

# IMPORTANCIA DE LA INERCIA TÉRMICA DE LOS CERRAMIENTOS

Autores: M. Domínguez . Instituto del Frío. CSIC. <http://www.if.csic.es/>  
S. Santamaría. CIDEMCO. <http://www.cidemco.es/>

## Resumen

Se analiza la importancia que tiene la inercia térmica en los cerramientos de las construcciones, partiendo del concepto de "Impedancia térmica", magnitud que se ha visto permite cuantificar e interpretar el comportamiento térmico de éstos elementos cuando están sometidos a ondas térmicas periódicas. Se comparan los resultados teóricos con los obtenidos experimentalmente, para diversos muros, los cuales, han sido sometidos, en una de sus caras, a variaciones de temperatura senoidales de un día de periodo.

Por último se establecerá la importancia del producto, resistencia por capacidad y por frecuencia, en el comportamiento real de los cerramientos y cómo, para una variación de temperatura periódica, se puede desfasar y amortiguar el flujo de calor que lo atraviesa de forma conveniente, actuando sobre el poder aislante o resistencia, y/o sobre la inercia térmica, que depende del calor específico, de la densidad y del volumen del cerramiento.

## INTRODUCCIÓN

Si nos fijamos en las diversas construcciones y miramos su evolución a lo largo del tiempo, nos encontramos que ha habido una selección natural, que se han ido adaptando a la cultura y al clima de las zonas, aprovechando los materiales autóctonos y los conocimientos tecnológicos disponibles. Este proceso continúa, y lo único innovador ha sido la no limitación de los materiales autóctonos, por lo que se dispone de libertad de elección de los mismos, al influir menos el coste del transporte.

En los países más desarrollados están apareciendo otros condicionantes, tales como: económicos, medioambientales, sociológicos y en definitiva normativos. Si estos condicionantes no se tienen presentes en el momento de proyectar un edificio, puede llevar a construcciones inadecuadas; para evitar estos errores y dar con una posible solución, analizamos y reflexionamos sobre estos temas. El **objeto** pretendido es llamar la atención sobre el comportamiento térmico de los cerramientos en condiciones reales, es decir, cuando están sometidos a variaciones periódicas de temperatura, y poder mejorar su comportamiento térmico, para de este modo contribuir a paliar los problemas medioambientales y energéticos.

Hay otros problemas, también importantes, en los cerramientos aparte de los puramente térmicos, como son: los de seguridad ignífuga, los movimientos sísmicos, la reconversión de los materiales al final de su vida útil (ciclo de vida), su comportamiento acústico, etc, que cobran, por momento, gran importancia y que no deben de olvidarse; aunque se reconozca su importancia, en este estudio no se les va a tener presente.

Se ha visto, en estos últimos años que, el comportamiento de los cerramientos y en general de los componentes de la construcción y enseres de los edificios, tienen un doble papel desde el punto de vista térmico; uno puramente resistivo y otro, al que se le da mucha menor importancia, el capacitivo o inercial. El resistivo depende directamente del espesor e inversamente del coeficiente de conductividad térmica, y el capacitivo es directamente proporcional, al calor específico, al espesor y a la densidad. **Por lo tanto, los muros de gran espesor, como se construían antiguamente, conducen a resistencias y capacidades elevadas, dejando pasar muy mal las ondas periódicas de frecuencias de uno o varios días.** Para comprender lo expuesto téngase en cuenta la reducida variación de temperatura que se observa en las bodegas enterradas, minas o en las catedrales.



En todos los campos de la física ocurre, con respecto a las ondas periódicas o senoidales, lo indicado. Las ondas largas atraviesan fácilmente la materia, mientras que las cortas son amortiguadas o eliminadas. No es extraño pues, que en el comportamiento térmico de los cerramientos, ante las ondas térmicas periódicas, influyan estos tres factores: el resistivo, el capacitivo y la propia frecuencia.

