

## Lista de exercícios de Fenômenos de Transporte – II

1º semestre de 2005

Profas. Esleide & Míriam (turmas 4E/F, 5C)

exercícios do capítulo 1 de Incropera & De Witt (numeração da 4ª edição, numeração entre parênteses são da 5ª edição)

Exercício	Resposta	Exercício	resposta
1.1 (1.1)	378 °C	1.23 b) e c) (1.34) (corrigir 4ª edição para D=60mm e L=250mm)	b) $2.04 \times 10^5$ (SI) c) 39 (SI)
1.3 (1.4)	0.1 (SI)	1.25	6923 (SI)
(1.6)	19600(W), 120W	*1.26	$\frac{dT}{dt} = -\frac{6}{\rho c p D} [h(T - T_\infty) + \epsilon \sigma (T^4 - T_{sp}^4)]$
1.7 (1.11)	1.1°C	1.32 (1.44) <sup>(2)</sup>	$\frac{\pi \dot{q}_o r_o^2 L}{2}; T_\infty + \frac{\dot{q}_o r_o}{4h}$
1.9 (1.13)	1400 e 18000 (SI)	1.33 a) e b) (1.48)	-0.089 K/s; 439K
1.11 (1.15)	4570; 65 (SI)	*1.35 a) (1.49a)	1.41 g/s
1.13 (1.18)	0.35; 5.25 (SI)	1.36 (1.50) <sup>(3)</sup>	1.37 h
(1.19)	2.94 W	*1.38 (1.53)	49°C
1.15 (1.21)	0.015 W	(1.54)	7.13 l/s; 70°C
(1.23)	102.5 °C	*1.40 (1.56)	79.1 K; 457mW
* (1.24)	28.3 (W/m <sup>2</sup> ); 95.4 (W/m <sup>2</sup> )	1.43 (1.59)	37.9 (°C)
*1.17 (1.25)	254.7 K	1.46 (1.62)	5500 W/m <sup>2</sup> ; 87.8°C
*1.19 (1.27)	727; 547 (SI)	1.47	88.9°C
* (1.28)	18405 W; \$ 6450	(1.69)	426K; 16 W/m <sup>2</sup>
*1.21 (1.30)	0.012 (W); 3.5%	*1.49 (1.70)	386 W/m <sup>2</sup> / 27.7 °C / 55%
* (1.31)	0.233 W; 3.44 W	1.51 (1.71)	47°C
*1.22 (1.32) <sup>(1)</sup>	8.1 W; 0.23 kg/h	1.52 (1.72)	(solução parcial anexada)

- (1) Despreze perdas de calor da camisa para o ambiente externo.
- (2) O enunciado do exercício 1.50 (5ª edição) não é idêntico ao do 1.36 (4ª edição), de modo que a resposta se refere apenas ao exercício da 4ª edição!
- (3) **Dica de resolução:** pense em como obter a taxa de geração de calor a partir da geração volumétrica dada e monte um BE para um VC englobando todo o recipiente cilíndrico.

\* **exercícios com radiação**

exercícios do capítulo 2 de Incropera & De Witt (numeração da 4ª edição, numeração entre parênteses são da 5ª edição)

exercício 2.7 (2.7): caso 1: 200 K/m; -5000 W/m<sup>2</sup>; caso 2: 225°C; 6250 W/m<sup>2</sup>; caso 3: -20°C; -5000 W/m<sup>2</sup>; caso 4: -85°C; -160K/m; caso 5: -30°C; 120 K/m

exercício 2.12 (2.12): 100°C; -40°C; 18.75 W; 16.25 W

Exercício	Resposta	Exercício	resposta
2.20 (2.20)		2.38(2.42)	
2.34 (2.37)		2.39(2.43)	
2.36 (2.39)		2.41 <sup>a</sup> (2.44 <sup>a</sup> )	
2.37(2.41)		2.42 <sup>a</sup> (2.46 <sup>a</sup> )	

exercícios do capítulo 3 de Incropera & De Witt (numeração da 4ª edição, numeração entre parênteses são da 5ª edição)

