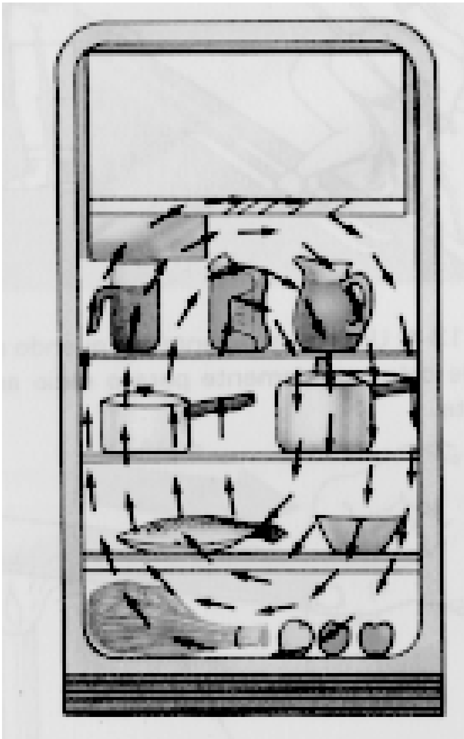
INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

CAMPUS SÃO JOSÉ

ÁREA TÉCNICA DE
REFRIGERAÇÃO E
CONDICIONAMENTO DE AR



TRANSFERÊNCIA DE CALOR (TCL)

Volume I – Parte 2

Prof. Carlos Boabaid Neto, M. Eng.

2010

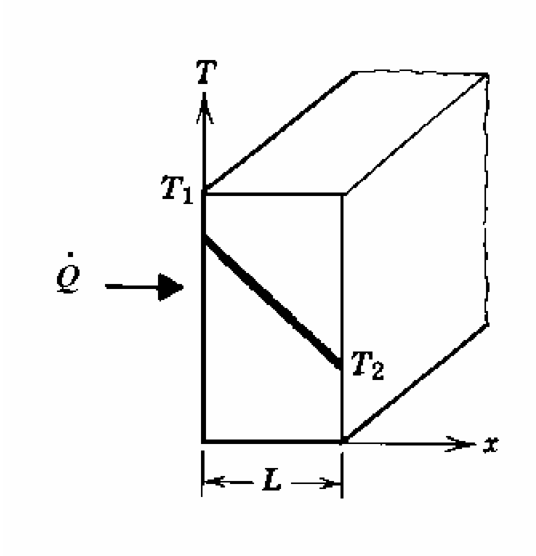
ÍNDICE

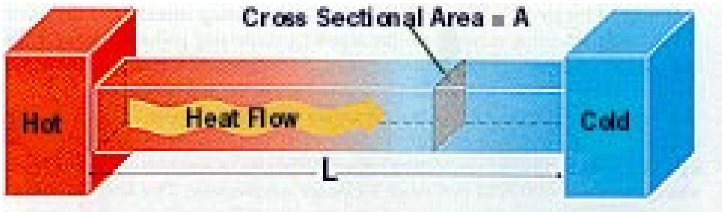
CAPÍTULO 2 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO

Como visto, a condução está associada à transferência de calor por difusão nos corpos sólidos, ou seja, sem a movimentação das moléculas. Do ponto de vista prático, interessa-nos poder calcular a quantidade de calor que é transferida pelo mecanismo da condução.

2.1 - A EQUAÇÃO DA CONDUÇÃO DO CALOR

Considere um objeto sólido (como por exemplo uma placa plana), de espessura L, cujas faces estejam às temperaturas T_1 e T_2, sendo que $T_1 > T_2$.





Então, existirá através da placa um fluxo de calor, expresso pela *Lei de Fourier*:

$$\dot{q} = k.\frac{\Delta T}{L} \qquad (2.1)$$

onde: $\Delta T = T_1 - T_2$ é a diferença de temperatura entre as faces da placa, [°C] ou [K]

L = espessura da parede, [m]

$\dot{q}$ = *fluxo* de calor, $\left[W/m^2 \right]$

k = constante de proporcionalidade, chamada de **condutividade térmica**, e que depende do material de que é feita a placa $\left[\frac{W}{m.K} \right]$

Note que o fluxo de calor representa a taxa de transferência de calor por unidade de área, ou seja, por cada metro quadrado de área superficial da parede.

A taxa de transferência de calor total, através da parede, será obtida multiplicando-se o fluxo de calor pela área superficial da parede, ou seja:

$$\dot{Q} = k.A.\frac{\Delta T}{L} \qquad (2.2)$$

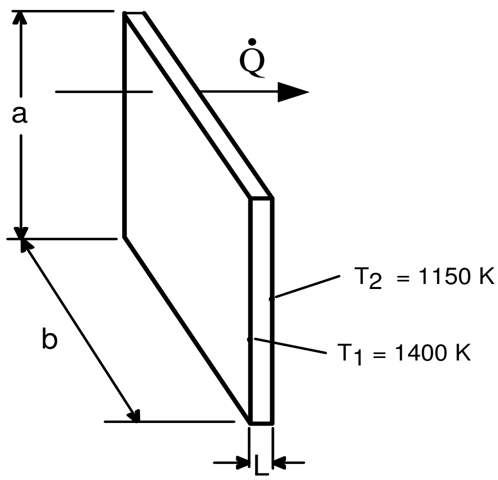
onde: A = área transversal da parede, [m²]

$\dot{Q}$ = taxa de transferência de calor, [W]

Exemplo

2.1. A parede de um forno industrial é construída de um tijolo de 0,15 m de espessura, com condutividade térmica de 1,7 W/m.K. As temperaturas nas faces interna e externa da parede são respectivamente 1400 e 1150 K. Qual é a perda de calor através de uma parede de 0,5 m por 3 m?

<u>Dados</u>: $L = 0,15$ m
$k = 1,7$ W/m.K
$T_1 = 1400$ K
$T_2 = 1150$ K



A área superficial da parede é dada por:
$A = a \times b$

onde: $a = 0,5$ m $b = 3,0$ m
Assim,
$A = a \times b = 0,5 \times 3,0$
$A = 1,5$ m²

<u>Solução</u>. como a transferência de calor através da parede é por condução, o fluxo de calor pode ser dado pela Lei de Fourier, eq. (2.1):

$$\dot{q} = k.\frac{(T_1 - T_2)}{L} = 1,7 \times \frac{(1400 - 1150)}{0,15} = 2833 \ \mathrm{W/m^2}$$

O valor acima representa a quantidade de calor que passa por cada metro quadrado da parede. A quantidade total de calor será, então,

$$\dot{Q} = \dot{q}.A = 2833 \times 1,5 = 4250 \ \mathrm{W}$$

2.2. Uma face de uma placa de cobre de 3 cm de espessura é mantida a 400 °C, e a outra face é mantida a 100 °C. Qual o fluxo de calor através da placa? A condutividade térmica do cobre é de 401 W/m.K.

