

ÍNDICE

<i>Prólogo</i>	17
Tema 1. INTRODUCCIÓN Y CONCEPTOS BÁSICOS EN TRANSMISIÓN DE CALOR	19
1. Introducción.....	21
2. Conceptos básicos en transmisión de calor	22
3. Mecanismos de transmisión de calor	23
3.1. Transmisión de calor por conducción.....	24
3.2. Transmisión de calor por convección.....	26
3.3. Transmisión de calor por radiación	28
4. Propiedades térmicas de los materiales	31
4.1. Conductividad térmica.....	31
4.2. Calor específico	37
4.3. Difusividad térmica	38
4.4. Coeficiente de dilatación térmica (sólo para líquidos y gases).....	39
4.5. Viscosidad (sólo para líquidos y gases)	40
5. Ecuación general de la conducción del calor.....	42
5.1. Ecuación general de la conducción del calor en coordenadas cartesianas	44
5.2. Ecuación general de la conducción del calor en coordenadas cilíndricas	48
5.3. Ecuación general de la conducción del calor en coordenadas esféricas	49
6. Ejercicios de autocomprobación.....	50

7. Solución a los ejercicios de auto comprobación	52
---	----

Tema 2. TRANSMISIÓN DE CALOR POR CONDUCCIÓN.....57

1. Introducción.....	59
2. Conducción de calor a través de una pared plana	61
2.1. Pared plana simple con temperaturas superficiales dadas	61
2.2. Pared plana compuesta bañada por fluidos a temperaturas conocidas	63
2.3. Coeficiente global de transmisión de calor.....	66
3. Conducción de calor a través de una pared cilíndrica	66
3.1. Pared cilíndrica simple con temperaturas superficiales dadas.....	67
3.2. Pared cilíndrica compuesta bañada por fluidos a temperaturas dadas.....	69
3.3. Coeficiente global de transmisión de calor.....	71
3.4. Espesor crítico de aislamiento en tuberías.....	72
4. Conducción de calor a través de una pared esférica	74
4.1. Pared esférica multicapa.....	77
5. Casos en los que se produce generación interna de calor	77
5.1. Generación uniformemente distribuida en una pared plana	77
5.2. Generación uniformemente distribuida a través de un cilindro.....	81
6. Ejercicios de auto comprobación.....	82
7. Solución a los ejercicios de auto comprobación	87

**Tema 3. CONDUCCIÓN DE CALOR EN SUPERFICIES
EXTENDIDAS: ALETAS..... 97**

1. Introducción.....	99
1.1. Clasificación de las aletas.....	99
1.2. Ecuación general de transmisión de calor en una aleta	102

2. Aletas longitudinales de sección recta constante y agujas de sección recta constante	104
2.1. Distribución de temperaturas y flujo de calor	104
2.2. Efectividad de la aleta longitudinal o de la aguja de espesor uniforme.....	107
3. Aleta anular de perfil rectangular uniforme.....	109
3.1. Solución a la ecuación general: distribución de temperaturas y flujo de calor.....	109
3.2. Efectividad de la aleta anular de perfil rectangular	112
3.3. Coeficiente global de transmisión de calor en tubos aleteados y aletas del tipo de aletas anulares de perfil rectangular uniforme.....	112
4. Gráficos para el cálculo de la efectividad de las aletas.....	116
4.1. Gráficos para el cálculo de la efectividad de la aleta longitudinal de perfil rectangular o agujas, aleta longitudinal de perfil triangular y aleta longitudinal de perfil parabólico	117
4.2. Gráficos para el cálculo de la efectividad de la aleta anular de perfil rectangular	118
5. Ejercicios de autocomprobación.....	121
6. Solución a los ejercicios de autocomprobación.....	127
7. Anexo 1: Valores seleccionados de las funciones modificadas de Bessel de primera y segunda especie, órdenes cero y uno.	136
8. Anexo 2: efectividad de la aleta longitudinal de perfil rectangular o agujas, aleta longitudinal de perfil triangular y aleta longitudinal de perfil parabólico	138
9. Anexo 3: efectividad de la aleta anular.....	139

Tema 4. TRANSMISIÓN DE CALOR POR CONDUCCIÓN EN RÉGIMEN VARIABLE.....

