	
dormir	40 g/h
reposo-sentado	50 g/h
tareas de escritorio	80 g/h
trabajos domésticos	200 g/h
trabajos artesanales	300 g/h
Por día	
cocina	900 - 3000 g
lavado	500 - 1800 g
secado interior	5000 - 14000 g
duchas	750 - 1500 g
lavado de pisos	1000 - 1500 g
estufa a gas butano	1500 g/kg gas

Tabla 3.1

La situación se agrava si la ocupación de los locales es alta y si en ellos se realizan actividades que generan gran cantidad de vapor de agua como el lavado y secado de ropa. En los baños y cocinas se desarrollan

actividades generadores de una cantidad considerable de vapor de agua, por lo cual estos locales poseen un mayor riesgo de sufrir condensaciones (fig.3.6).



Fig.3.6- Patología de condensación en baños.

De acuerdo a las normativas vigentes se admiten alturas y áreas de locales cada vez menores por lo cual el vapor de agua cedido al ambiente se distribuye en un volumen menor. Las viviendas tradicionales poseen un mayor volumen dado principalmente por la mayor altura de los locales y tasas de ventilación más altas, lo que determina que el vapor de agua aportado a los locales modifica en menor medida el porcentaje de humedad relativa.

Tipo de calefacción

Su influencia sobre el fenómeno de condensación depende de:

- La fuente de energía de calefacción y el equipo. El uso de calefacción de combustión interna (estufas a querosén, a gas butano) aportan vapor de agua al ambiente porque no evacúan los gases producto de la combustión, a diferencia de otros equipos o sistemas de

calefacción cuya fuente de energía no está en el ambiente, o evacúan los gases de combustión [convector a gas de tiro balanceado] o como las estufas eléctricas por ser un tipo de calefacción seca.

- El uso de la calefacción de forma continua o intermitente. La calefacción continua permite que el aire caliente pueda elevar la temperatura de los cerramientos y así disminuir el riesgo de condensación, mientras que el aporte de calor de la calefacción intermitente al aire interior puede no ser suficiente para calentar las paredes desde su cara interna.
- La calefacción homogénea de todos los ambientes o sólo de alguno de ellos. La práctica constructiva demuestra que en nuestro país las patologías de condensación son muy frecuentes en la vivienda sin calefacción central u homogénea (Mimbacas, 1998).

Animales y plantas.

Los animales también ceden vapor de agua al ambiente como consecuencia de sus funciones vitales y del grado de actividad.

Los vegetales también ceden vapor de agua al ambiente como parte de sus procesos vitales a través de la evapotranspiración.

B. Bajas temperaturas del aire ambiente

El riesgo de ocurrencia de condensaciones en los edificios aumenta notoriamente en condiciones de invierno cuando las temperaturas del aire exterior son bajas y se alejan más de la zona de confort.

Calefaccionar el ambiente para aumentar la temperatura superficial de los cerramientos es una estrategia necesaria y complementaria pero la calefacción empleada debe ser seca y permanente, no siendo una buena solución la

calefacción húmeda e intermitente. La calefacción intermitente no es suficiente para mantener las superficies a una mayor temperatura.

C. Tasa de ventilación insuficiente

La situación empeora si la tasa de ventilación es baja o ineficaz ya sea por error de diseño o porque los ocupantes no ventilan o directamente suprimen la ventilación, es el caso que se da con el cierre de terrazas de cocinas o de la rejilla del conducto de ventilación de baños.

La hermeticidad creciente de las aberturas (resultado del mejoramiento de su calidad o de la colocación de burletes) restringe la renovación del aire interior. Apuntando al ahorro de energía y al confort se construyen cada vez más edificios herméticos; de este modo se logran reducir las pérdidas térmicas pero se incrementan al mismo tiempo los problemas de condensación y de baja calidad del aire interior porque baja la tasa de ventilación al eliminar las infiltraciones que aportan a la renovación permanente de aire de los ambientes. Es por esto que las viviendas herméticas deben contar con un sistema de ventilación mecánica central y controlada.

En Uruguay, es necesario apuntar al mejoramiento de la calidad de las aberturas para reducir tasas de infiltración de aire demasiado grandes que provocan importantes pérdidas térmicas, especialmente en viviendas de interés social. Sin embargo, debido a las condiciones climáticas en el período frío, es **imprescindible** mantener una tasa de renovación de aire permanente y controlada, a fin de evacuar el vapor de agua generado en el interior. La tasa de renovación de aire depende del uso del espacio, tipo de actividad, número de ocupantes (Rivero, R. y otros. Repartidos cátedra de Acondicionamiento Térmico).

D. Cerramientos con aislamiento térmico insuficiente

Si la envolvente no cuenta con aislamiento térmico suficiente, alcanzará temperaturas más frías en su masa y en su superficie interior debido a las bajas temperaturas exteriores durante el período frío, corriendo un mayor riesgo de encontrarse por debajo de la temperatura de rocío.

Ambiente exterior

Los parámetros climáticos más importantes a tener en cuenta son:

- la temperatura exterior t_e
- la humedad relativa exterior H_{re}

Ambiente interior

Los parámetros climáticos más importantes a tener en cuenta son:

- la temperatura interior t_i
- la humedad relativa interior H_{ri}

Es imposible para el proyectista actuar sobre el medio exterior pero sí puede actuar sobre el medio interior modificando los valores de t_i y H_{ri} con un diseño que tenga en cuenta estos aspectos. La acción del usuario también tiene importancia en este sentido debiendo apoyar, y no anular, el buen diseño mediante un uso adecuado.

3.3 Manifestaciones y consecuencias de la patología de condensación: el deterioro del edificio y de la calidad de vida de los usuarios.

El fenómeno de condensación puede producirse en la superficie (condensación superficial) o en el interior del cerramiento (condensación intersticial).

La presencia de esta patología se manifiesta generalmente por la aparición de hongos, manchas y deterioro o desprendimiento de los materiales de revestimiento (fig.3.7).



Fig.3.7-Condensaciones en cielorraso de ducto de un baño.

Estas son sólo las manifestaciones visibles de un fenómeno que tiene consecuencias importantes para el propio edificio y para sus ocupantes. Estas manifestaciones originan quejas de los usuarios sobre los problemas estéticos, deterioro de los materiales de construcción y el equipamiento, que tiene repercusiones económicas importantes por los costos de reparación o sustitución.

Los problemas que puede generar la condensación superficial:

Aparición de hongos en determinadas condiciones de temperatura y humedad. Humedades relativas altas (superiores al 70%) y sostenidas en el tiempo y una tasa de ventilación baja propician el crecimiento de hongos. Existen superficies proclives a su desarrollo: materiales orgánicos (maderas, telas), adhesivos algunas pinturas, plásticos y vinílicos, yeso.

Deterioro de los materiales de revestimiento como revoques, pinturas, elementos de madera y del equipamiento del ambiente.

Los problemas que puede generar la condensación intersticial:

En estructuras de hormigón o cerámica armada, entre otras, puede generar deterioros por corrosión de las armaduras sometidas a estas condiciones por un tiempo prolongado; puede producirse también el desprendimiento de parte de su revestimiento.

En aislantes térmicos en general, la condensación produce una reducción importante en las propiedades de aislamiento térmico ya que el aire contenido en el aislante es sustituido por agua que posee una conductividad bastante mayor ($\lambda_{\text{aire}} = 0.024 \text{ W/m.K}$, $\lambda_{\text{agua}} = 0.62 \text{ W/m.K}$), por lo tanto pierde efectividad.

En aislantes de poros cerrados, el material es permeable al vapor de agua pero impermeable al agua, por lo cual el agua pasaría a ocupar el lugar del aire en las celdillas sin poder salir al exterior. Es por esto que no debe ser admitida la condensación en aislantes térmicos.

En todos los materiales hay aumento de conductividad cuando se produce

condensación en ellos, este problema desde el punto de vista térmico es menos grave que en el caso de los aislantes; pero sobre todo se transforman en contenedores de agua, que buscará salir por el camino más fácil, generalmente hacia el interior.

Si la superficie del paramento es absorbente, las condensaciones transitorias no lo afectan en forma importante, ya que al volverse a las condiciones normales el agua se evapora con facilidad. Si la superficie no es absorbente se observa la condensación sobre la misma, el proceso de normalización es lento y por tanto existen mayores riesgos de deterioro.

Cuando las condensaciones tienen carácter más permanente, el proceso es generalmente

acumulativo, es decir que se incrementa a sí mismo. Basta que se produzcan varios días fríos y húmedos o que el agregado de humedad en el interior sea mayor a lo normal (personas enfermas o niños pequeños

que determinan mayor número de personas en la casa, menor ventilación o uso de elementos de calefacción no adecuados) para que se inicie la condensación sobre los cerramientos con menor aislamiento. La acumulación de humedad en un cerramiento determina que se vuelva más conductor del

calor, es decir que se enfriará aún más, aumentando el problema de condensación sobre el mismo y posibilitando su extensión a otros sectores.

El Departamento de Clima y Confort en Arquitectura (DECCA) ha constatado la presencia generalizada de hongos en viviendas en invierno y realizó un trabajo de identificación de los tipos de hongos existentes en paredes, pisos y techos (C. Echevarría, C. Martínez. Estudio de patologías de condensación. Cooperativa Vicman. Facultad de arquitectura. 1996).

El crecimiento de hongos ocurre en las superficies de materiales si se dan las condiciones ambientales necesarias para su

desarrollo, fundamentalmente elevada humedad relativa [HR > 75%] que se mantiene en el tiempo y si hay presencia de esporas en el aire. El crecimiento de estos organismos es muy rápido porque aprovechan los recursos al máximo.

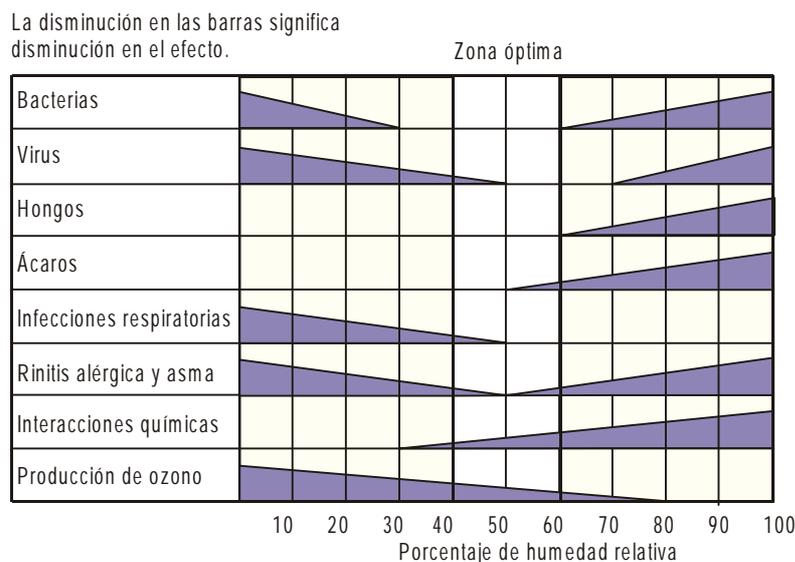


Fig. 3.8- De: Humidificadores domésticos (Trenchs V., Domingo A., García-Tornel S., Gaspá J., 2002). Referencia: Arundel et al.

Investigaciones internacionales muestran las repercusiones sobre la salud de los ocupantes de edificios con infección de hongos, fundamentalmente efectos nocivos relacionados a problemas respiratorios y de alergias. Se ha comprobado que entre 40 y

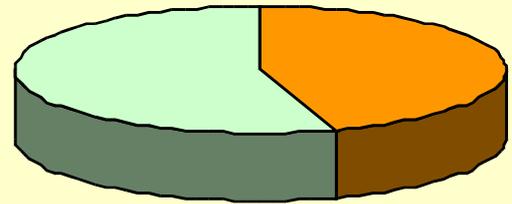
60% de humedad relativa se minimiza el efecto de diversos microorganismos sobre este tipo de dolencias (Trenchs V., Domingo A., García-Tornel S., Gaspá J., 2002, fig. 3.8).

Los problemas de humedad involucran a un 45% de los edificios estudiados en la Unión Europea, de los cuales el 40% se quejan de una variedad de síntomas; en Francia en las últimas dos décadas el número de asmáticos se ha duplicado (CSTB Magazine 133 janvier-février 2001).

Según un estudio realizado llevado a cabo por el DECCA en Uruguay, los problemas de humedad involucraron a un 77% de las viviendas estudiadas.

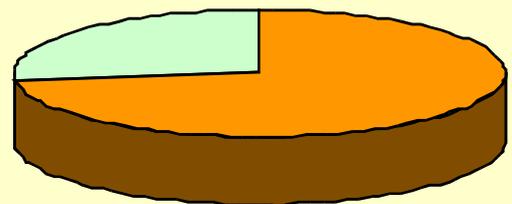
También han desarrollado investigaciones que determinan el grado de deterioro de los materiales de revestimiento de acuerdo a la resistencia que ofrecen al ataque de los hongos.

UNIÓN EUROPEA



- 55% de los casos estudiados no presentan problemas de humedad.
- 45% de los casos presentan problemas de humedad, de los que en el 40% de ellos sus ocupantes se quejan de diversas dolencias.

URUGUAY (estudio en un conjunto habitacional en Montevideo)



- 23% de los casos estudiados no presentan problemas de humedad.
- 77% de los casos presentan problemas de humedad.

Fig.3.9 - Estudios de incidencia de problemas de humedades en Europa y Uruguay.

4. ANALISIS DEL FENÓMENO DE CONDENSACIÓN EN CERRAMIENTOS OPACOS

4.1 Fundamentos

A través de la envolvente que actúa como filtro entre el ambiente interior y el exterior, tienen lugar dos fenómenos que influyen sobre el confort térmico y las patologías de condensación: la transmisión de calor y la transmisión de vapor entre los dos medios. Para estudiar estos dos fenómenos analizamos la condición del aire, básicamente la temperatura y humedad del aire en cada ambiente, porque para que entre los dos medios haya transmisión de calor debe haber diferencia de temperaturas y para que haya transmisión de vapor debe haber diferencia de presiones de vapor.

Si dos medios poseen diferentes temperaturas habrá un flujo de calor que tiende a igualarlas y cuyo sentido va desde el medio de mayor al de menor temperatura. A medida que pasa el tiempo cada capa va aumentando su temperatura, pero como le cede calor a la siguiente no alcanza la misma temperatura que la capa anterior que le cede calor. Entonces las temperaturas se van ordenando de mayor a menor en el sentido que fluye el flujo de calor. A esta ordenación de temperaturas se le llama gradiente de T1 temperaturas.

Si se considera régimen estacionario [temperaturas diferentes pero constantes en cada medio] el gradiente de temperaturas es una recta (fig.4.1).

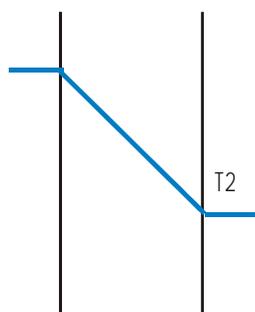


Fig.4.1

La pendiente del gradiente de temperaturas depende de la conductividad del material. Los materiales de alta conductividad térmica como el hormigón permiten que el flujo de calor se transmita más fácilmente; esto se traduce en temperaturas más homogéneas en todo el espesor del material [menor salto de temperatura] y por lo tanto el gradiente tiene poca inclinación. Por el contrario si se trata de un material de baja conductividad térmica, como los aislantes térmicos que conducen mal el calor, el salto de temperatura es mayor y la pendiente del gradiente será muy pronunciada (fig.4.2).



Fig.4.2

Análogamente, si dos medios poseen diferentes presiones de vapor o diferente humedad absoluta [HA] habrá un flujo de vapor que tiende a igualar estas presiones y cuyo sentido va desde el medio de mayor al medio de menor presión de vapor. En las condiciones estables del régimen estacionario se determina un gradiente compuesto por rectas, cuya inclinación indica la dificultad con que el vapor atraviesa el material. Si el material es permeable al paso del vapor la pendiente es poco inclinada y si se trata de un material poco permeable (muy resistente) al vapor la

pendiente será muy inclinada. (fig.4.3).
 A partir del gradiente de la HA es posible trazar el gradiente de las temperaturas de rocío de andamio similar (fig.4.3).

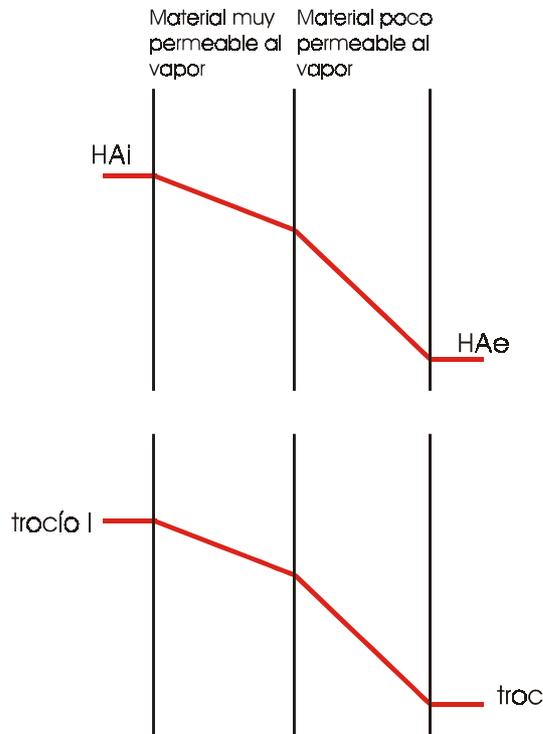


Fig.4.3

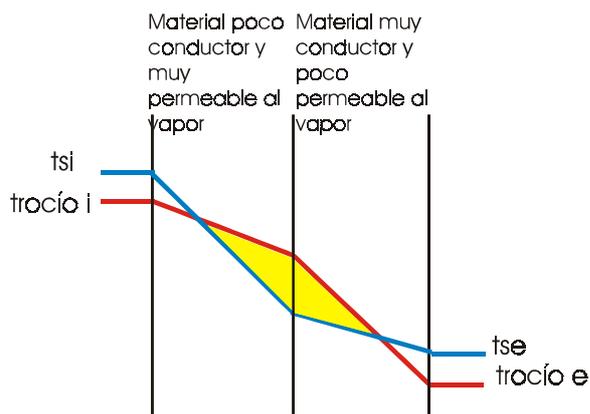


Fig.4.4

Para que se produzca condensación, la temperatura [t] en la(s) capa(s) del cerramiento deberán ser inferiores a la de rocío t_r (fig.4.4).
 Debido a que la capa del lado interior conduce

mal el calor el gradiente de temperaturas desciende rápidamente en esa capa, quedando por debajo del gradiente de temperaturas de rocío incluso en parte del espesor de la otra capa. En todas las capas cuya temperatura t sea menor que la de rocío t_r se producirá condensación. En la fig. 4.4 se produce condensación intersticial, es decir en el interior del cerramiento.

Como se muestra en la fig.4.5a si el material aislante térmico se ubica en la cara interior del cerramiento, éste tendrá una temperatura baja en casi todo su espesor aumentando así el riesgo de condensación. En la figura 4.5b

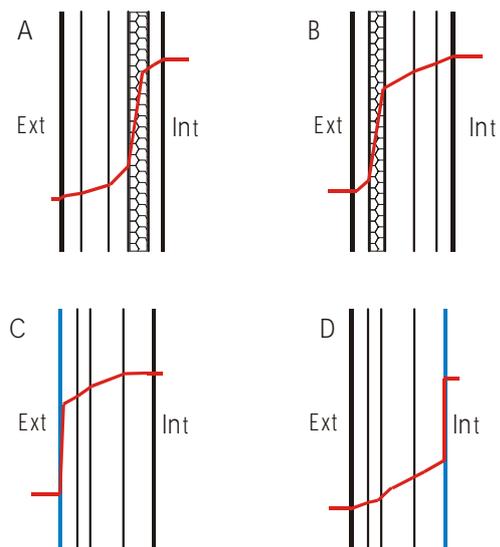


Fig.4.5

el material aislante térmico está ubicado hacia el exterior, del lado frío, por lo cual el cerramiento permanece con temperatura alta en su casi totalidad y se reduce así el riesgo de condensación.

