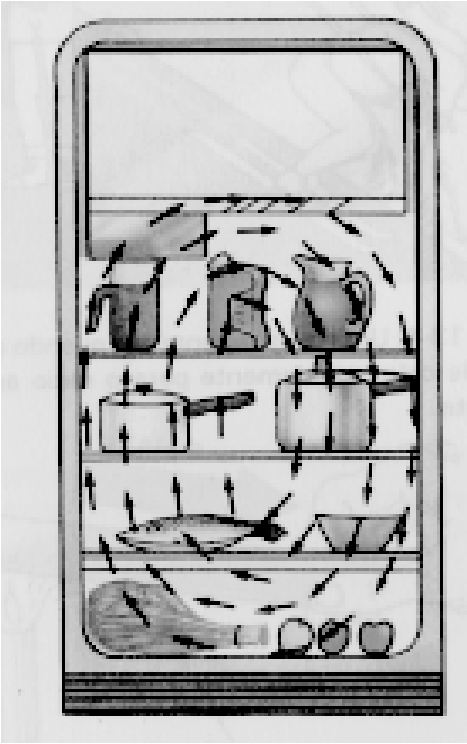
INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

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

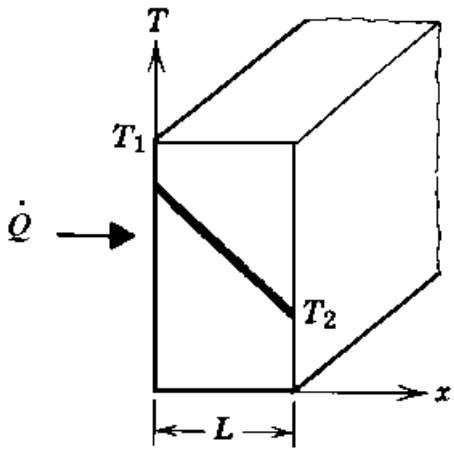
	Página
CAPÍTULO 2 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO	**02**
2.1 - A equação da condução do calor	**02**
2.2 - Condutividade térmica	**04**
2.3 - Analogia elétrica: a resistência térmica de condução	**12**
2.4 - Paredes compostas	**13**
2.5 - Sistemas radiais	**16**
Exercícios	**20**
CAPÍTULO 3 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO	**23**
3.1 - A transmissão de calor por convecção	**23**
3.2 - O coeficiente de transferência de calor por convecção	**28**
3.3 - A resistência térmica de convecção	**29**
3.4 – Transferência de calor combinada	**30**
Exercícios	**36**

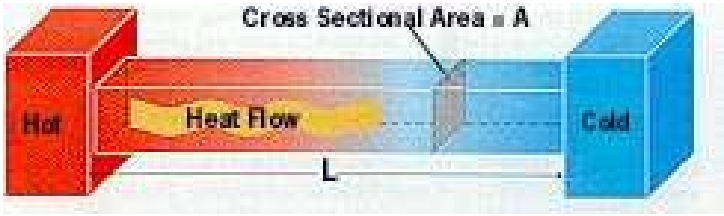
CAPÍTULO 2 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO

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 <u>fluxo de calor</u>, 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]

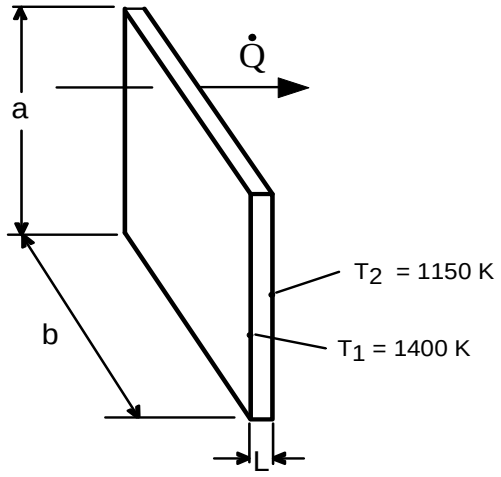
Exemplo

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?

Dados: 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 x b

onde: a = 0,5 m b = 3,0 m
Assim,
A = a x b = 0,5 x 3,0
A = 1,5 m²



Solução. 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):

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

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

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

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

Dados: L = 3 cm = 0,03 m k = 401 W/m.K ΔT = 400 - 100 = 300 ℃

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

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

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 ℃ e ntre as faces do bloco. Qual deve ser a espessura do bloco?

Dados: k = 0,74 W/m.K ΔT = 200 ℃ $\dot{q}$ = 5000 W/m²

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

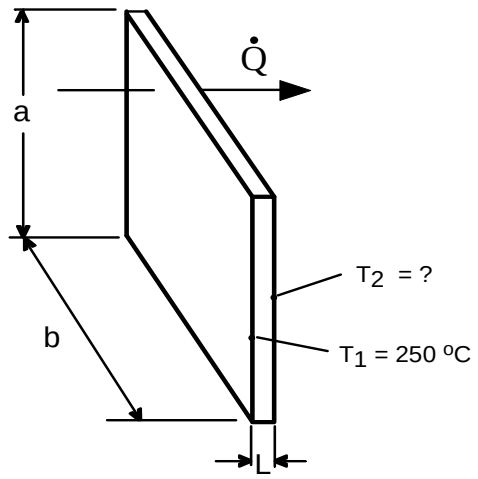
$$\dot{q} = k.\frac{\Delta T}{L} \quad \rightarrow \quad L = \frac{k.\Delta T}{\dot{q}} = \frac{0{,}74 \times 200}{5000} = 0{,}0296 \ m = 2{,}96 \ cm$$

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 ℃. Calcule a temperatura da outra face da placa.

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

A área superficial da parede é dada por:
A = a x b

onde: a = 50 cm = 0,50 m
b = 75 cm = 0,75 m
Assim,
A = a x b = 0,50 x 0,75
A = 0,375 m²



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

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

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

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):

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

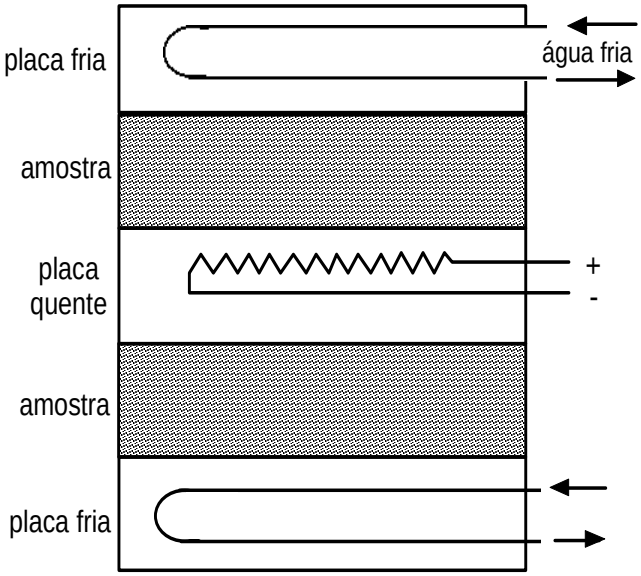
Ou seja, por meio de procedimentos experimentais em laboratório, podem ser feitas medições para a determinação da condutividade térmica dos diferentes materiais.

Exemplo

2.5. O equipamento chamado "placa quente protegida" é utilizado para medir a condutividade térmica de materiais isolantes, baseado na Lei de Fourier. Neste equipamento são medidas:

- a espessura (L) da amostra;
- a área superficial da amostra (A)
- a diferença de temperatura entre um lado e outro da placa (ΔT);
- potência elétrica dissipada pela placa quente ($\dot{Q}$)

Suponha que uma amostra de um material (um determinado tipo de argamassa), de 50 cm por 50 cm e 15 cm de espessura esteja sendo testada e tenha fornecido um ΔT de 45,5 ℃ para uma potência dissipada de 25 W. Qual a condutividade térmica do material sendo testado?