1. Introducción.....	143
2. Ecuación de distribución de temperatura en régimen transitorio para sólidos con temperatura espacialmente uniforme (método de la resistencia interna despreciable).....	144

2.1. Validez del método de la resistencia térmica interna despreciable	145
3. Ecuación de distribución de temperatura en régimen transitorio teniendo en cuenta las coordenadas espaciales (temperatura no uniforme en todo el sólido.....	146
3.1. Pared plana con convección	150
3.2. Cilindro infinito y esfera con convección.....	153
4. Resolución gráfica de los problemas transitorios	157
4.1. Transmisión de calor unidireccional transitoria para pared plana o placa infinita de espesor $2L$	158
4.2. Transmisión de calor unidireccional transitoria para cilindro de radio r_0 y longitud infinita	162
4.3. Transmisión de calor unidireccional transitoria para esfera de radio r_0	166
5. Ejercicios de autocomprobación.....	170
6. Solución a los ejercicios de autocomprobación	174
7. Anexo 1: Coeficientes de aproximación con un término de las soluciones de condición transitoria unidimensional	185
8. Anexo 2: Funciones de Bessel de primera clase, de orden cero y orden 1.	187

Tema 5. TRANSMISIÓN DE CALOR POR CONVECCIÓN FORZADA EN RÉGIMEN LAMINAR Y TURBULENTO..... 189

1. Introducción.....	191
2. Conceptos básicos en transmisión de calor por convección	192
2.1. Capa límite de velocidad y capa límite térmica.....	194
2.2. Convección libre y convección forzada.....	195
2.3. Flujo laminar y flujo turbulento	195
3. Ecuaciones para la transmisión de calor por convección forzada.....	197
3.1. Deducción de las ecuaciones diferenciales para la transmisión de calor por convección forzada.....	197
3.2. Ecuaciones y números adimensionales para la transmisión de calor por convección.....	207

4. Correlaciones para la convección forzada en régimen laminar y turbulento.....	212
4.1. Convección forzada en el interior de tuberías y tubos cilíndricos.....	213
4.2. Convección forzada, flujo externo que incide perpendicularmente a un conducto circular.....	218
4.3. Convección forzada, flujo externo que incide perpendicularmente sobre haces de conductos circulares.....	220
4.4. Convección forzada, flujo externo paralelo a superficies planas.....	223
5. Ejercicios de auto comprobación.....	225
6. Solución a los ejercicios de auto comprobación.....	226

**Tema 6. TRANSMISIÓN DE CALOR POR CONVECCIÓN LIBRE
EN RÉGIMEN LAMINAR Y TURBULENTO..... 233**

1. Introducción.....	233
2. Ecuaciones fundamentales de la convección libre.....	233
2.1. Ecuaciones para la transmisión de calor por convección libre.....	237
2.2. Número de Rayleigh.....	241
3. Correlaciones para la convección libre en régimen laminar y turbulento.....	241
3.1. Convección libre alrededor de superficies planas/cilindros verticales.....	242
3.2. Convección libre alrededor de placas horizontales.....	245
3.3. Convección libre alrededor de cilindros horizontales largos.....	248
4. Ejercicios de auto comprobación.....	249
5. Solución a los ejercicios de auto comprobación.....	250

**Tema 7. TRANSMISIÓN DE CALOR EN LOS CAMBIOS
DE ESTADO: CONDENSACIÓN Y EBULLICIÓN..... 255**

1. Introducción.....	255
2. Conceptos básicos de transmisión de calor en la condensación y en la ebullición	256

2.1. Ecuaciones y números adimensionales utilizados en la condensación y ebullición.....	256
2.2. Modos de condensación: condensación por gotas y condensación en película	258
2.3. Modos de ebullición: ebullición en estanque o en alberca y ebullición en convección forzada.....	260
3. Correlaciones para la transferencia de calor en la condensación en película	261
3.1. Condensación en película sobre placas verticales y cilindros verticales.....	261
3.2. Condensación en película sobre placa horizontal.....	269
3.3. Condensación en película en el exterior de esferas y cilindros horizontales.	270
4. Correlaciones para la transferencia de calor en la ebullición en estanque o de alberca.....	272
4.1. Regímenes de la ebullición en estanque.....	273
4.2. Flujo de calor en la zona de ebullición nucleada.....	276
4.3. Flujo calorífico máximo (crítico)	278
4.4. Flujo de calor en la zona de ebullición en película.....	279
5. Ejercicios de autocomprobación.....	281
6. Solución a los ejercicios de autocomprobación.....	283
Tema 8. CÁLCULO Y DISEÑO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR.....	293
1. Introducción.....	293
2. Tipos de intercambiadores de calor	294
2.1. Intercambiadores de calor de superficie.....	296
3. Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor	303
3.1. Cálculo del coeficiente global teórico de transferencia de calor	303
3.2. Cálculo del coeficiente global real de transferencia de calor	305
4. Análisis de un intercambiador de calor con el método de la diferencia media de temperaturas (<i>LMTD method</i>).....	307

