

AISLACIONES EN CLIMAS FRÍOS

Canzonieri, S. H., Herrera, C. F., Guerrero, J. L.,
Moreno R. C., Polito E. D. A. y Tramaglia J. A.
Universidad Nacional del Comahue - Facultad de Ingeniería.
Dpto. De Construcciones - C.E.V.Eq.U.
Buenos Aires 1400 - 8300 Neuquén - Argentina.
Telefax: (0299) 4490356
E-mail: jlg@uncoma.edu.ar

RESUMEN

Independientemente de la fuente que provee energía térmica a un edificio, es necesario aislarlo a fin de aumentar su eficiencia energética. En el presente trabajo se evalúa el comportamiento de los cerramientos aislados de los edificios ante la acción de los procesos de transferencia de masa y de calor que en ellos ocurren. En función de este conocimiento y la aplicación de un modelo apropiado se pretende configurar una estructura de aislaciones que permita la predicción de los efectos perjudiciales que producen la condensación de vapor de agua interna o la formación destructiva de hielo. Se incluyen aplicaciones a sistemas de aislación habituales con materiales de uso corriente en la construcción local, que contradicen viejos preconceptos sobre el tema.

INTRODUCCIÓN

Las bajas temperaturas que se registran constantemente en la región del Comahue en los meses invernales, inducen al estudio del comportamiento de los materiales empleados en construcciones edilicias; de manera particular, los porosos, por cuanto los mismos revisten el peligro de sufrir condensaciones o congelamiento durante estos periodos.

Mediante el relevamiento geográfico y climático de la zona en estudio se determina la presencia y magnitud de los sectores en riesgo. El aspecto físico relacional comprende el relativo al estudio del transporte de calor por conducción, del transporte de aire húmedo que tiene lugar entre el medio interior y el exterior, y de la distribución zonal de temperaturas mínimas que implican riesgo de congelamiento.

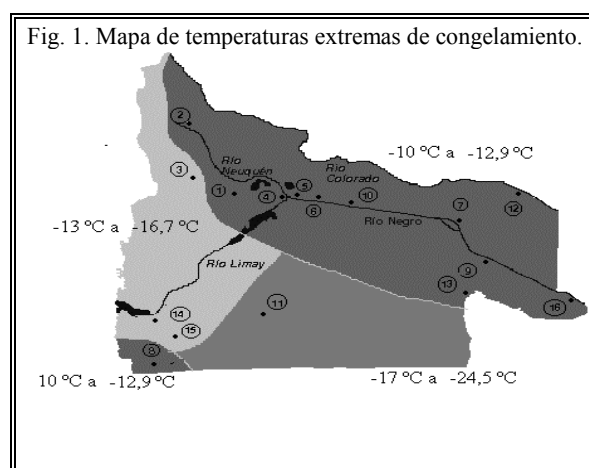
El estudio de los factores climatológicos de la zona permite contar con mecanismos de previsión respecto de los materiales de construcción y sistemas de aislación usados, lo que proveerá de procedimientos de diseño adecuados a los cerramientos de la zona, extrapolable a otras zonas del país o del exterior con características similares.

La capacidad térmica de los suelos, considerando sus caracteres intrínsecos, que rige en el curso de las heladas, no presenta una variación apreciable, si bien sí resulta afectada por el contenido de agua de los mismos.

Los datos de los parámetros físicos involucrados han permitido la elaboración del mapa definiendo las zonas de riesgos (Fig. 1), eligiéndose aquellos años que registran las mínimas temperaturas .

En el aspecto térmico la distribución de la temperatura del aire está íntimamente ligada a la temperatura de superficie. La evolución de la temperatura a distintas profundidades resultan relevantes en los estudios relativos al balance energético de la superficie. La transferencia de calor superficial puede ser evaluada efectuando mediciones periódicas de la temperatura superficial y capacidad calorífica.

El riesgo de condensación del vapor de agua en los elementos constructivos de los cerramientos de edificios provoca en general una disminución de la aislación que es una de las funciones más importantes que estos tienen [4], sobre todo en



zonas con altos niveles de calefacción, para mantener la situación de bienestar interior que hace a la habitabilidad de los edificios.

Es decir que su importancia es capital cuando la condensación se produce en elementos aislantes térmicos colocados en los cerramientos para disminuir el paso del calor y que pierden esta propiedad.

En varios materiales como el ladrillo, usado habitualmente en construcción, la existencia de agua condensada en su interior varía su conductividad térmica [5] en cerca del 170 %, es decir que es superior a la del ladrillo y más aún a la del agua. Esto se debe a que en los alvéolos del material ocurre un proceso de evaporación, del lado caliente y uno de condensación del lado opuesto, retornando el agua por capilaridad para volver a repetir el fenómeno.