Dados: ΔT = 45,5 ℃ $\dot{Q}$ *= 25 W*
L = 15 cm = 0,15 m
A = 0,5 x 0,5 = 0,25 m²

Solução. Aplicando a equação (2.2):

$$\dot{Q} = k.A.\frac{\Delta T}{L} \quad \rightarrow \quad k = \frac{\dot{Q}.L}{\Delta T.A} = \frac{25 \times 0{,}15}{45{,}5 \times 0{,}25} = 0{,}33 \text{ W/m.K}$$

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	água	0,556
(parado)	Freon 12	0,073
GÁS	ar	0,024
(parado)	dióxido de carbono	0,0146
MATERIAL	fibra de vidro	0,035
ISOLANTE	espuma de uretano	0,024

Observe que:

alta condutividade térmica → material *"condutor"*
baixa condutividade térmica → 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: sólidos não-metálicos

Material / Composição	Propriedades a 300 K	
	ρ [kg/m^3]	k [W/m.K]
Carbono	1950	1,60
Enxofre	2070	0,206
Epóxi com fibras de boro		
paralelo às fibras		2,29
perpendicular às fibras		0,59
Epóxi com fibras de grafita		
paralelo às fibras		11,1
perpendicular às fibras		0,87
Óxido de alumínio	3970	36,0

Tabela 2.4 - Condutividade térmica: materiais estruturais e de acabamento

Material / Composição	Temp. [°C]	k [W/m.K]	ρ [kg/m^3]
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 2.5 - Condutividade térmica: materiais isolantes p/ construção civil

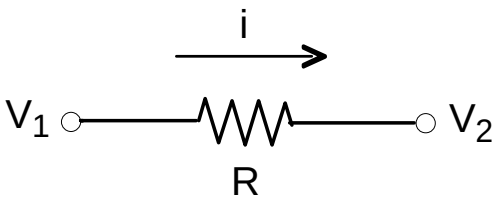
Material / Composição	Temp. [°C]	k [W/m.K]	ρ [kg/m^3]
Amianto			
não-compactado	-45	0,149	
	0	0,154	470 - 570
	100	0,161	
chapa de cimento amianto	20	0,74	
folhas	51	0,166	
feltro, 40 laminações por polegada	38	0,057	
	150	0,069	
feltro, 20 laminações por polegada	38	0,078	
	150	0,095	
corrugado, 4 dobras 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 2.6 - 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, caldeiras, 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":



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

$$i = \frac{\Delta V}{R} \qquad (2.3)$$

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:

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

Reescrevendo a equação (2.2), teríamos:

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

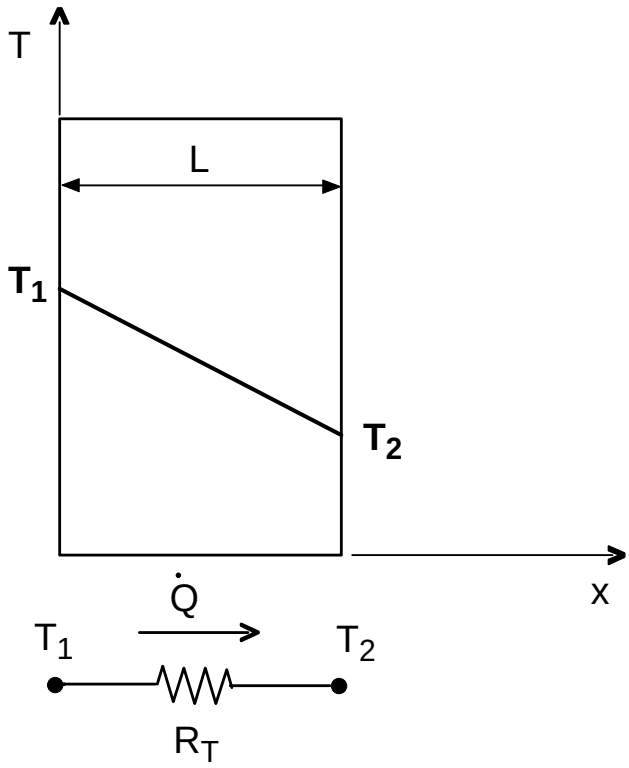
Note a semelhança entre as equações (2.3) e (2.4). Desta maneira, pode-se reescrever a equação (2.4) como:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_T} \qquad (2.5)$$

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

$$R_T = \frac{L}{k.A} \qquad \left[\frac{K}{W}\right] \text{ ou } \left[\frac{°C}{W}\right] \qquad (2.6)$$

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



Exemplo

2.6. 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.

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

Solução. A resistência térmica de condução é dada pela equação (2.6):

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

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

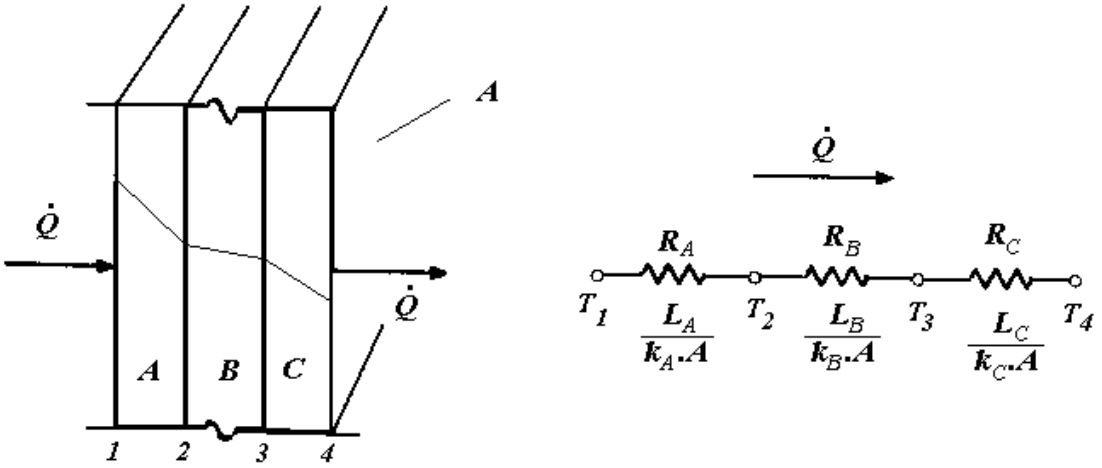
Dados: ΔT = 30 ℃ R_T = 0,04 K/W

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

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

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:

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

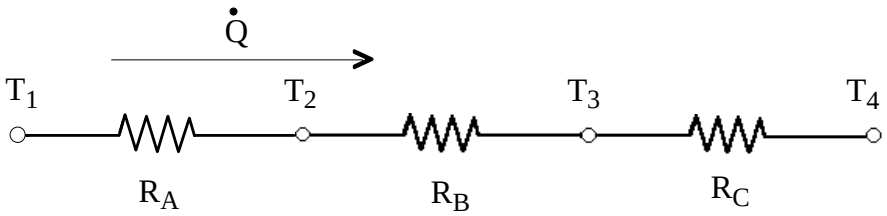
onde A é a área da seção transversal das paredes (igual para todas).

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

2.8. 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 ℃ e a face interna à 20 ℃?

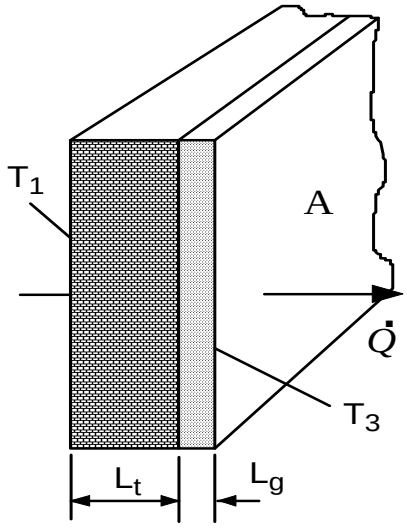
<u>Dados</u>: A situação física é representada na figura ao lado, onde:

L_t = 20 cm = 0,20 m

L_g = 5 cm = 0,05 m

T_1 = 35 ℃ T_2 = 20 ℃

e A = 1 m²



Da Tabela 2.4

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

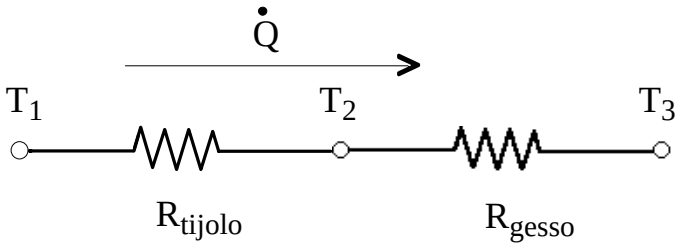
k_{gesso} = 0,48 W/m.K

<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:

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



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

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

Assim:

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

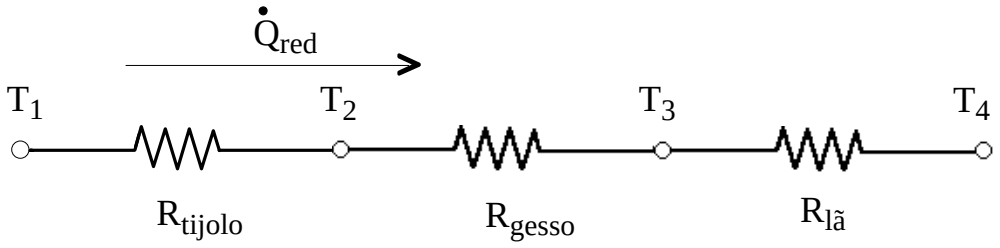
2.9. No problema anterior, qual a espessura de isolamento de lã de rocha (k = 0,065 W/m.K) que deve ser adicionada à parede, para se reduzir a transferência de calor em 80%?