4.1. Diferencia de temperaturas logarítmico media en un cambiador de flujo paralelo en equicorriente	309
4.2. Diferencia de temperaturas logarítmico media en un cambiador de flujo paralelo en contracorriente	311
4.3. Diferencia de temperatura media en cambiadores multipaso y de flujos cruzados.....	313
4.4. Diferencia de temperatura media en condiciones especiales de operación ...	319
4.5. Metodología de cálculo de un intercambiador de calor con el método de la diferencia media de temperaturas (<i>LMTD method</i>)	320
4.6. Metodología LMTD para el caso de que uno de los fluidos experimente un cambio de estado.	329
5. Análisis de un intercambiador de calor con el método de la efectividad-número de unidades de transmisión ($\epsilon - NTU METHOD$)	333
5.1. Parámetros adimensionales utilizados en el método del número de unidades de transmisión	333
5.2. Metodología de cálculo en el método del número de unidades de transmisión	342
6. Ejercicios de autocomprobación.....	345
7. Solución a los ejercicios de autocomprobación.....	350
Tema 9. TRANSMISIÓN DE CALOR POR RADIACIÓN	375
1. Introducción.....	373
2. Conceptos fundamentales.....	374
2.1. Definición y características de la radiación. Ley de Prevost.....	374
2.2. Intensidad de radiación $I (W/m^2/sr)$	375
2.3. Potencia emisiva $E (W/m^2)$	376
2.4. Radiosidad $J (W/m^2)$	377
2.5. Irradiación $G (W/m^2)$	378
3. Absorción, reflexión y transmisión.....	380

3.1. Absortividad	380
3.2. Reflectividad	381
3.3. Transmisividad	383
3.4. Relaciones entre las propiedades para distintos tipos de superficies.....	383
4. Leyes que rigen la transmisión de calor por radiación	385
4.1. Ley de distribución de Planck	385
4.2. Ley de desplazamiento de Wien.....	387
4.3. Ley de Stefan-Boltzmann	387
5. Transmisión de calor por radiación entre superficies grises. Factores de forma ...	391
5.1. Superficie gris.....	391
5.2. Transmisión de calor por radiación entre superficies grises.....	391
5.3. Definición y propiedades de los factores de forma	393
6. Ejercicios de autocomprobación.....	398
7. Solución a los ejercicios de autocomprobación	400
BIBLIOGRAFÍA	405

TEMA 2

TRANSMISIÓN DE CALOR POR CONDUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se estudia la transmisión de calor por conducción particularizada para el caso de conducción unidimensional en régimen permanente o estacionario. De forma matemática, las dos hipótesis anteriores se expresan de la siguiente forma:

- **Conducción unidimensional** significa que la temperatura (y, por tanto, la transmisión de calor) es función de una única variable espacial. En concreto, en este capítulo se van a estudiar dos casos: pared plana y pared cilíndrica.

$t = t(x)$ en el caso de pared plana

$t = t(r)$ en el caso de pared cilíndrica

- **Conducción en régimen permanente o estacionario** significa que el campo de temperaturas del sistema no depende del tiempo:

$$\frac{\partial t(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau} = 0 \rightarrow t = t(\vec{r})$$

donde: \vec{r} es el vector de posición en un punto genérico del sistema.

t ($^{\circ}\text{C}$) es la temperatura

τ (s) es el tiempo

A pesar de que las dos hipótesis anteriores pueden parecer muy simplificadoras, existen numerosos sistemas en ingeniería que pueden modelarse bajo estos supuestos. A lo largo del capítulo se verán las condiciones que se tienen que cumplir para que las hipótesis puedan darse como válidas.

El capítulo comienza analizando la transmisión de calor por conducción estacionaria unidimensional para el caso de una pared plana. Se introducirá el concepto de resistencia térmica, condiciones de frontera y coeficiente global de transmisión de calor.

De forma paralela se va a introducir el estudio de la conducción estacionaria y unidimensional a través de una pared cilíndrica. En este apartado se verán conceptos similares a los vistos en pared plana, y se incorporará la definición de radio crítico, que se debe de tener en cuenta en los aislamientos.

Por último, se va a considerar un caso especial de transmisión de calor unidimensional, que es el caso en el que exista generación interna de calor

Palabras clave: *conducción, coeficiente global de transmisión de calor, generación interna de calor*

2. CONDUCCIÓN DE CALOR A TRAVÉS DE UNA PARED PLANA

El primer caso que se va a analizar es el de conducción de calor a través de una pared plana. Dentro de este sistema se van a estudiar tres modelos, de menor a mayor complejidad.

2.1. Pared plana simple con temperaturas superficiales dadas

Para la modelización de la conducción unidimensional estacionaria en una pared plana se van a suponer las siguientes **hipótesis**:

1. Pared plana indefinida de espesor finito L : la realidad es que las otras dos dimensiones de la pared (y, z) van a ser mucho mayores que el espesor (x), por lo que se considerará conducción unidimensional en la dirección x .
2. Las caras de la pared se mantienen a las temperaturas t_1 y t_2 , constantes, de forma que $t_1 > t_2$
3. El material de la pared es homogéneo e isotropo. De esta forma, la conductividad de la pared no depende de la variable espacial (Aunque podrá depender de la temperatura).

La figura 2.1. es una representación esquemática del modelo considerado.