En el trabajo (1), se vio que esa dependencia, para el caso de muros homogéneos, tenían las expresiones siguientes:

$$[Z] = R \sqrt{[1 - 2/3(\omega RC/9)^2]^2 + [1/12(19(\omega RC/9) - (\omega RC/9)^3)]^2}$$

$$= \text{Arctg} \left[ \frac{1/3(19(\omega RC/9) - (\omega RC/9)^3)}{4 - 8/3(\omega RC/9)^2} \right]$$

Donde  $[Z]$  es el módulo de la impedancia térmica y su fase,  $R$  la resistencia térmica,  $C$  la capacidad térmica y la frecuencia de la onda térmica a la que se somete el muro.

Y que, en cualquier otro tipo de muro multicapa, se podrían encontrar relaciones equivalentes, en función de los valores  $R$  y  $C$  de sus componentes. Es de considerar, que en casos de cerramientos compuestos diferentes a estos, las expresiones serán más o menos complejas, en función de estos, pero que existirán relaciones con el comportamiento de los mismos factores de sus elementos y del equivalente de los cerramientos. En donde el estudio teórico sea muy complicado, por simulación o por experimentación se podrían encontrar las funciones respuesta de los cerramientos, a las perturbaciones a que se les someta.

Se ha visto que los tiempos de respuesta de los cerramientos pueden variar desde uno a cuatro meses, lo cual complica muchos los sistemas de simulación dinámica de los edificios. El concepto de IMPEDANCIA TÉRMICA que hemos introducido y venimos potenciando para este tipo de estudios, consideramos que tiene muchas ventajas y presenta grandes posibilidades, (2). El módulo de dicha magnitud corresponde a la resistencia real y el ángulo, al desfase de la onda de una determinada frecuencia (el paralelismo con la magnitud analógica de la corriente alterna es total).

Se pensó, a raíz de la crisis del año 1973, en la posibilidad de, desfasar la onda térmica anual unos meses para paliar el rigor del clima, mediante el empleo de bancos de piedras o depósitos de agua, construyéndose algunos edificios singulares. Los resultados fueron buenos desde el punto de vista térmico, pero no tanto desde el económico. Actualmente se piensa que, con acumuladores de calor de cambio de fase, que permiten reducir los volúmenes de acumulación enormemente, se podría llegar a soluciones constructivas interesantes, productos que se podría introducirlos en los propios cerramientos

En el caso de ondas de periodo de uno o varios días, el desfase idóneo es el de doce horas, que permite que no coincidan los aportes solares con las entradas por cerramientos opacos. A este desfase se han aproximado los cerramientos más generalizados, de manera consciente o inconsciente. Se sabe, a modo orientativo, que por cada pulgada (2.5 cm) se retrasa una hora la onda térmica diaria.

Por otra parte, en las construcciones de los centros de negocios de las grandes ciudades, en los que el suelo es muy caro, al ganar unos metros cuadrados de superficie, por disminución de los espesores de los cerramientos, se rentabiliza la construcción. En grandes edificios de oficinas, hoteles, etc. ha proliferado el uso del muro cortina, porque reduce el espesor y da una sensación agradable, pero llevan a consumos energéticos muy elevados y por ello a problemas medioambientales. En estos nuevos edificios, en las zonas céntricas de los núcleos urbanos, no deben descartarse: los súper aislantes, los captadores térmicos y hasta las células fotovoltaicas.

Hay pues un campo importante de investigación y de innovación al que los jóvenes técnicos, junto con los científicos, deben dedicar un gran esfuerzo y en donde los responsables de la programación de la investigación y del desarrollo deben apoyar.

Es de esperar y desear, que los nuevos materiales y las técnicas de su aplicación, resuelvan los problemas planteados, y que después de un periodo natural de selección y optimización técnico-económica para desarrollarse, terminen por imponerse de forma masiva o generalizada.

Es curioso, como las tendencias en construcción van cambiando y como, de unas soluciones generalizadas, se pasa en poco tiempo a otras. Esto demuestra que es un sector tradicional pero cambiante, movido principalmente por motivos económicos. Hace 30 años en España no se aislaba y ahora no se hace en la mayoría de los países del tercer mundo.

Sabemos, que hablar en los países en desarrollo de aprovechar la inercia térmica y procurar ahorrar energía en la construcción, el hacer edificios bioclimáticos y hasta, el pensar en el empleo de materiales aislantes, es una temeridad, pero creemos, que los problemas medioambientales que estamos padeciendo lo requieren, y que a poco que se consiga, merece la pena este esfuerzo.

