

METODO SIMPLIFICADO PARA EL DISEÑO DE LA AISLACION TERMICA Y LA ESTIMACION DE LAS PERDIDAS DE CALOR EN PISO APOYADOS SOBRE EL TERRENO

RUBEN RODOLFO REBORA*, LILIANA CASTRO PADULA+

I. INTRODUCCION

Los cálculos de transmisión de calor para sistemas en contacto con el terreno tales como los pisos apoyados ofrecen dificultades especiales debido a que deben utilizarse modelos por lo menos bidimensionales.

Los métodos utilizados hasta el presente para tratar el problema pueden agruparse en dos categorías:

a) Métodos analíticos: se basan en la solución de la ecuación de conducción para un sólido semi-infinito con una distribución de temperatura conocida en la superficie libre. Delsante (1) y Kusuda (2) derivaron dos métodos diferentes sobre esta base en los últimos años.

Delsante resolvió el problema en dos y tres dimensiones para la condición de borde mostrada en la figura 1, donde T_i y T_o representan las temperaturas interior y exterior respectivamente de la superficie del terreno. T_i y T_o son funciones del tiempo.

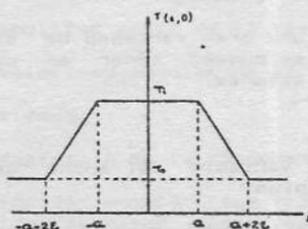


FIGURA 1 - Perfil de temperaturas

Esta temperatura puede utilizarse luego para calcular las pérdidas de calor mensuales. Los resultados dependen de la elección de la profundidad Z a la que se calcula la temperatura promedio.

* Instituto Nacional de Tecnología Industrial

+ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

Debido a la hipótesis de sólido semi-infinito, estos métodos tienen las siguientes limitaciones:

1. Están restringidos a pisos sin aislar.
2. No pueden tener en cuenta el efecto de la napa freática.

b) Métodos numéricos: se basan en la solución de la ecuación de conducción mediante técnicas de cálculo numérico tales como diferencias finitas o elementos finitos.

En los últimos años se han desarrollado muchos programas sobre esta base.

El programa DOE 2.1.B(4) resuelve un modelo físico bidimensional por elementos finitos para derivar factores de respuesta (FR) para pisos apoyados y sótanos. Estos FR se acoplan luego al conjunto de ecuaciones usadas para hacer el balance energético de un edificio.

GROCS (5) es un programa de computadora especialmente orientado hacia la solución de problemas de conducción en suelos mediante técnicas de diferencias finitas. Está basado también en un modelo físico bidimensional.

Estos programas requieren una entrada de datos detallada y la utilización de una computadora para cada caso a resolver.

Por esa razón, diversos autores ((6)-(10)) desarrollaron métodos simplificados basados en correlaciones hechas sobre resultados obtenidos mediante programas de computadora, tales como los mencionados más arriba.

Mitalas (9) obtuvo fórmulas simplificadas para 39 configuraciones diferentes de pisos apoyados sobre el terreno que permiten calcular las pérdidas de calor mensuales.

El trabajo de Mitalas cubre una gran variedad de situaciones de diseño, sin embargo, no se pueden tener en cuenta mediante las fórmulas los siguientes factores:

- 1) Profundidad de la napa variable
- 2) Ancho de la aislación perimetral variable (el ancho de la aislación se limita a 1 m o a todo el piso)

Mitalas recomienda incrementar la componente estacionaria en sus fórmulas en un 30 % al 70 % cuando se sabe que la napa está muy próxima al piso.

Kusuda (10) utilizó las fórmulas de Mitalas para obtener coeficientes de pérdidas de diseño para sótanos y pisos apoyados. En su trabajo, Kusuda menciona que la extensión de la aislación a anchos mayores de 1 m puede ser efectiva para suelos altamente conductores.

El propósito de este trabajo es obtener un método simplificado para definir el ancho de la aislación perimetral y la necesidad de la aislación central para pisos apoyados, en función

de su efectividad, teniendo en cuenta el efecto del nivel de la napa freática.