Dados: 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*

Solução. 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:

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

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

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

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,

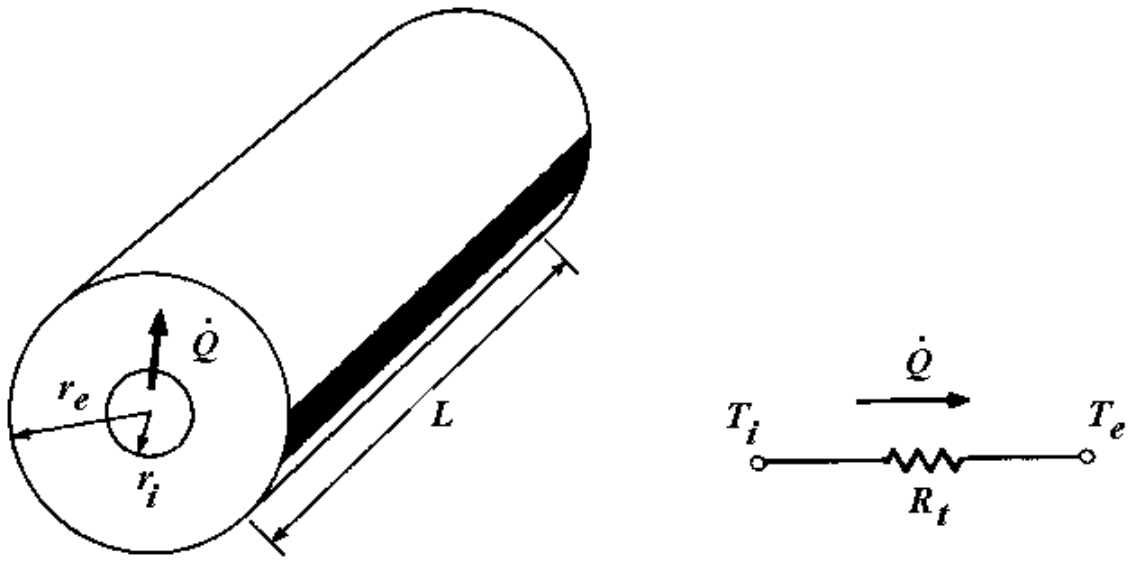
$$R_{lã} = \frac{L_{lã}}{k_{lã}.A} \quad \rightarrow \quad L_{lã} = R_{lã}.k_{lã}.A = 1{,}58 \times 0{,}065 \times 1{,}0 = 0{,}103 \text{ m}$$

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:

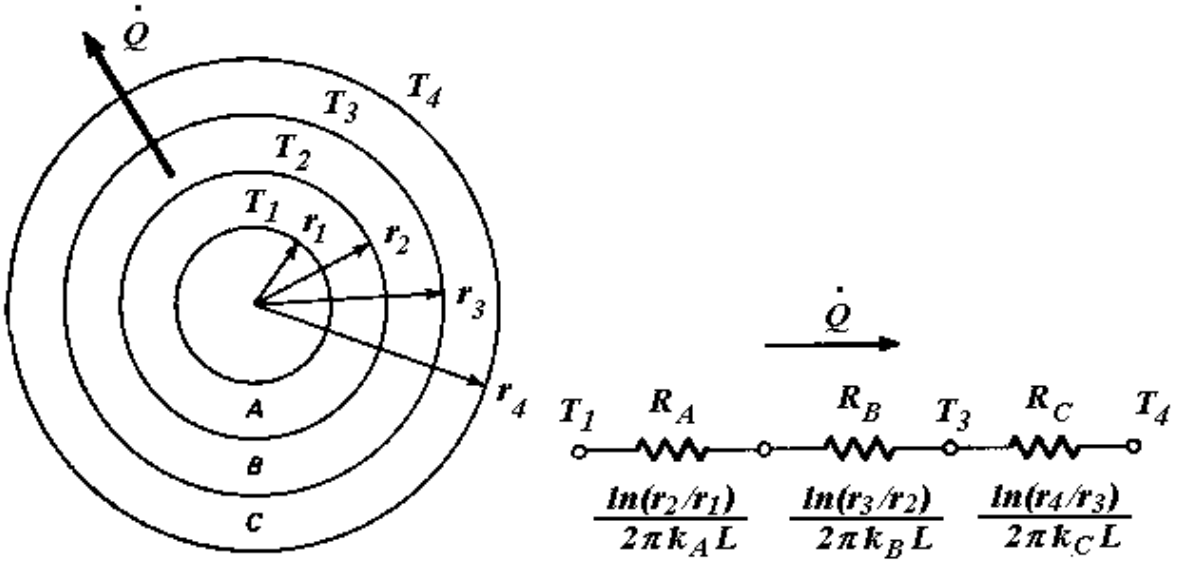


$$\dot{Q} = \frac{2.\pi.k.L.(T_i - T_e)}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)} \tag{2.12}$$

onde a notação *ln* significa o <u>logaritmo natural</u> 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):



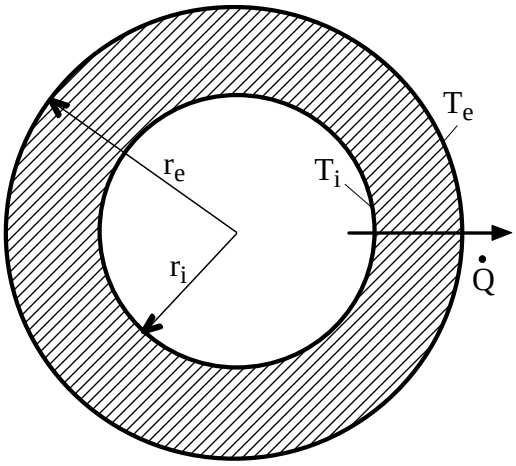
$$\dot{Q} = \frac{\Delta T_{total}}{R_{total}} = \frac{(T_1 - T_4)}{R_A + R_B + R_C}$$

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.℃) 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 ℃ e a superfície externa se encontra a 20 ℃, 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.℃
T_i = 200 ℃ T_e = 20 ℃

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.℃) 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.℃). Se a temperatura da parede interna do tub o é mantida a 600 ℃ e a superfície externa do isolamento a 100 ℃, calcule a perda de calor po r metro de comprimento.

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

T_1 = 600 ℃ T_3 = 100 ℃

$k_{aço}$ = 19 W/m.℃

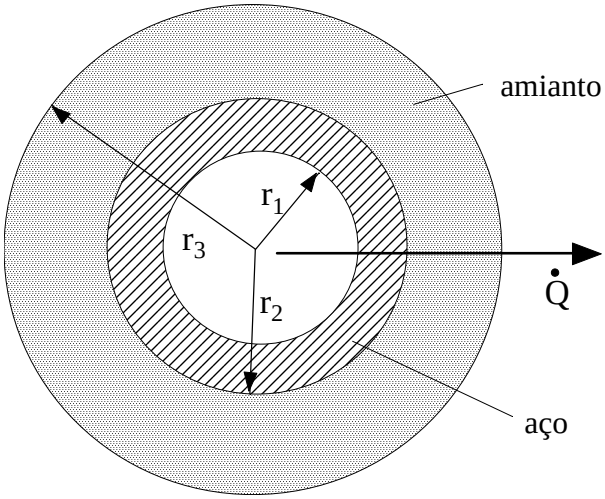
k_{ami} = 0,2 W/m.℃

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



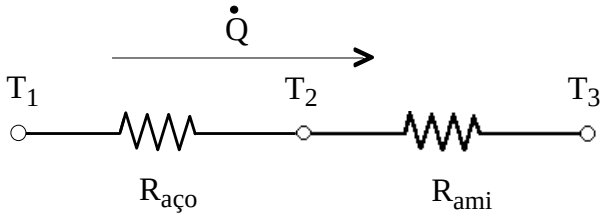
<u>Solução</u>. Vamos inicialmente calcular o valor dos raios mostrados na figura:

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

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

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

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:

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

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.

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?

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.

2.5. Uma placa de isolante térmico possui 100 cm² de seção transversal e 2 cm de espessura. Sua condutividade térmica é de 2×10^{-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?

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?

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?

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

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.

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.

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.

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?

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

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?

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.

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?

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.

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.

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?

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.

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 a 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?

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 ode ser considerada igual a temperatura do R-12.

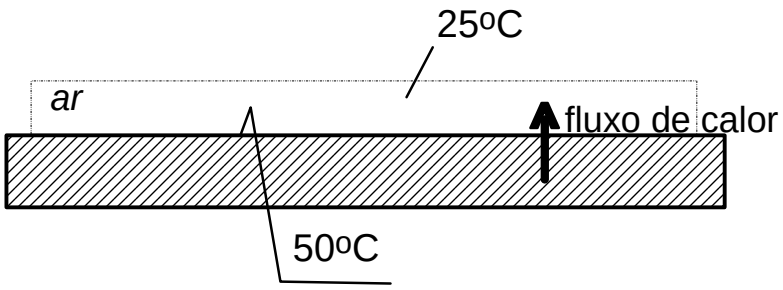
CAPÍTULO 3 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO

3.1 - A TRANSMISSÃO DE CALOR POR CONVECÇÃO.