En el caso 4.5c el material de alta resistencia al vapor se encuentra ubicado del lado exterior por lo cual la presión de vapor y por ende la temperatura de rocío son muy altas en todas las capas del cerramiento; existe así un gran

riesgo de condensación. Mientras que en la fig.4.5d el material de alta resistencia al vapor se ubica hacia el interior por lo que la presión de vapor y la temperatura de rocío son bajas, reduciéndose el riesgo de condensación.

Al diseñar el cerramiento se debe lograr que el gradiente de temperatura tenga la concavidad abierta hacia abajo y la del gradiente de las temperaturas de rocío abierta hacia arriba. Esto se logra colocando las capas más aislantes hacia el lado exterior o lado frío y las más resistentes al vapor del lado interior o lado caliente.

Puentes térmicos

La envolvente de un cerramiento casi nunca es homogénea en toda su superficie debido a la presencia de puentes térmicos. Un puente térmico es un sector de la envolvente donde se produce un debilitamiento en su resistencia térmica. Las razones más frecuentes son:

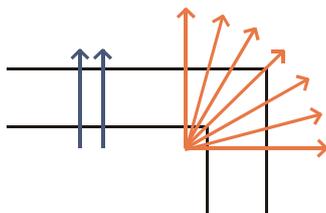


Fig.4.6

- Sectores de refuerzo estructural (vigas y pilares de hormigón armado por ejemplo),
- Zonas del cerramiento en las que la exposición al exterior es bastante mayor (encuentros de muros y encuentros entre muros y cielorraso).

Problema agregado: la resistencia de la capa de aire en contacto con la pared aumenta por lo que la temperatura superficial del cerramiento disminuye colocándose en una situación de mayor riesgo. Además, al ser menor la ventilación se dificulta más la remoción de vapor de agua en estos sectores que en el resto de los cerramientos.



Fig.4.7

- Zonas detrás de muebles y armarios donde la ventilación es aún más reducida (fig.4.7). Puede aparecer el típico "olor a humedad" que en realidad se debe al desarrollo de colonias de hongos que al entrar en putrefacción originan ese olor típico en ropa, libros, etc. Esta situación empeora si se encuentran sobre paredes

exteriores.

Los vidrios son sectores de la envolvente problemáticos porque tienen valores de transmitancia U altos (para un vidrio simple $U = 6 \text{ W/m}^2\text{K}$) por lo que su temperatura superficial en invierno es más baja que el resto de los cerramientos. Es muy difícil que se puedan fijar hongos en el vidrio porque es una superficie no absorbente y resbaladiza, sobre la cual el agua condensada chorrea mojando el antepecho; es allí donde se crea el ambiente proclive a la formación de hongos (fig.4.8).

4.2 Condensación superficial e intersticial



Fig.4.8- Condensación en vidrios.

Cuando el aire húmedo entra en contacto con una superficie cuya temperatura es menor a la temperatura de rocío [t_r] se enfría y condensa el vapor de agua que ya no es capaz de contener a esa temperatura.

Conforme a lo expresado en el punto 3.1 la temperatura de rocío del aire se determina a partir de su temperatura y humedad relativa.

La aparición de condensaciones superficiales depende de:

las condiciones del aire interior
la transmitancia del cerramiento

La aparición de condensaciones intersticiales depende de:

las condiciones del aire interior
la transmitancia del cerramiento
las condiciones del aire exterior
las propiedades higrotérmicas y el orden de las capas que componen el cerramiento

4.3 Método de cálculo para el estudio del riesgo de ocurrencia de condensaciones

A continuación se expone un método de cálculo en régimen estacionario para hallar los valores de t y t_r de cada capa. Se basa en el cálculo analítico y gráfico de las temperaturas de las capas que componen el cerramiento y de las temperaturas de rocío de dichas capas. De la comparación de ambas temperaturas aparecen las capas cuyas temperaturas son iguales o inferiores a las de rocío, en las que existirá riesgo de condensación superficial o intersticial.

Cálculo de la Transmitancia (U) del cerramiento

$$U = 1/R_t \quad \text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$$

siendo:

$$R_t = R_{si} + \sum R_{ca} + R_{se} \quad (\text{m}^2.\text{K})/\text{W}$$

Se definen cada uno de los factores que interviene en el cálculo de la **Resistencia Total [R_t]**

R_{si} es la resistencia superficial interior.

Para invierno según la norma ISO 6946:1996, los valores de R_{si} son los de la tabla 4.1.

Para el estudio específico de condensaciones

Cerramientos verticales:	$R_{si} = 0.13 \text{ m}^2\text{K/W}$
Cerramientos horizontales:	$R_{si} = 0.10 \text{ m}^2\text{K/W}$

Tabla 4.1- Valores de R_{si} según la norma ISO 6946:1996

se aumenta su valor teniendo en cuenta mayores dificultades en el intercambio de calor entre la superficie y el aire interior debido a problemas de exposición y disminución en la velocidad del aire. La norma ISO 10211-1:1995 define los nuevos valores de R_{si} [R'_{si}] (tabla 4.2).

Para superficies situadas en la mitad superior del local:	$R_{si} = 0.25 \text{ m}^2\text{K/W}$
Para superficies situadas en la mitad inferior del local:	$R_{si} = 0.35 \text{ m}^2\text{K/W}$
Para superficies con muebles adosados:	$R_{si} = 0.50 \text{ m}^2\text{K/W}$

Tabla 4.2- Valores de R_{si} según la norma ISO 10211-1:1995

ΣR_{ca} es la suma de las resistencias de cada una de las capas que conforman el cerramiento.

Para capas homogéneas se calcula:

$$R_{ca} = e / \lambda$$

siendo:

e espesor de la capa (m)

λ conductividad térmica del material ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$). (anexo tabla 1)

Si la capa es heterogénea (elementos con huecos), su resistencia térmica se obtiene mediante ensayos de laboratorio (anexo tabla 2).

Si se trata de una cámara de aire la resistencia térmica se obtiene mediante ensayos de laboratorio cuyos valores se transcriben en

tablas. La resistencia de una cámara de aire varía según su posición (vertical y horizontal), espesor, tipo de superficie (metálica o no metálica) y su grado de ventilación (anexo tabla 3).

R_{se} es la resistencia superficial exterior. Se toma según la Norma ISO 6946:1996 el mismo valor para todos los casos, siendo

$$R_{se} = 0.04 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$$

Condiciones base del medio interior y exterior

Para realizar el estudio de riesgo de ocurrencia de condensaciones se definen las condiciones base de temperatura y humedad de los medios interior y exterior.

Los valores del medio exterior corresponden

POSICIÓN DEL CERRAMIENTO	Horizontal	Vertical
Temperatura interior (t_i)	18 °C	18 °C
Temperatura exterior (t_e)	0 °C	4 °C
Humedad relativa interior (HRI)	80 %	80 %
Humedad relativa exterior (HRe)	90 %	90 %

Tabla 4.3- Condiciones base para el estudio de condensaciones.

a condiciones rigurosas del clima. Para el estudio de cerramientos horizontales se toma una temperatura del aire exterior menor porque se considera que existen mayores pérdidas de calor por radiación hacia la atmósfera, mientras que los cerramientos verticales se encuentran, en la mayoría de los casos, rodeados de otras superficies a similares temperaturas.

Para el medio interior la Norma IRAM 11625

toma una temperatura de 18°C y una HR de 75% admitiendo un aumento de este valor cuando el local es reducido, el grado de ventilación es bajo o la producción de vapor de agua es alta. En monitoreos llevados a cabo por el DECCA se han constatado situaciones en que se llega a humedades relativas interiores del orden del 80%. Por lo cual se toma este valor dentro de las condiciones base de estudio (tabla 4.3).

Estudio del riesgo de producción de condensaciones

El método de verificación de ocurrencia de condensaciones comprende:

1. Determinación de la temperatura t en la superficie y en las capas interiores del cerramiento.
2. Determinación de la temperatura de rocío t_r en la superficie y en las capas interiores del cerramiento
3. Comparación de ambas temperaturas, t y t_r en cada capa del cerramiento.

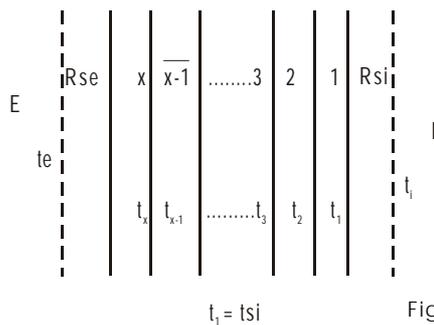


Fig. 4.9

1. Determinación de la temperatura t en la superficie interior y en cada una de las capas del cerramiento.

$$t_{(x)} = t_{(x-1)} - R_{ca_{(x-x-1)}} \cdot (t_i - t_e) / R_t$$

$R_{ca_{(x-x-1)}}$ se refiere a la resistencia de la

capa comprendida entre las superficies x y $x-1$ (fig.4.9).

$$R_{si} = R_{(1-2)} \qquad R_{se} = R_{(n-1-n)}$$

$$t_1 = t_i$$

$$t_2 = t_{si} = t_i - R_{si} \cdot (t_i - t_e) / R_t$$

$$t_3 = t_2 - R_{ca_{(2-3)}} \cdot (t_i - t_e) / R_t$$

$$t_{n-1} = t_{(n-2)} - R_{(n-2-n-1)} \cdot (t_i - t_e) / R_t$$

$$t_n = t_{(n-1)} - R_{se} \cdot (t_i - t_e) / R_t$$

t_n es la temperatura del aire exterior.

Como verificación de los cálculos t_n debe ser igual a 4°C para cerramientos verticales y 0°C para cerramientos horizontales.

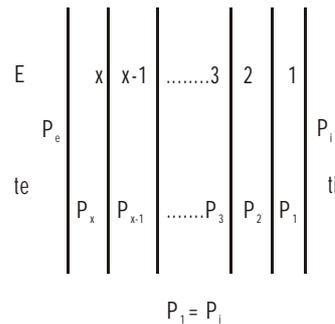


Fig. 4.10

2. Determinación de la temperatura de rocío t_r en la superficie y en el interior del cerramiento.

Se parte de las presiones de vapor en el interior P_i y en el exterior P_e :

$$P_1 = P_2 = P_i$$

$$P_{n-1} = P_n = P_e$$

Análogamente a la transmisión de calor la presión de vapor en cada capa se obtiene según:

$$P_{(x)} = P_{(x-1)} - R_{vca_{(x-x-1)}} \cdot (P_i - P_e) / R_{tv}$$

R_{tv} es la resistencia total a la transmisión de vapor del cerramiento y se obtiene

sumando la resistencia al vapor de cada capa: ΣR_{vca} (pa.m².s/kg)

R_{vca} se refiere a la resistencia al vapor de la capa comprendida entre las superficies x y $x-1$ (fig.4.10).

R_{vca} para cada capa se obtiene:

a) para capas homogéneas y cámaras de aire:

$$R_{vca} = e/\delta$$

Siendo:

e = espesor m

δ = permeabilidad al vapor

kg/(s.m.Pa) (anexo tabla 1).

b) para capas heterogéneas, láminas y películas.

El valor de R_{vca} se obtiene directamente de tablas (anexo tabla 2 y 4 respectivamente).

Según se especificó más arriba:

$$P_1 = P_2 = P_i$$

$$P_3 = P_2 - R_{vca} (P_i - P_e) / R_{tv}$$

$$P_{n-1} = P_{(n-2)} - R_{vca} (P_i - P_e) / R_{tv}$$

Como verificación de los cálculos $P_{(n-1)}$ debería ser igual a 732 Pa en caso de cerramientos verticales y $P_{(n-1)} = 550$ Pa en caso de cerramientos horizontales.

Una vez obtenidas las presiones de vapor en cada capa, se calcula la temperatura de rocío t_r en cada capa según tabla 4.4.

Temperatura (°C)	Presión de vapor (Pa)	Temperatura (°C)	Presión de vapor (Pa)
0	611	16	1818
1	657	17	1938
2	706	18	2064
3	758	19	2198
4	813	20	2339
5	872	21	2488
6	935	22	2645
7	1002	23	2810
8	1072	24	2985
9	1148	25	3169
10	1228	26	3363
11	1313	27	3567
12	1403	28	3782
13	1498	29	4008
14	1599	30	4246
15	1705		

Tabla 4.4- Obtenida de: Thermodynamic Properties of Moist Air (Standard Atmospheric Pressure, 101.325 kPa). Ashrae Handbook. Fundamentals. SI Edition. 1993.

3. Comparación de ambas temperaturas en cada capa del cerramiento. La temperatura t de cada capa debe ser mayor que la temperatura de rocío t_r de la capa considerada.
Si $t > t_r$ no existe riesgo de ocurrencia de condensación en la capa considerada
Si $t \leq t_r$ existe riesgo de condensación en la capa considerada.

5. ESTUDIO DEL RIESGO DE CONDENSACIÓN EN CERRAMIENTOS OPACOS PESADOS

Las exigencias y recomendaciones que se fijan deben cumplirse en todos los cerramientos opacos exteriores:

- cuya masa $M > 280 \text{ kg/m}^2$
- en cada una de las diferentes partes del cerramiento (parte corriente y puentes térmicos)
- en todos los cerramientos independientemente de su orientación

5.1 Exigencias

- Los cerramientos opacos cuya masa $M > 280 \text{ Kg/m}^2$ deben tener en todas sus partes una transmitancia $U \leq 0.85 \text{ W / m}^2\text{K}$.
- En ningún punto del cerramiento exterior puede producirse condensación superficial interior.
- En ningún punto del cerramiento exterior puede producirse condensación intersticial que perjudique a materiales aislantes o elementos estructurales que incluyan armaduras.

5.2 Estudio del riesgo de ocurrencia de condensación superficial

La aparición de condensaciones superficiales depende de las condiciones del aire interior y la transmitancia del cerramiento.

De acuerdo a los pasos definidos en el método:

1. Se calcula la temperatura de rocío t_r a partir de las condiciones base de temperatura y humedad del aire interior ya definidas: $t_i = 18^\circ\text{C}$ y $H_{ri} = 80\%$ (fig.5.1).

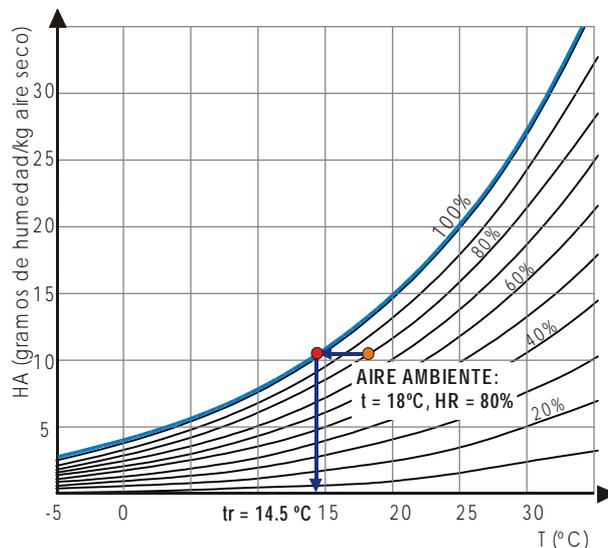


Fig.5.1- Cálculo de t_r para condiciones base de t y HR .

2. Se calcula la temperatura de la capa superficial interior t_{si} .

$$t_{si} = t_i - R'_{si} \cdot U' \cdot (t_i - t_e) \quad (^\circ\text{C})$$

3. Se comparan ambas temperaturas a fin de determinar:

Si $t_{si} \leq t_r$ existe riesgo de ocurrencia de condensación superficial.

Si $t_{si} > t_r$ no existe riesgo de ocurrencia de condensación superficial.

5.2.1 Ejemplos

Cerramiento 1

(fig.5.2):

Interior

- 1- Revoque interior (0.02m)
- 2 - Bloque hueco de hormigón (0.15m)
- 3- Revoque exterior (0.02m)

Exterior

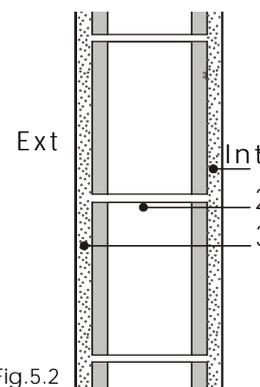


Fig.5.2

Se estudia el cerramiento en su situación más comprometida, el corte por la parte inferior del local, considerando que $R_{si} = 0.35 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$.

1. Cálculo de U' (tabla 5.1)

$$U' = 1 / R_{t'} = 1.66 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K}$$

Capa	e (m)	λ (W/mK)	R (m ² K/W)
1	0.02	1.10	0.018
2	0.15	-	0.18
3	0.02	1.40	0.014
		$R_{cerr} =$	0.212
		$R_{si} =$	0.35
		$R_{se} =$	0.04
		$R_{t'} =$	0.602

Tabla 5.1

2. Cálculo de la temperatura superficial interior t_{si}

$$t_{si} = t_i - R_{si} \times U' \times (t_i - t_e)$$

$$t_{si} = 18 - 0.35 \times 1.66 \times (18 - 4) = 9.87 \text{ }^\circ\text{C}$$

3. Comparación de temperaturas

$t_{si} < t_r$ existe riesgo de condensación superficial

Para mejorar el desempeño higrotérmico del cerramiento se calcula el espesor de aislamiento térmico necesario para cumplir con la transmitancia máxima exigida por el BHU, $U \leq 0.85 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K}$, que se coloca del lado exterior (lado frío), siendo necesario agregar una capa de revestimiento exterior para proteger el material aislante.

Cerramiento 2:

Cálculo del espesor de aislamiento necesario para cumplir con $U \leq 0.85 \text{ W}/\text{m}^2 \text{K}$ (fig.5.3).

Interior

- 1- Revoque interior (0.02m)
 - 2- Bloque hueco de hormigón (0.15m)
 - 3- Mortero de arena y portland (0.01m)
 - 4- Poliestireno expandido
 - 5- Ladrillo de campo (0.05m)
- Exterior

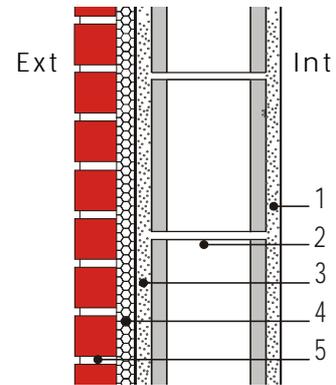


Fig.5.3

1. Cálculo de **Resistencias**

$$R_{existente} = 0.265 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W} \text{ (*1)}$$

$$R_{necesaria}, \text{ siendo } U = 0.85 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K}, R_{t'} = 1 / 0.85 = 1.18 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

$$R = 1.18 - 0.13 - 0.04 = 1.00 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

$$R_{aislante} = R_{t'} - R_{t'} = 1.00 - 0.265 = 0.74 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

$$U' = 0.66 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K}$$

Capa	e (m)	λ (W/mK)	R_m (m ² K/W)	R_m (m ² K/W)	R_m (m ² K/W)
1	0.02	1.10	0.018	0.018	0.018
2	0.15	-	0.18	0.18	0.18
3	0.01	1.40	0.007	0.007	0.007
4	¿?	0.035	¿?	0.86	0.86
5	0.05	0.79	0.06	0.06	0.06
		$R_{cerr} =$	0.265	1.13	1.13
		$R_{si} =$	0.35	0.35	0.13
		$R_{se} =$	0.04	0.04	0.04
		$R_{t'} =$	0.655	1.52	1.3
			*1	*2	*3

Tabla 5.2

2. Cálculo del espesor de material aislante, [ejemplo poliestireno expandido]

$$e = R \times \lambda = 0.74 \times 0.035 = 0.026 \text{ m}$$

espesor de la capa de aislamiento necesario $e = 3 \text{ cm}$

3. Verificación de la temperatura superficial interior t_{si} del cerramiento 2

$$t_{si} = t_i - R'_{si} \times U' \times (t_i - t_e)$$

[cálculo de U' en tabla,*2]

$$t_{si} = 18^\circ\text{C} - 0.35 \times 0.66 \times (18-4) = 14.8^\circ\text{C}$$

4. Comparación de temperaturas

$t_{si} > t_r$ **sin riesgo de condensación superficial**

En tabla 5.2, * 3 está el cálculo de la transmitancia del cerramiento $U = 0.77 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Se puede deducir fácilmente de los ejemplos anteriores que una de las estrategias principales que debe manejar el proyectista para evitar el riesgo de ocurrencia de condensación superficial es reducir la transmitancia (U) del cerramiento, que es lo mismo que aumentar su resistencia total. La forma más efectiva para lograrlo es colocar algún material aislante térmico en el cerramiento.