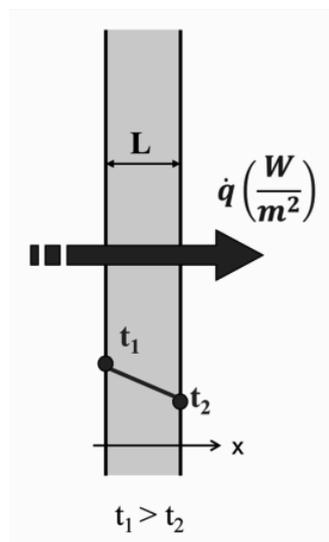


Figura 2.1. Pared plana simple con temperaturas superficiales dadas

2.1.1. Distribución de temperaturas

Para condiciones de estado estacionario, sin fuentes ni sumideros de calor, y en transmisión unidimensional, la ecuación de difusión del calor queda:

$$\frac{d}{dx} \left(k \cdot \frac{dt}{dx} \right) = 0 \quad (2.1)$$

Si se integra dos veces:

$$t(x) = C_1 \cdot x + C_2 \quad (2.2)$$

Las constantes de la ecuación anterior se determinan con las condiciones de contorno:

$$\begin{cases} t(0) = t_1 \\ t(L) = t_2 \end{cases} \quad (2.3)$$

Por lo que la distribución de temperaturas queda de la forma:

$$t(x) = (t_2 - t_1) \cdot \frac{x}{L} + t_1 \quad (2.4)$$

2.1.2. Flujo de calor

A partir de la ecuación de distribución de la temperatura, ecuación (2.4), aplicando la ley de Fourier se tiene:

$$\dot{Q}_x = -k \cdot A \cdot \frac{dt}{dx} = \frac{k \cdot A}{L} \cdot (t_1 - t_2) \quad (2.5)$$

donde:

$A \text{ (m}^2\text{)}$ = área de la pared normal a la dirección de transferencia de calor. Por tanto, para una pared plana será una constante independiente de x . El flujo de calor (W/m^2) es entonces:

$$\dot{q}_x \text{ (W/m}^2\text{)} = \frac{\dot{Q}_x}{A} = \frac{k}{L} \cdot (t_1 - t_2) \quad (2.6)$$

De acuerdo con la ecuación anterior, se deduce que en régimen unidimensional estacionario, sin generación interna de calor, el flujo de calor es una constante que no depende de la variable x .

A partir de la ecuación (2.5) se puede introducir el concepto de **Resistencia térmica para la conducción**, por analogía con la ley de *Ohm*:

$$R_{t,cond} (^{\circ}C/W) = \frac{(t_1 - t_2)}{\dot{Q}_x} = \frac{L}{k \cdot A} \quad (2.7)$$

El circuito térmico equivalente se representa en la figura 2.2.

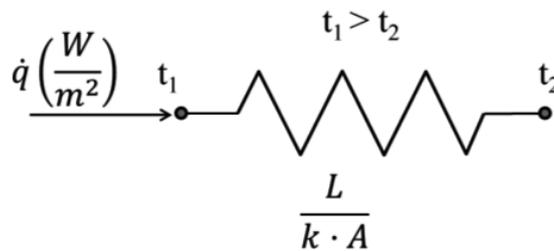


Figura 2.2. Circuito térmico equivalente para una pared plana simple con temperaturas superficiales dadas

2.2. Pared plana compuesta bañada por fluidos a temperaturas conocidas

Este caso que se va a estudiar se aproxima más a un sistema real, en el que la pared estará formada por más de un material y a su vez en contacto directo con dos fluidos por ambas caras.

Se va a suponer que la pared compuesta está formada por 3 capas de materiales distintos, tal y como se muestra en la figura:

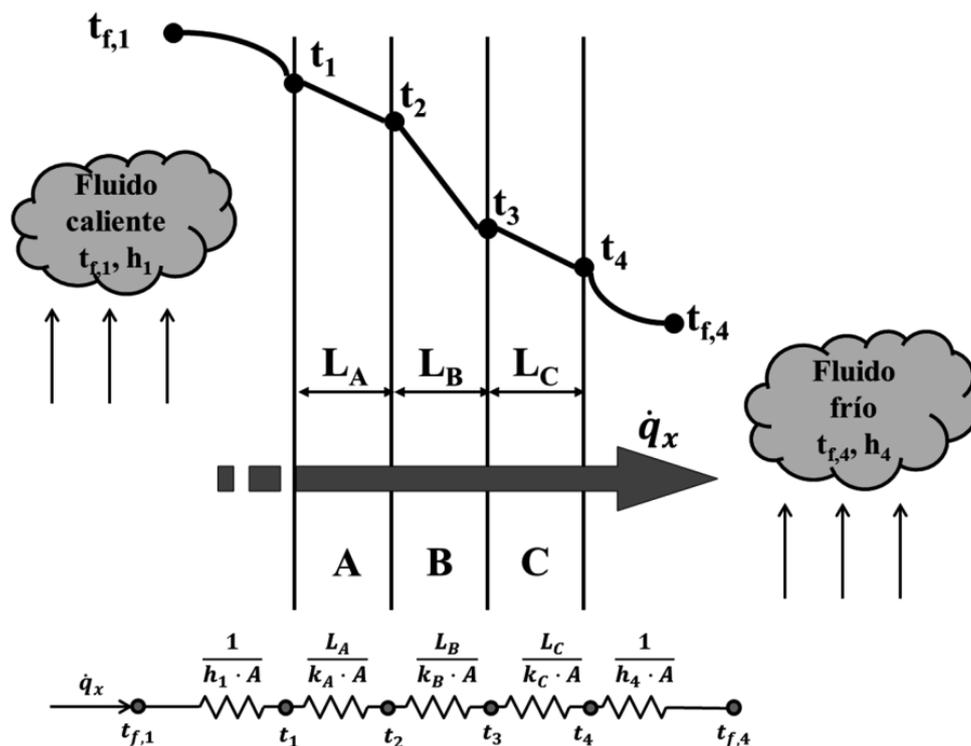


Figura 2.3. Distribución de temperaturas y flujo de calor en una pared plana compuesta con temperaturas superficiales dadas. Circuito térmico equivalente asociado.

Para la modelización de la conducción unidimensional estacionaria en una pared compuesta se van a suponer las siguientes **hipótesis** generales:

1. Pared plana indefinida (para que haya conducción de calor en una única dirección) formada por la yuxtaposición de n capas de espesores finitos L_1, \dots, L_n .
2. La temperatura del fluido interior es mayor que la temperatura del fluido exterior, $t_{f,1} > t_{f,n}$, de tal forma que la transmisión de calor va desde el interior de la pared cilíndrica hacia el exterior.
3. Cada una de las capas es de material distinto. Es decir, en cada capa, la conductividad térmica es distinta: k_1, \dots, k_n ; y el material de cada capa se va a considerar homogéneo e isotrópico, para que la conductividad no dependa de la variable espacial.
4. Todas las capas que integran la pared están perfectamente adheridas unas a otras, lo que equivale a decir que la distribución de temperaturas es una función continua a lo largo de toda la pared y no existen resistencias de contacto.

El flujo de calor por unidad de superficie se mantiene constante a lo largo del espesor de la pared. Es decir, el calor que transfiere el fluido 1 a la superficie 1 es exactamente igual que el que se transfiere a través del material A, a través del material B y a través del material C, y exactamente igual al que se transfiere de la superficie 4 al fluido 4.

El que exista una mayor o menor caída de temperaturas dependerá de la conductividad de un material dado.

Aplicando la ecuación (2.6) a cada uno de los materiales de la pared, y añadiendo además la transmisión de calor por convección se tiene:

$$\begin{aligned}
 \dot{q}_x &= \frac{(t_{f,1} - t_1)}{\frac{1}{h_1}} \rightarrow (t_{f,1} - t_1) = \dot{q}_x \cdot \frac{1}{h_1} \\
 \dot{q}_x &= \frac{(t_1 - t_2)}{\frac{L_A}{k_A}} \rightarrow (t_1 - t_2) = \dot{q}_x \cdot \frac{L_A}{k_A} \\
 \dot{q}_x &= \frac{(t_2 - t_3)}{\frac{L_B}{k_B}} \rightarrow (t_2 - t_3) = \dot{q}_x \cdot \frac{L_B}{k_B} \\
 \dot{q}_x &= \frac{(t_3 - t_4)}{\frac{L_C}{k_C}} \rightarrow (t_3 - t_4) = \dot{q}_x \cdot \frac{L_C}{k_C} \\
 \dot{q}_x &= \frac{(t_4 - t_{f,4})}{\frac{1}{h_4}} \rightarrow (t_4 - t_{f,4}) = \dot{q}_x \cdot \frac{1}{h_4}
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

Sumando miembro a miembro las ecuaciones anteriores, y despejando \dot{q}_x , se tiene:

$$\dot{q}_x = \frac{(t_{f,1} - t_{f,4})}{\frac{1}{h_1} + \frac{L_A}{k_A} + \frac{L_B}{k_B} + \frac{L_C}{k_C} + \frac{1}{h_4}} \tag{2.9}$$

La expresión (2.9) se puede generalizar para una pared compuesta por n capas, resultando:

$$\dot{q}_x = \frac{(t_{f,1} - t_{f,n})}{\frac{1}{h_1} + \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{k_i} + \frac{1}{h_n}} \quad (2.10)$$

De forma parecida a la ecuación (2.7), se introduce ahora el concepto de **resistencia térmica a la convección**, que aparece también en el circuito térmico equivalente de la figura 2.3.