## PLANTEAMIENTO TEÓRICO

Hay mucha gente técnica, que una vez terminada su carrera, no quieren ni oír hablar de planteamientos teóricos o matemáticos, sobre todo, si han pasado muchos años desde su terminación, sólo quieren oír conceptos y cosas sencillas y claras, y una vez aceptadas las ideas, pueden pensar en ecuaciones y recetas prácticas, y si estas son sencillas mejor, que las muy complejas. Los programas de ordenador los usamos, pero si nos obligan a tomar muchas decisiones, y desconocemos ciertos términos, nos ponen muy nerviosos y es posible que buenos programas nos conduzcan a malos resultados.

Veamos pues los conceptos que en éste trabajo y en la bibliografía referida en él hemos introducido. El producto de magnitudes importantes, es el ya referido:

$$\cdot R \cdot C$$

siendo  $\omega$  la frecuencia de la onda, expresada en rad/s,

R la resistencia térmica, cociente entre el espesor, expresado en m y el coeficiente de conductividad, expresado en W/mK: ( $m^2 K/W$ ),

y C la capacidad térmica, producto del calor específico (J/kg.K), por la densidad ( $Kg/m^3$ ), por el espesor en m: ( $J/ m^2 K$ )

Como se puede observar, el producto resistencia por capacidad, tiene dimensiones de tiempo y el producto por la frecuencia es una cifra adimensional.

Se puede ver también, que el desfase es función de dicho producto, es decir:

$$\text{Desfase} = f_1 (\omega \cdot R \cdot C)$$

Y que el amortiguamiento, o el módulo de la Impedancia térmica [Z], es también función de dicho producto y de la resistencia R, es decir que:

$$[Z] = R \cdot f_2 (\omega \cdot R \cdot C)$$

En la figura nº 1, se ha representado la variación del desfase en función de dicho producto, y en la nº 2 se ha representado la variación de [Z] en función de R y de dicho producto, empleando las ecuaciones encontradas y publicadas en (1) obtenidas para el caso de materiales o muros homogéneos.

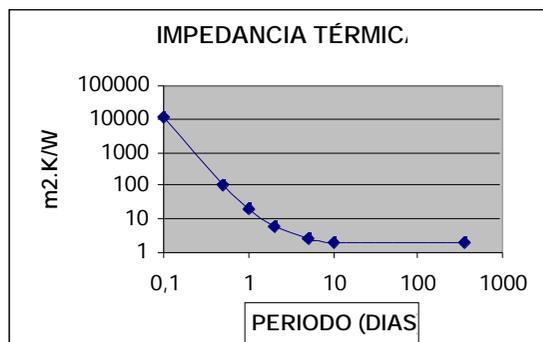


Figura nº 1

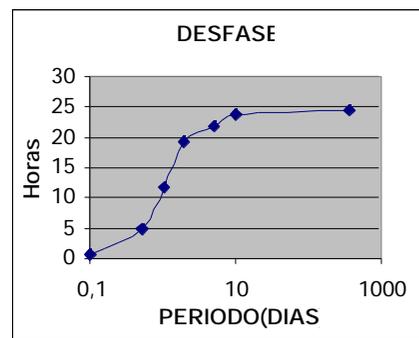


Figura nº 2

Como puede verse en estas figuras, el desfase varía mucho menos que la impedancia. Con los acumuladores y el amortiguamiento, puede verse disminuido a valores muy pequeños, prácticamente despreciables, con valores muy grandes de  $R$ , debido a los materiales muy aislantes, y con capacidades muy grandes, por los cerramientos de espesores elevados, o por el aprovechamiento de calores latentes cuando las ondas son muy largas. En la ecuación siguiente, se puede observar como varía el producto  $R \cdot C$  con el cuadrado del espesor  $x$ , el calor específico  $c$ , la densidad  $\rho$  y con el coeficiente de conductividad  $\lambda$ .

$$(x^2 \cdot c \cdot \rho) / \lambda$$

En los materiales de construcción el calor específico es muy poco variable, en la tabla nº 1 se indican valores aproximados de ellas para los aislantes y en la nº 2 para los materiales de mayor empleo en la construcción.