5.3 Estudios del riesgo de condensaciones superficial e intersticial con el programa HTerm

El programa computacional HTERM desarrollado por el DECCA en el año 1998 permite determinar la ocurrencia de condensación en los cerramientos opacos calculando además el valor U y la masa de los cerramientos.

No sería correcto estudiar solamente el riesgo de producción de condensaciones superficiales ya que es posible que el fenómeno de condensación se produzca en la masa del cerramiento por lo cual es conveniente realizar el estudio global del cerramiento.

A continuación se retoman los cerramientos

ya analizados para determinar el riesgo de producción de condensaciones superficiales e intersticiales.

Se utiliza el programa computacional HTERM que se basa en el método de cálculo explicado en el punto 4.3.

5.3.1 Cerramientos verticales

Los dos primeros cerramientos verticales que se estudian a continuación, que cumplen con la normativa municipal, han sido muy utilizados sobre todo en viviendas para sectores de recursos económicos medios y bajos. Se trata de muros de bloques de hormigón y de bloques cerámicos revocados en ambas caras (fig.5.4 y 5.5).

Ejemplo 1 (fig.5.4).

Interior

1- Revoque interior (0.02m)

2- Bloque de hormigón

(0.15m)

3- Revoque exterior

(0.02m)

Exterior

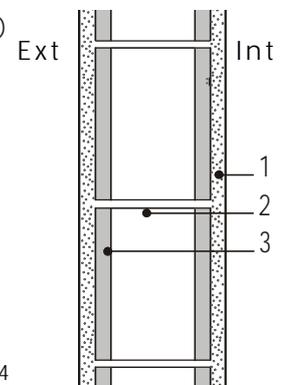


Fig.5.4

Ejemplo 2

Interior

1- Revoque interior (0.02m)

2- Bloque hueco de cerámica

(0.17m)

3- Revoque exterior (0.02m)

Exterior

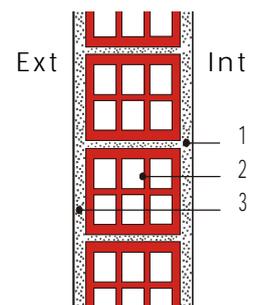


Fig.5.5

Los estudios realizados con el programa HTERM muestran para ambos cerramientos (fig.5.6 y 5.7) que $t < t_r$ en muchas capas por lo que existe riesgo de producción de condensaciones superficiales e intersticiales, hecho fácilmente constatable en la realidad. Se aprecia que las temperaturas en la masa de los cerramientos son muy bajas, estando sus valores más cerca de la temperatura exterior que de la interior por lo cual la mayor parte del cerramiento está frío.

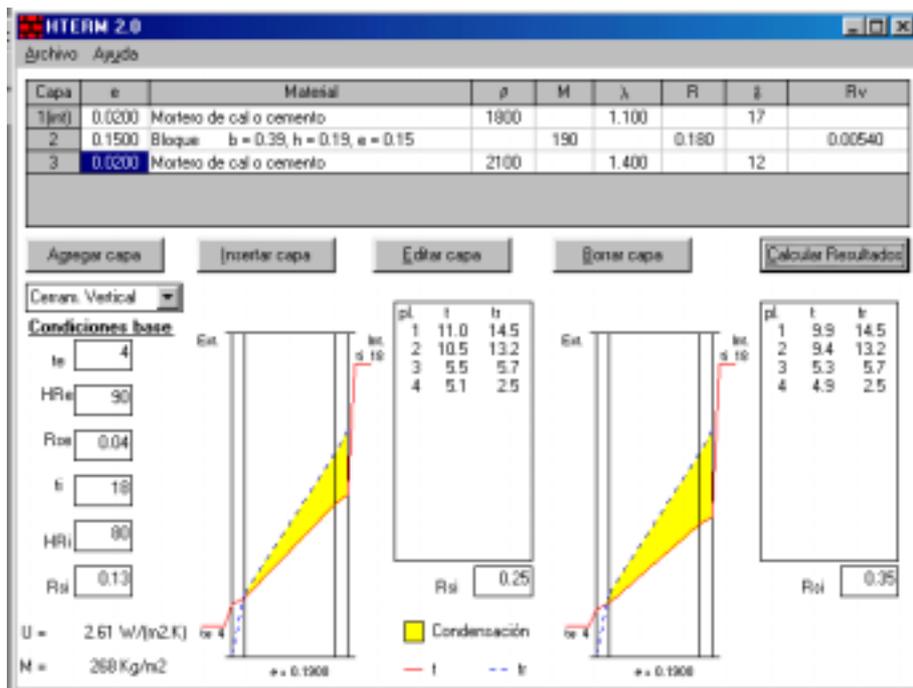


Fig.5.6- Estudio de riesgo de producción de condensaciones para el cerramiento 1.

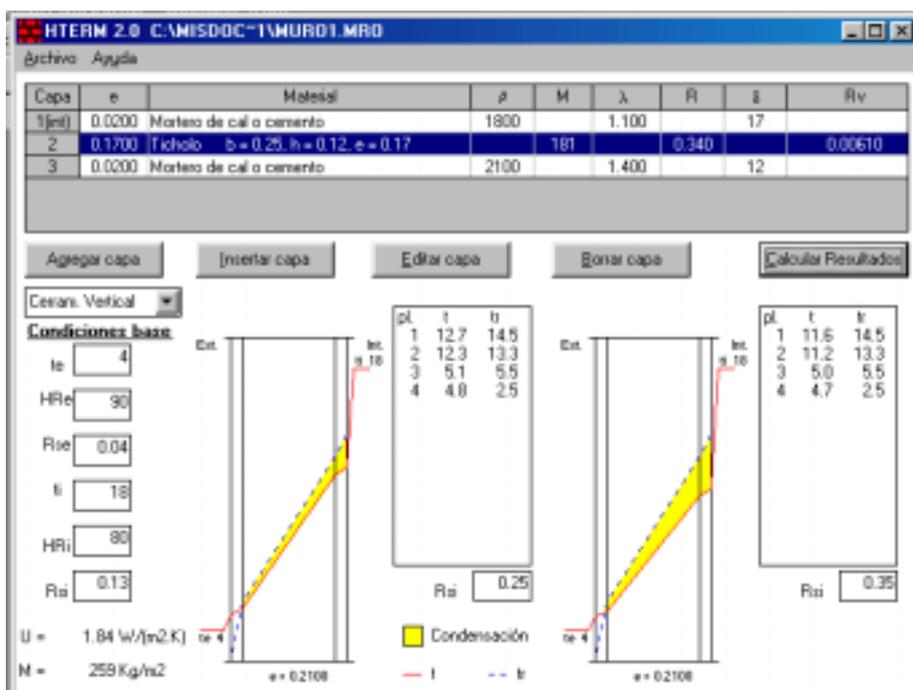


Fig.5.7- Estudio de riesgo de producción de condensaciones para el cerramiento 2.

A los efectos de mejorar el desempeño higrotérmico del cerramiento tipo 2. Las medidas que se pueden tomar para aumentar las temperaturas de las capas:

Ejemplo 2a

a) Colocar una cámara de aire y una pared exterior para conformarla (fig.5.8).

Interior

- 1- Revoque int (0.02m)
- 2- Bloque hueco cerámico (0.17m)
- 3- A.y p. c/hidrofugo (0.01m)
- 4- Emulsión asfáltica
- 5- Cámara de aire (0.04m)
- 6- Ladrillo de campo (0.05m)

Exterior

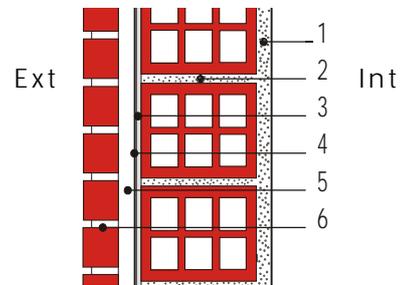


Fig.5.8

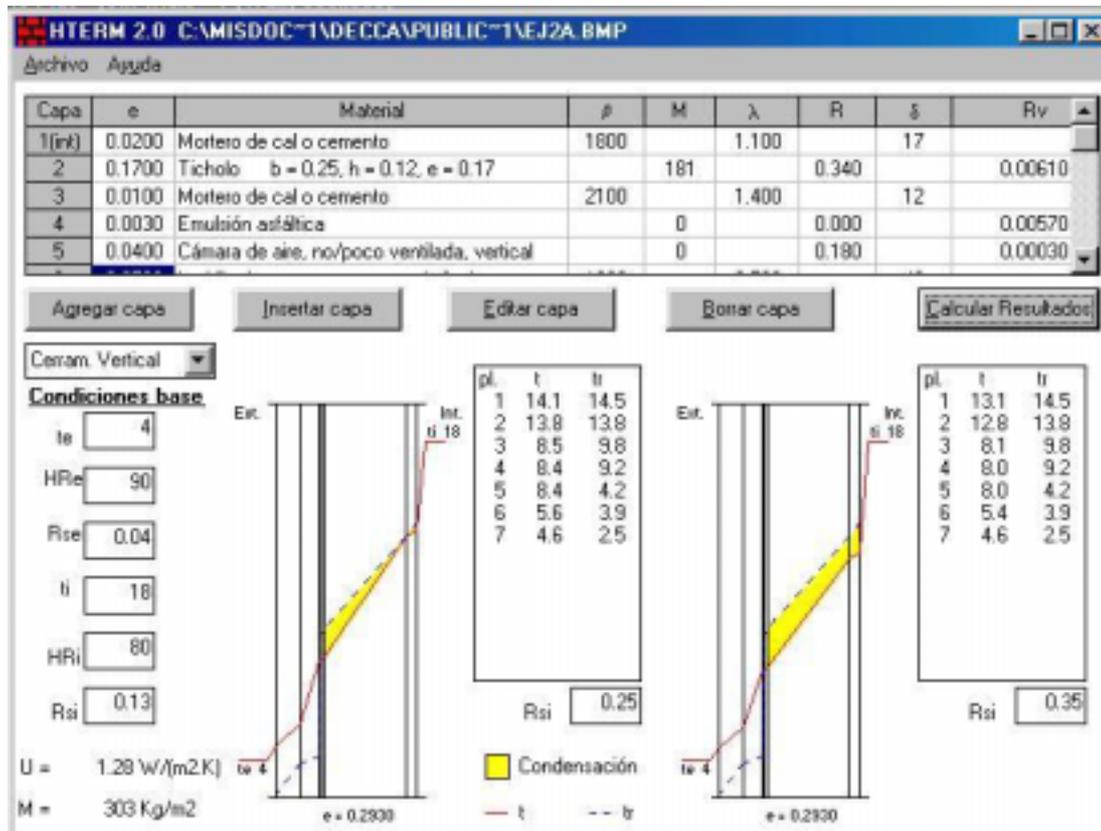


Fig.5.9- Ejemplo 2a

De acuerdo a los resultados del Hterm (fig.5.9) se puede apreciar que igualmente existe riesgo de ocurrencia de condensaciones intersticial y superficial en la pared interior, siendo su transmitancia $U = 1.28 \text{ W/m}^2\text{K}$ mayor que la recomendada $U \leq 0.85 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Ejemplo 2b

- b) Sustituir la cámara de aire por un material aislante térmico, por ejemplo, poliestireno expandido (fig.5.10).

Interior

- 1- Revoque int (0.02m)
- 2- Bloque hueco cerámico (0.17m)
- 3- A.y p. c/hidrofugo (0.01m)
- 4- Emulsión asfáltica
- 5- Poliestireno expandido (0.02 m)
- 6- Ladrillo de campo (0.05m)

Exterior

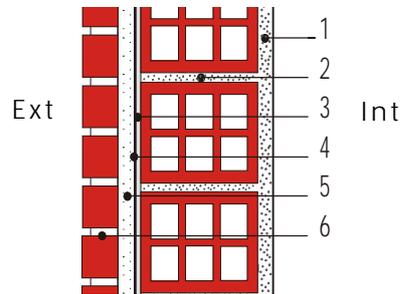


Fig.5.10

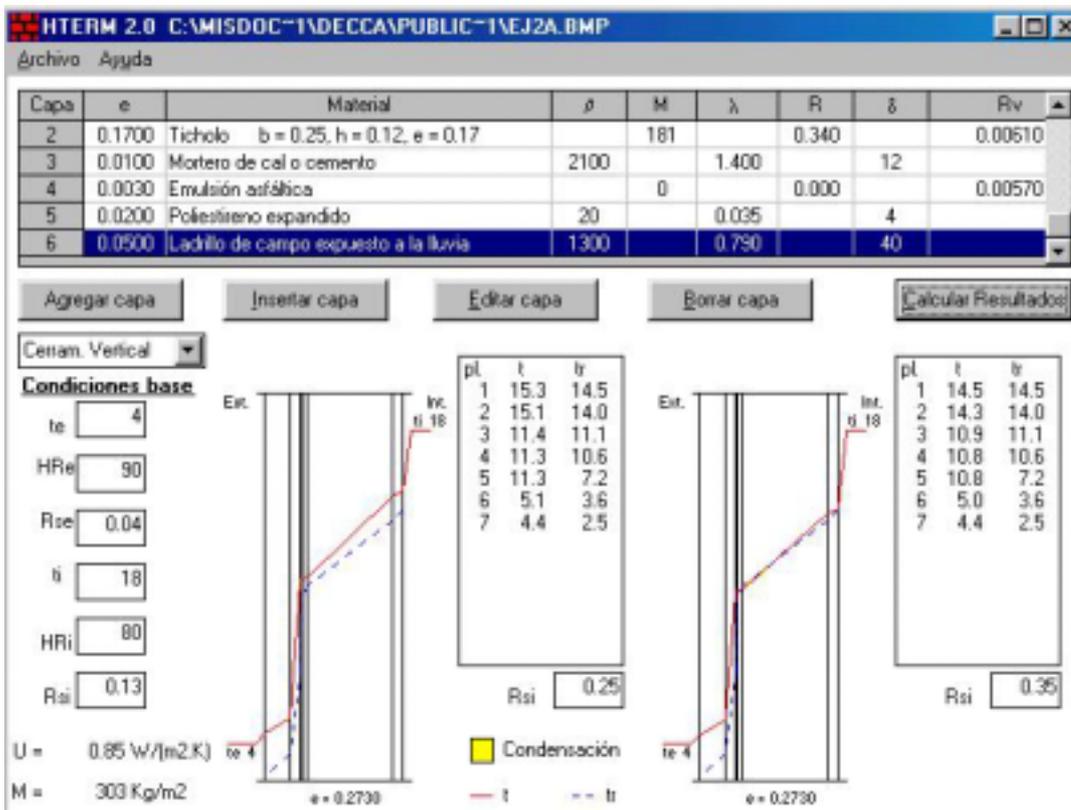


Fig.5.11- Ejemplo 2b

En este caso se obtienen resultados satisfactorios, el cerramiento cumple con la normativa del BHU $U \leq 0.85 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Comparando con el resultado del estudio anterior se verifica que el aislante térmico tiene mejor desempeño que la cámara de aire (fig.5.11), porque el aire está quieto encerrado en pequeñas celdillas mientras que en la cámara el aire se mueve, a lo que se suma los intercambios de calor por radiación. En las capa 1 y 3 correspondiente a $R'si=0.35$, t levemente menor a tr lo que se soluciona aumentando a 3cm el espesor del aislante (5.12).

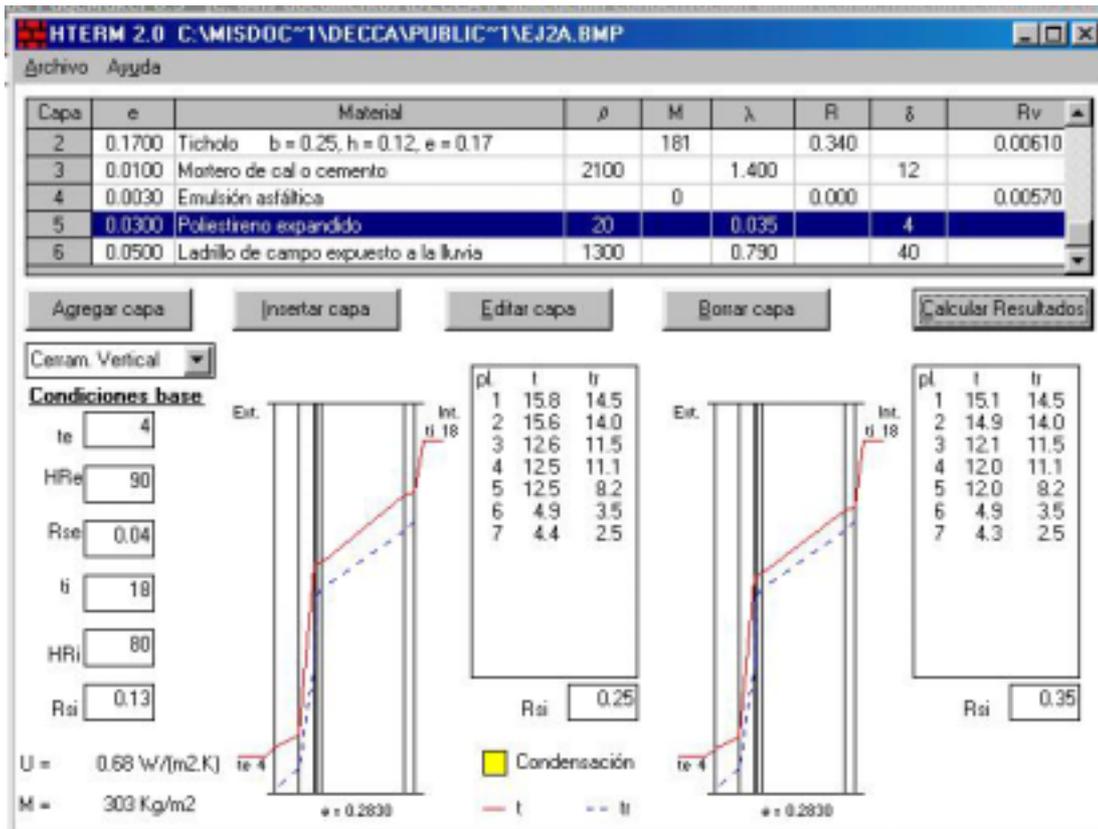


Fig.5.12 - Ejemplo 2b

Veamos qué sucede si se coloca el aislante térmico del lado interior con algún revestimiento por ejemplo de madera (fig.5.13).

Ejemplo 2c

Interior

- 1- Lambriz madera (0.01m)
- 2- Poliestireno expandido (0.03m)
- 3- Bloque hueco cerámico(0.17m)
- 4- Revoque ext (0.02m)

Exterior

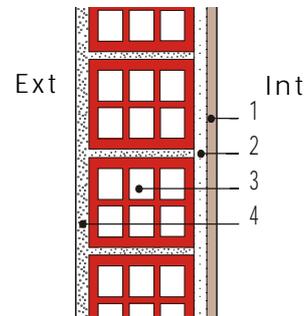


Fig.5.13

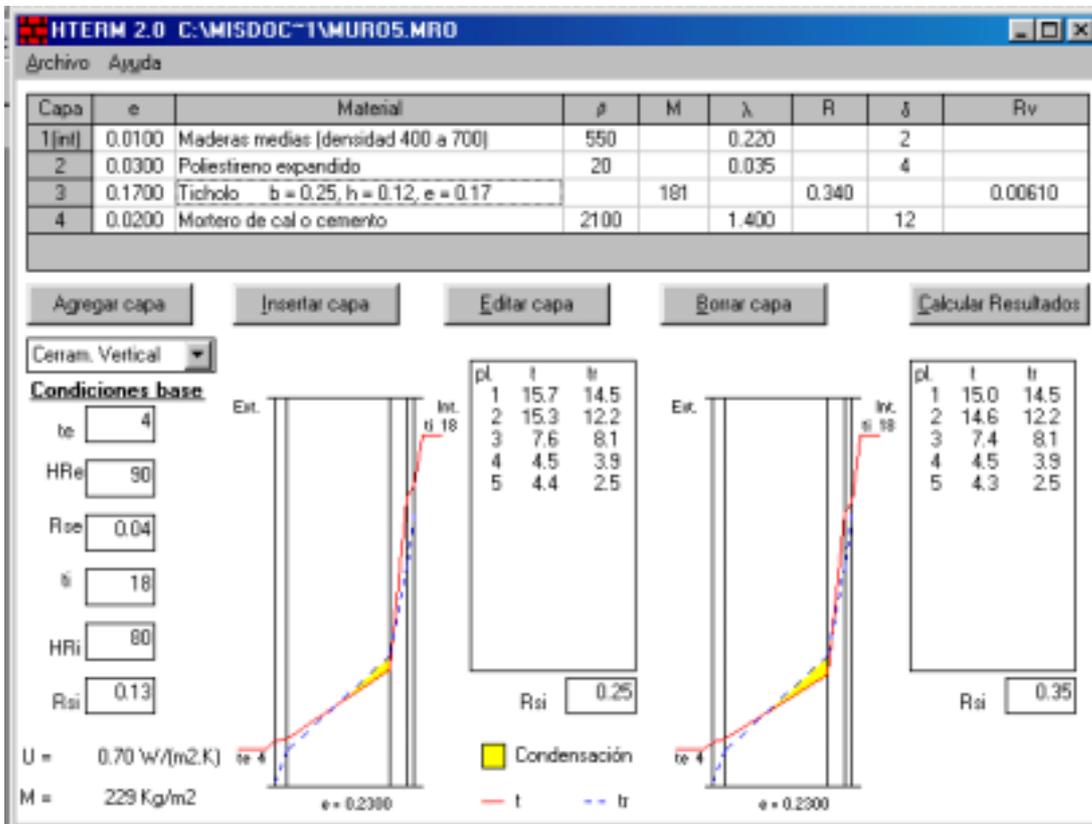


Fig.5.14- Ejemplo 2c.