Este fenómeno cobra especial importancia cuando el vapor condensado en agua corre el riesgo de congelarse, pues con la generación de hielo aparece la rotura del elemento constructivo del cerramiento.

El fenómeno de condensación intersticial puede ser evitado no permitiendo el paso del vapor de agua al interior del cerramiento, para lo cual es suficiente el empleo de una lámina impermeable que oficia de barrera de vapor. Si bien el uso de la misma es eficaz para evitar la condensación, su empleo conlleva la supresión de la respiración natural que debería poseer el cerramiento [6] y que contribuye a la calidad del ambiente interior (generación de hongos, persistencia de olores, etc.). La barrera de vapor sólo es recomendable ante serias dudas acerca de la posibilidad de condensación o congelamiento.

MODELO

El congelamiento y la condensación en sistemas constructivos ha tenido relativamente poca importancia en la arquitectura tradicional, debido a que los calores de condensación y congelamiento de los vapores de agua eran despreciables ante el calor transferido por el cerramiento.

No obstante la condensación de agua interna en los cerramientos exteriores producía suficientes patologías en la construcción lo que motivó una normativa para prevenir este riesgo. El modelo de evaluación propuesto nace ante la necesidad de analizar los procesos de intercambio de calor y masa en los cerramientos de aquellos edificios que al perseguir un ahorro energético importante, deben poseer una fuerte aislación térmica.

En estos edificios el calor de condensación es comparable al transmitido al exterior, situación que se agrava a medida que se consideran climas más fríos, donde la aislación es más importante.

En el modelo se considera que la transferencia de calor y masa se realiza en un sola dirección (interior - exterior), configurando un sistema plano unidireccional.

Si en alguna situación el vapor transferido se encuentra con su temperatura de saturación, condensará, entregando el calor correspondiente.

Esa situación genera que el calor de condensación será mayor, cuando mayor sea el tiempo transcurrido, pues el flujo de vapor permanecerá constante, al ser regido por la permeabilidad y el gradiente de presiones. Este calor a su vez altera el gradiente de temperatura y mayor será ésta cuanto menor sea el calor transferido desde el interior al exterior, situación que se manifiesta notablemente en los muros aislados. Si el condensado llegase a la temperatura de congelamiento y si la cantidad condensada fuera total habrían riesgos de ruptura, por esta razón es necesario incluir en el análisis la higroscopicidad del material.

Esta característica lleva a considerar el análisis en forma no estacionaria y al mismo tiempo, otro tipo de propiedades térmicas y de transferencia de masa de los materiales de construcción ante su humectación, así como la evolución de la temperatura externa.

Si el fenómeno de la condensación es considerado estacionariamente empleando para el análisis los valores extremos de temperatura interior y exterior y las presiones de vapor de agua tanto interior como exterior. Para encontrar los gradientes internos de ambos parámetros sólo es necesario conocer la conductividad térmica [λ] y la permeabilidad al vapor de agua [π] de cada material. De no existir condensación de agua tampoco habrá riesgo de congelamiento .

En el análisis actual este régimen serviría para una determinación rápida de la existencia o no de condensación, por simple verificación del fenómeno al tener el vapor pasante una presión igual a la de saturación para la temperatura en el mismo sitio. El gradiente de temperaturas en las distintas capas del cerramiento de espesor e y de conductividad térmica λ está gobernado por el calor pasante en función de las temperaturas t_w interior y exterior.

$$q = (t_{w1} - t_{wn}) / (e_1 / \lambda_1 + \dots + e_n / \lambda_n) \quad [\text{watts}]$$

Un dato importante para el posterior análisis es el gasto o caudal másico del vapor el que en principio puede considerarse constante al ser muy poco variables en el día las presiones p_v que lo motivan. Las permeabilidades al vapor de agua π de los materiales secos tampoco varía.

$$G = (p_{v1} - p_{vn}) / (e_1 / \pi_1 + \dots + e_n / \pi_n) \quad [\text{kg/s}]$$

Cabe hacer notar que este gasto permanecerá constante aún cuando haya condensación, pues la presión de vapor en el punto donde ocurra será la misma que si no ocurriera. Sólo habrá alteraciones en la presión de vapor cuando la cantidad de condensado sea tal que higroscópicamente sature al material, en ese caso se debe considerar que el mismo forma una barrera por la alta presión capilar frente a la del vapor. Esta última se elevará hasta llegar a la interior, produciendo nuevos puntos de condensación intersticial. En el caso de haber condensación, deberá cambiarse el análisis de estacionario a transitorio,

comenzando por la situación mas alejada a la condensación, es decir temperatura exterior máxima. Esto se debe a que aún cuando no hay condensación el análisis transitorio debe efectuarse para conocer la temperatura de cada elemento del cerramiento. Cuando la condensación aparece, normalmente diferirá de la situación extrema del análisis estacionario y el calor generado va alterando la temperatura de cada elemento del cerramiento.