Tabla nº 1

Material	Clave	Densidad ( $\rho$ )	Coef. Conductividad ( $\lambda$ )	Calor específico ( $c$ )	$\rho \cdot c / \lambda$
		Kg/m <sup>3</sup>	W/m.K	J/Kg.K	kW/m <sup>2</sup>
<b>Poliestireno expandido</b>	<b>a</b>	<b>15</b>	<b>0.032</b>	<b>1450</b>	<b>679.7</b>
<b>Poliestireno extrusionado</b>	<b>b</b>	<b>30</b>	<b>0.031</b>	<b>1450</b>	<b>1403.2</b>
<b>Poliuretano</b>	<b>c</b>	<b>33</b>	<b>0.026</b>	<b>1400</b>	<b>1776.9</b>
<b>Poliuretano</b>	<b>d</b>	<b>40</b>	<b>0.023</b>	<b>1400</b>	<b>2434.8</b>
<b>Lana mineral</b>	<b>e</b>	<b>50</b>	<b>0.042</b>	<b>1000</b>	<b>595.2</b>
<b>Lana de vidrio</b>	<b>f</b>	<b>25</b>	<b>0.042</b>	<b>1030</b>	<b>613.1</b>
<b>Vidrio celular</b>	<b>g</b>	<b>160</b>	<b>0.041</b>	<b>1000</b>	<b>3990.0</b>
<b>Corcho</b>	<b>h</b>	<b>150</b>	<b>0.042</b>	<b>1500</b>	<b>5357.1</b>
<b>Cámara aire</b>	<b>i</b>	<b>1.3</b>	<b>0.9</b>	<b>1003</b>	<b>1.5</b>

**Tabla nº 2**

<b>Material</b>	<b>Clave</b>	<b>Densidad ( ρ )</b>	<b>Coef. Conductividad ( λ )</b>	<b>Calor específico ( c )</b>	<b>ρ.c/λ</b>
		<b>Kg/m<sup>3</sup></b>	<b>W/m.K</b>	<b>J/Kg.K</b>	<b>kW/m<sup>2</sup></b>
<b>Hormigón</b>	<b>A</b>	<b>2200</b>	<b>1.65</b>	<b>1000</b>	<b>1333.3</b>
<b>Enfoscado cemento</b>	<b>B</b>	<b>1600</b>	<b>0.9</b>	<b>836</b>	<b>1486.2</b>
<b>Enfoscado yeso</b>	<b>C</b>	<b>1500</b>	<b>0.56</b>	<b>1000</b>	<b>2678.6</b>
<b>Ladrillo macizo</b>	<b>D</b>	<b>1800</b>	<b>0.87</b>	<b>836</b>	<b>1729.7</b>
<b>Ladrillo hueco</b>	<b>E</b>	<b>1200</b>	<b>0.49</b>	<b>836</b>	<b>2047.3</b>
<b>Madera</b>	<b>F</b>	<b>700</b>	<b>0.17</b>	<b>1600</b>	<b>6588.2</b>
<b>Madera</b>	<b>G</b>	<b>800</b>	<b>0.14</b>	<b>1600</b>	<b>9142.9</b>
<b>Vidrio</b>	<b>H</b>	<b>2500</b>	<b>0.95</b>	<b>750</b>	<b>1973.7</b>
<b>Aluminio</b>	<b>I</b>	<b>2700</b>	<b>204</b>	<b>880</b>	<b>11.6</b>
<b>Acero</b>	<b>J</b>	<b>7500</b>	<b>50</b>	<b>450</b>	<b>67.5</b>
<b>Piedra</b>	<b>K</b>	<b>2600</b>	<b>2.3</b>	<b>1000</b>	<b>1130.4</b>
<b>Bloque de hormigón</b>	<b>L</b>	<b>1400</b>	<b>0.56</b>	<b>1000</b>	<b>2500</b>

En la tabla nº 3 se indican, los componentes de diversos muros típicos de la construcción, y en la tabla nº 4, los valores **R** y **C**, junto al valor del producto **R.C**, para la onda de un día, conjuntamente con el desfase y el valor del módulo de la impedancia, que se calcularon en (2)

