

Importancia de la capacidad térmica en la resistencia al paso del calor en los cerramientos.

M. Domínguez, C. García, F. González, José M^a Arias
Instituto del Frío.



Esperamos que el ejemplo que nos brindan los girasoles de aprovechamiento de la captación solar nos induzca a ello en la Arquitectura.

Resumen

Se describe una nueva magnitud que hemos denominado **“resistencia térmica aparente”**, que tiene gran ventaja en el estudio térmico de los cerramientos. Aplicándose a diversos tipos de muros, en los cuales se ha ido variando la resistencia y la capacidad térmica.

Se llega a la conclusión que en las condiciones reales a que están sometidos los cerramientos, régimen periódico de temperatura en su cara externa, su comportamiento térmico depende grandemente de la capacidad térmica de los mismos. Debiendo emplearse mejor el nuevo concepto, que el hasta ahora empleado de resistencia térmica, que no depende de la frecuencia de la onda térmica, ni de la capacidad térmica de dichos cerramientos.

1.- Introducción

En la climatización y en la calefacción de los edificios, se consumen cantidades muy grandes de energía, la CE estima que en Europa se llega al 40 % de la total, por ello la importancia económica y medio ambiental es muy grande (1). Se considera que la energía que menos contamina es la que no se genera, por lo cual se deben tomar medidas para que ello se cumpla. Es lógico pensar que se disminuirá la contaminación mejorando el aislamiento y aprovechando mejor la energía en la edificación. La energía solar es muy importante y puede contribuir en la construcción grandemente, pero hay otros factores tanto o más importantes que no se subvencionan ni se tienen presente. Se pretende prestar atención a estos factores, así como contribuir a un mejor conocimiento de los mecanismos de transmisión de calor en los cerramientos de las edificaciones, para contribuir al deseado ahorro energético.

El concepto, que en su día introdujimos de “ **Impedancia térmica**”, tiene ventajas en el estudio de la transmisión de calor en régimen periódico, facilitando el desarrollo de nuevos sistemas constructivo (2) al (4). Dicha magnitud se relacionó, en el caso de medios homogéneos con la resistencia , capacidad y frecuencia de la onda senoidal y en el caso de medios heterogéneos se desarrollaron programas para su cálculo, empleando la analogía eléctrica resuelta con ordenador (5). Se montaron experiencias sobre muros reales sometiéndoles a ondas térmicas de distinta frecuencia en una de sus caras que permitieron comprobar los mencionados estudios teóricos.

De los estudios realizados se ha observado que se pueden desfasar las ondas térmicas y diseñar los cerramientos de las construcciones para poder filtrar las ondas que nos interesen . Se ha visto también que empleando acumuladores de cambio de fase junto con resistencias térmicas adecuadas en los muros , se puede retardar la onda anual , una y hasta dos estaciones (6) al (9), reduciendo las cargas térmicas grandemente y llegándose a no necesitar en muchas edificaciones los sistemas de climatización.

Últimamente se ha visto que es preferible introducir en lugar de la resistencia térmica y de la impedancia, un nuevo término, que hemos denominado “ **resistencia térmica aparente**”, cociente entre la diferencia de temperaturas medias entre el exterior e interior de un cerramiento , y el flujo de calor medio que entra o sale del interior del edificio (10) y (11).

$$R_{ta} = (T_{me} - T_{mi}) / F_{in}$$

El **objetivo** pretendido es llamar la atención sobre la conveniencia de usar este nuevo concepto que hemos definido como “**resistencia térmica aparente**” en los cálculos de transmisión de calor en la construcción y considerar la importancia de la capacidad térmica de los cerramientos.

El tema que se trata se ha ido estudiando desde hace muchos años , ya en el año 1985 hicimos un planteamiento teórico (12).