Ambas curvas se cortan dentro del aislante por lo tanto éste va a perder eficiencia y se va a deteriorar. Aunque no exista riesgo de condensación superficial (la temperatura superficial, 15.7°C, es mayor que la temperatura de rocío 14.5°C) el agua queda dentro del aislante (fig.5.14).

Si el aislante térmico se coloca del lado interior es necesario protegerlo con un material resistente al vapor (barrera al vapor). Se realiza entonces un nuevo estudio colocando una barrera al vapor de polietileno de 0.20mm entre el revestimiento de madera y el poliestireno expandido (fig.5.15).

Ejemplo 2d

Interior

- 1- Lambriz madera (0.01m)
- 2- Polietileno (0.20mm)
- 3- Poliestireno expandido (0.03m)
- 4- Bloque hueco cerámico (0.17m)
- 5- Revoque exterior (0.02m)

Exterior

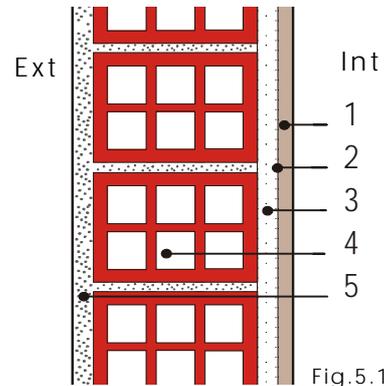


Fig.5.15

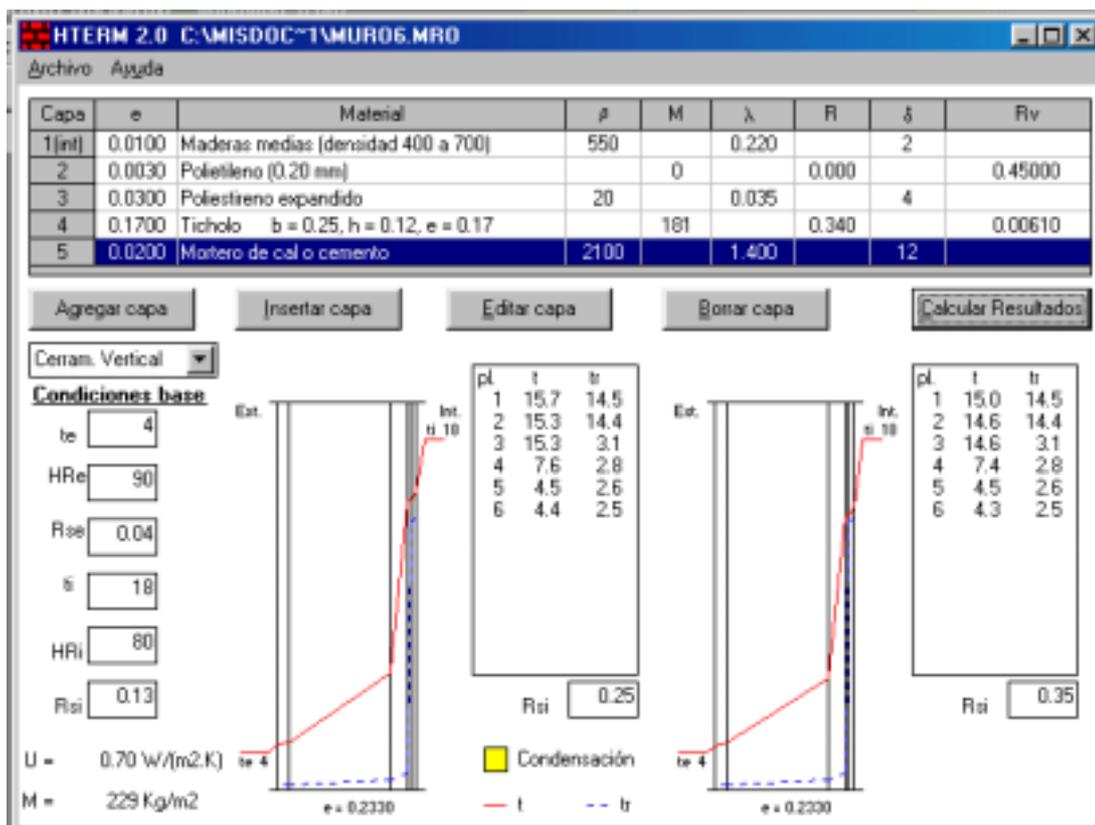


Fig.5.16- Ejemplo 2d

Se puede observar en este estudio que la presión de vapor en la masa del cerramiento disminuye por lo cual la concavidad del gradiente es hacia arriba no produciéndose el corte entre ambas curvas (fig.5.16).

Siempre que se estudia un cerramiento deben verificarse los sectores de puente térmico. Por lo cual, se repite el estudio para un sector estructural (vigas, pilares) que pueda comportarse como puente térmico (fig.5.17).

Ejemplo 3

- Interior
- 1- Revoque int (0.02m)
 - 2- Hormigón armado (0.12m)
 - 3- Mortero arena y portland c/hidrofugo (0.01m)
 - 4- Emulsión asfáltica
 - 5- Poliestireno expandido (0.02 m)
 - 6- Ladrillo de campo (0.12m)
- Exterior

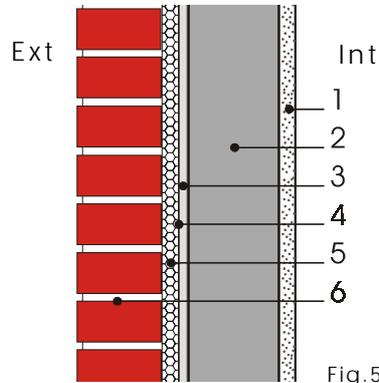


Fig.5.17

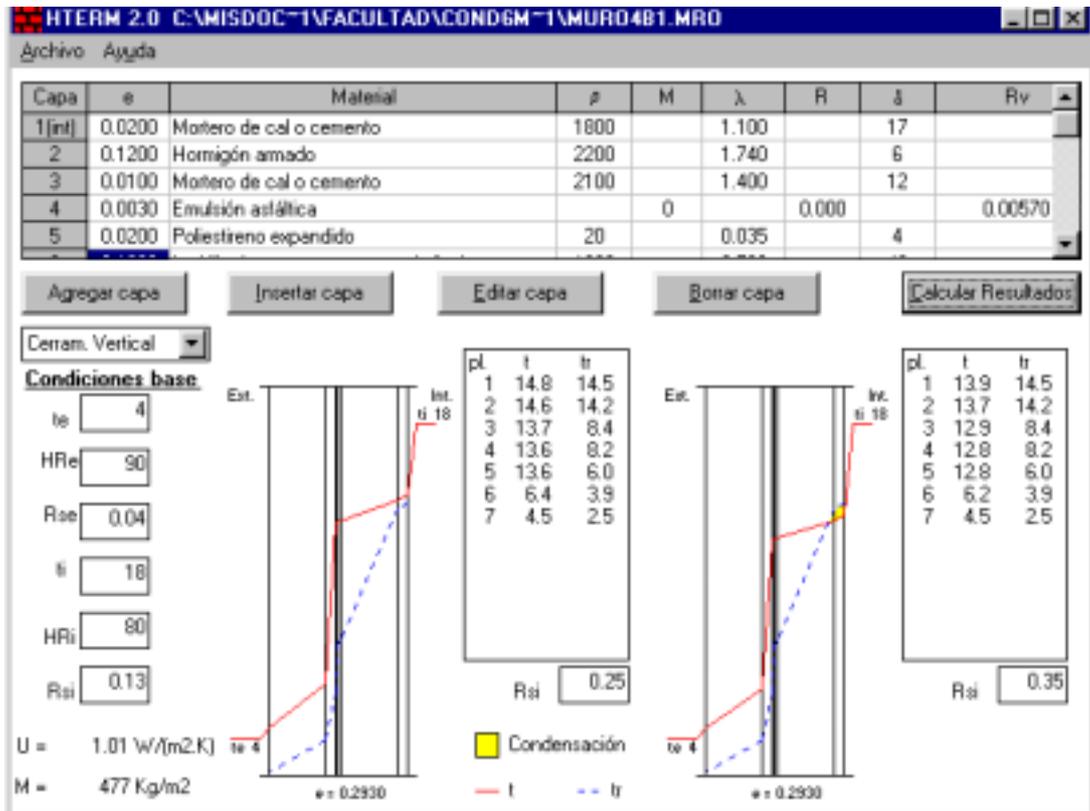


Fig.5.18- Ejemplo 3

Siendo su $U = 1.01 \text{ W/m}^2\text{.K}$ este cerramiento presenta problemas en el corte por el puente térmico del sector estructural ubicado en el sector inferior del edificio, (fig.5.18). Se aumenta entonces el espesor del aislante de 2 a 3 cm (fig.5.19).

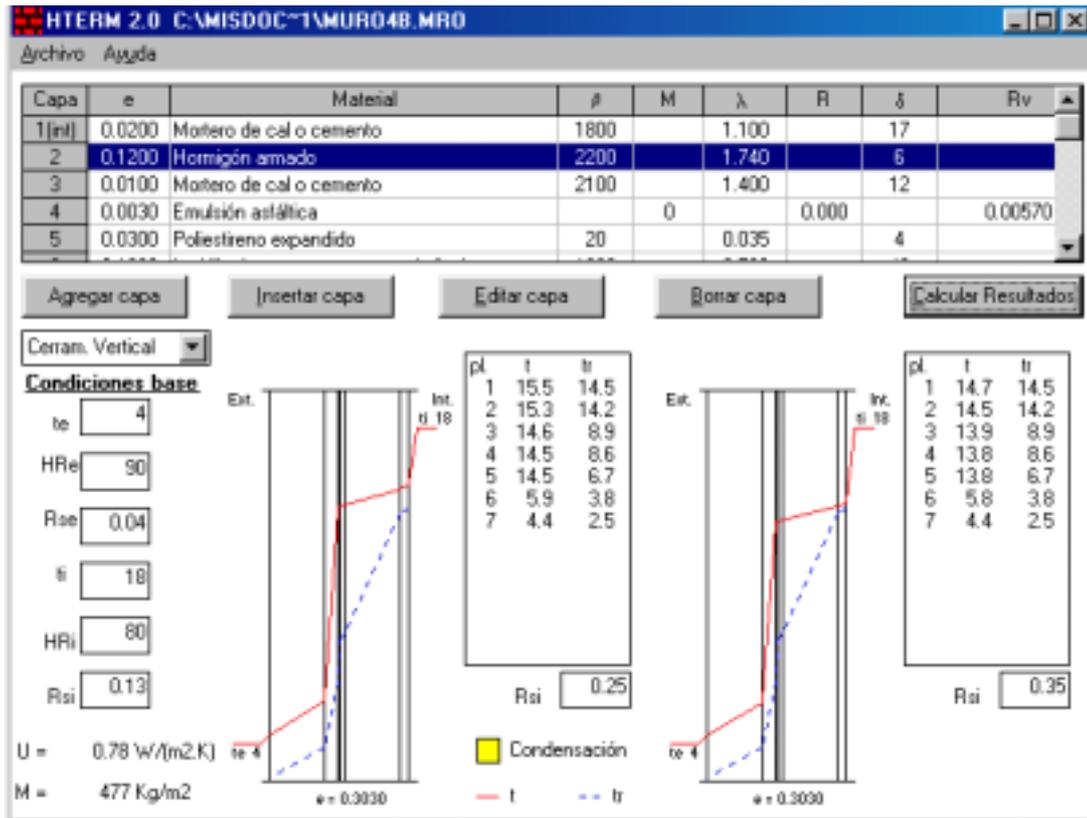


Fig.5.19- Ejemplo 3 corregido

En este caso el espesor del aislante es suficiente para prevenir riesgo de condensaciones superficiales e intersticiales siendo $U = 0.78 \text{ W/m}^2.\text{K}$.

Los resultados de los estudios anteriores demuestran que no siempre es necesaria la barrera al vapor. En cerramientos opacos pesados es posible solucionar el problema solamente con aislante térmico pero en caso de que el aislante se ubique del lado interior siempre debe colocarse barrera al vapor. Es importante que esta barrera se coloque correctamente (pág.44) de otra manera se anulará su efecto.

5.3.2 Cerramientos Horizontales

Esta primera solución de cerramiento horizontal que se estudia aquí corresponde a un diseño corriente de azotea pesada en nuestro medio (fig.5.20).

Ejemplo 1

Interior

- 1- Revoque int (0.02m)
- 2- Losa hormigón armado (0.10m)
- 3- Polietileno (0.20mm)
- 4- Poliestireno expandido (0.04m)
- 5- Relleno hormigón de cascotes (0.08m)
- 6- Alisado arena y Pórtland (0.02m)
- 7- Membrana asfáltica c/aluminio gofrado (4mm)

Exterior

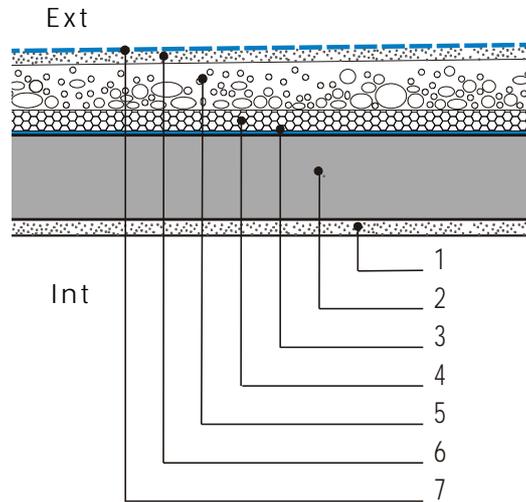


Fig.5.20

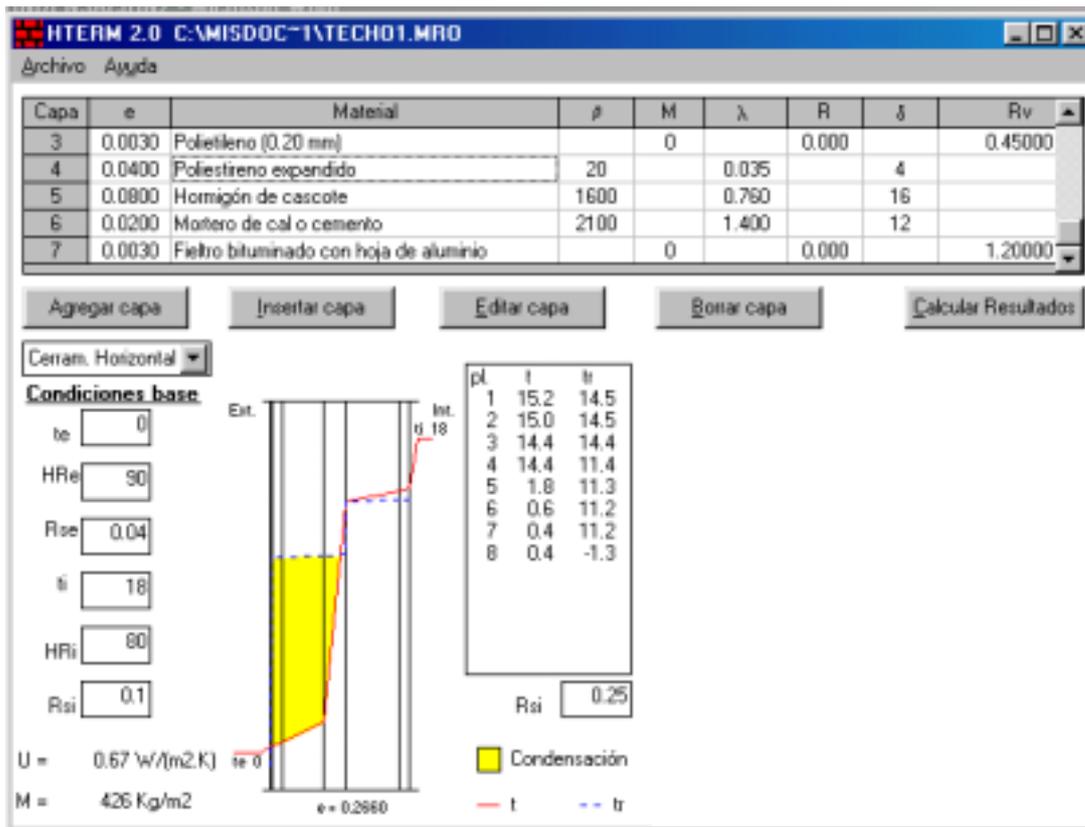


Fig.5.21- Ejemplo 1

La resistencia al vapor de la membrana asfáltica ($R_v = 1.20$) es bastante mayor que la resistencia de la capa que se colocó con propósito de barrera al vapor ($R_v = 0.45$) por lo cual el vapor que ésta deje pasar al exterior va a quedar "atrapado" entre

ambas barreras (fig.5.21). Por otra parte la colocación del aislante térmico hacia las capas interiores (lado caliente) hace que la temperatura de las capas que quedan por encima de la capa aislante se encuentren a una temperatura muy cercana a la temperatura exterior. Ambos factores conjugados aumentan el riesgo de condensación para este cerramiento.

Se modifica entonces el diseño del cerramiento ubicando la capa aislante del lado frío y sobre la membrana asfáltica que de este modo queda ubicada del lado caliente (fig.5.22).