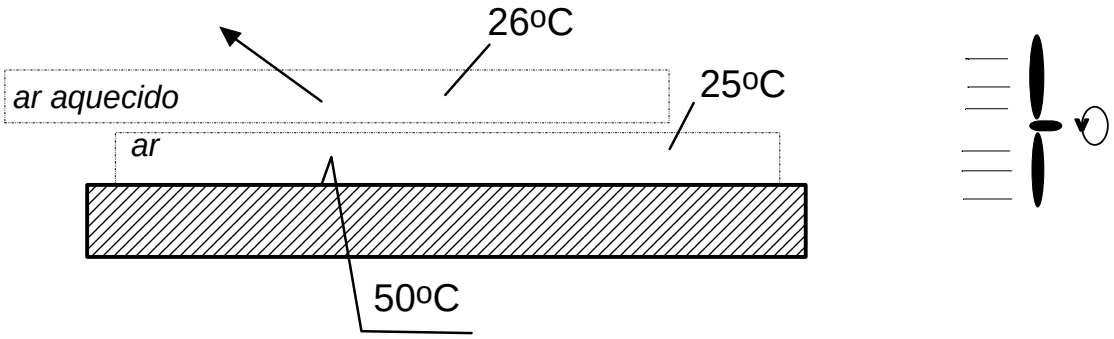
3.1.1 - Convecção Natural e Forçada

Num dia quente, utiliza-se ventiladores para produzir uma sensação de refrescamento. Isto porque, ao ligar o ventilador, está-se movimentando o ar e fazendo com que ele passe com mais velocidade sobre a pele. Existe uma troca de calor entre o corpo e o ar soprado, porque o ar ambiente está a uma temperatura menor que a temperatura da pele. Desta maneira, calor do corpo é "carregado" pelo ar.

Observe que, no estudo da transferência de calor por condução, vimos que o calor passa da superfície mais quente para a superfície mais fria. Suponha que ar a uma determinada temperatura entre em contato com uma placa mais quente que ele. Haveria uma transferência de calor conforme indica a seta.



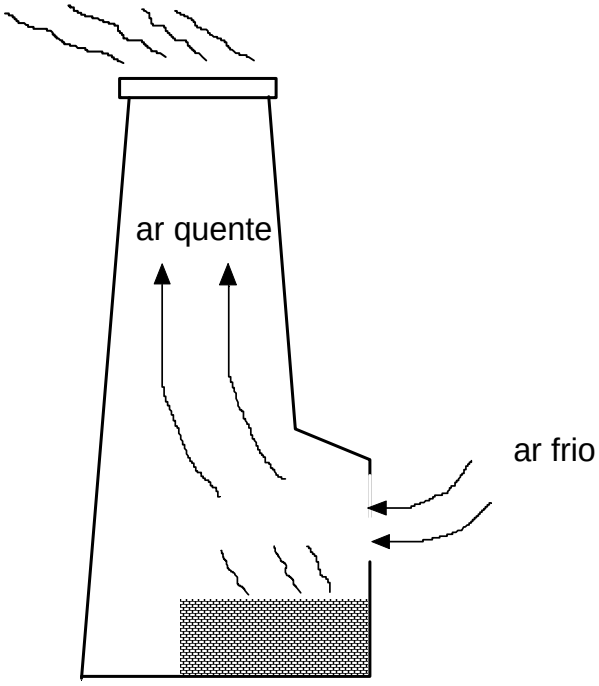
Imagine que a massa de ar estivesse "colada" à placa. A tendência seria que esse ar se aquecesse e a placa esfriasse, até atingirem o equilíbrio térmico. Porém, como o ar está em movimento, o ar que foi aquecido pelo contato com a placa será "empurrado" e substituído por ar novo, na temperatura original do ar ambiente. Assim, existe sempre ar "frio" em contato com a placa.



Isto dá uma idéia de como a quantidade de calor que pode ser retirada da placa é bem maior quando o ar está em movimento. Quando o fluido é movimentado artificialmente, por meios mecânicos (abanador, ventilador, etc.), temos caracterizada a ***circulação ou ventilação forçada*** do fluido. Quando a convecção se dá por meio de ventilação forçada, temos o que se chama de **convecção forçada**.

Porém, o movimento do fluido pode ser causado pelo seu próprio aquecimento. Por exemplo, quando fazemos um churrasco numa churrasqueira, observamos que o ar sobe

através da chaminé, carregando o calor e a fumaça, sem existir nenhum aparato mecânico que o forçe a isso

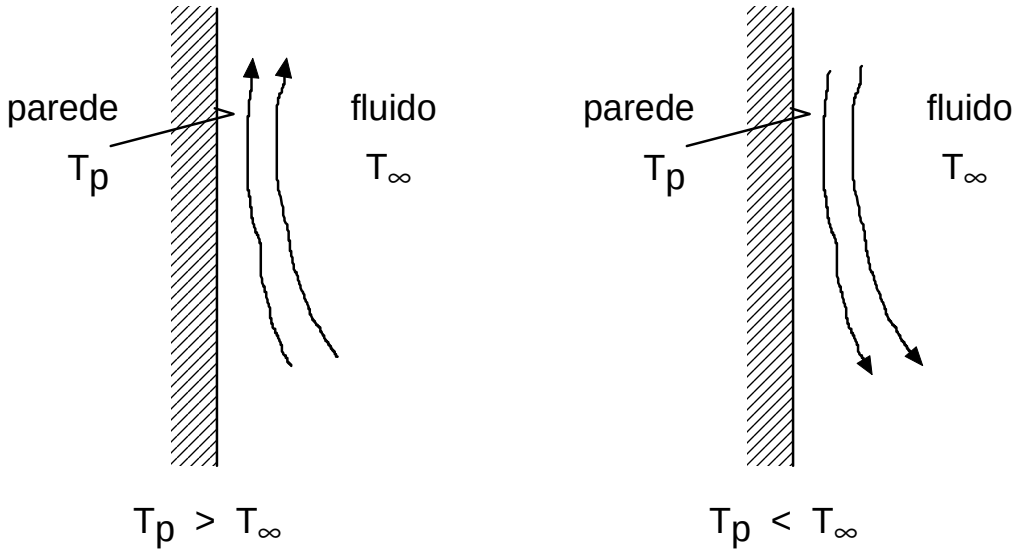


Da mesma maneira, quando aquecemos água numa panela, pode-se observar que a água quente sobe e a água fria desce, formando uma corrente de água que carrega o calor e aquece a água por inteiro.

Isto ocorre porque os fluidos, ao se aquecerem, ficam menos densos, consequentemente, mais leves, e tendem a subir. Este mecanismo é conhecido como "empuxo".

Esta movimentação do fluido denomina-se ***circulação natural.*** Lembre-se sempre desta regra simples:

- fluido quente sobe
- fluido frio desce



Então, quando a convecção se dá por meio de circulação natural, temos o que se chama de **convecção natural**. Resumindo:

CONVECÇÃO FORÇADA: quando a movimentação do fluido se dá por meios artificiais (ventilador, abanador, o próprio movimento da superfície que está trocando calor, etc.)

CONVECÇÃO NATURAL: quando a movimentação do fluido se dá por meios naturais, ou seja, pelo próprio aquecimento do fluido

3.1.2 - Importância da Convecção

Como você já deve ter observado, todos os fenômenos na área de Refrigeração e Condicionamento de ar envolvem convecção. Por exemplo:

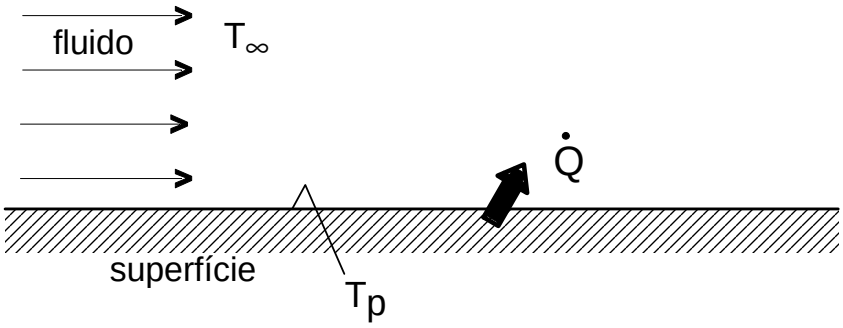
- o fluido refrigerante, ao passar no evaporador ou no condensador, troca calor com as paredes dos tubos por convecção;
- as paredes dos tubos do condensador ou do evaporador, por sua vez, trocam calor com o ar ambiente também por convecção;
- os gêneros alimentícios no interior de uma geladeira, de um freezer ou de uma câmara frigorífica, são refrigerados pelo ar por convecção.

3.1.3 - Cálculo do calor trocado por Convecção

Como visto até agora, as condições para que ocorra convecção são:

- um fluido em movimento;
- uma superfície de troca de calor
- uma diferença de temperatura entre a superfície e o fluido.

Considere então a seguinte representação esquemática:



Um fluido, a uma temperatura T_∞, move-se em contato com uma superfície de área A, e que se encontra a uma temperatura T_p. Se $T_p > T_\infty$, haverá uma transferência de calor da parede para o fluido conforme indica a seta.

O cálculo do fluxo de calor por convecção é realizado utilizando-se a equação de Newton:

$$\dot{q} = h.(T_p - T_\infty) \tag{3.1}$$

onde:	$\dot{q}$	= fluxo de calor por convecção	[W]
	T_p	= temperatura da superfície	[K] ou [°C]
	T_∞	= temperatura do fluido	[K] ou [°C]
	h	**= coeficiente de troca de calor por convecção**	**[W/m².K]**

Para o cálculo da taxa de transferência de calor, usa-se a seguinte expressão:

$$\dot{Q} = h.A.(T_p - T_\infty) \tag{3.2}$$

onde:	$\dot{Q}$	= taxa de transferência de calor por convecção	[W]
	A	= área de troca de calor na superfície sólida	[m²]

Na estimação do coeficiente de troca de calor por convecção estão incluídos todos os parâmetros que influenciam a transferência de calor convectiva. Todo o problema do estudo da convecção resume-se, então, à estimação do coeficiente **h**. Lembre-se que na condução do calor a condutividade térmica, **k**, é uma propriedade física do material. Já o coeficiente de troca de calor por convecção depende, principalmente:

(a) da forma e orientação da superfície;
(b) das propriedades físicas do fluido, como massa específica, viscosidade, condutividade térmica, etc.;
(c) da forma como o fluido se movimenta em relação à superfície de troca.