<u>Dados</u>: $L = 3$ cm $= 0,03$ m $k = 401$ W/m.K $\Delta T = 400 - 100 = 300$ °C

<u>Solução</u>. Pede-se o fluxo de calor através da placa, que pode ser calculado pela Lei de Fourier:

$$\dot{q} = k.\frac{\Delta T}{L} = 401 \times \frac{300}{0,03} = 4010000 \ \mathrm{W/m^2} = 4,01 \ \mathrm{MW/m^2}$$

2.3. Deseja-se que o fluxo de calor através de um bloco de amianto (k = 0,74 W/m.K) seja de 5000 W/m², para uma diferença de temperatura de 200 °C entre as faces do bloco. Qual deve ser a espessura do bloco?

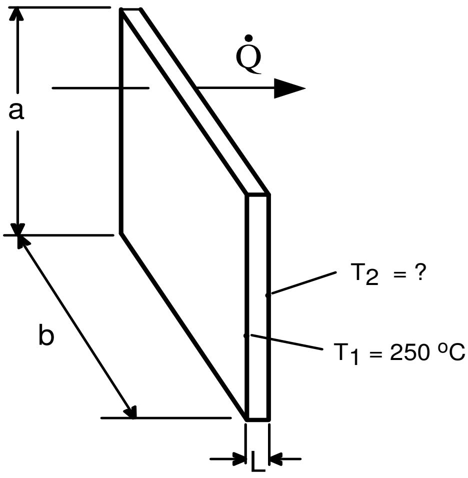
<u>Dados</u>: $k = 0,74$ W/m.K $\Delta T = 200$ °C $\dot{q} = 5000$ W/m²

<u>Solução</u>. Pede-se a espessura da placa, L. Utilizaremos novamente a Lei de Fourier:

$$\dot{q} = k.\frac{\Delta T}{L} \quad \rightarrow \quad L = \frac{k.\Delta T}{\dot{q}} = \frac{0,74 \times 200}{5000} = 0,0296 \ \mathrm{m} = 2,96 \ \mathrm{cm}$$

2.4. Através de uma placa de aço carbono (k = 60,5 W/m.K) de 50 por 75 cm, com 2 cm de espessura, existe uma taxa de transferência de calor da ordem de 2500 W. A temperatura de uma face da placa é 250 °C. Calcule a temperatura da outra face da placa.

Dados: $L = 2\ cm = 0{,}02\ m$
$k = 60{,}5\ W/m.K$
$T_1 = 250\ °C$
$\dot{Q} = 2500\ W$



A área superficial da parede é dada por:
$A = a \times b$

onde: $a = 50\ cm = 0{,}50\ m$
$b = 75\ cm = 0{,}75\ m$

Assim,
$A = a \times b = 0{,}50 \times 0{,}75$
$A = 0{,}375\ m^2$

Solução. Pede-se a temperatura T_2 da outra face da placa. Inicialmente, utilizemos a equação (2.2) para calcular ΔT:

$$\dot{Q} = k.A.\frac{\Delta T}{L} \quad \rightarrow \quad \Delta T = \frac{\dot{Q}.L}{k.A} = \frac{2500 \times 0{,}02}{60{,}5 \times 0{,}375} = 2{,}204\ °C$$

Como: $\Delta T = T_1 - T_2 \quad \rightarrow \quad T_2 = T_1 - \Delta T = 250 - 2{,}204 = 247{,}8\ °C$

2.2 - CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Conforme afirmado, a condutividade térmica é uma propriedade de cada material, que depende de sua estrutura molecular, de sua densidade, e também da temperatura.

O valor da condutividade térmica de cada material é definido experimentalmente, aplicando-se a própria definição da Lei de Fourier (equação 2.1):

$$k = \frac{\dot{q}}{\left(\frac{\Delta T}{L}\right)} \equiv \frac{\left(\frac{\dot{Q}}{A}\right)}{\left(\frac{\Delta T}{L}\right)} \tag{2.3}$$

Ou seja, por meio de procedimentos experimentais em laboratório, podem ser feitas medições para a determinação da condutividade térmica dos diferentes materiais.

A Tabela 2.1 relaciona valores típicos de condutividade térmica para alguns materiais, a 0°C, para efeitos comparativos. No caso dos fluídos (líquidos e gases), a medição da condutividade exige que estes estejam confinados em pequenas cavidades, de forma que a convecção não possa ocorrer.

Tabela 2.1 - Valores de condutividade térmica a 0 °C

Tipo de materia	Material	condutividade térmica k [W/m.K]
METAL	prata	410
	cobre	385
LÍQUIDO (parado)	água	0,556
	Freon 12	0,073
GÁS (parado)	ar	0,024
	dióxido de carbono	0,0146
MATERIAL ISOLANTE	fibra de vidro	0,035
	espuma de uretano	0,024

Observe que:

alta condutividade térmica $\rightarrow$ material *"condutor"*
baixa condutividade térmica $\rightarrow$ material *"isolante"*

Da tabela acima nota-se que os metais são muito melhores condutores do que líquidos e gases. Isto era de se esperar, pois nos metais as moléculas estão rigidamente ligadas, e muito mais próximas uma das outras (alta densidade), facilitando a difusão de calor. Materiais isolantes normalmente tem uma densidade muito baixa, razão pela qual não conduzem bem o calor. Então, em geral:

elevada massa específica $\rightarrow$ maior condutividade
baixa massa específica $\rightarrow$ menor condutividade

Em geral a condutividade térmica apresenta uma forte dependência com a temperatura. Por exemplo, para os gases esta dependência é direta, ou seja, quanto maior a temperatura, maior a condutividade. Isto é lógico, porque, quanto maior a temperatura, maior o grau de agitação das moléculas, e maior a velocidade com que o calor se propaga por difusão. Já para os líquidos, a relação nem sempre é direta. Isso porque nos líquidos existe a influência de forças moleculares. Nos metais, a relação também varia de um metal para outro.

As Tabelas das páginas a seguir fornecem valores de condutividade térmica para uma ampla gama de materiais.

Observando a Tabela 2.2, pode-se observar que o cobre e o alumínio são os metais melhores condutores. É o motivo pelo qual estes metais são os mais utilizados em trocadores de calor. O cobre não pode ser utilizado puro, pois é pouco resistente. Por isto são utilizadas ligas metálicas (misturas de 2 ou mais metais) à base de cobre, como por exemplo o bronze.

Tabela 2.2 - Condutividade térmica: metais

Material / Composição	Propriedades a 300 K	
	ρ [kg/m^3]	k [W/m.K]
Alumínio		
Puro	2702	237
Duralumínio (96% Al, 4% Cu, Mg)	2787	164
Liga comercial 2024-T6	2770	177
Liga 195, fundida	2790	168
Chumbo	11340	35,3
Cobre, puro	8933	401
Bronze comercial (90% Cu, 10% Al)	8800	52
Latão 71 (70%Cu, 30% Zn)	8530	110
Cromo	7160	93,7
Estanho	7310	66,6
Ferro, puro	7870	80,2
Ferro Armco (99,75% puro)	7870	72,7
Aço carbono	7854	60,5
AISI 1010	7832	63,9
Aço de baixo cromo	7882	37,7
Aços INOX		
AISI 302	8055	15,1
AISI 304	7900	14,9
AISI 316	8238	13,4
Magnésio	1740	156
Níquel, puro	8900	90,7
Platina, pura	21450	71,6
Zinco	7140	116