Ejemplo 2

Interior

- 1- Revoque int (0.02m)
- 2- Losa hormigón armado (0.10m)
- 3- Polietileno 0.20mm
- 4- Relleno hormigón de cascotes (0.08cm)
- 5- Alisado arena y Pórtland (0.02cm)
- 6- Membrana asfáltica (4mm)
- 7- Poliestireno expandido (0.04m)
- 8- Alisado arena y Pórtland c/malla electrosoldada
- 9- Tejuela (0.02m)

Exterior

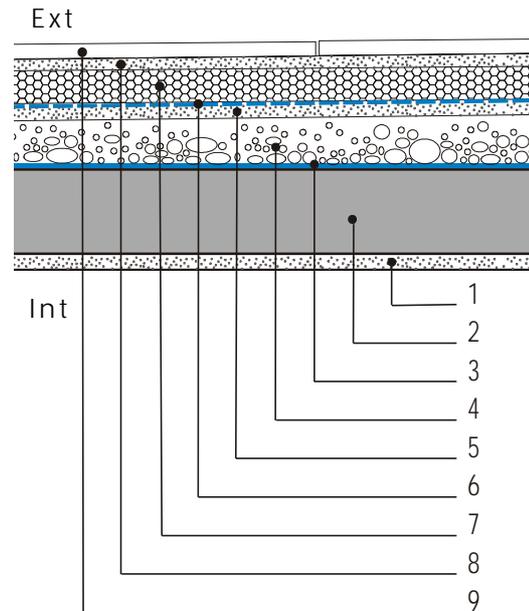


Fig.5.22

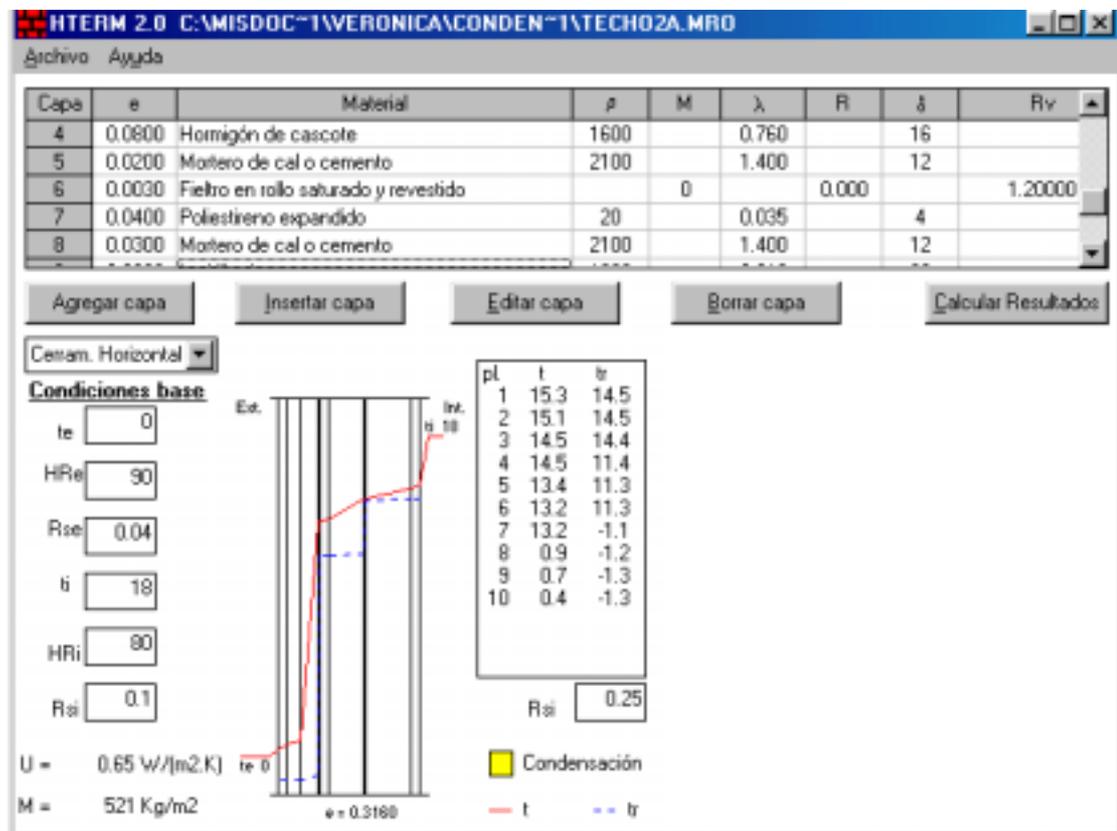


Fig.5.23 - Ejemplo 2

Es necesario colocar sobre el aislante una capa de protección mecánica que lo proteja de agentes agresivos externos como la radiación solar, sobre todo del espectro que corresponde a los ultravioletas. El tipo de protección mecánica dependerá del uso de la azotea, es decir si es o no transitable. Se puede apreciar en el esquema que el estudio resultó satisfactorio (fig. 5.23).

Se podría obviar la barrera de vapor de polietileno pero en este caso el espesor del aislante térmico debería aumentar a por lo menos 6cm (fig.5.24).

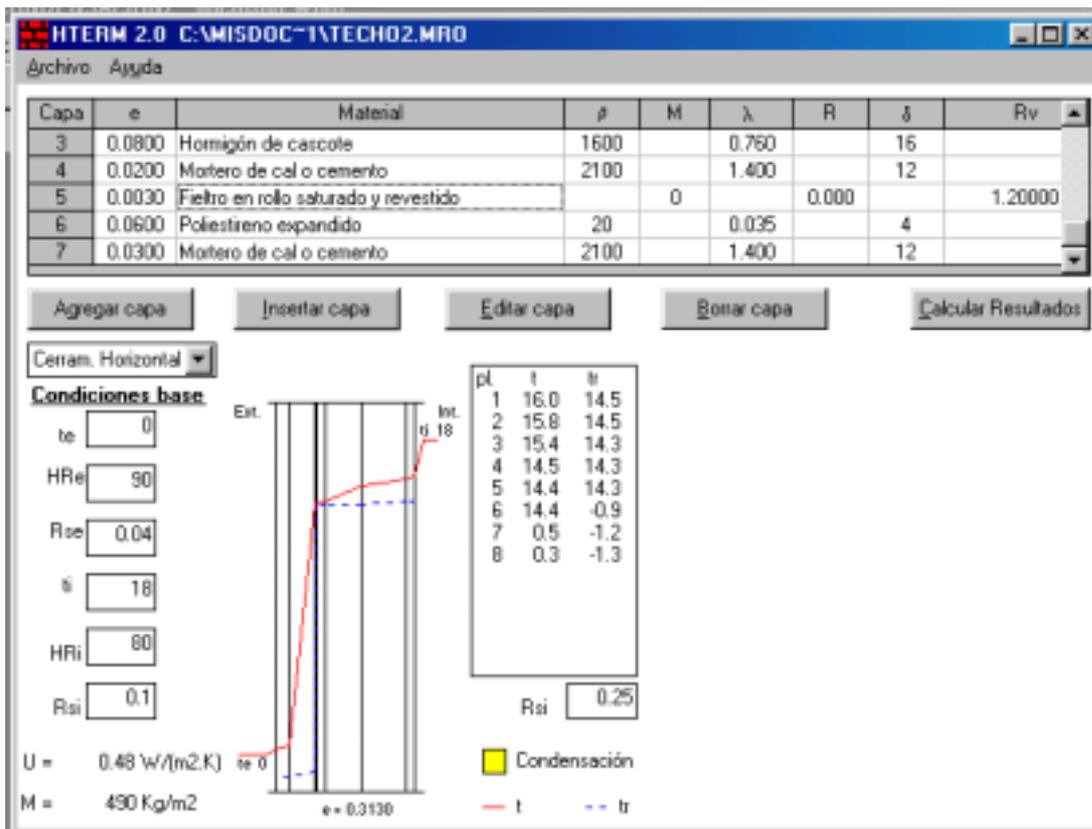


Fig.5.24 - Ejemplo 2

5.4 Conclusiones

A partir del análisis de los ejemplos estudiados y a modo de resumen se puede concluir que las técnicas concernientes al diseño del cerramiento para evitar el riesgo de condensaciones serían las siguientes:

- **Conseguir que el cerramiento se mantenga a la mayor temperatura posible, disponiendo las capas más aislantes del lado frío (exterior).**

Aislantes resistivos (tradicionales)

El aire quieto es el material que posee más baja conductividad térmica (0.024 W/mK).

La finalidad de estos aislantes es mantener el aire quieto, retenido en pequeñas celdas o material fibroso que retiene el aire entre las fibras.

En cámaras de aire el aire no está quieto sino que se producen movimientos convectivos que favorecen la transferencia de calor.

Aislantes reflectivos

Consiste en la colocación de un material de baja emisividad, barrera radiante, (anexo tabla 5) en una de las caras interiores de una cámara de aire.

El uso de barreras radiantes como el aluminio pulido reduce la transmisión de calor por radiación a través de la cámara de aire, incrementando así su resistencia térmica.

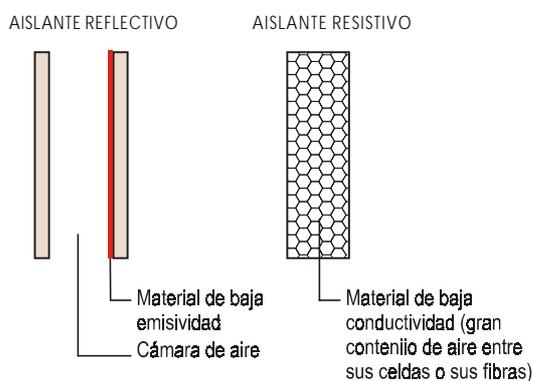


Fig.5.25- Tipos de aislantes térmicos

La elección del tipo de material aislante

(fig.5.25) depende de los siguientes factores: conductividad térmica, densidad, resistencia al paso del vapor, facilidad de colocación, costo, durabilidad, comportamiento frente al fuego, grado de exposición a la intemperie y resistencia a daños físicos.

Se debe colocar de manera que no queden zonas sin cubrir, porque se genera una reducción de la resistencia térmica.

- **De ser necesario, disminuir la transmisión de vapor a través del cerramiento, disponiendo un material de alta resistencia al vapor (“barrera al vapor”) lo más cercana posible del lado caliente (interior).**

En tecnología de la construcción el término “barrera al vapor” describe a un tipo de materiales que ofrecen una resistencia alta al flujo de vapor de agua, existiendo una amplia variedad de materiales con alta resistencia a la difusión de vapor de agua.

Los materiales que tienen una permeancia 0.75 o su inversa una $R_v=0,0013 \cdot 10^{12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}/\text{Kg}$ (bajo condiciones de ensayo establecidas por norma) se consideran barreras al vapor.

Algunos de los productos de construcción que entran dentro de esta categoría son: membranas y papeles laminados asfálticos, papeles pesados para techos, láminas de metal (cobre o aluminio), polietileno, pinturas de aluminio, pinturas y terminaciones asfálticas, pinturas (barniz y latex de algunos tipos), contrachapados, aislamiento plástico celular. La efectividad de la barrera no solamente depende de su resistencia al vapor sino que está determinada en gran medida por el diseño y el cuidado comprometido en su puesta en obra.

También tienen mucha importancia las propiedades del material en cuanto a **resistencia a la tracción, flexibilidad, resistencia a la rotura, durabilidad a la acción bacteriana, al congelamiento y descongelamiento o a la humectación y secado.**

Se requiere determinada calidad y espesor (e) del material y mayor resistencia, por lo que se recomienda:

Polietileno e = 0,20 mm

Hoja de aluminio e = 0,025 mm

Membrana asfáltica revestida o similares con una $R_v = 0,45 \times 10^{12} \text{ Pa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}/\text{kg}$

La más impermeable y durable de las barreras puede volverse inefectiva por la presencia de aberturas accidentales o intencionales.

Para que esta membrana provea una protección satisfactoria es necesario proteger de manera continua todas las partes del cerramiento, con la *menor cantidad de juntas* posible. Se recomienda que las *juntas se solapen 10 cm y se sellen con silicona o por pegado caliente.*

6. ESTUDIO DEL RIESGO DE CONDENSACIÓN EN CERRAMIENTOS OPACOS LIVIANOS

Los análisis y conclusiones extraídas para cerramientos pesados se aplican también a cerramientos livianos, presentando éstos una serie de particularidades que ameritan una mención aparte. Por un lado la falta de masa térmica, $M < 100 \text{ kg/m}^2$ para este tipo de cerramientos, y por otro las filtraciones de aire a través de sus elementos, determinan su desempeño higrotérmico en régimen variable.

6.1 Conformación y tipos de capas

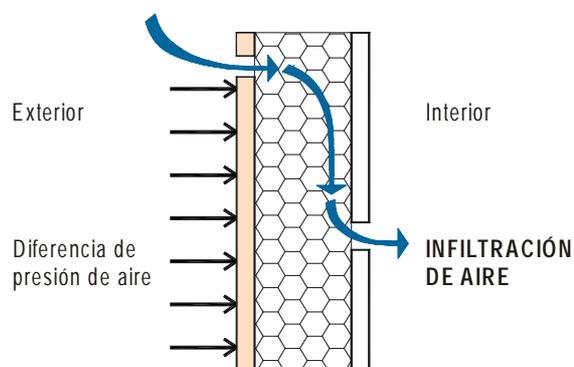
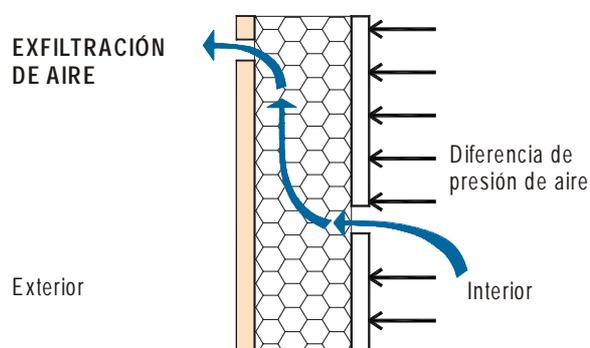
Los cerramientos livianos son más susceptibles a sufrir filtraciones de aire a través de sus capas que hacen perder efectividad al aislamiento térmico y favorecen la migración de vapor de agua. Es especialmente importante para estos cerramientos controlar la estanqueidad al aire en la zona de aislamiento ya que las filtraciones de aire contribuyen a que se incremente el problema de condensaciones.

Las filtraciones de aire se producen cuando existen aberturas accidentales en el cerramiento combinadas con la presión del aire que actúa sobre estas aberturas no planificadas (juntas de materiales mal resueltas, pases para instalaciones, etc).

Si en las paredes quedan pequeñas cavidades entre los materiales que componen los cerramientos el aire se infiltra hasta que encuentra un punto de salida.

Las filtraciones de aire pueden provenir del interior o del exterior:

- Filtración de aire del interior al exterior (exfiltración): la condensación suele ocurrir cerca del punto de salida porque el aire que se filtra del interior tiene una temperatura alta y por lo tanto también lo será su temperatura de rocío, y puede encontrar capas del cerramiento a una temperatura más baja que la temperatura de rocío del aire (fig.6.1).



Figs.6.1 y 6.2- Filtraciones de aire a través de la envolvente.

- Filtración de aire del exterior al interior (infiltración): el aire más frío proveniente del exterior, enfría el cerramiento con el consiguiente riesgo de que sus capas queden por debajo de la temperatura de rocío (fig.6.2).

Aunque estas aberturas sean pequeñas pueden aparejar consecuencias bastante graves: por ejemplo según un estudio realizado para el clima de Canadá, una abertura de 1cm² puede dejar pasar alrededor de 30 litros de agua si existe una diferencia de presión de aire de 10 pascal (National Research Council Canada).

El proceso de filtración de aire puede dejar pasar 100 veces más vapor de agua que el proceso de difusión o transmisión de vapor a través del material.

La solución a este problema es hacer que la envolvente sea estanca al aire, con el mínimo posible de pases para instalaciones y uniones bien selladas.

Para los cerramientos livianos se definen entonces dos zonas diferenciadas por sus funciones higrotérmicas:

Cerramientos horizontales:

- Zona de cubierta: Comprende el material de cubierta y la membrana (1) que actúa como barrera al aire y al agua
- Zona de aislamiento térmico: Comprende el aislamiento térmico y los elementos estructurales, la barrera al vapor (2) y la

CERRAMIENTOS HORIZONTALES

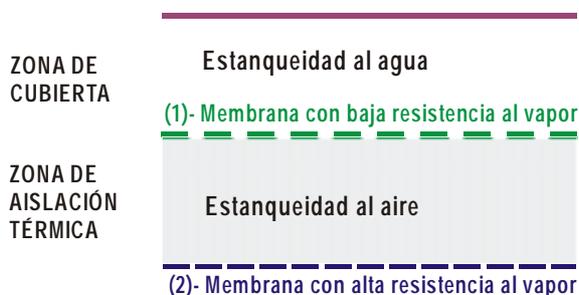


Fig.6.3- Cerramientos horizontales: zonas higrotérmicas.

terminación interior (fig.6.3).

Cerramientos verticales:

- Zona de terminación exterior: el revestimiento exterior y la membrana que actúa como barrera al aire y al agua (1).
- Zona de aislamiento térmico: Comprende el aislamiento térmico y los elementos estructurales, la barrera al vapor (2) y la

CERRAMIENTOS VERTICALES

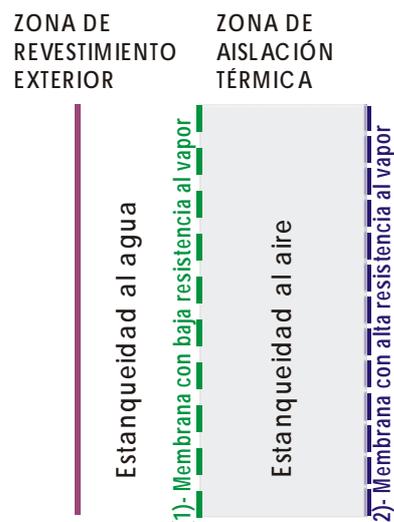


Fig.6.4- Cerramientos verticales: zonas higrotérmicas.

terminación interior (fig.6.4).

6.2 Exigencias

El método de cálculo que se aplica en este trabajo (programa HTERM) no toma en cuenta la posibilidad de filtraciones de aire; es por esto que deben adoptarse las recomendaciones que siguen para mejorar el desempeño higrotérmico de los cerramientos livianos.

Transmitancia térmica para cerramientos livianos de masa $m < 100 \text{ kg/m}^3$, por su situación más comprometida

Se fija un valor de $U \leq 0.40 \text{ W/m}^2\text{K}$

Tipo y orden de las capas para todos los cerramientos

Para controlar la migración de humedad se plantea:

- **control de la difusión de vapor** del lado caliente hacia el frío
- **control de la filtración de aire húmedo** desde el interior y el exterior
- **control de la filtración de aire frío** del exterior al interior

Para ello se debe colocar:

- Del **lado frío** (o exterior) una **membrana** que actúe como **barrera contra el aire y el agua** (de gran resistencia al paso del aire e impermeable contra el agua) pero que sea **permeable al vapor de agua**.
- Del **lado caliente** (o interior) otra **membrana** que actúe como **barrera contra el aire** y también como **barrera al vapor de agua** (tabla 6.1).

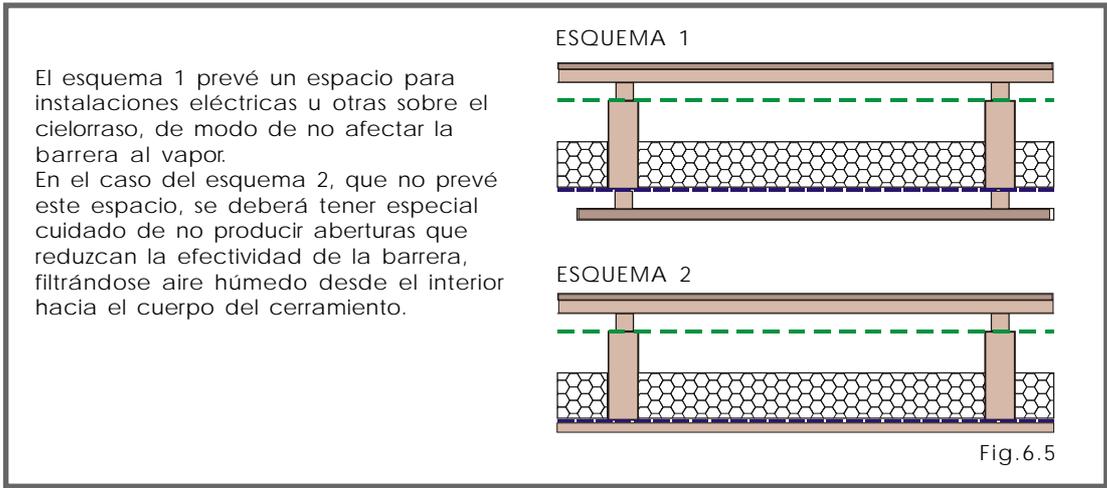
CAPA	FUNCIÓN	CARACTERÍSTICAS HIGROTÉRMICAS	VALORES RECOMENDADOS
TERMINACIÓN EXTERIOR	Protección de las capas interiores del cerramiento. Estética. Higiene.		
MEMBRANA 1	Control de la filtración de aire desde el exterior y al ingreso de agua líquida.	Alta permeabilidad al vapor de agua. Estanqueidad total al agua líquida y a las filtraciones de aire.	Valores de referencia: Membrana microporosa tipo Tyvek o similar $R_v = 0.00011 \times 10^{12}$
AISLAMIENTO TÉRMICO	Reducción del flujo de calor. Aumento de las temperaturas superficiales interiores y de las temperaturas en la masa del cerramiento.	Alta resistencia térmica dada por la relación e/λ , gran espesor, baja conductividad.	$U \leq 0.40 \text{ W/m}^2\text{K}$
MEMBRANA 2	Control de filtración de aire y de vapor de agua desde el interior.	Alta resistencia al vapor de agua. Estanqueidad total a las filtraciones de aire	$R_v \geq 0.45 \times 10^{12} \text{ Pa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s/kg}$
TERMINACIÓN INTERIOR	Protección de las capas interiores del cerramiento. Estética. Higiene.		