En el trabajo (13) se indica que en Italia piensan incorporar la inercia en la normativa de la construcción con la corrección siguiente

$$U_c = C_m \times U$$

es decir, multiplicar al coeficiente de transmisión térmica **U** , por un factor corrector , para pasar al coeficiente real o correspondiente a régimen periódico **U_c**

Siendo los valores de la constante **C_m** los indicados en la tabla n° 1, en función de las zonas climáticas **A** a la **F** y los valores **M**, masa por unidad de área frontal (Kg/m²)

Tabla n° 1 (Valores de C_m)

M / Zona	50	100	200	300	400
A,B,C	1	0.95	0.86	0.80	0.76
D,E,F	1	0.96	0.90	0.87	0.85

También introduce los factores **E** y **F** , respectivamente como relación entre las variaciones de temperatura externas e internas y entre la primera y el flujo de calor necesario para mantener constante la temperatura interior. Con el propósito de comparar estos conceptos con respecto a lo que proponemos, en el apartado 4 se comparan los resultados que hemos obtenido en los dos ejemplos que proponen, respetando los datos de los materiales que indican. Consideramos que no son las mejores para el estudio pero nos confirman el interés por el tema.

Se debe recordar que la capacidad térmica es el producto del calor específico c , por la masa M , es decir, que siendo d la densidad y e el espesor de un muro y s su área frontal, se puede determinar C mediante la ecuación

$$C = c \times M = c \times d \times e \times s$$

2.-Transmisión de calor en régimen periódico.

En los climas continentales las variaciones de temperatura a lo largo del año y hasta en un mismo día son muy grandes, variando de forma periódica. En el caso de transmisión de calor unidireccional, la ecuación de Fourier, para una variación periódica de temperatura, podría resolverse para cada frecuencia principal del desarrollo en serie y sumarse las funciones obtenidas (12). En el caso de una condición de contorno senoidal en una de las caras de un cerramiento, el flujo de calor que lo atraviesa, una vez alcanzado el régimen "periódico estacionario", es una función también senoidal de la misma frecuencia, pudiéndose relacionar con la temperatura a través de una magnitud que por analogía o similitud a la impedancia eléctrica en corriente alterna, podemos denominar **impedancia térmica** (5).

En todos los campos de la física se conoce que las ondas penetran en los diversos medios en función de su frecuencia y en la conducción térmica ocurre otro tanto. Las ondas térmicas de longitudes de onda muy cortas, al llegar a los cerramientos normales, éstos las amortiguan, no dejándolas pasar mientras que las muy largas pasan fácilmente. Se debe tener en cuenta que en la construcción el orden del retraso de la onda diaria es de 6 a 9 horas y sus amortiguamientos oscilan entre el 10 y el 20 %.

En el caso de la climatización, las cargas térmicas son muy variables en el tiempo, debido a las jornadas de trabajo, las grandes superficies acristaladas y la problemática de la iluminación y cada vez más al empleo generalizado de terminales de ordenadores. El empleo de las tarifas eléctricas diferenciadas a lo largo del día y hasta en las diversas época del año, hacer muy importante el estudio de la transmisión calor en régimen variable.

Recientemente hemos observado, al estudiar las entradas de calor en los edificios reales, que la primera aproximación de considerar el régimen estacionario conduce a valores mayores, por lo que consideramos preferible definir otra magnitud como es la **resistencia térmica aparente**.

En el esquema de la figura nº 1 se ha representado un cerramiento convencional, formado por los elementos siguientes: Ladrillo de medio pie macizo, aislante térmico de 4 cm, ladrillo hueco de 4 cm y un enfoscado de yeso de 1,5 cm. En la figura nº 2 se ha representado el símil eléctrico elemental de dicho muro, incorporando las resistencias de los coeficientes de película. Las dos fuentes de tensión extremas corresponden a las temperaturas ambientes, las resistencias eléctricas a las térmicas y los condensadores a las capacidades térmicas.

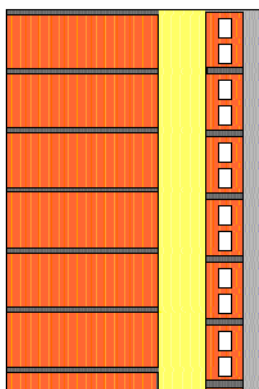


Fig. 1

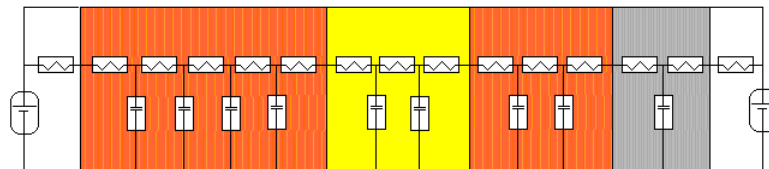


Fig. 2

Figura nº 1 Muro de inercia intermedia, formado por: ladrillo macizo de medio pie, cuatro centímetros de poliestireno expandido, rasilla y enfoscado de yeso.