Tabela 2.3 - Condutividade térmica: materiais estruturais e de acabamento

Material / Composição	Temp. [°C]	k [W/m.K]	ρ [kg/m³]
Asfalto	20 - 55	0,74 - 0,76	
Tijolo:			
comum (argila)	20	0,69	1600
de concreto, 10 cm, furado		0,20	
de concreto, 20 cm, furado		0,13	
refratário, queimado a 1330 °C	500	1,04	2000
refratário, queimado a 1450 °C	500	1,28	2300
Cimento Portland		0,29	1500
argamassa	23	1,16	
Argamassa			
cimento com areia		0,72	
gesso com areia		0,80	
Concreto simples		0,72	
Emboço em gesso	20	0,48	1440
armação de metal	20	0,47	
sarrafo de madeira	20	0,28	
Reboco comum	20	2,78	
Pedra			
granito		1,73 - 3,98	2640
calcáreo	100 - 300	1,26 - 1,33	2500
mármore		2,07 - 2,94	2500 - 2700
arenito	40	1,83	2160 - 2300
Madeira (perpendicular ao sentido das fibras)			
balsa	30	0,055	140
pau de cipreste	30	0,097	460
pinho	23	0,11	420
carvalho	30	0,166	540
pinheiro amarelo	23	0,147	640
pinheiro braco	30	0,112	430
Vidro de janela	20	0,78	2700
borosilicato	30 - 75	1,09	2200

Tabela 2.4 - Condutividade térmica: materiais isolantes p/ construção civil

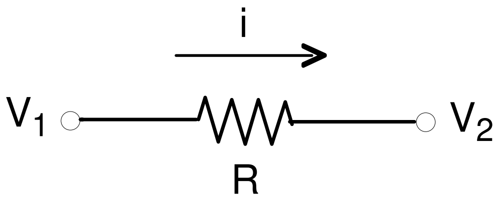
Material / Composição	Temp. [°C]	k [W/m.K]	ρ [kg/m^3]
Amianto			
não-compactado	-45	0,149	
	0	0,154	470 - 570
	100	0,161	
chapa de cimento amianto	20	0,74	
Folhas	51	0,166	
feltro, 40 laminações por polegada	38	0,057	
	150	0,069	
feltro, 20 laminações por polegada	38	0,078	
	150	0,095	
corrugado, 4 dobras por polegada	38	0,087	
	93	0,100	
cimento amianto		2,08	
Papelão, ondulado		0,064	
Prancha de cortiça	30	0,043	160
Cortiça, granulada	32	0,045	45 - 120
moída	32	0,043	150
Feltro de crina	30	0,036	130 - 200
Feltro de lã	30	0,052	330
Cartão de fibra isolante	20	0,048	240
Fibra de vidro		0,035	
Lã de vidro	23	0,038	24
Lã de rocha	32	0,032 a 0,040	160
não compactada	150	0,074	64
	260	0,080	
Serragem	23	0,059	
Aparas de madeira	23	0,059	
Sílica aerogel	32	0,024	140
Poliestireno expandido (EPS)	27	0,029	
EPS comercial (15 kg/m²)		0,041	
EPS comercial (30 kg/m²)		0,035	
Poliuretano	27	0,024	
Isoflex		0,045	
blocos p/ construção c/ isolamento		0,138 a 0,23	

Tabela 2.5 - Condutividade térmica: tipos de isolantes e aplicações

Tipo	Temp. [°C]	k [mW/m.°C]	ρ [kg/m³]	Aplicação
Superisolante evacuado	-240 a 1.100	0,0015 - 0,72	variável	diversas
Espuma de uretano	-180 a 150	16 – 20	25 - 48	tubos quentes e frios
Espuma de uretano	-170 a 110	16 – 20	32	tanques
Prancha e bloco de espuma de uretano	100 a 150	16 – 20	24 - 65	tubulações
Manta de fibra de vidro p/ revestimento	-80 a a290	22 - 78	10 - 50	tubos e conexões
Manta de fibra de vidro	-170 a 230	25 - 86	10 - 50	tanques e equipamentos
Contorno pré-moldado de fibra de vidro	-50 a 230	32 - 55	10 - 50	tubulações
Manta de fibra de vidro com barreira contra condensação	-5 a 70	29 - 45	10 - 32	linhas de refrigerante
Jaqueta de fibra de vidro sem barreira contra condensacão	até 250	29 - 45	24 - 48	tubulações quentes
Placa de fibra de vidro	60 a 370	30 - 55	10 - 50	tubos e conexões
Folha de elastômero	-40 a 100	36 - 39	70 - 100	tanques
Contorno pré-moldado de elastômero	-40 a 100	36 - 39	70 - 100	tubos e conexões
Bloco de vidro celular	-200 a 200	29 - 108	110 - 150	tanques e tubos
Prancha e bloco de vidro celular	20 a 500	29 - 108	110 - 150	tubulações quentes
Contorno pré-moldado de fibra mineral	até 650	35 - 91	125 - 160	tubulacões quentes
Manta de fibra mineral	até 750	37 - 81	125	tubulações quentes
Bloco de fibra mineral	até 1.100	52 - 130	210	tanques e caldeiras
Bloco de lã mineral	450 a 1.000	52 - 130	175 - 290	tubulações quentes
Prancha de bloco de silicato de cálcio	230 a 1.000	32 - 85	100 - 160	tubulacões, cal-deiras, revestimento de chaminés

2.3 - ANALOGIA ELÉTRICA: A RESISTÊNCIA TÉRMICA DE CONDUÇÃO

No estudo da eletricidade, observa-se que, havendo uma diferença de potencial elétrico ΔV entre as extremidades de um condutor elétrico de resistência R, existirá uma corrente elétrica i através do condutor, dada pela "Lei de Ohm":



$$V_1 > V_2$$
$$\Delta V = V_1 - V_2 \quad > 0$$

$$i = \frac{\Delta V}{R} \tag{2.3}$$

A Lei de Fourier pode ser vista de uma maneira conceitualmente similar. A diferença de temperatura através de um material é a função potencial ou motora, ou seja, é a "força" que faz com que exista uma transferência de calor através deste material, similarmente à diferença de potencial elétrico. A transferência de calor seria o fenômeno "induzido" pela diferença de temperatura, similar à corrente elétrica. A combinação da condutividade térmica, espessura de material e área, representariam a "resistência térmica" à passagem do calor. Assim, a transferência de calor pode ser entendida como um fenômeno similar à eletricidade:

$$\left\{\begin{array}{c}\text{Taxa de}\\ \text{transferência}\\ \text{de calor}\end{array}\right\} = \left\{\frac{\begin{array}{c}\text{diferença de}\\ \text{potencial térmico}\end{array}}{\begin{array}{c}\text{resistência}\\ \text{térmica}\end{array}}\right\}$$

Reescrevendo a equação (2.2), teríamos:

$$\dot{Q} = \frac{k.A}{L}.\Delta T \qquad \rightarrow \qquad \dot{Q} = \frac{\Delta T}{\left(\dfrac{L}{k.A}\right)} \tag{2.4}$$