Tabla 6.1- Características higrotérmicas de las capas que conforman los cerramientos livianos.

Las membranas deben proteger de manera continua todas las partes del cerramiento con la menor cantidad de juntas posibles. Se recomienda que las juntas se solapen 10 cm y se sellen con silicona o por pegado caliente.

La barrera al vapor, no necesaria siempre para cerramientos pesados, debe necesariamente estar presente siempre en cerramientos livianos.

Si bien los materiales que tienen una $R_v = 0,0013 \cdot 10^{12} \text{ Pa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s/Kg}$ bajo condiciones de ensayo establecidas por norma se consideran barreras al vapor, para techos livianos se recomienda que la barrera al vapor posea una resistencia $R_v = 0,45 \times 10^{12} \text{ Pa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s/Kg}$.



La posibilidad de que existan aberturas en las barreras al vapor es mayor en cielorrasos y techos de estructura liviana que en las paredes. Estas aberturas pueden ser producidas por colocación deficiente, por fijación de elementos de la instalación eléctrica, conductos y chimeneas. Sus consecuencias son más graves que en el caso de los cerramientos opacos.

6.3 Ejemplos de Cerramiento horizontal liviano

En una primera instancia se estudian dos cerramientos horizontales livianos que difieren en su terminación exterior; el primero de tejas cerámicas y el segundo de tejas metálicas, ambos con la cámara de aire medianamente o poco ventilada (figs. 6.6 y 6.7).

Cerramiento 1a

- Interior
- 1- Cielorraso de madera (0.01m)
 - 2- Polietileno 0.20mm
 - 3- Poliestireno expandido (0.04m)
 - 4- Tyvek
 - 5- Cámara de aire medianamente ventilada
 - 6- Tejas cerámicas
- Exterior

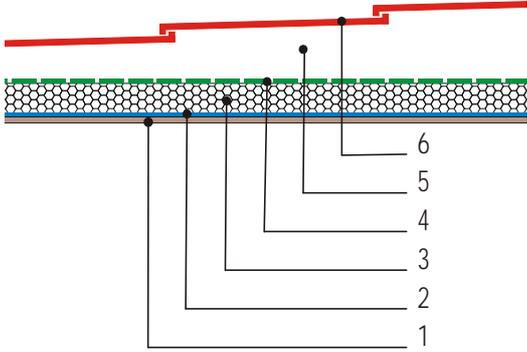


Fig. 6.6

Cerramiento 2a

- Interior
- 1- Cielorraso de madera (0.01cm)
 - 2- Polietileno 0.20mm
 - 3- Poliestireno expandido (0.04m)
 - 4- Tyvek
 - 5- Cámara de aire medianamente ventilada
 - 6- Tejas metálicas
- Exterior

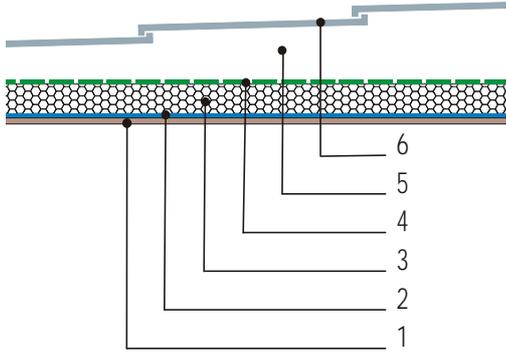


Fig. 6.7

Los resultados para el primer caso resultan satisfactorios (fig.6.8) pero al sustituir las tejas de material cerámico por tejas o chapas de metal sucede algo similar que con los cerramientos pesados (fig.6.9). El metal es un material que posee una resistencia al vapor de agua casi infinita, mucho mayor evidentemente que la del polietileno que fue colocado como barrera al vapor.

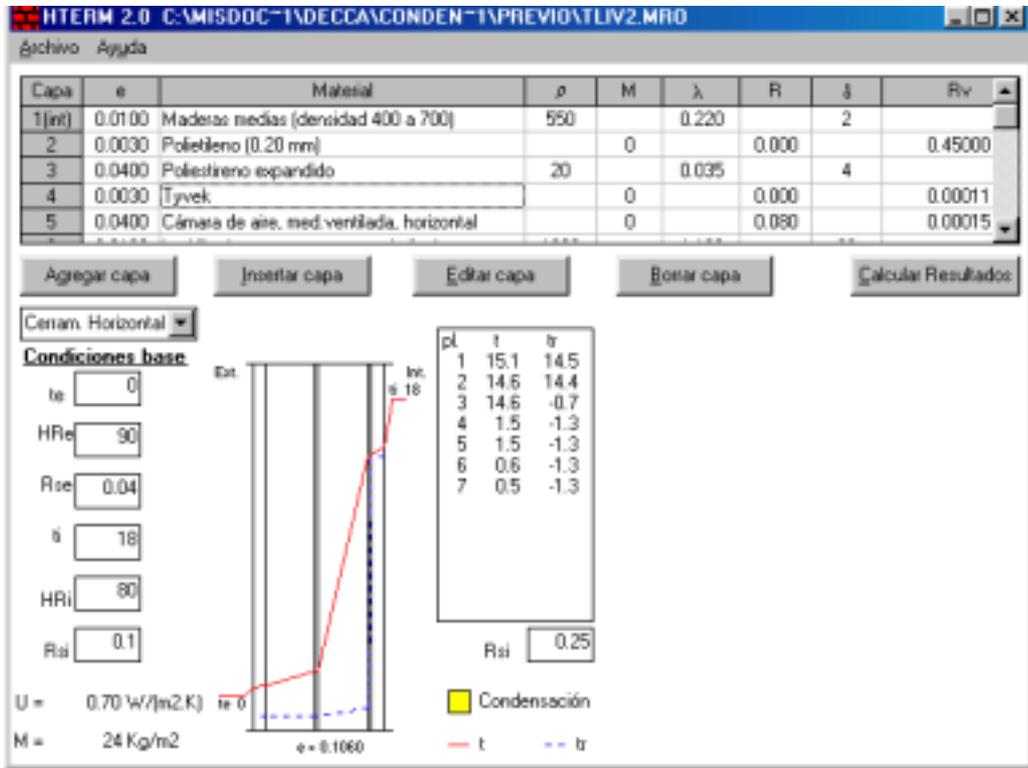


Fig.6.8- Cerramiento 1a

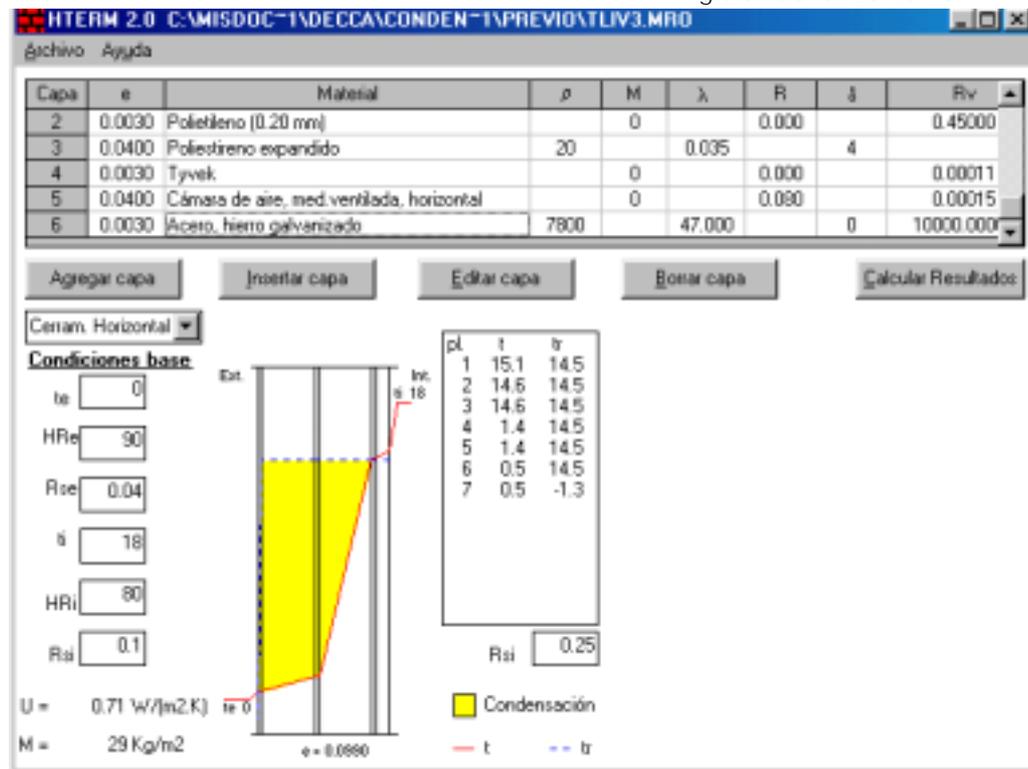


Fig.6.9- Cerramiento 2a.

Como medida correctiva se propone incrementar la ventilación de la cámara (de medianamente ventilada a muy ventilada) para remover el vapor de agua que pueda quedar "atrapado" (fig.6.10) con lo que el problema queda resuelto.

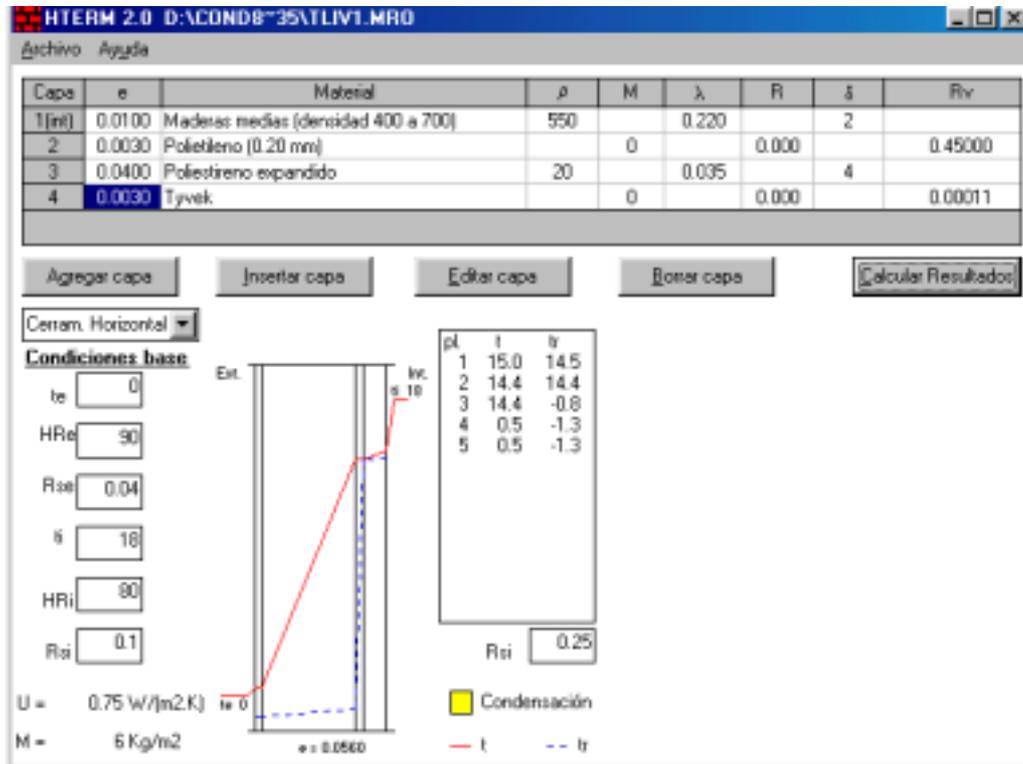


Fig.6.10

Sin embargo en la capa 2 ambas temperaturas (de la capa y de rocío) son iguales por lo cual se aumenta el espesor de la capa de poliestireno expandido de 4 a 5 cm como se puede ver en la fig.6.11.

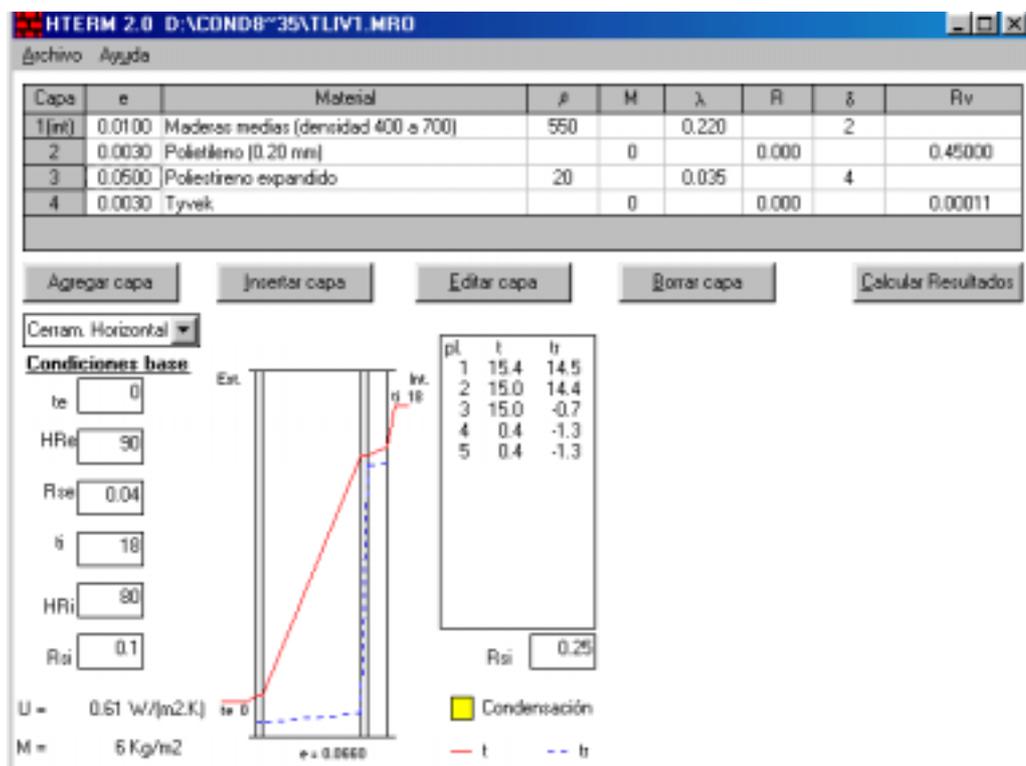


Fig.6.11

ATENCIÓN

Aunque los resultados de los estudios anteriores sean satisfactorios desde el punto de vista higrotérmico con valores de U mayores a $0.40 \text{ W/m}^2\text{K}$, es necesario incrementar el espesor del aislante para llegar a una transmitancia de $U \leq 0.40 \text{ W/m}^2\text{K}$ a fin de compensar la falta de inercia térmica de estos cerramientos y los efectos de la posible filtración de aire.

6.4 Ejemplos de cerramiento vertical liviano

Se estudia un cerramiento liviano compuesto por un núcleo de aislante térmico revestido por una lámina metálica en su lado externo y cartón en el interno (fig.6.12) y la variante en que ambos revestimientos se resuelven con metal (fig.6.13).

Ejemplo 1

Interior
 1- Cartón (0.013cm)
 2- Poliestireno expandido (0.05m)
 3- Metal
 Exterior

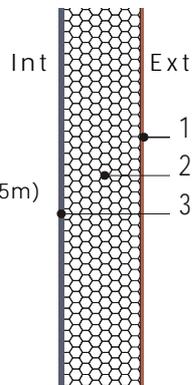


Fig. 6.12

Ejemplo 2

Interior
 1- Metal
 2- Poliestireno expandido (0.05m)
 3- Metal
 Exterior

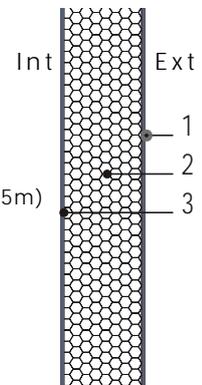


Fig. 6.13

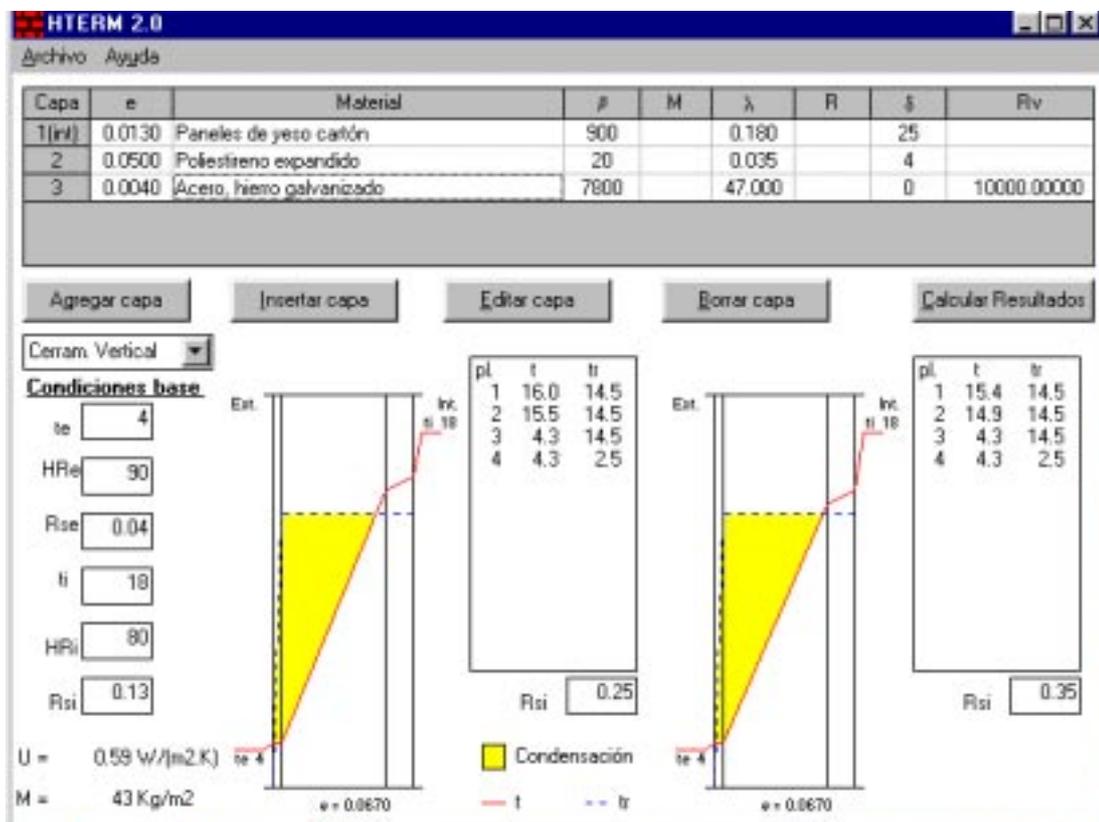


Fig.6.14- Ejemplo 1

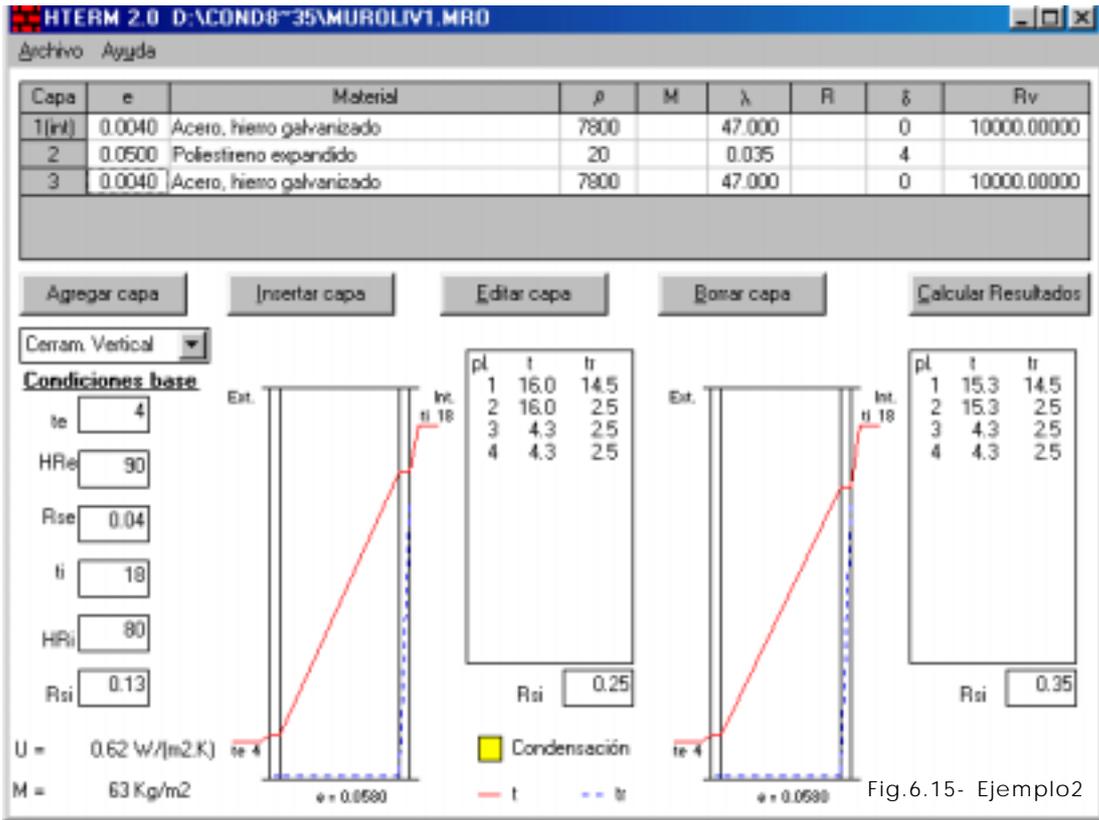


Fig.6.15- Ejemplo2

El primer caso presenta riesgo de condensaciones intersticiales (fig.6.14) y el segundo no presenta problemas (fig.6.15). Lo que sucede es que la capa externa del primer ejemplo es un metal, material de resistencia infinita al paso del vapor (barrera al vapor colocada del lado frío). Esta capa impide que el vapor de agua se difunda hacia el exterior por lo que existe el riesgo que la temperatura de rocío sea más alta que la temperatura de las capas del cerramiento. Esta situación causa riesgo de ocurrencia de condensación intersticial en el cerramiento.