$$R_{t,conv}(\text{°C}/W) = \frac{(t_{f,1} - t_1)}{\dot{Q}_x} = \frac{1}{h_1 \cdot A} \quad (2.11)$$

2.3. Coeficiente global de transmisión de calor

En el caso de paredes compuestas suele ser interesante trabajar con el coeficiente global de transmisión de calor U , que permite expresar el calor de una forma global similar a la ley de enfriamiento de Newton.

$$\dot{Q}_x = U \cdot A \cdot (t_{f,1} - t_{f,n}) \leftrightarrow \dot{q}_x = \frac{\dot{Q}_x}{A} = U \cdot (t_{f,1} - t_{f,n}) \quad (2.12)$$

Siendo U el coeficiente global de transmisión de calor.

$$U \left(W/m^2 \cdot \text{°C} \right) = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{k_i} + \frac{1}{h_n}} \quad (2.13)$$

Según se puede observar, las unidades del coeficiente global de transmisión de calor U son las mismas que el coeficiente de transmisión de calor por convección h :
 $\left(W/m^2 \cdot \text{°C} \right)$

3. CONDUCCIÓN DE CALOR A TRAVÉS DE UNA PARED CILÍNDRICA

Existen multitud de sistemas cilíndricos y esféricos en los que la conducción de calor se efectúa sólo en dirección radial y, por tanto, es una conducción unidimensional. Si además no existen ni fuentes ni sumideros de calor, la conducción es estacionaria, y se puede estudiar de forma similar al apartado 2.

Por lo que la distribución de temperaturas queda de la forma:

$$t(r) = t_o + \frac{\dot{Q}^* \cdot r_o^2}{4k} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{r_o^2}\right) \quad (2.53)$$

Se deja al alumno el cálculo del flujo de calor a partir de esta ecuación.

6. EJERCICIOS DE AUTOCOMPROBACIÓN

Problema 1

Calcular el radio crítico para una esfera genérica, para la que se va a considerar sólo una capa de aislante y el fluido exterior, tal y como se muestra en la figura siguiente. El coeficiente de convección exterior se denominará: h

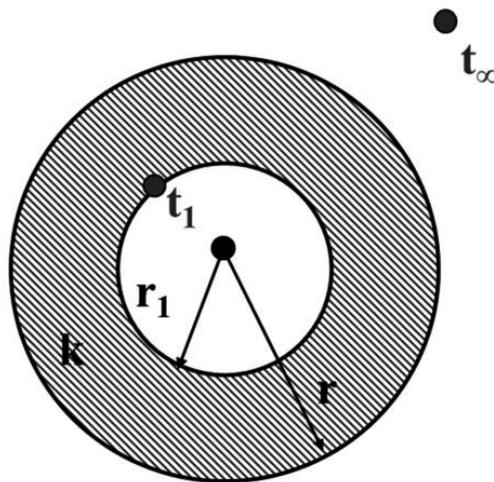


Figura. Corte de una esfera. La zona rallada se refiere a material aislante, de conductividad k

Problema 2

Se considera una esfera hueca, con 3 capas, cuyo corte se muestra en la fig. 1:

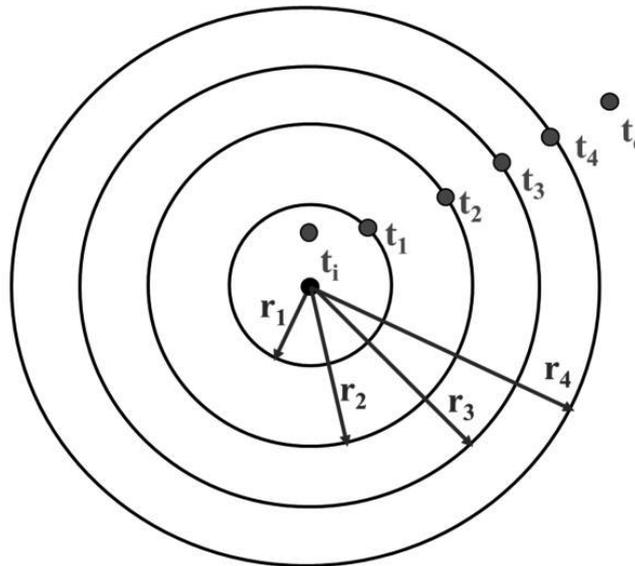


Figura. Corte a una esfera hueca, multicapa

Se supondrá que: $t_i > t_1 > t_2 > t_3 > t_4 > t_e$

Se supondrá asimismo que la conductividad de los distintos materiales (denominados con los subíndices 1, 2, 3 y 4) es, respectivamente: k_1 , k_2 , y k_3 . Además, los coeficientes de película interior y exterior son, respectivamente: h_i y h_e .