Observando a equação (3.1), vê-se que:

$$\text{se } T_p > T_\infty \quad \rightarrow \quad (T_p - T_\infty) > 0 \rightarrow \quad Q > 0$$
$$\text{se } T_p < T_\infty \quad \rightarrow \quad (T_p - T_\infty) < 0 \rightarrow \quad Q < 0$$

Em outras palavras, a taxa de transferência de calor é positiva se o calor é transferido da *superfície para o fluido* (resfriamento da superfície e aquecimento do fluido), e negativo se o calor é transferido do *fluido para a superfície* (aquecimento da superfície e resfriamento do fluido).

Exemplo

3.1. A superfície de uma placa de aço de 8m² é mantida a uma temperatura de 150 ℃. Uma corrente de ar é soprada por um ventilador e passa por sobre a superfície da placa. O ar se encontra a uma temperatura de 25 ℃. Calcular a taxa de transferência de calor trocado por convecção, entre a placa e o ar, considerando um coeficiente de troca de calor por convecção de 150 W/m².K.

Dados: T_p *= 150 ℃* T_∞ *= 25 ℃*
A = 8m² *h = 150 W/m².K*

Solução. Aplicando-se a equação da transferência de calor por convecção (eq. 3.2), temos:

$$\dot{Q} = h.A.\left(T_p - T_\infty\right) = 150 \times 2 \times (150 - 25) = 37500 \text{ W}$$

Ou seja, 37,5 kW estarão sendo transferidos da placa para o fluido.

3.2. Um determinado fluido escoa através de um tubo de 20cm de diâmetro interno. O fluido se encontra a uma temperatura de 50℃. A temperatura da superfície interna do tubo pode ser determinada, e é de 25℃. Considerando um coeficiente de transferência de calor por convecção de 2000 W/m².K, calcule a taxa de transferência de calor por metro de comprimento linear de tubo.

Dados: T_p *= 25 ℃* T_∞ *= 50 ℃* *h = 2000 W/m².K*
L = 1m *D = 20 cm = 0,2 m*

Solução. A área de troca de calor, por metro de comprimento linear de tubo, pode ser calculada por:

$$A = (\text{perímetro}) \times (\text{comprimento}) = (\pi.D).(L) = \pi \times 0{,}2 \times 1{,}0 = 0{,}6283 \text{ m}^2$$

Assim,

$$\dot{Q} = h.A.\left(T_p - T_\infty\right) = 2000 \times 0{,}6283 \times \left(25 - 50\right) = -31415 \text{ W}$$

Ou seja, 31,4kW estarão sendo transferidos do fluido para a superfície (lembre-se da regra de sinais)

3.3. Um prédio metálico recebe, no verão, uma brisa leve. Um fluxo de energia solar total de 450W/m² incide sobre a parede externa. Destes, 100W/m² são absorvidos pela parede, sendo o restante dissipado para o ambiente por convecção. O ar ambiente, a 27°C, escoa pela parede a uma velocidade tal que o coeficiente de transferência de calor é estimado em 50W/m².K. Estime a temperatura da parede.

Dados: T_∞ = 27 °C *h = 50 W/m².K*

O fluxo de calor líquido de convecção é dado pela diferença entre a radiação incidente e a radiação absorvida pela parede:

$$\dot{q} = 450 - 100 = 350 \text{ W/m}^2$$

Solução. Utiliza-se a equação (3.1):

$$\dot{q} = h.\left(T_p - T_\infty\right) \quad \rightarrow \quad \left(T_p - T_\infty\right) = \frac{\dot{q}}{h} \quad \rightarrow \quad T_p = T_\infty + \left(\frac{\dot{q}}{h}\right)$$

$$T_p = 27 + \left(\frac{350}{50}\right) = 27 + 7 = 34 \text{ °C}$$

A temperatura da parede é de 34°C.

3.4. Um fluido escoando através de um tubo de 80mm de diâmetro interno, absorve 1kW de calor, por metro de comprimento de tubo. Sabendo-se que a temperatura da superfície do tubo é de 28°C, e considerando um coeficiente de transferência de calor por convecção de 3500 W/m².K, estime a temperatura média do fluido.

Dados: T_p = 28°C *h = 3.500 W/m².K*

$\dot{Q} = 1.000$ W *p/ L = 1 m* *D_i = 80 mm = 0,08 m*

Solução. A área de troca de calor pode ser calculada como:

$$A = \pi.D_i.L = \pi \times 0{,}08 \times 1{,}0 = 0{,}2513 \text{ m}^2$$

Da equação (3.2), vem que:

$$\frac{\dot{Q}}{h.A} = \left(T_p - T_\infty\right) \quad \rightarrow \quad T_\infty = T_p - \left(\frac{\dot{Q}}{h.A}\right)$$

$$T_\infty = 25 - \left(\frac{1000}{3500 \times 0{,}2513}\right) = 25 - 1{,}137 = 23{,}863 \text{ °C}$$

A temperatura do fluido é de 23,8°C.

3.2 - O COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO

Vimos que o coeficiente de troca de calor por convecção, **h**, é dependente de vários fatores. Desta maneira, cada caso particular de transferência de calor terá uma equação diferente para **h**, ou seja, uma maneira diferente de calculá-lo. O estudo mais aprofundado de cada um desses casos foge ao nível deste curso. No entanto, é importante ter um mínimo de familiaridade com a forma de cálculo de **h**.

Pode-se, no entanto, utilizar tabelas com valores médios para cada situação de convecção. Um exemplo é dado abaixo:

Tabela 3.1 - Valores médios do Coeficiente de convecção "**h**"

PROCESSO		**h** [W / m².K]
CONVECÇÃO NATURAL	Ar	5 - 30
	Gases	4 - 25
	Líquidos	120 - 1.200
	Água, líquida	20 - 100
	Água em ebulição	120 - 24.000
CONVECÇÃO FORÇADA	Ar	30 - 300
	Gases	12 - 120
	Líquidos	60 - 25.000
	Água, líquida	50 - 10.000
	Água em ebulição	3.000 - 100.000
	Água em condensação	5.000 - 100.000

A tabela acima dá uma idéia de valores de "h". Da observação da tabela pode-se estabelecer algumas conclusões:

- líquidos são mais eficazes que gases, para transferência de calor por convecção;
- convecção forçada é mais eficaz que convecção natural;
- uma substância em mudança de fase possui uma grande capacidade de troca de calor por convecção.

Esta última constatação explica o porquê de se utilizar uma substância em mudança de fase (o gás refrigerante) em um sistema de refrigeração. Uma grande capacidade de transferência de calor por convecção (isto é, um valor de "h" elevado) permite uma grande transferência de calor em um espaço reduzido (isto é, uma área de troca reduzida), como se pode constatar analisando-se a equação (3.2).

A tabela seguinte fornece valores de coeficiente de transferência de calor para situações de convecção natural comuns quando se analisa problemas de transferência de calor em ambientes condicionados, câmaras de refrigeração, etc.

Tabela 3.2 - Valores do coeficiente de convecção "**h**" para situações de convecção natural em edifícios (ar ↔ superfícies)

SITUAÇÃO	**h** [W/m².K]
Paredes internas	8,0
Forros internos	6,0
Pisos internos	10,5
Paredes externas (sem vento)	25,0
Superfícies horizontais externas (sem vento)	29,0

É interessante lembrar que o corpo humano perde calor com o ambiente por convecção. Esta troca de calor é calculada também pela equação (3.2). A área superficial do corpo humano varia entre 1,5 e 2,5 m², dependendo do tamanho da pessoa. A temperatura superficial da pele humana, nas partes cobertas pela vestimenta, variam entre 31 e 33°C. O coeficiente de transferência de calor por convecção para esse caso é dado pela seguinte equação:

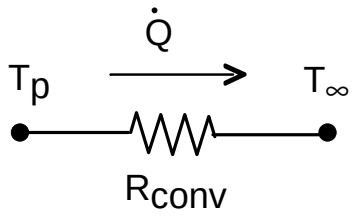
$$h = 13{,}5.V^{0,6} \tag{3.3}$$

onde V é a velocidade do ar em [m/s]. Assim, conforme foi estudado, quanto maior a velocidade do ar em contato com o corpo, maior será o valor do coeficiente de transferência de calor e maior será a troca de calor.