En el segundo ejemplo, la capa interna, compuesta por un metal, impide casi totalmente la migración de vapor de agua desde el interior al cuerpo del cerramiento, actuando como barrera al vapor del lado caliente.

Se estudia otro cerramiento liviano, que también se encuentra en el mercado, en dos situaciones: la primera sin barrera de vapor y la segunda con barrera de vapor (ejemplo 3 y 4 respectivamente, figs.6.16 y 6.17).

Ejemplo 3

Interior
 Placa de yeso (0.013m)
 Poliestireno expandido (0.03m)
 Placa de aglomerado (0.013m)
 Mortero c/malla (0.02m)
 Exterior

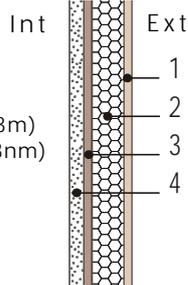


Fig.6.16- Ejemplo 3

Ejemplo 4

Interior
 Placa de yeso (0.013m)
 Polietileno (0.20mm)
 Poliestireno expandido (0.03m)
 Placa de aglomerado (0.013m)
 Mortero c/malla (0.02cm)
 Exterior

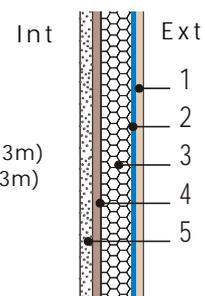
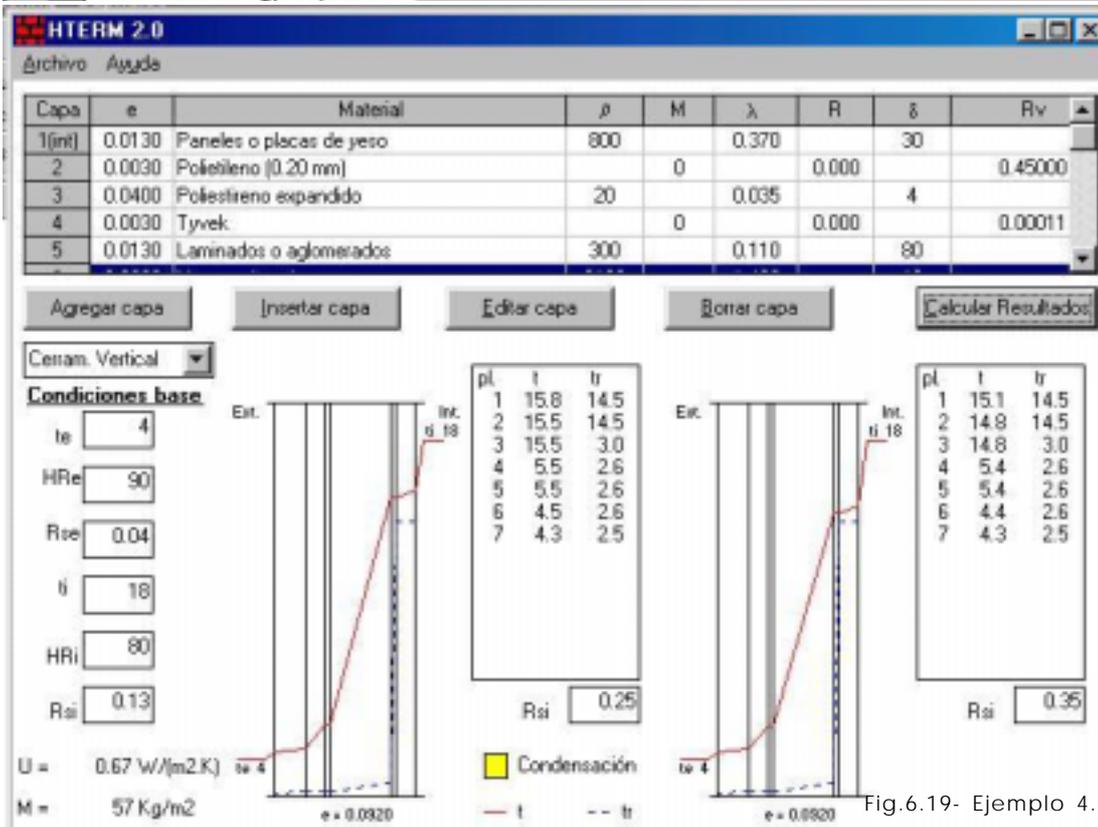
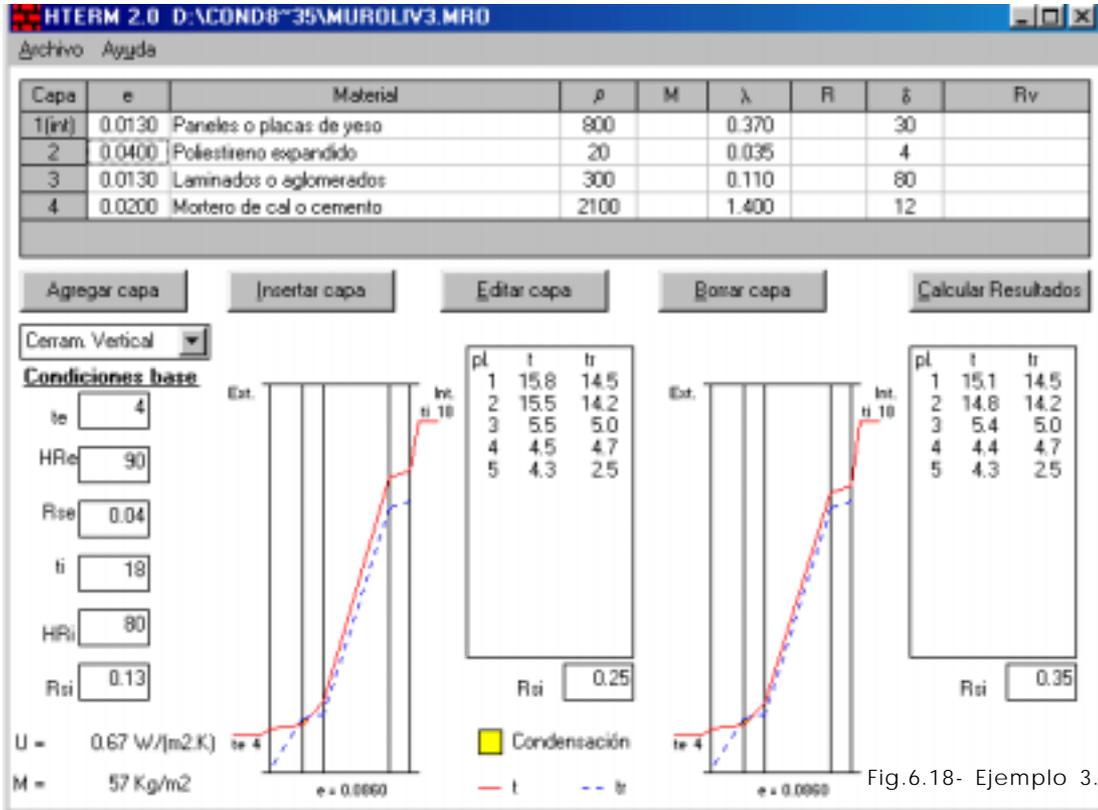


Fig.6.17- Ejemplo 4

En el primer ejemplo se produce riesgo de condensaciones (fig.6.18) mientras que en el segundo se soluciona el problema al colocar la barrera de vapor del lado interior (lado caliente) reduciendo el flujo de vapor de agua que se difunde a través



del cerramiento (fig.6.19).

Si en lugar de colocar la barrera de vapor, se aumentara el espesor del aislante los resultados del estudio serian igualmente satisfactorios (fig.6.20).

Sin embargo las capas (1) y (2) (fig. 6.3 y 6.4) deben necesariamente ser

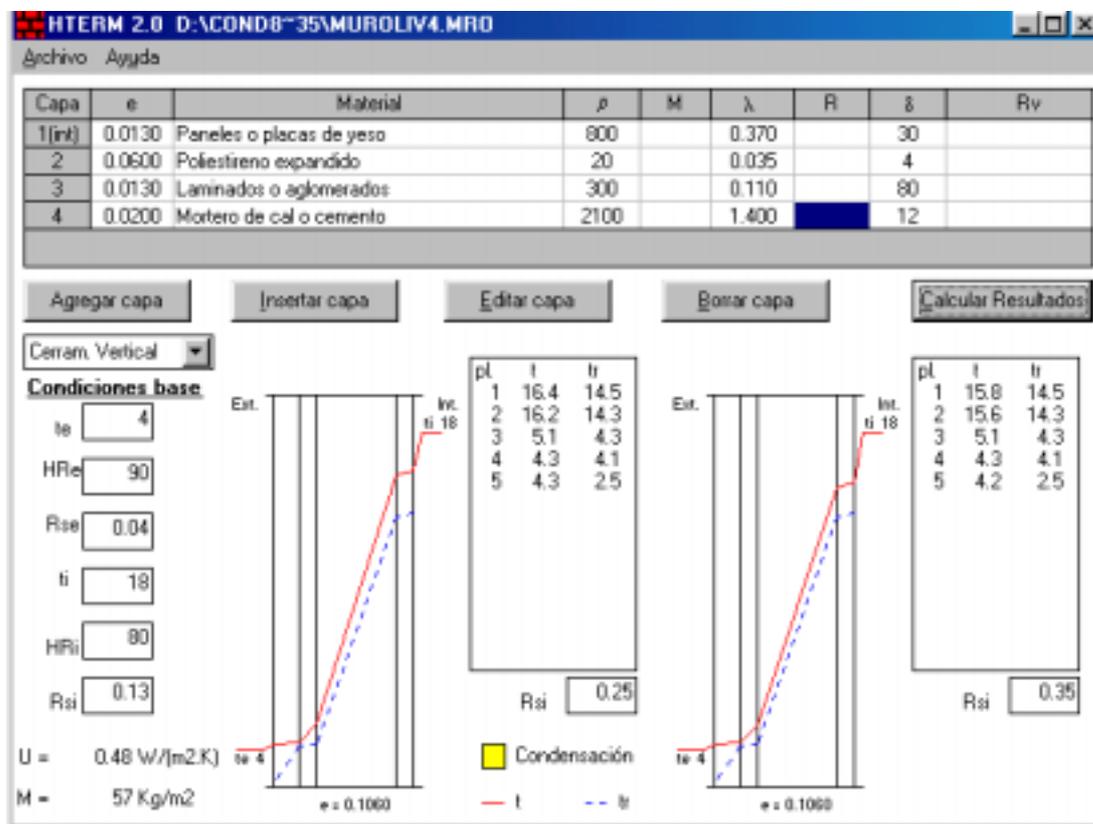


Fig.6.20

incluidas para evitar filtraciones de aire que el Hterm no está considerando.

6.5 Recomendaciones

A partir del análisis de los ejemplos estudiados se formulan algunas recomendaciones adicionales para mejorar el desempeño higrotérmico de cerramientos livianos y evitar así el riesgo de condensaciones:

Para invierno es conveniente que la ventilación de cámaras de aire sea permanente cuando:

- la cubierta o el revestimiento exterior es metálico.

Los metales se caracterizan por su infinita resistencia al vapor por lo cual es necesario ventilar para evacuar el vapor de agua que haya dejado pasar la barrera al vapor. La ventilación en verano también es beneficiosa sobre todo en techos livianos con áticos(fig.6.21).

- **se coloca aislamiento radiante**
En cerramientos horizontales el aislamiento radiante debe colocarse en la cara interna superior de la cámara de aire. Si se lo ubica sobre la cara interna inferior se cubre de polvo por lo que baja su reflectancia y sube la emisividad, por lo tanto

pierde efectividad como aislamiento radiante (tabla 5 anexo de capítulo 5). Para este tipo de aislamiento frecuentemente se utilizan materiales con alta resistencia al vapor, que además actúan como barrera al vapor pero del lado frío; por lo tanto es necesario ventilar permanentemente la cámara de aire a fin de evitar condensaciones (fig.6.22).

Los cerramientos verticales no presentan el problema de acumulación de polvo porque el aislamiento radiante se coloca verticalmente. La ventilación de la cámara de aire no es entonces obligatoria, sin

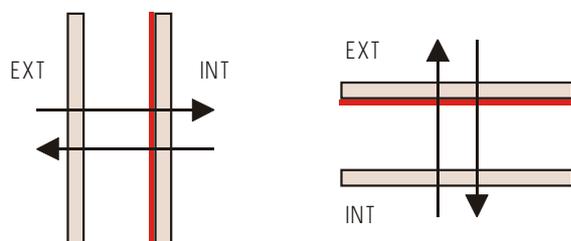


Fig.6.22- Ubicación del aislamiento radiante.

embargo se recomienda realizar la verificación para cada caso .

Para que la cámara de aire y/o el ático se ventilen correctamente es necesario crear una corriente de aire y por lo tanto prever aberturas de entrada y de salida (fig.6.21).

En cerramientos horizontales estas aberturas se deben distribuir uniformemente en la parte inferior bajo alero y en la parte superior o

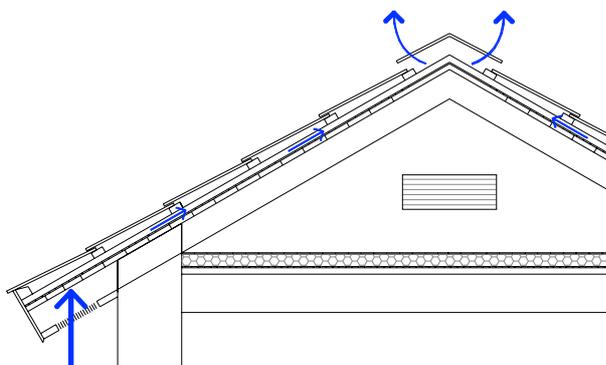


Fig.6.21- Ventilación de cámaras de aire y áticos.

cumbrera. Pueden tener rejilla con celosía para controlar la ventilación en invierno.

La ventilación de áticos se realiza a través de respiraderos (entrada y salida) colocados en los frontones. Esta ventilación se debe controlar en invierno (rejillas con celosía) y no debe sustituir a la de la cámara de aire.

En cerramientos verticales la disposición de la cámara de aire favorece la convección natural del aire por lo que deben disponerse aberturas de salida en la parte superior y aberturas de entrada en la parte inferior del cerramiento. El área de entrada no debe ser menor que el de salida.

El área total de aberturas necesaria se indica en anexo correspondiente al capítulo 4.

No es posible incidir siempre sobre las condiciones en el ambiente exterior pero sí es posible incidir en el ambiente interior modificando los valores de temperatura y humedad relativa

el arquitecto a través del diseño arquitectónico

el usuario adoptando un comportamiento que apoye el buen diseño.

Son necesarias ambas acciones ya que de nada sirve que se realice un correcto diseño pensado para el control del ambiente interior, si las acciones del usuario anulan sus efectos, por ejemplo el diseño correcto de las estrategias de ventilación no tendrán efecto si los ocupantes no ventilan.

7. ESTRATEGIAS PARA LA PREVENCIÓN DE LA PATOLOGÍA DE CONDENSACIÓN

7.1 Factores que dependen del usuario:

Para la reducción de la tasa de humedad interior existen dos estrategias que puede aplicar el usuario que son igualmente importantes: la disminución de la producción de vapor de agua mediante el uso de distintas estrategias de ventilación y su rápida evacuación generado en el interior de los locales .

El vapor de agua generado en el interior de los locales debe ser controlado a fin de no alcanzar valores altos de humedad relativa (mayor de 70%). Muy especialmente en los lugares de alta producción de vapor como baños y cocinas, es necesario que el vapor de agua sea evacuado por una ventilación eficaz lo más cercana al lugar de producción y lo más rápidamente posible.

Cuando la producción de vapor en el interior de los locales es muy grande y la humedad relativa se acerca al 100% es probable que en la práctica se produzca condensación aunque el diseño higrotérmico del cerramiento sea correcto.

- En cocinas es conveniente el uso de extractores lo más cerca posible del lugar generador de vapor (el lugar de cocción de alimentos), así como tapar las ollas para disminuir el vapor de agua volcado al ambiente. Es necesario que la cocina no esté integrada a otros ambientes.
- En baños es previsible que se produzca

este fenómeno por la alta producción de vapor debido al tipo de actividades que allí se realizan. Por eso se recomienda secar los azulejos después de usar la ducha, usar extractores o ventilación natural y cerrar la puerta luego que la ducha haya sido utilizada.

- Se recomienda secar la ropa en el exterior de la vivienda, de no ser esto posible el lugar donde se realice esta actividad debe estar bien ventilado. De utilizarse secadora de ropa la evacuación debe estar conectada al exterior.
- La calefacción deberá ser preferiblemente seca y en caso de que no lo sea, por ejemplo, calefacción de combustión abierta, se recomienda prever la renovación del aire del local.

Es un error bastante común creer que en invierno no conviene ventilar los días de humedad relativa exterior alta. Si bien es cierto que el aire exterior en este período se caracteriza por temperaturas bajas y humedades relativas altas, igualmente la ventilación es beneficiosa y necesaria.

El aire exterior a menor temperatura que el aire interior, tiene menor capacidad de contener vapor de agua. Cuando este aire exterior ingresa a los locales, se mezcla con el aire interior a mayor temperatura por lo que la temperatura de la mezcla es más alta que la del aire exterior pero su humedad relativa más baja; la mezcla es un aire más seco. Por eso aún en los días fríos y húmedos es beneficiosa la ventilación de los locales para la remoción del vapor de agua, que es

uno de los factores causantes del fenómeno de condensación.

Si se tratase de un día muy caluroso y muy húmedo, atípico en esta época del año, en este caso no convendría ventilar.

7.2 Factores que dependen del arquitecto

El arquitecto es responsable de diseñar correctamente los cerramientos y la ventilación (tabla 7.1).

- Mejorar el aislamiento de la envolvente mediante el uso de aislamiento térmico que reduce la transmitancia térmica de modo que las temperaturas superficiales interiores sean mayores que la temperatura de rocío del aire. Los valores de U no sólo contemplan el problema de condensación sino también influyen sobre el confort y el consumo de energía.
- Diseñar el cerramiento mediante un correcto orden de las capas de los distintos materiales que lo componen. Esto se consigue disponiendo las capas más aislantes del lado exterior y, en caso de que sea necesario disminuir la

transmisión de vapor a través del cerramiento, disponer una "barrera al vapor" ubicada lo más cerca posible del lado caliente.