Figura nº 2 Símil eléctrico del muro de la figura nº 1, las temperaturas ambientes se representan por fuentes de tensión, las resistencias térmicas por resistencias y las capacidades térmicas por condensadores.

Se aplica como condición de contorno una onda de temperatura de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ de valor medio y de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ de amplitud, con una variación senoidal de periodo 24 h en el exterior y $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ constante en el ambiente interior. En el símil eléctrico, después de transcurridos unos días, es decir, alcanzado el régimen "**periódico estacionario**", (el tiempo de respuesta de los cerramientos es del orden de 100 horas), se obtienen los valores de las temperaturas y los flujos de calor en cada nodo y en cada elemento.

En la figura nº 3 se han representado los valores de flujo térmico que salen del edificio hacia el muro junto a la variación de temperatura del exterior. El valor medio del flujo de calor es 5.0221 w/m^2 . Teniendo en cuenta que la resistencia térmica del cerramiento vale $1,833\text{ m}^2\text{ K/w}$, se tiene que $R_a = (23-10)/5.0221=2.589\text{ m}^2\text{ K/w}$, que dividida por 1.833 , nos da el factor de ganancia del régimen periódico con respecto al estacionario de 1.4124 . Es decir mejora un 41.24%

Figura nº 3 Una vez alcanzado el régimen periódico estacionario, variación del flujo de calor que desde el interior entra en el muro (gráfica inferior) y temperatura en el exterior en función del tiempo (gráfica superior). Cerramiento de la figura nº 1

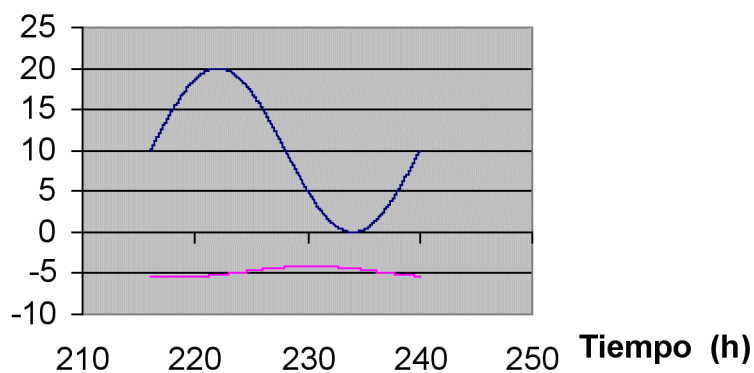


Figura nº 3

En otro cerramiento formado por un **muro de piedra de 30 cm** de espesor , de coeficiente de conductividad 1.5 w/mK , se obtienen valores de $R_a = 1.297\text{ m}^2\text{K/w}$; $R = 0.426\text{ m}^2\text{K/w}$ y $R_a/R = 3.0439$



Muro de piedra

Si tomamos un caso, un muro sin inercia, formado por aislamiento de 20 cm, se tiene la respuesta indicada en la figura nº 4 y los valores de $R = 6.892 \text{ m}^2\text{K/w}$; $R_a = 7.564 \text{ m}^2\text{K/w}$ y $R_a/R = 1.0975$. En éste caso se puede ver que el transitorio no es importante.