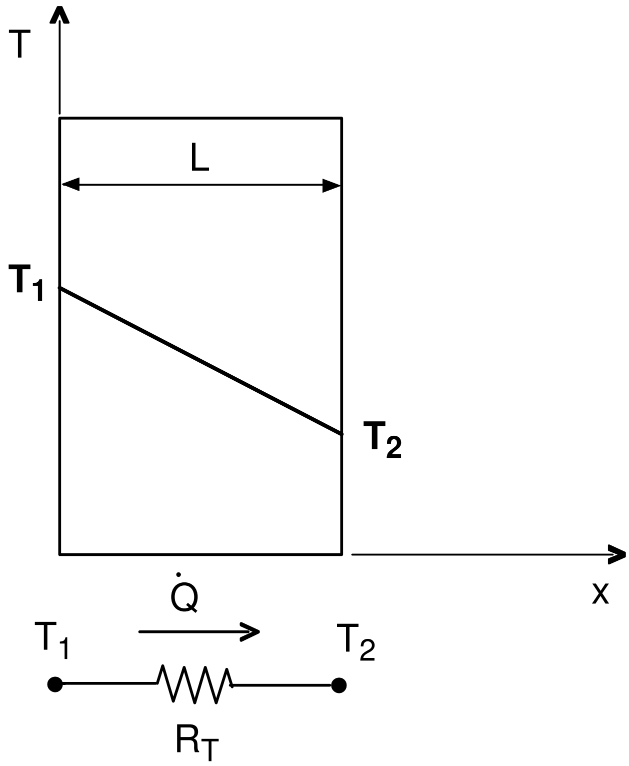
Note a semelhança entre as equações (2.3) e (2.4). Desta maneira, pode-se reescrever a equação (2.4) como:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_T} \tag{2.5}$$

A quantidade (L / k.A) é então conhecida como a **resistência térmica de condução**:

$$R_T = \frac{L}{k.A} \qquad \left[\frac{K}{W}\right] \text{ ou } \left[\frac{^\circ C}{W}\right] \tag{2.6}$$

Assim, teremos para o problema da transferência de calor por condução a seguinte analogia elétrica:



Exemplo

2.5. Calcular a resistência térmica de condução de uma parede de alvenaria, de 2,5 por 3,0 m, cuja espessura é de 30 cm? A condutividade térmica da alvenaria é de 1,0 W/m.K.

<u>Dados</u>: L = 30 cm = 0,30 m A = 2,5 x 3,0 = 7,5 m²
k = 1,0 W/m.K

<u>Solução</u>. A resistência térmica de condução é dada pela equação (2.6):

$$R_T = \frac{L}{k.A} = \frac{0,30}{1,0 \times 7,5} = 0,04 \quad K/W$$

2.6. Qual a taxa de transferência de calor na parede do exemplo anterior, se for submetida a uma diferença de temperatura de 30 °C entre suas faces?

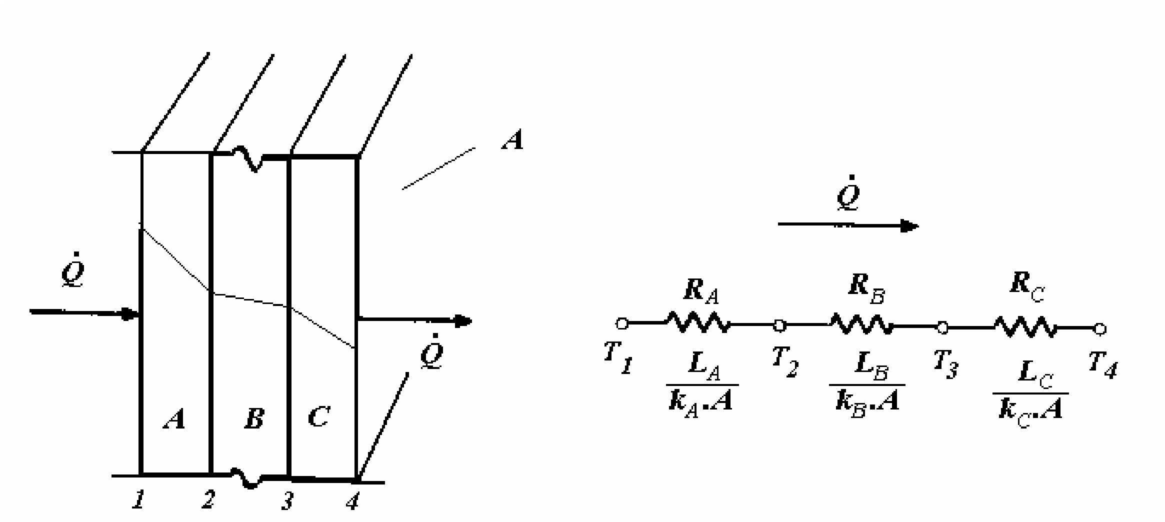
<u>Dados</u>: $\Delta T = 30$ °C $R_T = 0,04$ K/W

<u>Solução</u>. Como já dispomos da resistência térmica da parede, podemos utilizar diretamente a equação (2.5):

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_T} = \frac{30}{0,04} = 750 \text{ W}$$

2.4 - PAREDES COMPOSTAS

A analogia elétrica pode ser agora empregada para a solução de problemas mais complexos. Imagine o caso onde mais de um material está presente, como é o caso da parede abaixo, que chamamos de *parede composta*:



A taxa de transferência de calor pode ser dada por:

$$\dot{Q} = k_A.A.\frac{(T_1 - T_2)}{L_A} = k_B.A.\frac{(T_2 - T_3)}{L_B} = k_C.A.\frac{(T_3 - T_4)}{L_C}$$

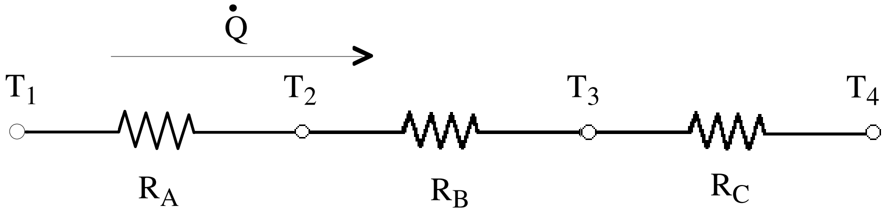
onde A é a área da seção transversal das paredes (igual para todas).

Observe que não seria possível determinar a taxa de transferência por qualquer uma das equações acima, pois as temperaturas internas à parede (T_2 e T_3) não podem ser medidas. Porém, a taxa deve ser a mesma através de todas as seções da parede. Combinando as equações, a taxa de transferência de calor é dada por:

$$\dot{Q} = \frac{(T_1 - T_4)}{\frac{L_A}{k_A.A} + \frac{L_B}{k_B.A} + \frac{L_C}{k_C.A}} \tag{2.7}$$

Tem-se agora uma equação que pode ser resolvida, pois depende apenas das características geométricas, da condutividade do material de cada seção, e das temperaturas das faces externas (T_1 e T_4).