En este análisis, además de conocer los parámetros antes mencionados habrá que determinar otros que hacen a la evaluación transitoria, como ser : calor específico c , densidad ρ , conductividad húmeda λ_h , velocidad higroscópica v , y calor generado q_c .

La solución analítica de las ecuaciones diferenciales para el presente caso reviste cierta complejidad dado que se trata de capas de diferentes materiales, con propiedades y espesores particulares y condiciones de borde cambiantes en el tiempo siguiendo a la temperatura ambiente. Por esta razón se ve la conveniencia de su solución numérica a través diferencias finitas [5], [7] componiendo un sistema unidireccional perpendicular al cerramiento analizado.

Para hacer esto posible es necesario dividir la sección del cerramiento en volúmenes elementales con una separación $\delta=1\text{mm}$ entre sí. Según las dimensiones del cerramiento serán necesarios un número apropiado de los mismos. Los intervalos de tiempo $\tau=60\text{ s}$ en que se realiza el análisis en principio deben ser pequeños, aunque estarían limitados por el tiempo de difusión capilar del condensado en el volumen elemental.

En general tanto la separación de los volúmenes como el lapso de análisis están limitados en esta forma de solución por el tiempo adimensional de Fourier, debiendo ser

$$\frac{a\tau}{\delta^2} = Fo \leq \frac{1}{2} \quad \text{donde} \quad a = \frac{\lambda}{c\rho} \text{ es la difusividad}$$

térmica del volumen elemental.

Así en el volumen elemental V_n el balance de calor estará dado por la expresión

$$q_{\text{cond}} + q_{n-1,n} + q_{n+1,n} = \frac{c_n \rho_n V_n}{\tau} (t'_n - t_n)$$

donde

$q_{\text{cond}} = GH_c \tau = m c_n t_c$ - es el calor producido por la condensación del vapor de agua si esta ocurre, es decir, si el vapor transferido se encuentra con su temperatura de saturación.

G - es el caudal másico del vapor.

H_c - es el calor de condensación del vapor de agua.

c_n -es el calor específico del volumen elemental n .

t_c - es el incremento de la temperatura a causa de la condensación.

Desarrollando y despejando la temperatura al final del lapso t'_n resulta

$$t'_n = Fo \left[t_{n-1} + t_{n+1} + t_n \left(\frac{1}{Fo} - 2 \right) \right] + t_c$$

Es de hacer notar que luego de que en algún volumen elemental se produzca condensación la difusividad térmica variará y consecuentemente con el número adimensional Fo , provocada por el contenido de agua en el material. Esta variación se debe a que la conductividad térmica seca λ pasa a ser húmeda λ_h , el calor específico seco c pasa a ser $c+c_a$ es decir la suma del primero más el correspondiente al agua condensada y la densidad aparente seca ρ pasa a ser una densidad ρ_h considerando la cantidad de agua condensada en el volumen elemental.

Si la temperatura t' del volumen elemental llegase a la de congelamiento del agua condensada aparece el riesgo de congelamiento. Si debido al análisis de higroscopicidad del material se encuentra que la cantidad condensada fuera total habría riesgo de ruptura del material.

Las condiciones de borde están fijadas interiormente por la temperatura inferior de bienestar, la que se mantendrá fija en $18,5^\circ\text{C}$ y exteriormente por la variación de la temperatura ambiente correspondiente al día más frío registrado. La condición de umbral [7] esta definida por el gradiente interno, brindado por una evaluación estacionaria para el momento más cálido de la temperatura ambiente. Como los datos meteorológicos no contemplan estas variaciones térmicas, se emplea la modelización del comportamiento de la temperatura ambiente [8].

ALGUNOS RESULTADOS NOTORIOS

En los gráficos de las figuras 2 y 3 se muestran dos casos en los que se aplicó el modelo con los datos medidos según las técnicas descriptas en [9], en el momento de peor situación.