Exercício	resposta	Exercício	Resposta
3.2 a) (3.2)	7.7°C e 4.9°C	3.41 (3.45) <sup>(2)</sup>	a) 47.1 W/m; c) 3.25h
3.3 a) (3.3)	1270 (SI)	3.44 (3.47)	a-) 778.7°C; b-) 1153°C; 778.7°C; c-) 318.2°C
3.4 a) e b) (3.4)	2833 W/m <sup>2</sup>	3.45	163 W/m; 3.1 meses
3.6 (3.6)	996; 14.5 (SI)	3.46 (3.49)	1831 W/m
3.7 (3.7)	0.553; 22.1°C; 10.8°C; -56.3°C	3.49 (3.52)	1040 W/m
3.9	30 (SI)	3.50 (3.53)	0.01m; 909 W/m; 55 mm
3.13 (3.9)	5000 W/m <sup>2</sup> ; 1.53 W/mK	3.54 (3.57)	0.062 W/mK
3.15 (3.13)	b) 4.21 kW	3.59 (3.64)	sem lente: 35.5 mW; com lente 44.9mW
3.16 (3.14)	1.302 × 10 <sup>8</sup> J	3.106 (3.119)	+420%; +29%
3.17 (3.15)	0.1854 k/W	3.107 (3.120)	156.5°C, 128.9°C, 107°C
3.20 (3.20)	34600 W/m <sup>2</sup>	3.108 (3.124)	120.9 W
3.32 a) (3.35)	603 W/m	3.110 (3.126)	$T_b = T_\infty + \frac{\dot{q} A_g L_g}{h(A_g - A_c) + \sqrt{hk \frac{\pi^2 D^3}{4}} \tanh\left(\frac{L}{2} \sqrt{\frac{4h}{kD}}\right)}$
3.36	62.2 \$/dia	3.111 (3.127)	17.5 (SI)
3.38	150.8°C; 130°C	3.119 (3.136)	276W
(3.41) <sup>(1)</sup>	251 W/m; 23.5 °C	3.124 (3.140)	2831 W/m

- (1) Prove usando o BE que o cilindro interno deve ser isotérmico de modo que a temperatura do centro é igual à temperatura da face interna do cilindro que recobre a resistência elétrica.
- (2) No item b efetuar cálculos para uma espessura de gelo de 2mm

**exercícios do capítulo 4 de Incropera & De Witt (entre parênteses consta a numeração da 5ª edição)**

<b>exercício</b>	<b>Resposta</b>	<b>exercício</b>	<b>resposta</b>
<b>4.40 (4.39)</b>	(solução anexada)	<b>(4.48)</b>	122°C; 94.5 °C; 95.8 °C; 79.67 °C; 1117W/m; 1383 W/m; sim
<b>4.41 (4.40)</b>	$\frac{\Delta x T_o}{kR_{tc}} + \frac{h_u \Delta x}{k} T_\infty + T_2 + T_6 + \frac{\dot{q} \Delta x^2}{2k} - (B) T_1 = 0$ $B = \frac{\Delta x}{kR_{tc}} + \frac{h_u \Delta x}{k} + 2$ $\frac{h_1 \Delta x}{k} T_\infty + \frac{T_{12} + 2T_8 + T_{14}}{2} + \frac{\dot{q} \Delta x^2}{2k} - \left( \frac{h_1 \Delta x}{k} + 2 \right) T_{13} = 0$	<b>4.49</b>	358 W/m; 0.86 W/mK
<b>4.42 (4.41)</b>	(solução anexada)	<b>4.50 (4.50)</b>	160.7(°C); 95.6(°C); 48.7(°C); 74 3W/m
<b>4.43 (4.42)</b>	$-T_o + \frac{(T_1 + T_3)}{4} + \frac{k_A T_2 + k_B T_4}{2(k_A + k_b)} = 0$	<b>4.52 (4.52)</b>	205 W/m
<b>4.47 (4.46)</b>	422K; 363K; 443K; 156W/m	<b>4.53 (4.53)</b>	162.5(°C)

**exercícios do capítulo 5 de Incropera & De Witt (numeração da 4ª edição, numeração entre parênteses são da 5ª edição)**

<b>Exercício</b>	<b>Resposta</b>	<b>Exercício</b>	<b>Resposta</b>
<b>5.5 (5.5)</b>	1122 s	<b>(5.13)</b>	84.1; 83 (°C)
<b>5.6 (5.6)</b>	35.3 W/m <sup>2</sup> K	<b>(5.14)</b>	21.8 m
<b>5.7 (5.7)</b>	25358 s	<b>5.14(5.15)</b>	1.08h; 1220K
<b>5.8</b>	351K	<b>(5.19)</b>	63,8 °C
<b>5.10 (5.10) (1)</b>	968s; 456°C	<b>(5.26)</b>	80°C; 38,3 s