3.3 - A RESISTÊNCIA TÉRMICA DE CONVECÇÃO

Por uma analogia similar à realizada com a equação da condução do calor, podemos definir uma *resistência térmica convectiva*:

$$R_{conv} = \frac{\left(T_p - T_\infty\right)}{\dot{Q}} \tag{3.4}$$



Como:

$$\dot{Q} = h.A.\left(T_p - T_\infty\right) \quad \rightarrow \quad \frac{\left(T_p - T_\infty\right)}{\dot{Q}} = \frac{1}{h.A} \tag{3.5}$$

Assim:

$$R_{conv} = \frac{1}{h.A} \tag{3.6}$$

Observe que, quanto maior o coeficiente de transferência de calor por convecção, bem como quanto maior for a área de troca, teremos uma menor resistência térmica, ou, em outras palavras, uma maior facilidade para haver troca de calor.

Desta maneira, a resistência térmica convectiva pode ser associada à resistência térmica condutiva. Isto permitirá o cálculo do coeficiente global de troca de calor "U".

3.4 – TRANSFERÊNCIA DE CALOR COMBINADA

O calor conduzido através de um sólido frequentemente é fornecido ou removido por algum processo de convecção. Por exemplo, em aplicações de trocadores de calor, um arranjo de tubos é empregado para a remoção de calor de um líquido quente. A transferência de calor do líquido quente para o tubo ocorre por convecção. O calor é transferido através da parede do material por condução, e finalmente dissipado para o ar ambiente por convecção. Obviamente, uma análise dos sistemas que combinam condução e convecção é muito importante do ponto de vista prático.

3.4.1 – Coeficiente Global de Transferência de Calor

Considere a parede plana mostrada na Figura 3.1, exposta a um fluido quente A em um dos lados e a um fluido mais frio B no outro lado.

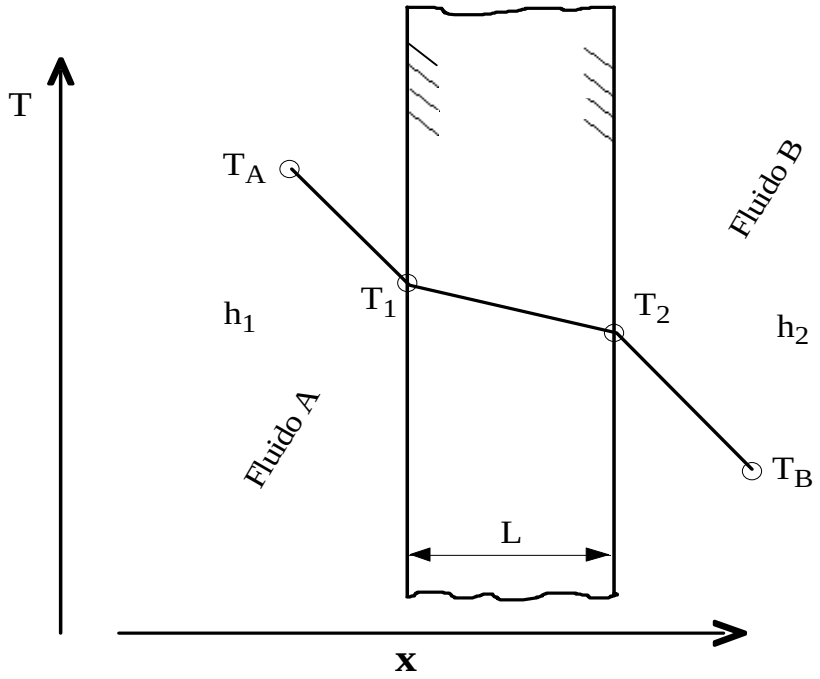


Figura 3.1 - Transferência de calor através de uma parede plana

A taxa de transferência de calor através da parede, em regime permanente, é dada por:

$$\dot{Q} = h_1.A.(T_A - T_1) = \frac{k.A}{L}.(T_1 - T_2) = h_2.A.(T_2 - T_B)$$

O *processo* de transferência de calor pode ser representado pelo circuito de resistências apresentados na Figura 3.2,

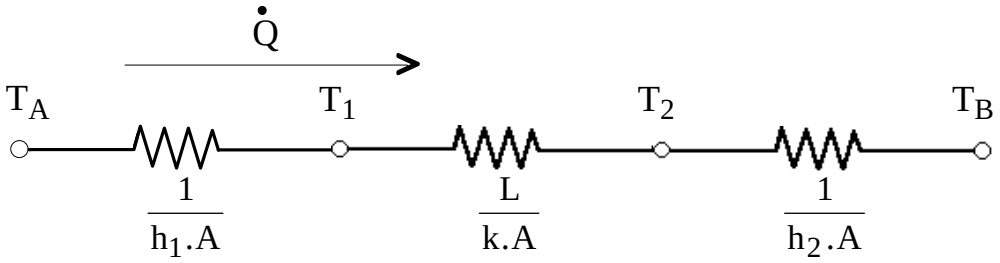


Figura 3.2 - Circuito elétrico equivalente à situação física da Figura 3.1

e o calor total transferido é calculado como a razão entre a diferença total de temperatura e a soma das resistências térmicas:

$$\dot{Q} = \frac{(T_A - T_B)}{R_{conv,A} + R_{cond} + R_{conv,B}} \tag{3.7}$$

ou seja

$$\dot{Q} = \frac{(T_A - T_B)}{\frac{1}{h_1.A} + \frac{L}{k.A} + \frac{1}{h_2.A}} \tag{3.8}$$

Observe que o valor (1 / h.A) é usado para representar a resistência térmica de convecção (eq. 3.6), e o valor (L / k.A) é usado para representar a resistência térmica de condução (eq. 2.6).

O calor total transferido pelos mecanismos combinados de condução e convecção é frequentemente expresso em termos de um ***coeficiente global de transferência de calor*** **U**, definido pela relação:

$$\dot{Q} = U.A.\Delta T_{total} \tag{3.9}$$

onde A é uma área adequada para a transferência de calor. De acordo com a equação (3.8), o coeficiente global de transferência de calor para o caso da parede plana é:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_2}} \tag{3.10}$$

<u>Sistemas Radiais</u>. A analogia elétrica para o caso de um cilindro oco (por exemplo, um tubo ou duto, Figura 3.3), que troca calor por convecção interna e externa, está representada na Figura 3.4, onde T_A e T_B são as temperaturas dos fluidos interno e externo, respectivamente, e L é o comprimento do tubo.

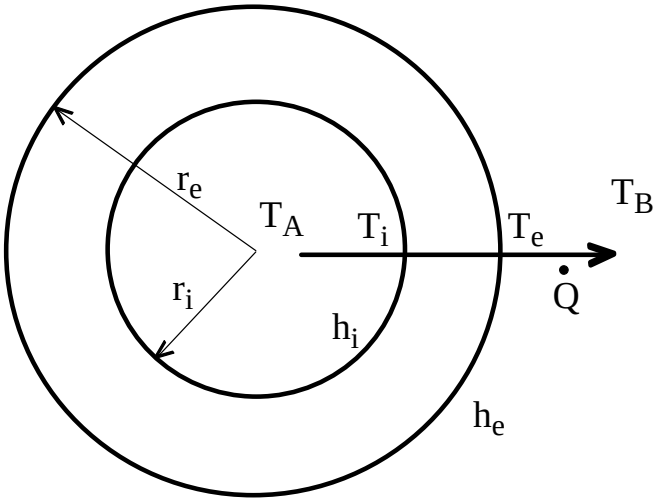


Figura 3.3 - Transferência de calor através de um cilindro oco (tubo)

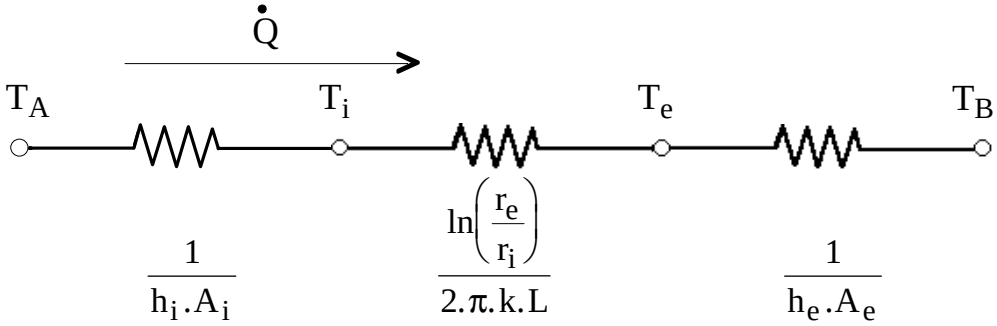


Figura 3.4 - Circuito elétrico equivalente à situação física da Figura 5.3

Observe que neste caso a área para convecção não é a mesma para os dois fluidos. Estas áreas dependem do diâmetro interno do tubo e da espessura da parede. Neste caso, a taxa de transferência de calor total é dada por:

$$\dot{Q} = \frac{(T_A - T_B)}{\left[\frac{1}{h_i.A_i} + \frac{\ln(r_e / r_i)}{2.\pi.k.L} + \frac{1}{h_e.A_e}\right]} \tag{3.11}$$

de acordo com o circuito térmico da Figura 3.4. Os termos A_e e A_i representam as áreas das superfícies externa e interna do tubo. Nestes casos, ao invés de se utilizar o coeficiente global de transferência de calor de forma isolada, utiliza-se o parâmetro “UA”, ou seja, o produto do coeficiente global pela área de troca. Da eq. (3.11):

$$\dot{Q} = (UA)_{global}.\Delta T_{global} \qquad (UA)_{global} = \frac{2.\pi.L}{\left(\frac{1}{r_i h_i} + \frac{\ln(r_e / r_i)}{k} + \frac{1}{r_e h_e}\right)} \tag{3.12}$$