En el primero se muestra una pared de ladrillo común con una cámara de aire, sistema constructivo muy común en la zona. El fenómeno ocurre de la siguiente manera: La temperatura exterior va bajando a partir del atardecer, durante las primeras horas de la noche la condensación del vapor de agua comienza desde la cara exterior, su calor es eliminado hacia esta cara que está más fría con rapidez ya que la conductividad aumenta. Mientras subsiste la condensación de vapor en el ladrillo exterior el gradiente de sus presiones no se modifica en la zona no condensada. Cuando la condensación pasa a la cámara de aire se produce un efecto convectivo y fenómenos de evaporación-condensación que vuelven a la cámara muy conductora. La pared exterior rápidamente se satura de agua y su temperatura sigue prácticamente a la exterior.

En el segundo caso se muestra un sistema similar pero con la diferencia que en lugar de cámara de aire se coloca poliestireno expandido, ocurriendo el fenómeno de la siguiente manera. La condensación comienza como en el caso anterior desde la cara externa de la pared, siendo su calor también eliminado rápidamente. Mientras la condensación está en el ladrillo exterior, el gradiente de presiones de vapor en la zona no condensada se mantiene inalterable. Cuando la zona de condensación está en el límite entre este ladrillo exterior y el poliestireno expandido, el agua condensada va al primero en parte y otra parte forma una película en la parte exterior del segundo dada su nula higroscopicidad. Como consecuencia de ésta, el gradiente de presiones de vapor dentro del poliestireno aumenta eliminando la posibilidad de condensación de más agua. Las propiedades aislantes del mismo se conservan, el agua existente en el ladrillo exterior no llega a su saturación con lo que si bien el congelamiento de la misma existirá no será causal de roturas.

Fig. 2. Muro con cámara de aire.

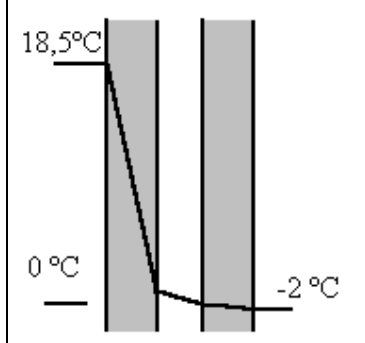
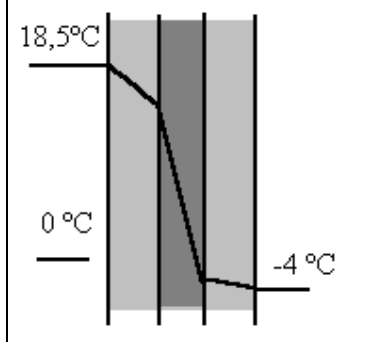


Fig.3. Muro con poliestireno.



CONCLUSIONES.

Dado que en las zonas delimitadas el registro de temperaturas mínimas se encuentra muy por debajo del punto de congelamiento, se concluye que toda la región del Comahue se constituye en zona de riesgo de roturas de material por congelamiento. La aplicación de la presente metodología previene los riesgos de situaciones comprometidas.

REFERENCIAS.

- [1] Fuerza Aérea Argentina, Servicio Meteorológico Nacional. Estadísticas Meteorológicas, Climatológicas y Pluviométricas., Buenos Aires, Años 1921/50, 1928/34, 1951/80, 1992.
- [2] Lettau, H; Davidson, B. Exploring the atmosphere's. Vol I. Pergamon Press Inc. Gran Bretaña. 1953.
- [3] Aeroterra S.A, INTA, Fundación ArgenINTA. Atlas de suelos de la República Argentina. Sistema de información geográfica. Argentina. ISBN 987-95542-0-5. Buenos Aires 1995
- [4] Guerrero, J. L., Informe Final del Programa Metodica de Diseño Energético para Viviendas., C.E.V.Eq.U, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, 1993.
- [5] Isachenko, V. P., Osipova, V. A. y Sukomel A. S. - Transmisión del calor. Marcombo S.A. De Boixareu Editores. Barcelona, 1973. ISBN 84-267-0239-2. 566 pp.
- [6] Calefacción y Ventilación. Acondicionamiento de Instalaciones Sanitarias., Rumor, C. y Stohmenger, G., Editorial Científico Médica ULRICO HOELPI. Milán 1972. 480 p.
- [7] O'Callaghan P.W. - Building for energy conservation - Pergamon Press - Oxford , England , 1978.
- [8] Guerrero, J. L. y otros. Modelo para aproximar la marcha de la temperatura ambiente. Actas de la XII Reunión de Trabajo de la A. S. A. D. E. S.. Buenos Aires. Noviembre de 1987.
- [9] Tramaglia, J. A., Polito, E. D. A. y Guerrero, J. L. Determinación de parámetros de transporte de calor y masa en materiales constructivos. Presentado a ASADES'98. Salta, noviembre de 1998. Publicado en AVANCES EN ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE. V2 N°1 pág 02.45. ISSN 0329-5184.