Vamos analisar o problema do ponto de vista da analogia elétrica. A situação física da figura acima poderia ser representada pela seguinte associação de resistores:



onde:

$$R_A = \frac{L_A}{k_A.A} \qquad R_B = \frac{L_B}{k_B.A} \qquad R_C = \frac{L_C}{k_C.A} \tag{2.8}$$

Comparando as equações (2.7) e (2.8), é fácil comprovar que:

$$\dot{Q} = \frac{(T_1 - T_4)}{R_A + R_B + R_C} \tag{2.9}$$

ou, em outros termos:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T_{total}}{R_{total}} \tag{2.10}$$

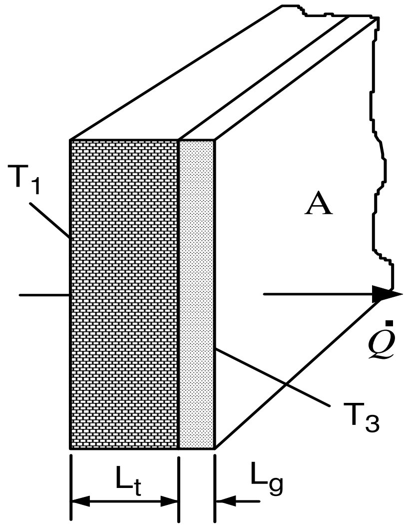
onde ΔT_{total} seria a diferença de temperatura ao longo de toda a parede, ou seja, entre as duas faces mais externas da parede, e:

$$R_{total} = R_A + R_B + R_C \tag{2.11}$$

Exemplo

2.7. A parede externa de uma casa é composta por uma camada de 20 cm de espessura de tijolo comum e uma camada de 5 cm de gesso. Qual a taxa de transferência de calor por unidade de área, se a face externa da parede se encontra à 35 °C e a face interna à 20 °C?

<u>Dados</u>: A situação física é representada na figura ao lado, onde:



$L_t = 20$ cm $= 0{,}20$ m

$L_g = 5$ cm $= 0{,}05$ m

$T_1 = 35$ °C $T_2 = 20$ °C

e $A = 1$ m²

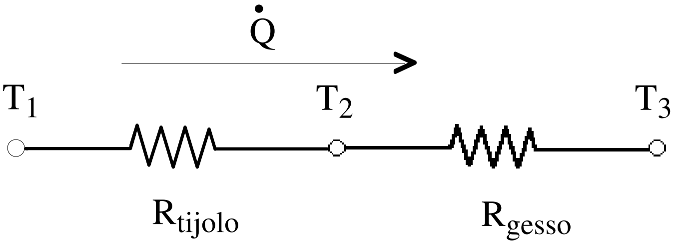
Da Tabela 2.4

$k_{tijolo} = 0{,}69$ W/m.K

$k_{gesso} = 0{,}48$ W/m.K

<u>Solução</u>. A situação física acima indicada pode ser representada pela asociação de resistências mostrada a seguir, onde:

$$\dot{Q} = \frac{(T_1 - T_3)}{R_{total}}$$



com:

$$R_{total} = R_{tijolo} + R_{gesso}$$

$$R_{tijolo} = \frac{L_t}{k_{tijolo}.A} = \frac{0{,}20}{0{,}69 \times 1{,}0} = 0{,}29 \ \text{K/W}$$

$$R_{gesso} = \frac{L_g}{k_{gesso}.A} = \frac{0{,}05}{0{,}48 \times 1{,}0} = 0{,}104 \ \text{K/W}$$

Assim:

$$R_{total} = 0{,}29 + 0{,}104 = 0{,}394 \text{ K/W} \qquad \dot{Q} = \frac{(35 - 20)}{0{,}394} = 38{,}0 \text{ W}$$

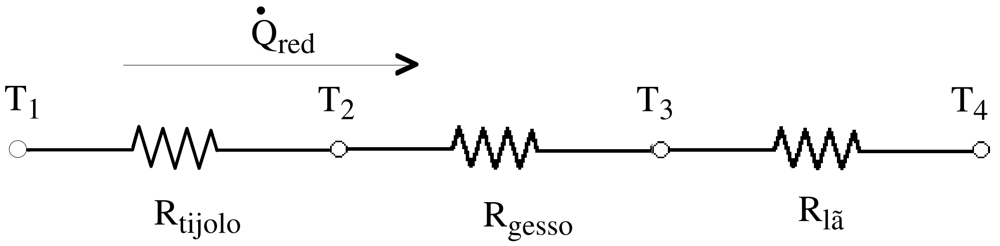
2.8. No problema anterior, qual a espessura de isolamento de lã de rocha (k = 0,065 W/m.K) que deve ser adicionada à parede, para se reduzir a transferência de calor em 80%?

<u>Dados</u>: Deseja-se reduzir a transferência de calor em 80%, ou seja, a transferência de calor reduzida deverá ser 20% do valor encontrado no problema anterior, ou seja:

$$\dot{Q}_{red} = 0{,}20 \times 38 = 7{,}6 \text{ W}$$

Além disso, $k_{lã} = 0{,}065$ *W/m.K*

<u>Solução</u>. Adiciona-se agora uma camada extra à parede, que seria então representada pela seguinte associação:



O diferencial de temperatura permanece o mesmo. Assim: $T_1 = 35$ ℃ *e* $T_4 = 20$ ℃
Conhece-se a taxa de transferência desejada. Dessa forma, pode-se calcular a resistência total necessária para fornecer esta taxa:

$$\dot{Q}_{red} = \frac{(T_1 - T_4)}{R_{total}} \qquad \rightarrow \qquad R_{total} = \frac{(T_1 - T_4)}{\dot{Q}_{red}} = \frac{(35-20)}{7{,}6} = 1{,}974 \text{ K/W}$$

A resistência adicional deverá ser fornecida pela camada de lã de rocha:

$$R_{total} = R_{tijolo} + R_{gesso} + R_{lã} \qquad \rightarrow \qquad R_{lã} = R_{total} - R_{tijolo} - R_{gesso}$$

As resistências da porção de tijolo e de gesso permanecem a mesma, pois não foram feitas alterações geométricas. Assim:

$$R_{lã} = 1{,}974 - 0{,}29 - 0{,}104 = 1{,}58 \text{ K/W}$$

Porém,

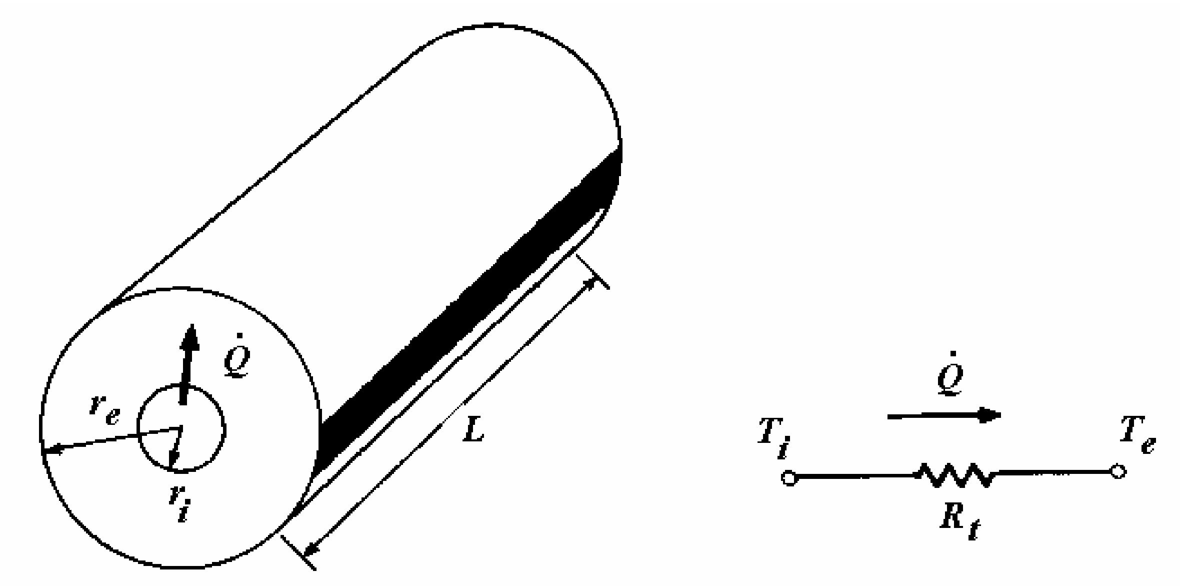
$$R_{lã} = \frac{L_{lã}}{k_{lã}.A} \qquad \rightarrow \qquad L_{lã} = R_{lã}.k_{lã}.A = 1{,}58 \times 0{,}065 \times 1{,}0 = 0{,}103 \text{ m}$$