En cerramientos pesados no siempre es necesaria mientras que en cerramientos livianos su aplicación es imprescindible (ver capítulos 5 y 6).

- Diseñar una ventilación eficaz para invierno y para verano, tomando en cuenta que debe permitirse la ventilación cruzada a través de la organización de la tipología (doble orientación), y de la ubicación y diseño de la abertura (partes móviles, tamaño).

El agua de condensación superficial sobre los vidrios, se debe recoger a través de un correcto diseño de la carpintería de la abertura.

Una mejor opción es colocar aberturas con doble vidriado. El vidrio doble posee un valor de transmitancia U igual a la mitad aproximadamente de un vidrio simple por lo cual su temperatura superficial aumenta

PATOLOGÍA	CONDICIONES INTERIORES	CLIMA	CARACTERÍSTICAS DE LOS CERRAMIENTOS	MEDIDAS CORRECTIVAS DE DISEÑO
Condensaciones en vidrios.	Alta HR interior. Ventilación mal diseñada o insuficiente.	Período frío.	Muy baja resistencia térmica (muy alta trasmirancia U).	Colocación de doble vidriado o doble aventanamiento Perfil que recoja la condensación.
Condensaciones en cerramientos pesados.	Alta HR interior. Ventilación mal diseñada o insuficiente.	Período frío.	Baja resistencia térmica del cerramiento. Ordenamiento incorrecto de las capas. Cámaras de aire no ventiladas cuando el material de terminación exterior es un metal.	Incorporar o aumentar el aislamiento térmico. Ordenar correctamente las capas. Ventilar las cámaras de aire sobre todo cuando el material de terminación exterior es metálico o aislamiento radiante.
Condensaciones en cerramientos livianos.	Alta HR interior. Ventilación mal diseñada o insuficiente.	Período frío.	Baja resistencia térmica del cerramiento. Ordenamiento incorrecto de las capas. Cámaras de aire no ventiladas cuando el material de terminación exterior es un metal. Filtraciones de aire a través del cerramiento.	Incorporar o aumentar el aislamiento térmico. Ordenar correctamente las capas. Ventilar las cámaras de aire sobre todo cuando el material de terminación exterior es un metal o aislamiento radiante. Colocación de dos membranas: una interior (lado caliente) barrera al vapor y otra exterior (lado frío) barrera al aire y al agua pero permeable al vapor de agua.

Tabla 7.1- Pautas para un diseño higrotérmico correcto de los cerramientos.

8. CONCLUSIONES

reduciendo el riesgo de encontrarse por debajo de la temperatura de rocío.

La mejora de la calidad higrotérmica de la edificación que se construye en Uruguay, especialmente de la vivienda por sus implicancias socioeconómicas, es responsabilidad de:

Los **Proyectistas** que deben actuar en el mejoramiento de las condiciones del ambiente interior a través de la aplicación de criterios correctos en el diseño arquitectónico, incluyendo los cerramientos en cuanto a la elección de materiales, espesores y orden de las capas, estrategias de ventilación, orientaciones con buena recepción de la radiación solar, relación área vidriada y área opaca, relación entre superficie expuesta y

volumen, protección de cerramientos vidriados.

Los **Usuarios** que deben concientizarse sobre los modos correctos de uso y mantenimiento de la vivienda, siendo para ello imprescindible que cuente con la información correspondiente.

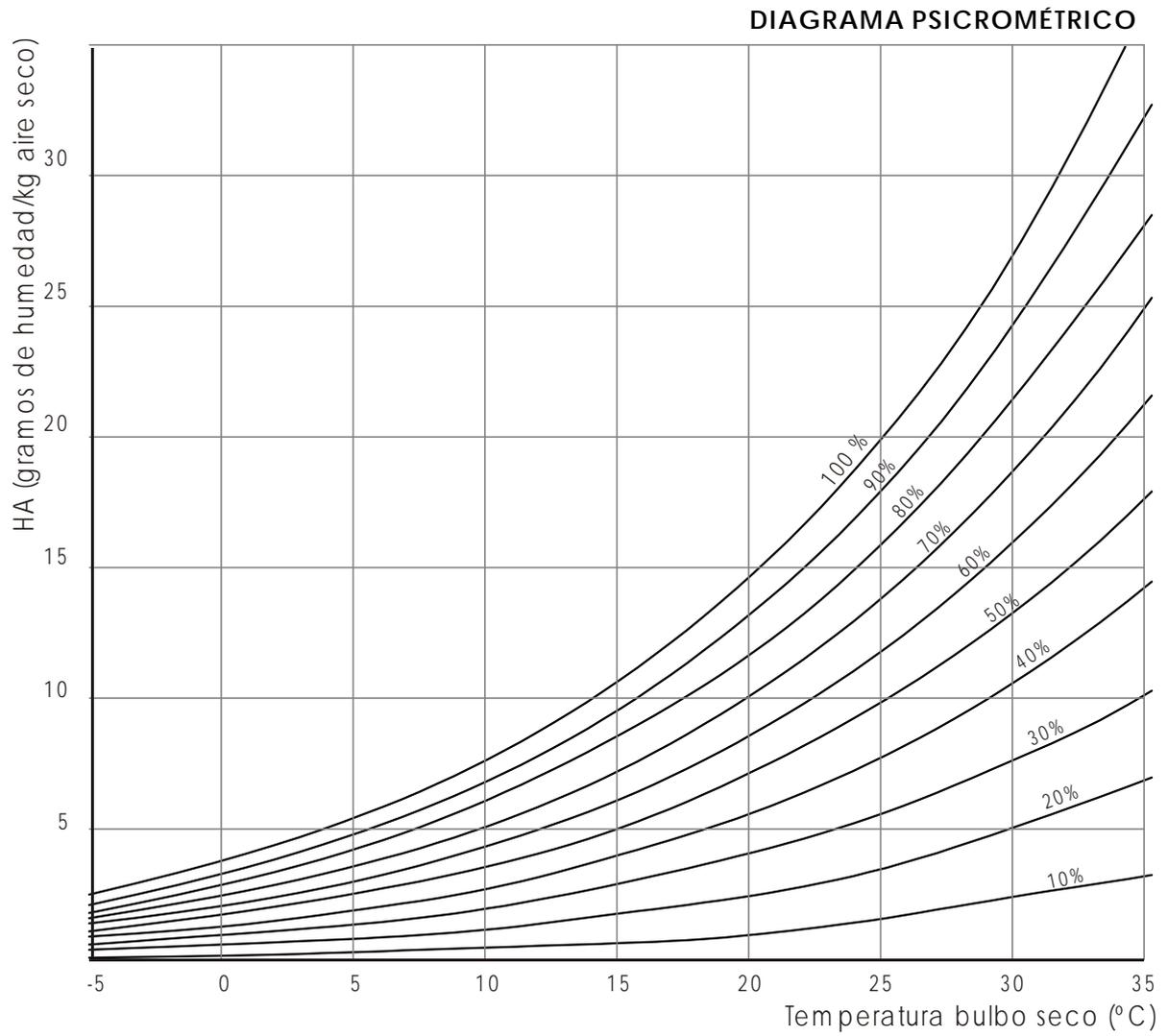
Los **Organismos competentes** que deben contribuir estableciendo normativas que contemplen los factores que intervienen en la calidad higrotérmica.

9. BIBLIOGRAFÍA

- ARZTEGUI, J. Temas del curso. Cátedra de Acondicionamiento Térmico. Oficina del libro del CEDA. Facultad de Arquitectura. 1996.
- ARUNDEL A. STERLING E. BIGGIN J. STERLING T. Indirect health on HR in indoor environments Environ Health Perspect 1986; 65: 351-61
- ASHRAE Journal. Moisture control for buildings. February 2002.
- CIBSE GUIDE Section A10: Moisture transfer and condensation.
- CDU:697.147 Ficha. Barreras de vapor. Conceptos básicos.
- CSTB. Etudes et recherches. Transferts de vapeur.
- CSTB Magazine. Humidité dans les batiments. 133 janvier-février 2001.
- CSTB. Les condensations superficielles intérieures sur le murs de façades.
- CUNNINGHAM, M. Moisture diffusion due to periodic moisture and temperature boundary conditions - an approximate steady analytical solution with non-constant diffusion coefficients. Building and Environments. Vol. 27. N°3. 1992.
- CUNNINGHAM, M. Effective penetration depth and effective resistance in moisture transfer. Building and Environments. Vol. 27. N°3. 1992.
- DECCA. Concepción del aislamiento de la cubierta liviana. 2001.
- ECHEVARRIA, C. RIVERO, R. Pautas de diseño para la prevención de las condensaciones en los cerramientos. Facultad de arquitectura. 1991.
- ECHEVARRÍA, C. MARTINEZ, C. Estudio de patologías de condensación. Cooperativa Vicman. Facultad de arquitectura. 1996.
- GIRARDIN, M. ECHEVARRIA, C. MARTÍNEZ, C. PICCION, A. Calidad higrotérmica de la vivienda. Exigencias mínimas y recomendaciones. Facultad de arquitectura. 1998.
- GIRARDIN M., PICCIÓN A. Influencia del diseño arquitectónico en el confort térmico y en el ahorro energético. Proyecto VI – 4 CYTED. 1999.
- GIRARDIN, M. PICCION, A. La calidad higrotérmica de la vivienda y el diseño de los cerramientos. COTEDI, 2000.
- GONZALO, G. MARTÍNEZ, C. Condensación en edificios. Revista Trama.
- HANDEGORD, G.O. Vapour barriers in home construction. CBD-9 (Canadian Building Digest).
- HANDEGORD, G.O. Moisture considerations in roof design. CBD-73 (Canadian Building Digest).
- HANSEN, A. Moisture problems in houses. CBD-231 (Canadian Building Digest).
- HUTCHEON, N. Humidity in canadian building. CBD-1 (Canadian Building Digest).
- INNOVARO revista . Aislación térmica. Condensación de vapor de agua.
- KIRILLIN, V. Thermodynamique technique.
- KOHONEN, Transient analysis of the thermal and moisture physical behaviour of building constructions. Building and environment. Vol.19.1984.
- LATTA, J. BEACH, R. Vapour diffusion and condensation. CBD-57 (Canadian Building Digest).
- LAVIGNE, P. Arquitectura climática. Tomo 1. Editorial Universidad de Talca. 2003.
- MIMBACAS, A. Comportamento do usuario e condensação: Cooperativa Habitacional Vicman. Tesis de maestría. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1998.
- MUSSO, R. Condensación en los edificios. Publicación interna. DECCA.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL CANADA, Humidity condensation and ventilation in house. 1983.
- NAMIESNIK, J. et all. Indoor air quality (IAQ), pollutants, their sources and concentration levels. Building and Environments. Vol. 27. N°3. 1992.
- NEILA GONZÁLEZ. J. Técnicas arquitectónicas y constructivas de acondicionamiento ambiental. Editorial Munilla-Lería. 1997.
- OLGYAY, V. Arquitectura y Clima. Princeton University Press. 1963.
- PACIUK M. BECKER R. The effect of improved thermal insulation on condensation and mould growth in dwellings. National Building Research Institute Technion - Israel Institute of Technology.
- PYTLOWANY, G. Fenómenos físicos que producen humedades. Congreso patologías.
- RAW G. Condensation, heating and ventilation in small homes. Building Research and Information Volume 19 Number 2, 1991.
- RIVERO, R. Arquitectura y Clima. División publicaciones y ediciones Universidad de la República. 1988.
- RIVERO, R. AROZTEGUI J. GIRARDIN, M. MUSSO, R. Repartido cátedra de acondicionamiento térmico.
- SIMON, F. HAUGLUSTAINÉ J.M. L'isolation thermique de la toiture inclinée.
- TRENCHS V., DOMINGO A., GARCÍA-TORNEL S., GASPÁ J. Humidificadores domésticos: ¿qué se sabe de ellos? An Esp Pediatr 2002; 57(3):231-7
- VAN ZELE, J. Regulation de climat intérieur pour éviter la formation de condensation. C.S.T.C. Revue. N°3. p.23. Setiembre 1978.

10. ANEXOS

Anexo al capítulo 3



Anexo al capítulo 4

TABLA 1

MATERIAL	ρ	λ	δ
	densidad	conductividad	permeabilidad
	(kg/m ³)	(W/mK)	kg/(s.m.Pa)
ARCILLA COCIDA			
ladrillo macizo de campo	1300-1600	0.65	40x10 ⁻¹²
ladrillo macizo de campo expuesto a la lluvia	-	0.79	40x10 ⁻¹²
ladrillo macizo de prensa	1600	0.81	30x10 ⁻¹²
ladrillo macizo de prensa expuesto a la lluvia	-	1.00	30x10 ⁻¹²
ladrillo de prensa	1800	0.92	30x10 ⁻¹²
ladrillo de prensa expuesto a la lluvia	1800	1.10	30x10 ⁻¹²
HORMIGONES			
hormigón amado	2000	1.51	6x10 ⁻¹²
hormigón amado	2200	1.74	6x10 ⁻¹²
hormigón amado	2400	2.00	6x10 ⁻¹²
hormigón de cascote	1600	0.76	16x10 ⁻¹²
hormigón de cascote	1800	0.95	16x10 ⁻¹²
hormigón celular	500	0.20	30x10 ⁻¹²
hormigón celular	700	0.27	30x10 ⁻¹²
hormigón celular	1000	0.41	30x10 ⁻¹²
hormigón celular	1300	0.58	30x10 ⁻¹²
hormigón con agregados livianos	500	0.15	20x10 ⁻¹²
hormigón con agregados livianos	700	0.22	20x10 ⁻¹²
hormigón con agregados livianos	1000	0.30	20x10 ⁻¹²
hormigón con agregados livianos	1300	0.40	20x10 ⁻¹²
MORTEROS			
mortero de cal y cemento interior	1800	1.10	17x10 ⁻¹²
mortero de cal y cemento exterior	2100	1.40	12x10 ⁻¹²
enduido de yeso	800	0.40	30x10 ⁻¹²
enduido de yeso	1000	0.49	30x10 ⁻¹²
enduido de yeso	1200	0.64	30x10 ⁻¹²
MADERA			
maderas blandas	< 400	0.13	2x10 ⁻¹²
maderas medias	400-700	0.22	2x10 ⁻¹²
maderas duras	> 700	0.29	2x10 ⁻¹²
madera enchapada	600	0.15	3x10 ⁻¹²
laminados o aglomerados	300	0.11	80x10 ⁻¹²
laminados o aglomerados	600	0.14	65x10 ⁻¹²
laminados o aglomerados	800	0.17	50x10 ⁻¹²
MATERIALES PÉTREOS			
arenisca	2000	1.30	18x10 ⁻¹²
mármol	2600	2.90	1x10 ⁻¹²
granito	2800	3.35	1x10 ⁻¹²
METALES			
aluminio	2700	230	0
acero, hierro galvanizado	7800	47	0
ASBESTO CEMENTO			
placa de asbesto cemento	2000	0.58	4x10 ⁻¹²
YESO			
paneles o placas de yeso	800	0.37	30x10 ⁻¹²
paneles o placas de yeso	1200	0.51	30x10 ⁻¹²
paneles de yeso cartón	900	0.18	25x10 ⁻¹²
AISLANTES TÉRMICOS			
poliestireno expandido	20	0.035	4x10 ⁻¹²
poliestireno expandido	30	0.032	4x10 ⁻¹²
lana de vidrio	50	0.036	90x10 ⁻¹²
poliuretano proyectado	30/60	0.022	5x10 ⁻¹²
poliuretano en plancha	30/60	0.027	5x10 ⁻¹²
corcho en plancha	100	0.038	30x10 ⁻¹²
corcho en plancha	300	0.058	30x10 ⁻¹²
aire en reposo			174x10 ⁻¹²

TABLA 2

PIEZAS HUECAS DE CERÁMICA						
MATERIAL	masa/m ²	b	h	e	R resistencia a la transmisión de calor	Rv resistencia a la transmisión de vapor
	kg/m ²	m	m	m	(m ² K)/W	(Pa.m ² .s)/kg
Tichob						
	60	0.25	0.12	0.07	0.14	0.0025x10 ¹²
	78	0.25	0.25	0.08	0.16	0.0029x10 ¹²
	120	0.25	0.17	0.12	0.26	0.0043x10 ¹²
	177	0.25	0.12	0.12	0.26	0.0043x10 ¹²
	181	0.25	0.17	0.17	0.34	0.0061x10 ¹²
Rejilla						
	136	0.25	0.09	0.12	0.16	0.0029x10 ¹²
Rejillón						
	186	0.25	0.12	0.17	0.26	0.0061x10 ¹²
Bovedilla						
	284	0.25	0.25	0.10	0.11 (invierno)	0.0036x10 ¹²
	309	0.25	0.25	0.15	0.17 (invierno)	0.0054x10 ¹²
PIEZAS HUECAS DE HORMIGÓN						
MATERIAL	masa/m ²	b	h	e	R resistencia a la transmisión de calor	Rv resistencia a la transmisión de vapor
	kg/m ²	m	m	m	(m ² K)/W	(Pa.m ² .s)/kg
Bloque						
	132	0.39	0.19	0.10	0.15	0.0036x10 ¹²
	160	0.39	0.19	0.12	0.16	0.0041x10 ¹²
	190	0.39	0.19	0.15	0.18	0.0054x10 ¹²
Bovedilla						
	273	0.40	0.25	0.10	0.11 (invierno)	0.0036x10 ¹²
	355	0.40	0.20	0.15	0.13 (invierno)	0.0054x10 ¹²

TABLA 3

RESISTENCIA A LA TRANSMISIÓN DE CALOR (m ² k)/w DE CÁMARAS DE AIRE CON ESPESOR > 25 mm			
TIPO DE CÁMARA (según grado de ventilación)	ABERTURAS DE VENTILACIONES (mm)	CERRAMIENTO VERTICAL	CERRAMIENTO HORIZONTAL
NO VENTILADA POCO VENTILADA	S ≤ 500 mm ² /m lineal	0.18	-
	S ≤ 500 mm ² /m ² de superficie	-	0.16
MEDIANAMENTE VENTILADA	500 < S ≤ 1500 mm ² /m lineal	0.09	-
	500 < S ≤ 1500 mm ² /m ² de superficie	-	0.08
MUY VENTILADA	S ≥ 1500 mm ² /m lineal	Se desprecia la resistencia de la cámara y de la capa externa a ésta.	
	S ≥ 1500 mm ² /m ² de superficie		

TABLA 4

RESISTENCIA A LA TRANSMISIÓN DE VAPOR	
MATERIAL	R v resistencia a la transmisión de vapor
	(s m² Pa) / kg
IMPERMEABILIZANTES	
filtro alquitranado	0.0016x10 ¹²
filtro asfáltico	0.0055x10 ¹²
filtro en rollo saturado y revestido	1.20x10 ¹²
filtro bituminado con hoja de aluminio	1.20x10 ¹²
papelkraft	0.0005x10 ¹²
tyvek	0.00011x10 ¹²
PELÍCULAS Y LÁMINAS	
hoja de aluminio (0.025 mm)	∞
hoja de aluminio (0.009 mm)	0.35x10 ¹²
polietileno (0.05 mm)	0.11x10 ¹²
polietileno (0.1 mm)	0.23x10 ¹²
polietileno (0.15 mm)	0.30x10 ¹²
polietileno (0.20 mm)	0.45x10 ¹²
polietileno (0.25 mm)	0.60x10 ¹²
polyester (0.025 mm)	0.024x10 ¹²
pvc (0.051 mm)	0.026x10 ¹²
pvc (0.1 mm)	0.032x10 ¹²
PINTURAS	
pintura a la cal	0.00005x10 ¹²
pintura tipo epoxi	0.0035x10 ¹²
pintura a base de silicona	0.001x10 ¹²
esmalte sobre enduido	0.009x10 ¹²
resina acrílica	0.0009x10 ¹²
resina acrílica de estireno (pintura texturada)	0.0007x10 ¹²
resinas de poliuretano	0.002x10 ¹²

Anexo al capítulo 5

TABLA 5

MATERIAL	Emisividad (ϵ)
Aluminio o superficies muy pulidas	0.02 - 0.04
Aluminio o superficies muy pulidas sucias	0.50
Pintura aluminio nueva	0.45
Pintura aluminio sucia	0.60