Outra situação encontrada na prática é quando há uma camada de isolamento aplicada ao redor do tubo (Figura 3.5). Neste caso, o fator UA é dado pela equação (3.13):

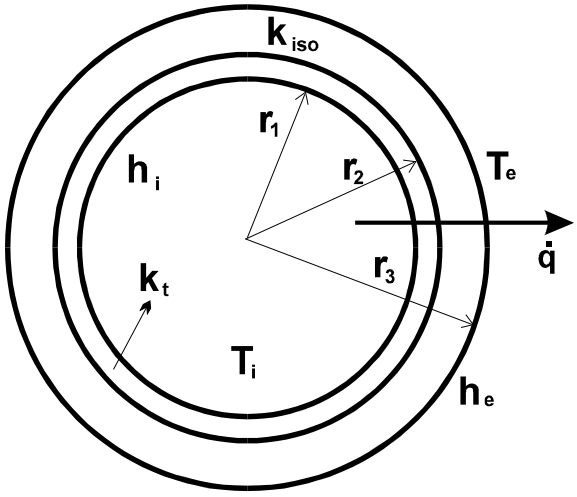


Figura 3.5 - Transferência de calor através de um cilindro com isolamento térmico

$$(UA)_{global} = \frac{2.\pi.L}{\left(\frac{1}{r_1 h_i} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{k_t} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{k_{iso}} + \frac{1}{r_3 h_e}\right)} \tag{3.13}$$

onde: r_1 = raio interno do tubo;
r_2 = raio externo do tubo = raio interno do isolante;
r_e = raio externo do isolante;

Exemplo

3.5. Um ambiente que se encontra a 24 ℃, recebe calor do ambiente externo, que está a 30 ℃. Qual a quantidade de calor recebido? Sabe-se que as paredes tem uma área total de 48 m². O coeficiente de transferência de calor por convecção no lado interno é estimado em 8 W/m².K, e no lado externo em 25 W/m².K. As paredes são feitas de concreto, e têm 15 cm de espessura.

Dados: T_{int} = 24℃ T_{ext} = 30℃ h_e = 25 W/m².K
A = 48 m² L = 15 cm = 0,15 m h_i = 8 W/m².K
p/ concreto: k = 0,76 W/m.K (tabelas Capítulo 2)

Solução. O coeficiente global de transferência de calor pode ser calculado:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_2}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,15}{0,76} + \frac{1}{25}} = \frac{1}{0,125 + 0,197 + 0,04} = \frac{1}{0,362} = 2,762 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

e o calor total transferido é calculado por:

$$\dot{Q} = U.A.\Delta T_{total} = U.A.(T_{int} - T_{ext}) = 2,762 \times 48 \times (24 - 30) = -795,5 \text{ W}$$

Ou seja, 795,5 W estão sendo transferidos do ambiente externo para o interno. Veja que, ao fazermos (T_{int} - T_{ext}), convencionamos que a transferência se daria do interior para o exterior. Por isso, o resultado apresentou sinal negativo, mostrando que a transferência de calor está na verdade se dando no sentido oposto ao convencionado.

3.6. Um determinado fluido escoa através de um tubo de aço, de 20 cm de diâmetro externo e 3 cm de espessura. O fluido se encontra a uma temperatura de 50 ℃. O tubo está exposto ao ar ambiente, com temperatura de 20 ℃. Considerando um coeficiente de transferência de calor por

convecção no lado interno de 2000 W/m².K, e no lado externo de 20 W/m².K, calcule a transferência de calor por metro de comprimento linear de tubo.

Dados: D_e = 20 cm = 0,2 m → $r_e = D_e/2$ = 0,1 m t = 3 cm = 0,03 m
L = 1 m T_{int} = 50 °C T_{ext} = 20 °C
h_i = 2000 W/m².K h_e = 20 W/m².K p/ o aço: k = 60,5 W/m.K

Solução. Calculemos inicialmente o raio interno do tubo:

$$r_i = r_e - t = 0,1 - 0,03 = 0,07 \text{ m}$$

Utilizando a eq. (3.12), tem-se:

$$(UA)_{global} = \frac{2.\pi.L}{\left(\frac{1}{r_i h_i} + \frac{\ln(r_e/r_i)}{k} + \frac{1}{r_e h_e}\right)} = \frac{2.\pi.1}{\left(\frac{1}{0,07.2000} + \frac{\ln(0,1/0,07)}{60,5} + \frac{1}{0,1.20}\right)}$$

$$= \frac{1}{0,007 + 0,0059 + 0,5} = \frac{1}{0,513} = 1,95 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

Assim,

$$\dot{Q} = U_i.A_i.\Delta T_{total} = 1,95 \times (50 - 20) = 58,5 \text{ W}$$

ou seja, 58 W estarão sendo transferidos do fluido para o ambiente, por cada metro de tubo. Observe que a maior resistência para o fluxo de calor é conseqüência do baixo coeficiente de convecção externo.

3.4.2 – Espessura Crítica de Isolamento

Considere uma camada de isolamento aplicada ao redor de um tubo circular, como mostrado na Figura 3.5. Das equações de transferência de calor, aplicando-se considerações matemáticas adequadas, obtém-se o raio externo (r_3) do isolamento, para o qual a transferência de calor será máxima:

$$r_3 = \frac{k_{isol}}{h_e} \tag{3.14}$$

A equação (3.14) expressa o conceito de *raio crítico de isolamento*. Duas conclusões podem ser obtidas:

- se o raio externo do isolamento fôr menor que o valor dado por esta equação, então a transferência de calor será aumentada com a colocação de mais isolante;
- para raios maiores que o raio crítico, um aumento de espessura do isolamento causará uma redução na transferência de calor.

A conclusão principal é que, para valores de h pequenos (ex.: convecção natural), as perdas de calor por convecção podem aumentar com o aumento da espessura de isolamento, porque isto aumenta a área da superfície externa do isolamento.

Exemplo

3.7. Calcule o raio crítico de isolamento para o amianto (k = 0,17 W/m.K) que reveste um tubo exposto ao ar a 20 ℃ com h = 3,0 W/m².K. Calcule a perda d e calor de um tubo de 5 cm de diâmetro cuja superfície encontra-se a 200 ℃, quando coberto com o raio crítico de isolamento, e sem isolamento.

Dados: k = 0,17 W/m.K h_e = 3,0 W/m².K $D_{e,tubo}$ = 5 cm = 0,05 m
T_e = 200 ℃ T_∞ = 20 ℃

Solução: da equação (3.14) podemos calcular:

$$r_{crit} = \frac{k}{h_e} = \frac{0{,}17}{3{,}0} = 0{,}0567 \text{ m} = 5{,}67 \text{ cm}$$

Vamos calcular a perda de calor, com o raio crítico. Observe que a transferência de calor, uma vez que se conhece a temperatura externa do tubo, pode ser dada por (equação 3.11):

$$\dot{Q} = \frac{(T_i - T_\infty)}{\dfrac{\ln(r_e / r_i)}{2.\pi.k.L} + \dfrac{1}{A_{e,isol}} . \dfrac{1}{h_e}}$$

onde r_e é o raio crítico, e r_i o raio interno do isolamento, dado por:

$$r_i = \frac{D_{e,tubo}}{2} = \frac{0{,}05}{2} = 0{,}025 \text{ m}$$

A área de troca de calor é calculada, fazendo-se L = 1m:

$$A_{e,isol} = 2.\pi.r_e.L = 2 \times \pi \times 0{,}0567 \times 1 = 0{,}356 \text{ m}^2$$

Assim:

$$\dot{Q} = \frac{(200 - 20)}{\dfrac{\ln(0{,}0567 / 0{,}025)}{2 \times \pi \times 0{,}17 \times (1)} + \dfrac{1}{0{,}356 \times 3{,}0}} = \frac{180}{0{,}767 + 0{,}936} = 105{,}7 \text{ W}$$

Sem isolamento, a perda de calor por convecção pela superfície do tubo seria:

$$\dot{Q} = h_e.A_i.(T_i - T\infty) = 3{,}0 \times (2 \times \pi \times *0{,}025) \times (200 - 20) = 84{,}8 \text{ W} \lessdot$$

Observe que a adição de 3,17 cm de isolamento na verdade *aumenta* a transferência de calor, em 25%. Qualquer espessura de isolamento que for adicionada, que seja menor que 3,17 cm, só fará aumentar a troca de calor. Para se conseguir algum efeito de redução na transferência de calor, ter-se-ia que adicionar uma espessura significativamente maior que 3,17 cm.

EXERCÍCIOS

3.1. Defina o coeficiente de transferência de calor por convecção. Explique como o mesmo está relacionado com os mecanismos físicos da convecção.