Se pide:

1. Plantear las ecuaciones de transmisión de calor para cada una de las capas, incluyendo la interior y la exterior.

2. A partir de las ecuaciones anteriores, deducir razonadamente una expresión global para la transmisión de calor, en la que sólo intervengan las temperaturas de los fluidos exteriores, t_i y t_e . De dicha ecuación se deducirá, asimismo, el coeficiente global de transmisión de calor.

Problema 3

Una nave industrial de 120 x 20 x 4 m tiene instalado un sistema de calefacción por agua caliente que aporta 175 kW. Las cuatro fachadas son exteriores, teniendo una superficie acristalada de 90 m² y una superficie ocupada por puertas de 30 m². La composición del muro es de ladrillo macizo de 20 cm ($k = 0.93 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) y enfoscado de yeso de 2.5 cm de espesor ($k=0.185 \text{ W/m}^\circ\text{C}$). Con el fin de ahorrar un mínimo del 20% en energía, se pretende instalar un aislamiento de fibra de vidrio ($k = 0.035 \text{ W/m}^\circ\text{C}$), mediante planchas que se adosarán al enfoscado de yeso sujetándolas por medio de un tabique de ladrillo macizo de 10 cm de espesor ($k = 0.93 \text{ W/m}^\circ\text{C}$), que a su vez será revestido de un enlucido de yeso como el que se tenía inicialmente. Se pide:

1. Calcular la temperatura en el interior de la nave.
2. Espesor mínimo de aislante que será necesario instalar.

Datos:

- Vidrio de la ventana de 6 mm de espesor: $k_v = 0.7674 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
- U de puerta: $U_p = 3.45 \text{ W/m}^2/\circ\text{C}$
- U de techo: $U_t = 1.16 \text{ W/m}^2/\circ\text{C}$
- U de suelo: $U_s = 0.58 \text{ W/m}^2/\circ\text{C}$
- h interior: $h_i = 11.5 \text{ W/m}^2/\circ\text{C}$
- h exterior: $h_e = 30 \text{ W/m}^2/\circ\text{C}$
- T exterior = $-2 \text{ }^\circ\text{C}$

Problema 4

Una pared está compuesta de una capa de material A de 15 cm de espesor y otra de material B de 25 cm de espesor. Sabemos que las temperaturas de las capas exteriores de A y B son de 250°C y 35°C, respectivamente. A la superficie exterior de la capa B se le añade un aislamiento de 3 cm de espesor ($k = 0.05 \text{ W/m}^\circ\text{C}$). En estas condiciones, se observa que la temperatura de la superficie de la capa A aumenta a 300°C y la de la unión entra la capa B y el aislamiento (anteriormente la cara exterior de la capa B), llega a 240°C. Si la superficie del aislamiento está a 22°C ¿Cuál es el flujo de calor por metro cuadrado de superficie de la pared. “antes” y “después” de añadir el aislamiento?

Problema 5

La conductividad térmica de una placa es $k = 35 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$ y su espesor $L=10 \text{ mm}$. En la placa actúan fuentes internas de calor que se consideran uniformemente distribuidas. Las temperaturas sobre las superficies de la placa son de $t_1 = 230^\circ\text{C}$ y $t_2 = 245^\circ\text{C}$. Determinar la coordenada correspondiente a la máxima temperatura de la placa, el valor de dicha temperatura y la velocidad de flujo calorífico por m^2 en ambas superficies de la placa en los siguientes casos:

1) $q^* = 8 \cdot 10^8 \text{ W/m}^3$

2) $q^* = 7 \cdot 10^7 \text{ W/m}^3$

Problema 6

Una pared de ladrillo macizo de 10 cm de espesor ($k = 0.9302 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$) enlucida interiormente con 1.5 cm de tablero de yeso ($k = 0.18 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$), está en contacto con el ambiente exterior a la temperatura de -5°C . En el interior la temperatura es de 22°C y la humedad relativa existente da lugar a que la temperatura de rocío alcance el valor de 17°C .

Para evitar las condensaciones superficiales se instala sobre el tablero de yeso una placa de cobre (que actuará como fuente térmica) de 0.8 cm de espesor ($k = 383 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$) uniformemente distribuida sobre toda su superficie, enluciendo finalmente esta placa de nuevo con 1.5 cm de tablero de yeso. Calcular:

- 1) Temperatura superficial interior antes de la instalación de la fuente térmica.
- 2) La potencia mínima que deberá aportar la fuente térmica para eliminar totalmente la condensación de la pared.
- 3) Temperatura sobre la superficie exterior de la pared después de la conexión de la fuente térmica.