Uma lâmina de 10,3 cm de espessura de lã de rocha será necessário para conseguir a redução desejada.

2.5 - SISTEMAS RADIAIS

Considere um cilindro de raio interno r_i , raio externo r_e e comprimento L, tal como mostrado na figura a seguir. Este cilindro é submetido a um diferencial de temperatura (T_i – T_e), onde T_i é a temperatura da superfície interna do tubo, e T_e a temperatura da superfície externa.

Pode-se considerar que o calor é transmitido na direção radial. Para calcular a taxa de transferência de calor para esta situação física, mais uma vez utilizar-se-á a Lei de Fourier. Porém, observe que, neste caso, a área da seção através da qual flui o calor varia continuamente com o raio. Aplicando-se procedimentos matemáticos adequados, chega-se a seguinte equação:

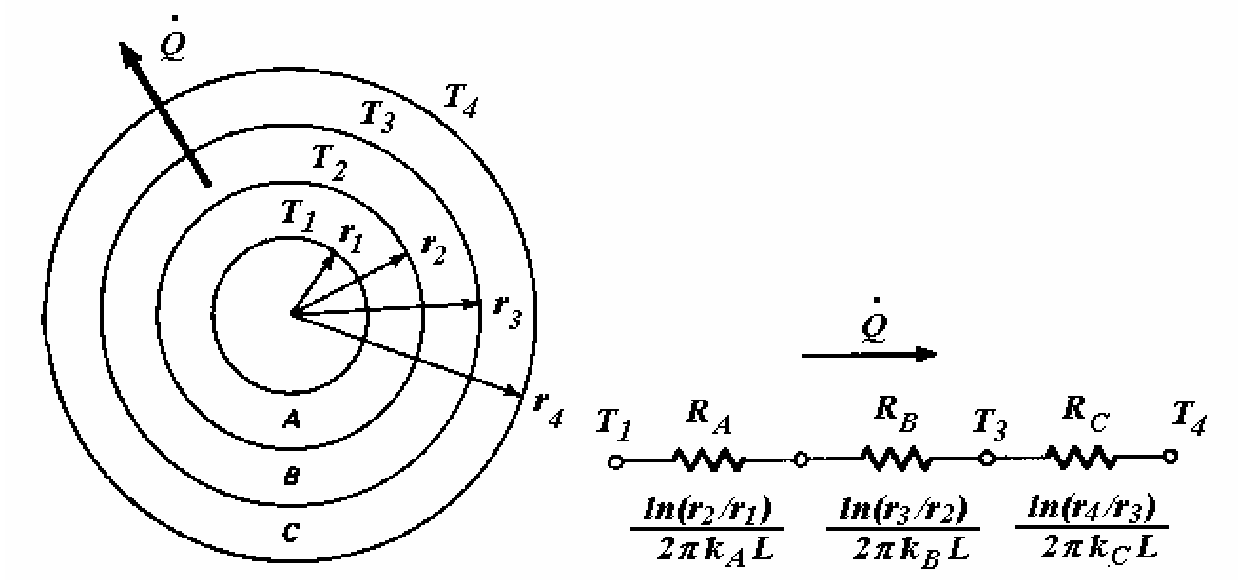


$$\dot{Q} = \frac{2.\pi.k.L.(T_i - T_e)}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)} \tag{2.12}$$

onde a notação *ln* significa o logaritmo natural da razão (r_e / r_i). A resistência térmica nesse caso é:

$$R_t = \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2.\pi.k.L} \tag{2.13}$$

Novamente, o conceito de resistência térmica pode ser usado para paredes cilíndricas compostas, da mesma maneira que para paredes planas. Por exemplo, para o sistema de três camadas apresentado na figura a seguir a solução é dada pela equação (2.10):



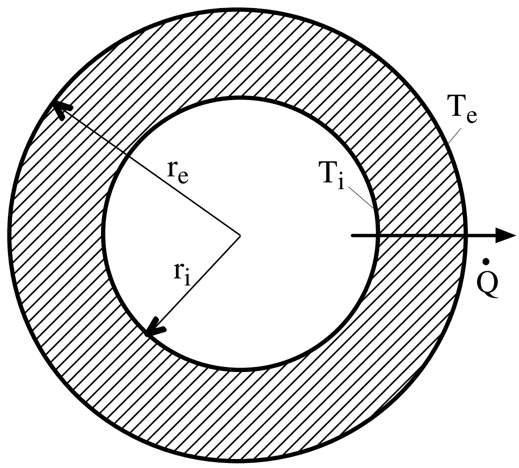
$$\dot{Q} = \frac{\Delta T_{total}}{R_{total}} = \frac{(T_1 - T_4)}{R_A + R_B + R_C}$$

onde:

$$R_A = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2.\pi.k_A.L} \qquad R_B = \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2.\pi.k_B.L} \qquad R_C = \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2.\pi.k_C.L}$$

Exemplo

2.10. Um tubo de aço carbono (k = 60,5 W/m.°C) de 10 cm de diâmetro externo e 2 cm de espessura conduz vapor d'água superaquecido. Se a temperatura da parede interna do tubo é mantida a 200 °C e a superfície externa se encontra a 20 °C, calcule a perda de calor por metro de comprimento de tubo.



Dados: A situação física é demonstrada pela figura ao lado, com:

t = 2 cm = 0,02 m
D_e = 10 cm = 0,1 m   L = 1 m
k = 60,5 W/m.°C
T_i = 200 °C T_e = 20 °C

Sabe-se que:

$$\mathbf{r_e = \frac{D_e}{2} = \frac{0,1}{2} = 0,05\ m}$$

e

$$\mathbf{r_i = r_e - t = 0,05 - 0,02 = 0,03\ m}$$

Solução. Podemos aplicar diretamente a equação (2.12):

$$\dot{Q} = \frac{2.\pi.k.L.(T_i - T_e)}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)} = \frac{2\times\pi\times 60,5\times 1\times(200-20)}{\ln\left(\frac{0,05}{0,03}\right)}$$

$$\dot{Q} = \frac{380,13\times(180)}{\ln(1,667)} = \frac{68423,4}{0,511} = 133894,3\ W = 133,9\ kW$$

Ou seja, 133,9 kW de calor estarão sendo transferidos para o ambiente, a cada metro de tubo. Observe que a perda de calor é significativa. De fato, sempre que temos a situação física acima (tubo de aço conduzindo vapor d'água) é utilizado isolamento térmico para se reduzir esta perda, como mostra o exemplo a seguir.