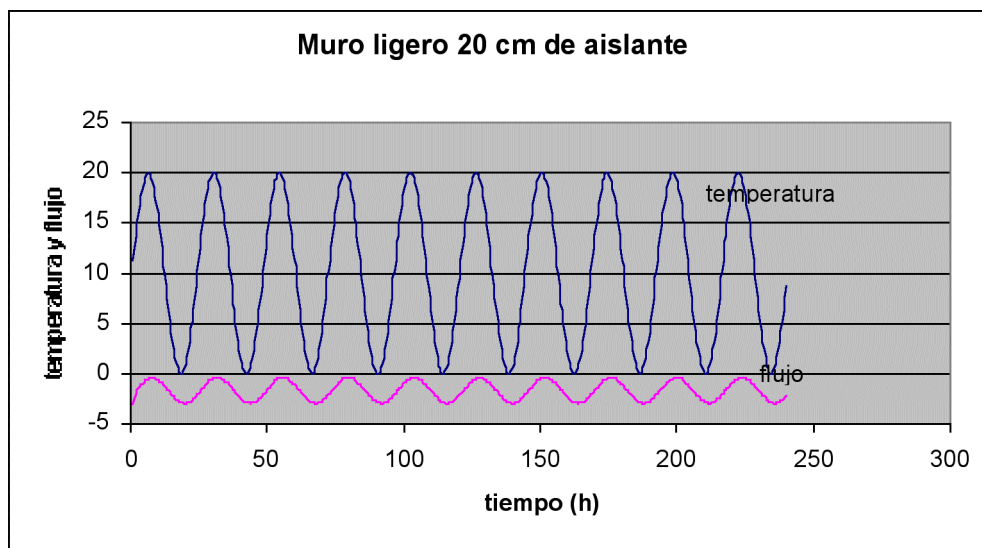


Figura nº 4 Variación del flujo de calor que desde el interior entra en el muro (la parte inferior) y temperatura en el exterior (en la superior), en función del tiempo. Cerramiento muy poco inerte, de 20 cm de aislante. El régimen estacionario periódico se alcanza muy rápidamente.

Figura nº 4

4.-Comparación en dos tipos de cerramientos de uso generalizado

En las tablas nº 2 y 3 se indican las características de dos tipos de cerramientos de uso generalizado en Italia de los cuales se dispone información en régimen variable de 24 h (13) . En la tabla nº 4, se resumen sus características térmicas. En las figuras nº 5 y 6 se han representado las curvas de temperatura exterior y de flujo obtenidas en la analogía eléctrica para los dos tipos de muros estudiados

Tabla nº 2

material	espesor cm	conductividad W/mK	Densidad Kg/m ³	Calor específico J/Kg.K
Enlucido exterior	1.5	0.9	1800	910
Termoarcilla	35	0.27	850	840
Enlucido interior	1.5	0.7	1400	1010

Tabla nº 3

material	espesor cm	conductividad W/mK	Densidad Kg/m ³	Calor específico J/Kg.K
Enlucido exterior	1.5	0.9	1800	910
Ladrillo hueco	12	0.32	600	840
Aislante	4	0.04	30	1600
Ladrillo hueco	12	0.32	600	840
Enlucido interior	1.5	0.7	1400	1010

12 cm ladrillo 4 cm aislante 12 cm ladrillo

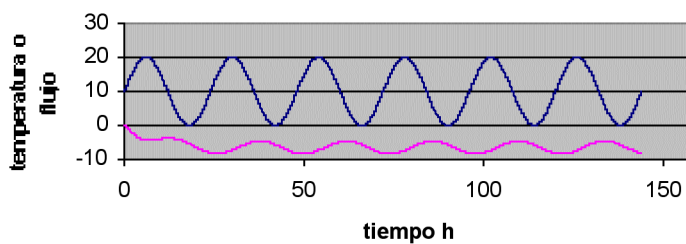


Figura nº 5

TERMOARCILLA

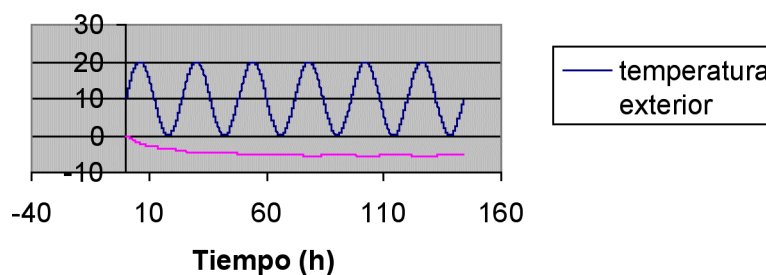


Figura nº 6

Tabla nº 4

Magnitud	Unidades	Muro Tabla nº 2	Muro Tabla nº 3
Peso unitario	Kg/m ²	345.5	193.2
Capacidad unitaria	KJ/m ² K	295.68	168.66
Resistencia térmica	m ² .K/W	1.33	1,79
Resistencia térmica total*	m ² .K/W	1.50	1.96
E Módulo	-	24.3	12.78
E Desfase	H	14.83	10.64
F Módulo	m ² .K/W	7.37	3.76
F Desfase	H	12.51	7.87