1. MODELO DEL PROBLEMA

Se utilizó el modelo físico bidimensional mostrado en la figura 2.

Se pusieron las siguientes condiciones:

1. Bordes laterales adiabáticos.

2. Borde inferior isotérmico a una profundidad variable b en un rango $2 \text{ m} < b < \infty$. Para simular la condición $b = \infty$, b era incrementada hasta el punto en que un incremento ulterior causaba diferencias despreciables en los resultados (en términos de flujo de calor), y las diferencias entre borde inferior isotérmico y adiabático era también despreciable.

3. Borde superior con capa convectiva. Se asumió un coeficiente de convección aparente $h = 8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Se estableció una distribución de temperatura como la mostrada en la figura 1, donde:

T_i = temperatura del aire interior sobre la capa convectiva.
Se la supuso constante e igual a 18 C durante todo el año.

T_o = temperatura exterior de la superficie del terreno.
Se la definió como:

$$T_c = T_a + A_a \sin \omega (\tau + T_c) \quad (1)$$

donde:

T_a = temperatura media anual del terreno.

A_a = amplitud anual de la temperatura del terreno.

ω = velocidad angular de la componente transitoria.

T = tiempo.

T_c = desfase de la componente transitoria.

La velocidad angular fue fijada en 30/mes. Se despreciaron las armónicas de mayor orden, de acuerdo a resultados obtenidos por Mitalas y otros investigadores.

4. Condiciones iniciales. De acuerdo a resultados obtenidos en corridas preliminares, las diferencias entre el flujo de calor anual para el segundo y tercer año eran despreciables. Por lo tanto se simularon dos años para cada caso, tomando los resultados del segundo año.

5. Geometría y parámetros físicos: se realizaron las siguientes presunciones:

a) Propiedades físicas constantes para todos los componentes

- b) Aislación térmica del piso ubicada en los primeros 30 cm de profundidad, extendida horizontalmente hasta un ancho variable 3 , y en buen contacto térmico con la aislación de la pared. Esta última suposición fue efectuada sobre la base de que la aislación del piso no es efectiva cuando no se cumple con la condición de continuidad en la aislación. Esta hipótesis es sustentada por resultados de trabajos previos (8), (9), (10).
- c) Espesor de la transición entre la temperatura exterior e interior igual al espesor de la aislación de la pared ($2 \epsilon = 0.05$ m).
- d) Rango para los valores de los parámetros físicos: se muestra en la tabla 1, donde:

a,b,c: dimensiones mostrada en la figura 2

x_s : difusividad térmica del terreno

k_s : conductividad térmica del terreno

U_p : transmitancia térmica de los primeros 30 cm de piso (y terreno, en caso de que el espesor de aquél sea menor) incluyendo la resistencia térmica superficial interior.

Symbol	Min. Val.	Max. Val.	Units
x_s	.001	.0045	m ² /h
k_s	.5	2	W/mK
U_p	.68	3	W/m ² K
T_a	5	15	C
A_a	0	10	C
a	3.5	10	m
b	2		m
c	5	16	m

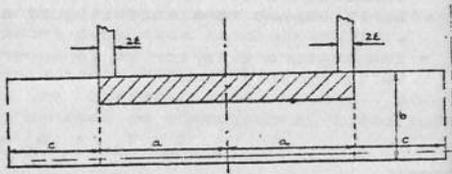


TABLA I - Rango de valores para los parámetros físicos y geométricos

FIGURA 2 - Modelo usado para derivar el método propuesto

1.1. MODELO MATEMATICO

Se utilizó el programa TAP6 (13) para resolver el modelo físico. TAP6 es un programa multipropósito de diferencias finitas. La entrada de datos debe presentarse como el circuito eléctrico análogo.

Se utilizó el programa Puentes (15) como preprocesador para generar el modelo eléctrico, y como postprocesador para mostrar los resultados.

El correcto uso e implementación del TAP6 fue verificado en un trabajo anterior (14).

Se generó una malla de densidad variable, de 200 puntos, sobre el modelo de la figura 4. No se obtuvieron diferencias apreciables en los resultados incrementando la densidad a 400 puntos.