2.11. Um tubo de parede grossa de aço inoxidável (k = 19 W/m.°C) com 2 cm de diâmetro interno e 4 cm de diâmetro externo é coberto com uma camada de 3 cm de isolamento de amianto (k = 0,2 W/m.°C). Se a temperatura da parede interna do tubo é mantida a 600 °C e a superfície externa do isolamento a 100 °C, calcule a perda de calor por metro de comprimento.

Dados: A situação física é representada na figura ao lado, onde:

T_1 = 600 °C T_3 = 100 °C

$k_{aço}$ = 19 W/m.°C

k_{ami} = 0,2 W/m.°C

t_{ami} = 3 cm = 0,03 m

$D_{e,aço}$ = 4 cm = 0,04 m

$D_{i,aço}$ = 2 cm = 0,02 m

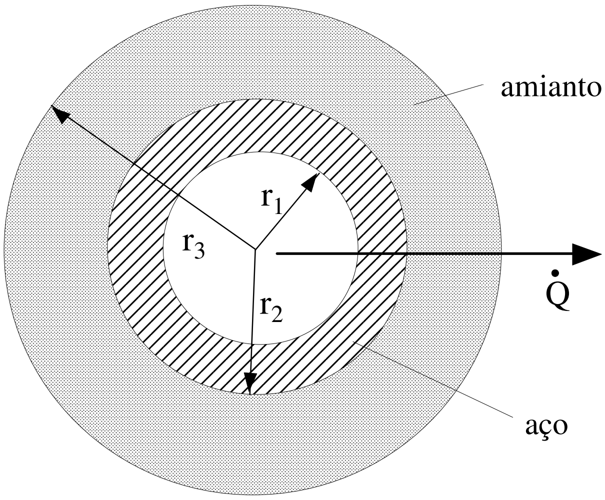
L = 1 m

<u>Solução</u>. Vamos inicialmente calcular o valor dos raios mostrados na figura:

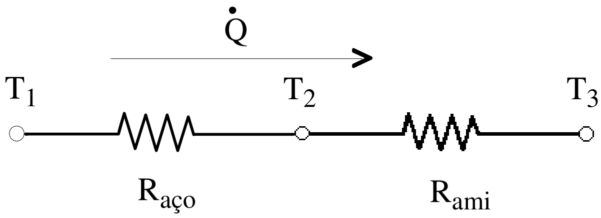
$$r_1 = \frac{D_{i,aço}}{2} = \frac{0,02}{2} = 0,01\ m$$

$$r_2 = \frac{D_{e,aço}}{2} = \frac{0,04}{2} = 0,02\ m$$

$$r_3 = r_2 + t_{ami} = 0,02 + 0,03 = 0,05\ m$$



O problema físico pode ser representado pela seguinte analogia elétrica:



onde:

$$\dot{Q} = \frac{(T_1 - T_3)}{R_{aço} + R_{ami}}$$

Calculemos o valor das resistências:

$$R_{aço} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2.\pi.k_{aço}.L} = \frac{\ln\left(\frac{0,02}{0,01}\right)}{2\times\pi\times 19\times 1} = \frac{0,693}{119,38} = 5,805\times 10^{-3}\ \frac{K}{W}$$

$$R_{ami} = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2.\pi.k_{ami}.L} = \frac{\ln\left(\frac{0,05}{0,02}\right)}{2\times\pi\times 0,2\times 1} = \frac{0,9163}{1,2566} = 0,729\ \frac{K}{W}$$

Observe como a resistência térmica do amianto é muito maior que a do aço. Então:

$$\dot{Q} = \frac{(T_1 - T_3)}{R_{aço} + R_{ami}} = \frac{(600 - 100)}{0,005805 + 0,729} = \frac{500}{0,7348} = 680,45\ W$$

Ou seja, 680,45 W de calor estarão sendo perdidos a cada metro de tubo. Observe que é um valor muito menor que o do exemplo anterior, apesar de a diferença de temperatura entre o lado interno e externo ser significativamente maior.

EXERCÍCIOS

2.1. Defina condutividade térmica. Explique como a mesma está relacionada com os mecanismos físicos da condução.

2.2. É mantida uma diferença de 75 °C através de uma manta de fibra de vidro de 11 cm de espessura. A condutividade térmica da fibra de vidro é 0,035 W/m °C. Calcule o fluxo de calor através do material, e a quantidade de calor transferido por m², em uma hora.
R.: $\dot{q}$ ***= 23,86 W/m²; Q = 85.909,09 J***

2.3. Um recinto é dotado de uma janela envidraçada, medindo 3,0m de comprimento e 1,5m de altura; a espessura do vidro é de 5,0mm. Nas faces interior e exterior as temperaturas do vidro são de +20°C e -5°C respectivamente. Qual o calor conduzido através do vidro em uma hora?
R.: Q = 63,18 MJ

2.4. Através de uma placa de material isolante de 2,5 cm de espessura, com condutividade térmica 0,3 W/m.°C, existe um fluxo de calor de 3 kW/m². Calcule a diferença de temperatura entre as faces do isolante.
R.: ΔT ***= 250 °C***

2.5. Uma placa de isolante térmico possui 100 cm² de seção transversal e 2 cm de espessura. Sua condutividade térmica é de 2 x 10^{-4} cal/s.cm.°C. Se a diferença de temperatura entre as faces é de 100°C, quantas calorias atravessa a placa por segundo? Qual é a taxa de transferência de calor, em watts?
R.: $\dot{Q}$ ***= 4,19 W***

2.6. Existe uma taxa de transferência de calor de 3 kW através de um material de isolamento, com uma área transversal de 10 m² e espessura de 2,5 cm. Se a superfície mais quente está a uma temperatura de 415 °C e a condutividade térmica do material isolante é de 0,2 W/m.K, qual é a temperatura da superfície mais fria?
R.: 377,5 °C

2.7. O fluxo de calor através de uma lâmina de madeira, de 50 mm de espessura, cujas superfícies interna e externa se encontram a 40 °C e 20 °C respectivamente, foi determinado como sendo de 40 W/m². Qual é a condutividade térmica desta madeira?
R.: 0,1 W/m².°C

2.8. As temperaturas interna e externa em um vidro de janela, de 5 mm de espessura, são 24°C e 38°C respectivamente. Qual a taxa de transferência de calor através de uma janela de 1 m por 3 m? A condutividade térmica do vidro é de 1,4 W/m.K
R.: $\dot{Q}$ ***= 11.760 W***

2.9. Uma câmara frigorífica possui 8m de comprimento por 4m de largura e 3m de altura. O fundo da câmara é apoiado sobre o solo e pode ser assumido como perfeitamente isolado. Qual é a espessura mínima de espuma de uretano (k = 0,026 W/m.K) que deve ser aplicada às superfícies do topo e dos lados do compartimento para garantir um ganho de calor menor que 500 W, quando as temperaturas interna e externa são respectivamente -10 °C e 35 °C? Desconsidere a presença de paredes estruturais, ou seja, considere que a câmara é feita apenas do material isolante.