*Coeficientes superficiales interior y exterior respectivamente de valores de 8 y de 23 W/m²K

En la tabla nº 5 se recogen los valores que se han obtenido aplicando la analogía eléctrica resuelta con ordenador antes descrita

Tabla nº 5

Magnitud	Dimensiones	Muro tabla nº 2	Muro tabla nº 3
Temperatura Exterior*	°C	10+/-10°	10+/-10°
Temperatura Interior	°C	23	23
Flujo interior	W/m ²	5.401	6.542
Resistencia aparente	m ² .°C/W	2.407	1.987
Desfase	H	12.96	7.70
Factor de mejora		0.624	0.985

* seno de 10°C de amplitud de periodo 24 h y de temperatura media 10°C

5.-Discusión

Se puede observar en los tres ejemplos indicados en primer lugar, correspondientes a dos tipos de muro extremos, con inercia y sin ella, y uno intermedio típico del actual sistema constructivo, que al aumentar la capacidad térmica, es decir la inercia, los cerramientos se comportan mejor a las ondas térmicas de amplitud de un día, y que los valores de flujo de calor medios son menores a los que se podrían obtener en régimen estacionario. En los tres ejemplos ha disminuido el flujo de calor: en el ligero el 9.75 %, en el mediano el 41.24 % y en el pesado el 304.39 %. Esto concuerda en su tendencia con lo que se propone en la nueva normativa italiana. **El Código Técnico de la Edificación**, que está en proceso de elaboración, en su capítulo de aislamiento térmico debería tener esto en cuenta.

Se considera que conceptos sencillos de comprensión y de manejo, como el que ahora proponemos de **resistencia térmica aparente**, pueden facilitar la búsqueda de nuevos cerramientos y que programas de ordenador o ensayos de cerramientos en régimen periódico, pueden contribuir a importantes ahorros energéticos y al deseado no aumento del CO₂ causante del efecto invernadero.

En régimen periódico, los cerramientos parecen que se comportan como si reflejaran parte de la onda y dejaran pasar otra parte, siendo el porcentaje de transmisión, función de la frecuencia de la onda y de la frecuencia propia del cerramiento. Dado que la posición relativa de los elementos influye, el concepto de "frecuencia propia" no es sencillo de definir (tiene que estar relacionado con el producto de las resistencias por las capacidades térmicas, que tienen magnitudes de tiempo).

Los desfases obtenidos por analogía resuelta con ordenador concuerdan con los indicados en (13) para el factor F, en los dos ejemplos descritos. Es posible que esto sea genérico para cualquier tipo de muro.

Se puede ver en estos dos ejemplos de los cuales se tiene información del comportamiento térmico en régimen periódico con ondas de periodo un día, que la mejora varía mucho en función de la resistencia, de la capacidad y hasta de su colocación relativa. Es pues difícil querer simplificar las correcciones en función de la masa y hasta de la capacidad. Pero debe quedar claro que mejoran en todos los cerramientos su comportamiento, así como cuando las frecuencias de las ondas disminuyen.

También se debe tener en cuenta que en la edificación, las suposiciones de elementos yuxtapuestos como los estudiados se dan junto a otros que no lo son, como puentes etc., que complican grandemente el análisis térmico. En la realidad se juntan a las inercias térmicas de forjados interiores y enseres, lo que hace complejísimo éste tipo de estudios.

Los factores **E** y **F** que han introducido en (13), para el estudio de los cerramientos sometidos a ondas de periodo 24 horas se consideran poco prácticos, pero si demostrativos de que la inercia térmica tiene gran influencia en la búsqueda de un mejor comportamiento de los cerramientos y que la utilización de las normas que emplean únicamente el régimen estacionario no es adecuado.