DATOS:

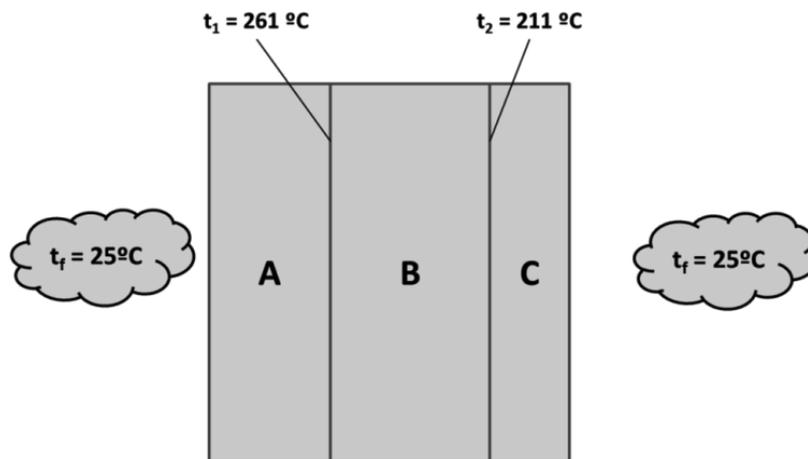
- Coeficiente de transferencia de calor por convección exterior: $30 \text{ W/m}^2/^\circ\text{C}$.
- Coeficiente de transferencia de calor por convección interior: $11.5 \text{ W/m}^2/^\circ\text{C}$.

Problema 7 (febrero 2015, Termotecnia. Grado en Ingeniería Mecánica)

Considere la conducción unidimensional en una pared plana compuesta. Las superficies externas se exponen a un fluido a 25°C y un coeficiente de transferencia de calor de $1000 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$. La pared intermedia B experimenta una generación uniforme de calor \dot{Q}^*_B , mientras que no hay generación en las paredes A y C. Las temperaturas de las interfaces son $t_1 = 261^{\circ}\text{C}$ y $t_2 = 211^{\circ}\text{C}$.

Los espesores y conductividades de cada pared son: $k_A = 25 \text{ W/m}/^{\circ}\text{C}$. $k_C = 50 \text{ W/m}/^{\circ}\text{C}$. $L_A = 30 \text{ mm}$. $L_B = 30 \text{ mm}$. $L_C = 20 \text{ mm}$.

Se pide determinar la generación volumétrica de calor \dot{Q}^*_B , y la conductividad térmica k_B



Problema 8

Se va a construir una pared de 5 cm de espesor con un material que tiene una conductividad térmica de $1.5 \text{ W/m}/^{\circ}\text{C}$. Se va a aislar la pared con un material que tiene una conductividad térmica media de $0.35 \text{ W/m}/^{\circ}\text{C}$, de modo que la pérdida de calor no superará el valor de 1800 W/m^2 . Suponiendo que las temperaturas de las superficies interna y externa de la pared aislada son 1300°C y 30°C , calcúlese el espesor de aislante necesario.

Problema 9

Una tubería de acero de 7 cm de diámetro exterior está recubierta por un aislamiento de 5 mm de asbesto ($k = 0.166 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$), seguido de una capa de 2.5 cm de fibra de vidrio ($k=0.048 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$). La temperatura de la pared de la tubería es 315°C , y la temperatura del exterior del aislamiento es 30°C . Calcúlese la temperatura de la interfaz entre el asbesto y la fibra de vidrio.

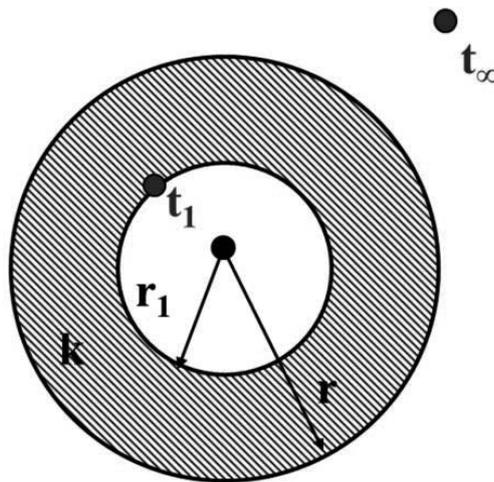
7. SOLUCIÓN A LOS EJERCICIOS DE AUTOCOMPROBACIÓN**Problema 1**

Figura. Corte de una esfera. La zona rallada se refiere a material aislante, de conductividad k

La transmisión de calor en la esfera es, supuesto conocido t_1 :

$$\dot{q} = \frac{4\pi \cdot (t_1 - t_\infty)}{\frac{1}{k} \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r}\right) + \frac{1}{h_e \cdot r^2}}$$

Derivando respecto del radio r :

$$\frac{\partial \dot{q}}{\partial r} = - \frac{4\pi \cdot (t_1 - t_\infty)}{\left[\frac{1}{k} \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r}\right) + \frac{1}{h_e \cdot r^2}\right]^2} \cdot \left[\frac{1}{k \cdot r^2} - \frac{2r}{h_e \cdot r^4}\right] = 0 \rightarrow r = \frac{2 \cdot k}{h_e}$$