R.: 24,34 cm

2.10. Uma parede de concreto em um prédio comercial tem uma área superficial de 30 m² e uma espessura de 0,30 m. No inverno, o ar ambiente (interno) deve ser mantido a 35 °C enquanto o ar externo encontra-se a -15 °C. Qual é a perda de calor através da parede? A condutividade do concreto é de 1 W/m.K.

R.: $\dot{Q}$ ***= 5 kW***

2.11. Uma amostra de determinada argamassa é testada em um equipamento de placa quente protegida. A amostra tem 35 x 35 cm de superfície, e 50 mm de espessura. Durante o teste, mediu-se uma diferença de temperatura de 19,7 °C entre as faces da amostra, quando a taxa de trasferência de calor na amostra é de 56 W. Determine a condutividade térmica desta argamassa.

R.: 1,16 W/m².°C

2.12. Calcule a resistência térmica de uma seção de parede de tijolo comum, de 4,5 m² de área e 30 cm de espessura. Qual a taxa de transferência de calor transferido através da parede, quando esta está submetida a uma diferença de temperatura de 23°C?

R.: R_{tij} ***= 0,0966 °C/W;*** $\dot{Q}$ ***= 238,05 W***

2.13. Um vidro duplo de janela é constituído por duas placas de vidro de 7mm de espessura, com um espaço selado cheio de ar entre elas, também com espessura de 7mm.

(a) monte o circuito elétrico equivalente e calcule a resistência térmica total do vidro (a condutividade térmica do ar estagnado (parado) é de 0,02624 W/m.K);

(b) qual a perda de calor através da janela, com 0,8 m de comprimento e 0,5 m de largura, para um ΔT de 20°C?

R.: (a) R_{vidro} ***= 0,285 °C/W (p/ área de 1 m²); (b)*** $\dot{Q}$ ***= 28,1 W***

2.14. Qual a espessura necessária para uma parede de argamassa, que tem uma condutividade térmica de 0,75 W/m.K, se a taxa de transferência de calor deve ser 75% da taxa de transferência através de uma parede de material estrutural composto que tem uma condutividade térmica de 0,25 W/m.K e uma espessura de 100 mm? Considere que ambas as paredes estão sujeitas à mesma diferença de temperatura.

R.: 0,4 m ou 40 cm

2.15. O compartimento de um freezer consiste de uma cavidade cúbica de 2 m de lado, feita de lâmina de alumínio de 2 mm de espessura. Pode-se assumir o fundo como perfeitamente isolado. Qual é a espessura mínima de poliestireno expandido que deve ser aplicada às superfícies do topo e dos lados do compartimento para garantir um ganho de calor menor que 500 W, quando as temperaturas interna e externa são -10°C e 35°C respectivamente?

R.: 52,2 mm

2.16. Uma parede de 2 cm de espessura deve ser construída com um material que tem uma condutividade térmica média de 1,3 W/m.°C. A parede deve ser isolada com um material cuja condutividade térmica média é 0,35 W/m.°C, de tal forma que a perda de calor por metro quadrado não seja superior a 1830 W. Considerando que as temperaturas das superfícies interna e externa da parede composta são 1300 e 30 °C, calcule a espessura do isolamento.

R.: 23,75 cm

2.17. As paredes de uma casa são feitas de tijolos com 15 cm de espessura, cobertas em ambos os lados por uma camada de argamassa de aproximadamente 2 cm de espessura. Qual será o ganho de calor por metro quadrado através desta parede, em um dia em que as temperaturas interna e externa forem 25 e 30 °C respectivamente? Assumir que as temperaturas das faces da parede são iguais às temperaturas do ar.

R.: 18,32 W/m²

2.18. Uma tubulação de cobre, de 3 cm de diâmetro externo e 1,5 de diâmetro interno, conduz refrigerante R-22 a uma temperatura de -5°C. A temperatura do ambiente em que se encontra a tubulação é de 28°C.

(a) quanto calor é absorvido pelo refrigerante em 5 metros de tubo?

(b) utilizando um isolamento de lã de vidro, de 1 cm de espessura, de quanto será o valor do calor absorvido?

R.: (a) 77,775 kW; (b) 77,04 W (utilizando p/ o cobre 52 W/m.°C)

2.19. Um tubo de aço de 7,25 cm de diâmetro externo é coberto com 6,0 mm de amianto (k=0,166 W/m.°C) seguido de uma camada de 2,5 cm de fibra de vidro (k = 0,048 W/m.°C). A temperatura da parede externa do tubo é 315 °C, e a temperatura externa do isolamento é de 38°C. Calcule a temperatura da interface entre o amianto e a fibra de vidro.

R.: 290,9 °C

2.20. Um tubo de aço de 88,9 mm de diâmetro e 5,49 mm de espessura, é utilizado para a distribuição de vapor em uma indústria. O vapor passa no interior do tubo a uma temperatura de 300°C (que pode ser considerado igual à temperatura da parede interna do tubo).

(a) calcule quanto de calor é perdido, por metro linear de tubo, se a temperatura da parede externa do tubo é de 45°C;

(b) se a tubulação tem um total de 100 metros de tubo, calcule a perda total de calor;

(c) utilizando-se mantas de amianto corrugado, com 2,5 cm de espessura, para o isolamento, de quanto seria reduzida a perda de calor?

(d) desejando-se reduzir a perda de calor do tubo a 10% do valor original, utilizando poliuretano (k = 0,024 W/m.°C), de quanto seria a espessura do isolamento necessária?

(e) desejando-se reduzir a perda de calor do tubo para, no máximo, 500 W/m, utilizando blocos de lã mineral (k = 0,07 W/m.°C), de quanto seria a espessura do isolamento necessária?

R.: (a) 207,745 kW (utilizando p/ o aço 15,1 W/m.°C); (b) 20,7745 MW; (c) redução de 99,81% (taxa de 394,01 W/m, utilizando p/ o amianto 0,1 W/m.°C); (d) 0,083 mm; (e) 12,52 mm

2.21. Um tubo de cobre, de 3,81cm de diâmetro externo e 4mm de espessura, conduz vapor superaquecido de R-12 a uma temperatura de -20 °C aproximadamente, e para alcançar o compressor tem de passar por uma sala, onde a temperatura ambiente é de 24°C. O tubo percorre cerca de 2,5 m dentro da sala. O tubo é envolto por um isolamento duplo, formado por uma camada de 10 mm de espessura de lã de vidro (k = 0,038 W/m.K) envolta por isotubo de poliestireno (k = 0,029 W/m.K) de 30 mm de espessura. Qual o ganho de calor total do refrigerante ao passar pela sala?

Obs.: Considere a temperatura da superfície externa do conjunto igual à temperatura ambiente, e a temperatura da parede interna do tubo de latão pode ser considerada igual à temperatura do R-12.

R.: 21,76 W (utilizando p/ o cobre 52 W/m.°C)