El proponer correcciones simplificativas, en función sólo de la masa de los cerramientos, se considera poco adecuado, aunque es una primera aproximación al problema, el ajustarla en función de la capacidad térmica. El producto de la resistencia por la capacidad de los cerramientos es sin duda un mejor factor de corrección. Es en éste campo en donde estamos investigando y hemos visto que el empleo de sustancias de cambio de fase, es decir, de una capacidad térmica muy grande, pueden retardar meses la onda anual y prácticamente no dejar pasar las ondas diarias.

Los estudios térmicos de simulación de edificios completos, teniendo en cuenta las inercias de todos los elementos, las intermitencias de las fuentes térmicas y sus posibles adelantos en el tiempo, serán los que puedan permitir tomar decisiones energéticas importantes y conducir a drásticos ahorros energéticos, por ello lo que se avance en este campo e introduzca en los nuevos códigos de la edificación será interesante.

6.-Conclusión

Se considera que puede ahorrarse gran cantidad de energía en la edificación, sin pérdida del deseado grado de confort, buscando nuevos cerramientos en los que además de su elevada resistencia térmica, se neutralicen las variaciones periódicas de frecuencia 24 horas.

Es importante para dicha búsqueda el nuevo concepto de **resistencia térmica aparente**, cociente entre los saltos medios de temperatura y el flujo medio de calor que sale o entra en el edificio.

Los resultados de los desarrollos teóricos y de su comprobación experimental deberían recogerse en los nuevos códigos de la edificación.

7.-Bibliografía

Directiva 2002/91CE del Parlamento y del Consejo Europeo de 16 de diciembre de 2002, relativa a la eficiencia energética de los edificios.

(2) **M. Domínguez ; D. García** . La impedancia térmica de los cerramientos. Nuevo concepto que puede facilitar de forma considerable el ahorro de energía. Nueva Arquitectura nº 10. Octubre 1999. pag 69,84.

(3) **M. Domínguez; M^a V^a Barragán ; P. López; F. González; S. Santamaría**. Ventajas del empleo de la "Impedancia Térmica" en la búsqueda de nuevos cerramientos. XXVIII Reunión Bienal de la RSEF. Sevilla. Sep 2001. **VI**. 260,261.

(4) **M. Domínguez; O. Herrera; I. Álvarez**. Instituto del Frío. Resolución de la ecuación de transmisión de calor en muros multicapa, aplicando la impedancia térmica.1985. 1,15.

(5) **V. M. Barragán.; R. Fuentes ; M. Domínguez.; J. M. Arias**. Testing the computer assisted solution of the electrical analogy in the temperature distribution on a square sheet quit no homogeneous boundary conditions. Anales de física.2000. **Vol 95**,139-146.

(6) **M. Domínguez**. Fachadas ligeras con acumuladores de cambio de fase. Pendiente de publicación junio 2003.

(7) **M. Domínguez; J. M^a. Arias; R. Díaz; J. Velasco**. Incorporación de los acumuladores de cambio de fase en la construcción. Conarquitectura nº 5. Junio. 2002 .65,72

(8) **M. Domínguez; C. García; J. M^a Arias; J. Culubret**. Simulación de un muro de tipo Trombe con cambio de fase. Montajes e Instalaciones. **Nº 337**. Marzo 2000. Págs 69-74

(9) **L. E. Gómez; M. Domínguez**. Proyecto de edificios escolares bioclimáticos en Colombia. El Instalador. Esp. Julio-Agosto nº 388 .2002 .64,74.

(10) **M. Domínguez; F. González; J.M^a Arías** . Transmisión de calor en régimen periódico en cerramientos. "Resistencia térmica aparente" XXIX Reunión Bienal de la Real Sociedad de Física. Julio. Vol II. 869,870. 2003.

(11) **M. Domínguez; F. González; J.M^a Arías**. Resistencia térmica aparente en cerramientos. (Pendiente De publicación en el Instalador)

(12) **I. Álvarez;; O. Herrera.; M. Domínguez**. Instituto del Frío. Resolución de la ecuación de transmisión de calor en muros multicapa, mediante el método de redes.1985. 1,33.

(13) **L. Bari** Poroton: Isolamento termico ed inerzia termica". Poroton News. Lulio 2003 n,6 p. <http://www.poroton.it/user/articoli/n6/inerzia.asp?SRG=MAIL&NS=N6>