**Tabla nº 3**

Muro	1°		2°		3°		4°	
	clave	Espesor cm.						
1	D	12	d	5	E	4	A	1.5
2	D	12	a	4	E	4	A	1.5
3	D	12	i	5	E	4	A	1.5
4	K	30	A	1.5				
5	B	1.5	L	20	C	1.5		

**Tabla nº 4**

Muro	R	C	RC	Desfase	Z
1	2.611	145.71	380.45	7.2	9.41
2	1.662	176.88	293.97	7.8	6.26
3	0.620	144.04	110.77	6.2	1.74
4	0.340	783.76	266.48	5.6	1.63
5	0.588	336.54	197.88	6.0	1.59

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

Diversos muros, típicos de la construcción, han sido sometidos a variaciones de temperatura en una de sus caras para medir variaciones de temperatura y del flujo de calor en la cara de salida. De estos valores se han deducido el desfase y el módulo de la impedancia. Las características de los muros ensayados son:

### Muro 6 (multicapa )

Enfoscado de cemento 1.5 cm  
Ladrillo perforado de 11.5 cm  
Poliestireno expandido 3 cm  
Tabique de ladrillo hueco 4 cm  
Revoco de yeso de 1.5 cm

### Muro 7 (Termoarcilla 29)

Enfoscado de cemento de 1,5 cm  
Bloque de 29 cm  
Revoco de yeso de 1.5 cm

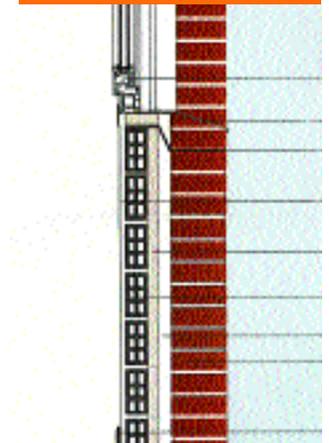
### Muro 8 (Termoarcilla 34)

Enfoscado de cemento de 1,5 cm  
Bloque de 34 cm  
Revoco de yeso de 1.5 cm

En la tabla nº 5 se han indicado los valores experimentales y teóricos que se han obtenido.

Tabla nº 5

Muro	R	Desfase	Z
	m <sup>2</sup> K/W	h	m <sup>2</sup> K/W
	Experimental		
6	1.69	8.2	4.48
7	1.10	10.1	5.2
8	1.47	11.7	7.72
	Teórico		
6			
7	1.04	11.3	5.34
8	1.12	11.5	8.55



## DISCUSIÓN

Se puede deducir de lo indicado, que la concordancia entre el estudio teórico y la experimentación es muy buena, que la nueva magnitud por nosotros introducida "**la impedancia térmica**" es muy adecuada, simplificando mucho los estudios y que servirá de base en la búsqueda de nuevos cerramientos que se deberán emplear en el campo del ahorro energético.

Se desprende de lo visto y analizado, que cuando se quiera desfasar la onda anual unos meses, y al mismo tiempo eliminar el paso de las ondas diarias por los cerramientos, se puede conseguir con el empleo de los acumuladores de calor de cambio de fase a temperaturas positivas, lo que abre un campo interesante en el campo de la investigación y el desarrollo.

## CONCLUSIÓN

Se considera, que la magnitud "**impedancia térmica**", es idónea para el estudio de cerramientos y que permite determinar los flujos de calor que lo pueden atravesar bajo condiciones periódicas de variación de temperatura en la cara exterior, y el desfase de las ondas de temperatura y de flujo de calor. Y que las expresiones indicadas en este trabajo, resumen de las publicadas en (1), coinciden con los valores experimentales realizados y que se recogen parcialmente en este trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

- <sup>1</sup> M. Domínguez; D. García. "La impedancia térmica de los cerramientos. Nuevo concepto que puede facilitar de forma considerable el ahorro energético". Nueva Arquitectura con arcilla cocida nº 10 Octubre 1999.69,84
- <sup>2</sup> J. A. Carrasco. "Aprovechamiento de la inercia térmica en el ahorro de energía" Tesis doctoral Instituto Químico de Sarriá 1982