2. METODO SIMPLIFICADO PARA DISEÑAR LA AISLACION TERMICA

2.1. Borde inferior en $b = b_0$

De acuerdo a los resultados de la solución de Delsante, sólo existirá en este caso una componente perimetral de pérdida de calor (suponiendo que la aislación no afecta la forma de la solución).

Se efectuaron numerosas simulaciones cambiando los parámetros de acuerdo a los rangos y condiciones descriptos en la sección anterior.

Se calculó, para cada simulación el flujo de calor anual, a los efectos de establecer el ancho de la aislación perimetral más allá del cual su efectividad no aumentaba.

Los resultados se analizaron a través de correlaciones y análisis dimensional.

Se definió un ancho de diseño 3 para la aislación perimetral. Este ancho es aquel para el cual las pérdidas de calor no disminuirán más de un 5 % del valor para aislación nula en caso de que la aislación se extendiera a todo el piso. El valor 3 de se obtiene de la figura 3 en función de K_s / U_p y el ancho $2a$ del piso.

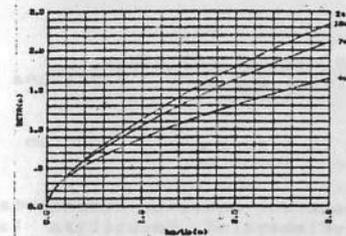


FIGURA 3 - Ancho de diseño para la aislación perimetral

Para $2a > 10$ m la dependencia de 3 respecto de a se torna despreciable. De acuerdo a los resultados, la amplitud térmica anual no afecta a las pérdidas anuales mientras la temperatura exterior del terreno no supere la temperatura interior a lo largo del año. ($T_a + A_a < T_i$).

Para esos casos las pérdidas de calor anuales pueden obtenerse para el sistema bidimensional por la siguiente fórmula:

$$Q_a = 2 U_p \beta 31.5 (T_i - T_a) \quad (\text{MJ/m Año}) \quad (2)$$

donde:

Q_a = Pérdidas de calor anuales a través de piso por unidad de longitud.

31,5 = Segundos por año por 10^{-6} .

Cuando $T_a + A_a > T_i$, las pérdidas de calor estacionales (es decir, el flujo total de calor para la temporada de calefacción) es un parámetro más adecuado para definir el diseño que las pérdidas anuales. Más aún, la hipótesis de temperatura interior

constante (18 C) a lo largo del año no es ya válida en este caso. Sería más adecuado en cambio suponer que T_i puede flotar libremente durante la temporada de verano.

Finalmente, si T_i es libre durante las estaciones templadas y cálidas, es posible que una aislación vertical (si es que es necesario aislar) tenga ventajas sobre la aislación horizontal, tal como lo sugiere T. Loxley (12).

De la discusión anterior, puede verse que mientras $T_i + A < T_a$, las pérdidas de calor anuales pueden estimarse por la (2) para cualquier ancho de aislación mayor que β , dentro de un margen del 5% de error respecto del valor para el piso sin aislar.

2.2. Borde Inferior Isotérmico

Se realizaron numerosas simulaciones para diferentes valores de b. La temperatura de la napa T_g , fue supuesta constante e igual a T_a durante todo el año.

Se investigó la influencia del nivel de la napa sobre las pérdidas de calor anuales. Se propuso la siguiente fórmula para evaluarlas:

$$Q_a = (23 U_p + 2 (a - \beta) U_c) \gamma 31.5 (T_i - T_a) \quad (3)$$

donde:

U_c = Transmitancia térmica de la parte central del piso, incluyendo la resistencia superficial del aire y hasta una profundidad b.

γ = Factor adimensional obtenido de la figura (4) en función de b.

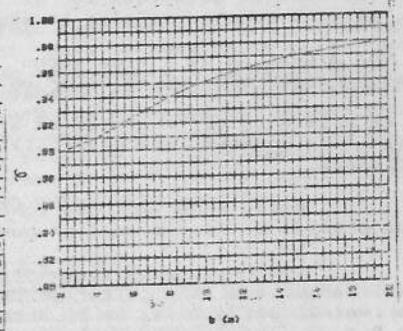
La (3) se basa en la hipótesis de que una componente central se superpone a las pérdidas perimetrales. Se utiliza la expresión para régimen permanente debido a que tanto T_i como T_a permanecen constantes.