3.2. Uma barra de 2,5 cm de diâmetro e 15 cm de comprimento é mantida a 260°C. A temperatura do ambiente é 16°C e o coeficiente de transferência de calor por convecção é 15 W/m^2.°C. Calcule o calor perdido pela barra (taxa de transferência de calor).

3.3. Um cilindro, de 25 cm de diâmetro e 1,50 m de altura, contendo nitrogênio líquido, está exposto ao ar ambiente. Uma determinada quantidade de nitrogênio vaporiza a cada 24 horas, equivalente a uma transferência de calor da ordem de 10kJ. Supondo que este calor seja transferido por convecção do ar ambiente para a parede do cilindro, com um coeficiente de transferência de calor por convecção da ordem de 2,7 W/m².K, calcule a diferença de temperatura necessária entre a parede do cilindro e o ar ambiente.

3.4. Uma placa metálica colocada na horizontal, e perfeitamente isolada na sua parte traseira absorve um fluxo de radiação solar de 700 W/m². Se a temperatura ambiente é de 30°C, e não havendo circulação forçada do ar, calcule a temperatura da placa nas condições de equilíbrio (isto é, quando todo o calor que está sendo recebido é eliminado). Para obter o coeficiente de convecção, consulte a Tabela 3.2.

3.5. A temperatura interna de um ambiente é de 24 °C, quando a temperatura externa é de 32°C. Qual a taxa de transferência de calor através de uma janela de vidro de 1,2 x 3 m, com 5 mm de espessura? A condutividade térmica do vidro é de 1,4 W/m.K.

3.6. 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) é mantido a 25 °C enquanto o ar externo encontra-se a 5°C. Qual é a perda de calor através da parede? A condutividade do concreto é de 1 W/m.K.

3.7. O cilindro de um motor de combustão interna tem 10cm de diâmetro por 15cm de altura. Este motor gera uma taxa de transferência de calor da ordem de 5 kW, que precisa ser dissipado por convecção. Calcule a temperatura da parede externa do cilindro, quando se utiliza os seguintes fluidos:
a) ar a 27°C (h = 280 W/m².K);
b) água a 21°C (h = 3000 W/m².K).

3.8. No problema anterior, supondo que o cilindro seja de aço (k = 60,5 W/m.K) e tenha 10mm de espessura, calcule a temperatura média dos gases na câmara de combustão, sabendo-se que o coeficiente de transferência de calor por convecção no interior da câmara é da ordem de 150 W/m².K.

3.9. Um dos lados de uma parede plana é mantido a 100°C, enquanto o outro lado está exposto a um ambiente onde T = 80°C e h = 100W/m².°C. A parede, de 40cm de

espessura, tem condutividade térmica k = 1,6 W/m.°C. Utilizando o conceito das resistências térmicas, calcule o fluxo de calor através da parede.

3.10. Um dos lados de uma parede plana de 5cm de espessura está exposto a uma temperatura ambiente de 38°C. A outra face da parede se encontra a 315°C. A parede perde calor para o ambiente por convecção. Se a condutividade térmica da parede é de 1,4 W/m.K, calcule o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção que deve ser mantido na face da parede exposta ao ambiente, de modo a garantir que a temperatura nessa face não exceda 41°C.

3.11. Em um evaporador circula refrigerante R-12. A serpentina do evaporador têm 37,5mm de diâmetro externo e 5,0m de comprimento total. A taxa de transferência de calor total deve ser de 1,0 kW. Para evitar formação de gelo sobre a superfície da serpentina, deve-se manter a temperatura da superfície em torno de 2°C. O ar em contato com a serpentina está a aproximadamente 10°C. Qual deve ser o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção no evaporador para que não ocorra formação de gelo?

3.12. Um condensador tipo arame sobre tubo deve ser projetado para dissipar 0,6 kW de energia. O diâmetro do tubo utilizado é de 7,5mm. A temperatura da parede dos tubos é de 45°C.

(a) se a temperatura ambiente for de 27°C e h = 15 W/m².K, qual será o comprimento de tubo necessário para o condensador?

(b) se o tamanho máximo da tubulação do condensador for de 20m, qual será o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção necessário?

3.13. Ar atmosférico a 25°C escoa sobre uma placa que se encontra a uma temperatura de 75°C. A placa tem 1,5m de comprimento por 75cm de largura. Calcule o fluxo de calor que passa da placa para o ar, se o coeficiente de transferência de calor for de 5,0 W/m².K.

3.14. Qual é a taxa de liberação de calor por convecção de um corpo humano exposto a uma corrente de ar de 0,25 m/s e 24°C ?

3.15. Recalcule o fluxo de calor para uma parede semelhante a do Exercício 3.6, se do lado interno da parede é adicionado um revestimento de gesso de 5 mm de espessura.

3.16. Recalcule o fluxo de calor do Exercício anterior se, entre o revestimento de gesso e o concreto, for adicionado isolamento de placas de poliestireno (isopor), de 1 cm de espessura.

3.17. Um dos lados de uma parede plana está exposto a um ambiente onde T = 80°C e h = 100W/m².°C, enquanto o outro lado está exposto à atmosfera. A parede, de 40cm de espessura, tem condutividade térmica k = 1,6 W/m.°C. Calcule o coeficiente global de transferência de calor, e o fluxo de calor através da parede, se a temperatura atmosférica for de 30°C.

3.18. Uma parede de concreto em um prédio comercial tem uma área superficial total de 30m² e uma espessura de 30,0 cm. No inverno, o ar ambiente (interno) deve ser mantido a 24°C enquanto o ar externo encontra-se a 15°C. Calcule o coeficiente global de transferência de calor e a taxa de transferência de calor do ambiente para o exterior. A condutividade do concreto é de 1,0 W/m.K, e os coeficientes de troca de calor por convecção interno e externo são 8,0 e 23,0 W/m².K respectivamente.

3.19. Um vidro duplo de janela é formado por duas lâminas de vidro de 5 mm de espessura, separadas por um intervalo que contém ar. Supondo que o ar no meio das lâminas de vidro está estagnado e se comporta como um sólido, com condutividade térmica igual a 0,02624 W/m.K, calcule o coeficiente global de transferência de calor para este tipo de vidro. A condutividade térmica do vidro é de 1,4 W/m.K. Coeficientes típicos de troca de calor por convecção em relação a ambientes internos e externos podem ser assumidos como 8,0 e 23,0 W/m².K respectivamente.

3.20. Uma parede é construída de uma seção de aço inoxidável (k = 16 W/m.K) de 4 mm de espessura com idênticas camadas de plástico sobre as duas faces. O coeficiente global de transferência de calor, considerando o coeficiente de convecção nas duas superfícies de plástico, é 200 W/m².K. Se a diferença de temperatura entre o ar de um lado e de outro da placa é de 100°C, calcule a diferença de temperatura através do aço inoxidável. (considere uma área unitária).

3.21. O compartimento de um freezer consiste de uma cavidade cúbica de 2 m de lado. Pode-se assumir o fundo como perfeitamente isolado.

(a) qual o coeficiente global de transferência de calor que os materiais das paredes do freezer devem ter para garantir um ganho de calor menor que 400 W, quando as temperaturas externa e interna são respectivamente 35°C e -10°C?
(b) baseado no valor de U calculado, qual seria a espessura mínima de poliestireno expandido (k = 0,027 W/m.K) que deve ser aplicada às superfícies do compartimento? Despreze a contribuição dos materiais de revestimento interno e externo. Os coeficientes de convecção interno e externo podem ser assumidos como 7,5 e 20,0 W/m².K.

3.22. A parede de uma casa pode ser aproximada por duas camadas de 1,2cm de reboco sobre uma camada de 15cm de tijolo comum. Admitindo um coeficiente de transferênciade calor por convecção de 15 W/m².°C em ambos os lados da parede, calcule o coeficiente global de transferência de calor para este arranjo. (para obter os valores de condutividade térmica, utilize as tabelas do Capítulo 2)

3.23. Água escoa no interior de um tubo de aço com diâmetro interno de 2,5 cm. A espessura da parede do tubo é 2 mm, e o coeficiente de convecção no interior do tubo é 500 W/m².K. O coeficiente de convecção no lado externo é 12 W/m².K. Calcule o coeficiente global de transferência de calor.

3.24. Uma tubulação de vapor de diâmetro interno 8 cm e 5,5 mm de espessura de parede tem sua superfície interna a uma temperatura de 300°C. A tubulação é coberta com uma camada de 9 cm de isolante com k = 50 W/m.°C, seguida de uma camada de 4cm de isolante com k = 0,35 W/m.°C. A temperatura da superfície externa do isolante é 30°C. Calcule o coeficiente global U e o calor perdido por metro de comprimento, admitindo k = 47 W/m.°C para o tubo.

3.25. Um tubo de aço de 6cm de diâmetro interno e 0,75 cm de espessura é coberto com 0,6cm de amianto (k = 0,166 W/m.°C) seguido de uma camada de 2,5 cm de fibra de vidro (k = 0,040 W/m.°C). O coeficiente de convecção interno é 2000 W/m².K, e o externo, 50,0 W/m².K.

(a) calcule o coeficiente global de transferência de calor para a situação física descrita
(b) calcule a taxa de transferência de calor por metro de comprimento, quando as temperaturas interna e externa são respectivamente 300°C e 20°C?