El coeficiente γ puede considerarse como un factor de acoplamiento que tiene en cuenta que ambas componentes no actúan en forma independiente.

La tabla II muestra los resultados de la comparación entre los valores que se derivan de la (3) y los obtenidos de las fórmulas de Mitalas para casos comparables (se considera solo la componente estacionaria).

Case	h	A	h ₀	U _c	β	Year	Q _a	Q _a	Diff
no	M/m	M/M	M/M	M/M	m	-	M/mK	M/mK	%
1	.9	0	0	.049	0	41	1.77	1.94	-11.3
2	.9	1	.774	.0425	1.0	43	1.17	1.22	-4.3
3	.9	1.5	.548	.0410	1.0	43	.972	1.03	-6.5
4	.9	2.0	.43	.0392	1.0	43	.907	.948	-4.5
5	1.25	0	0	.102	0	34	2.37	2.51	-5.6
6	1.25	1	.774	.0915	1.000	39	1.07	1.13	-5.2
7	1.25	1.5	.548	.0864	1.0	35	1.24	1.32	-5.2
8	1.25	2.0	.43	.104	1.0	36	1.22	1.30	-6.4
9	1.5	0	0	.177	0	26	1.86	1.87	-0.5
10	1.5	1.175	.482	.124	1.0	34	1.19	1.23	-0
11	.9	.619	1.04	.049	1.0	42	1.25	1.46	-15.2
12	.9	.817	1.04	.041	1.0	43	1.25	1.37	-8.2

TABLA II - Comparación entre el método de Mitalas y el método propuesto. Caso bidimensional.
FIGURA 4 - Factor gamma para el cálculo de la pérdidas de calor



Los valores de Q en la Tabla II tienen dimensiones de W/mK, es decir, el factor evaluado es:

$$Q_{sm} = (23 U_p + 2 (a - \beta) U_c) \gamma \quad (4)$$

el cual es comparado con el equivalente de las fórmulas de Mitalas (Q_m). Sys # se refiere a la numeración dada por Mitalas a los sistemas.

Como puede observarse de la tabla II, la (4) da valores más pequeños que el método de Mitalas para todos los casos. Esto podía esperarse debido a la pequeña diferencia entre los modelos utilizados. En efecto, en el modelo de Mitalas la superficie inferior de la placa del piso está en contacto con el terreno, mientras que en el esquema utilizado en este trabajo es el borde superior el que se encuentra a nivel de la superficie.

Las diferencias entre los resultados dados por ambos métodos tiende a decrecer al aumentar la conductividad del terreno o la aislación perimetral, lo cual es también esperable, ya que la contribución a la resistencia global de la configuración que hacen las capas de terreno que rodean la placa, (y que constituyen la diferencia entre los modelos) decrece en esos casos.

Los casos 3 y 4 de la tabla II son extrapolaciones del método aquí propuesto, ya que los valores de U_p están fuera del rango cubierto por las simulaciones. De la misma manera, los casos 11 y 12 fueron obtenidos extendiendo el uso de las fórmulas de Mitalas más allá del límite inferior para R (resistencia de la aislación, $R = 1$).

En ambos casos se utilizó un valor de $R = 0,619 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ de forma de obtener un valor de $\beta = 1 \text{ m}$ de la figura 3.

n	Q _{an}	Q _{an}	E _{PI}
-	M/K	M/K	%
1	55.4	52.1	2.5
2	30.8	27.9	10.5
3	24.3	24.1	-.9
4	21.2	21.3	-.6
5	66.	64.6	3.3
6	34.2	35.6	7.8
7	28.5	28.6	-.5
8	91.6	86.7	5.5
9	40.3	40.	-.8
10	34.7	37.4	-1.9
11	35.	32.2	8.6
12	35.	31.8	10.

n	Q _{an}	Q _{an}	E _{PI}
-	M/K	M/K	%
1	85.1	87.8	-3.1
2	32.4	30.3	4.1
3	42.3	42.9	-3.7
4	37.9	29.1	-5.2
5	110.	111.	-.9
6	63.7	61.6	3.4
7	31.9	32.9	-1.9
8	131.	141.	7.1
9	74.6	74.4	-.2
10	69.3	69.8	-.6
11	36.2	39.6	3.3
12	37.7	34.9	1.3

TABLA V - Comparación entre el método de Mitalas y el método propuesto. Caso tridimensional. $a = 4.6$; $d = 4.6$.

TABLA VI- Comparación entre el método de Mitalas y el método propuesto. $a = 4.6$; $d = 9.2$.

3. CONCLUSIONES

Se puede seleccionar un ancho de diseño para la aislación perimetral a través de un único gráfico, en función del ancho del piso y de la relación entre la conductividad del terreno y la transmitancia propuesta para la aislación. Una fórmula sencilla del tipo de régimen permanente permite evaluar las pérdidas anuales de calor y la necesidad de aislación central adicional en función de la profundidad de la napa freática, siempre y cuando la temperatura exterior del terreno no supere la temperatura interior a lo largo del año ($T_a + A_a < T_i$).

Los resultados obtenidos por el método propuesto concuerdan satisfactoriamente con los dados por otros métodos simplificados para casos comparables. Los casos comparables, de todos modos fueron pocos, debido a las diferentes situaciones de diseño y rangos de valores de los parámetros físicos cubiertos por los métodos disponibles.

De acuerdo a los resultados, si el nivel de la napa no es próximo a la superficie, la extensión de la aislación al ancho de diseño proporciona un mejor aprovechamiento del material aislante que las alternativas de extenderlo a todo el piso o bien a un ancho de un metro.

4. REFERENCIAS

- (1) A. Delsante, A. Stokes, P. Walsh. "Applications of Fourier transforms to periodic heat flow into the ground under a building", International Journal of Heat and Mass Transfer. 26.121-129. (1983).
- (2) T. Kusuda J. W. Bean, "simplified methods for determining seasonal heat loss from uninsulated slab on grade floors". National Bureau of Standards. AT 84-11 N 4.

- (3) A.H. Lachenbruch. "Three dimensional heat conduction in permafrost beneath heated buildings". Geological Survey Bulletin 1052-B U.S. Government Printing Office. Washington D.C. (1957).
- (4) R. Sullivan, J. Bull, P. Davis, S. Nozaki, Z. Cumali, G. Meixei. "Description of an earth-contact modeling capability in the DOE 2.1B Energy Analysis Program". ASHRAE Transactions (1985).
- (5) P.D. Metz. "A simple computer program to model three dimensional underground heat flow with realistic boundary conditions". Journal of the Solar Energy Engineering. 105 42-49 (1983).
- (6) J. Poulos, J. Akridge. "A new method to calculate heat loss from underground spaces". Solar Age. March 1984 20-22.
- (7) D.C. Yard, M. Morton Gibson, J.W. Mitchell. "Simplified dimensionless relations for heat loss from basements". National Bureau of Standards. AT 84.11 N 5.
- (8) G.P. Mitalas. "Basement heat loss studies at DRB/NRC". Division of Building Research. National Research Council of Canada. NRCC 20416. September 1982.
- (9) G.P. Mitalas. "Calculation of below grade heat loss for low rise residential buildings. Building Research Note. National Research Council of Canada. October 1984.
- (10) T. Kusuda, J.N. Bean, "Design heat loss factors for basements and slab floors". Building Physics Division. National Bureau of Standards. ASTM Conference on Thermal Insulation, Materials and Systems, December 2-6, 1984.
- (11) M. Prada, R. Rébora, V. Volantino. "Puentes térmicos, 25 casos resueltos por métodos numéricos". Departamento de Construcciones. Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Argentina (1985).
- (12) Thomas E. Loxley, "The inverted cave house". Journal of CIB. Jan.- Feb. 1985.
- (13) "Thermal Analyzer Computer Program". University of Southern California 1979.