(1) Dica: Incropera & De Witt (p. 119-4ª edição e p. 178 – 5ª edição) apresentam a equação integrada para o cálculo da taxa de calor transferida em regime transitório como sendo:

$$Q = \rho V c_p (T_i - T_\infty) \left[ 1 - e^{-t/\tau_i} \right]; \text{ sendo } T_i \text{ a temperatura inicial e } \tau_i = \frac{\rho V c_p}{h A_{\text{sup}}}$$

Para que valor de tempo a expressão acima para a taxa de calor atinge o máximo valor?

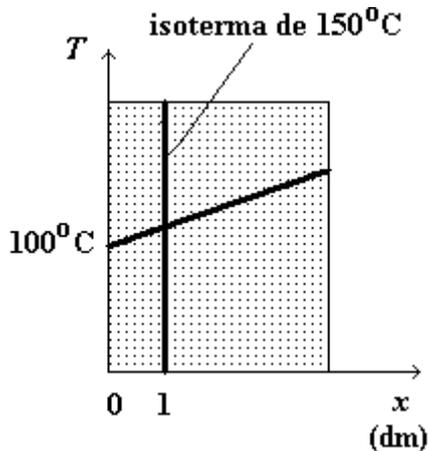
(2) ler 5.3 Incropera (p. 174-175, 5ª edição): desenvolvimento da equação diferencial não homogênea de 1º ordem.

**exercícios do capítulo 12 de Incropera & De Witt (numeração da 4ª edição, numeração entre parênteses são da 5ª edição)**

<b>Exercício</b>	<b>Resposta</b>	<b>Exercício</b>	<b>Resposta</b>
<b>(12.106)</b>	(a) 321,15 K	<b>(12.119)</b>	cálculo de h=68,3SI; Ts=295,2K
<b>(12.109)</b>	329,2K	<b>(12.122)</b>	a)312,5 K; b) 299,5 K
<b>(12.113)</b>	268,5K	<b>(12.134)</b>	a)197 K; b) 340 K

## exercícios complementares

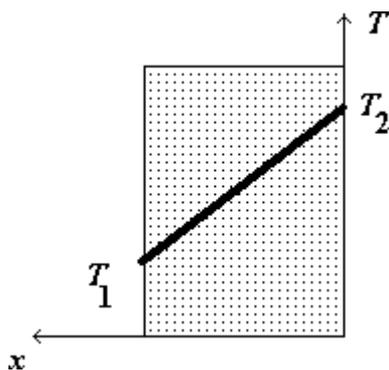
### Exercício 01 – (adaptado do exercício 2.9 de Incropera & De Witt – 5ª edição)



Considere a parede plana esquematizada no sistema de coordenadas mostrado a seguir com 4 dm de espessura e condutividade térmica de 100 W/mK. Supondo a manutenção de condições de regime estacionário e transferência de calor unidimensional. Pede-se:

- determinar o fluxo de calor e o gradiente de temperatura para o sistema de coordenadas mostrado.
- calcular a temperatura na face de 4 dm.

### Exercício 02 – (adaptado do exercício 2.9 de Incropera & De Witt – 5ª edição)



Considere a parede plana esquematizada no sistema de coordenadas mostrado a seguir com 100 mm de espessura e condutividade térmica de 100 W/mK. Supondo a manutenção de condições de regime estacionário e transferência de calor unidimensional, com  $T_1=400\text{K}$  e  $T_2=600\text{K}$ . Pede-se:

- determinar o fluxo de calor e o gradiente de temperatura para o sistema de coordenadas mostrado.
- desenhar no sistema de coordenadas mostrado a isoterma de 500K.

### Exercício 03 - (adaptado do exercício 1.39 (4ª edição) ou 1.55 (5ª edição) de Incropera & De Witt)

Sobre a superfície externa do teto de um carro em um estacionamento incide um fluxo solar radiante de  $800\text{ W/m}^2$ , enquanto a superfície interna é perfeitamente isolada. O coeficiente de convecção entre o teto e o ar ambiente é  $12\text{ W/m}^2\text{K}$ . Pede-se:

- desprezando-se a troca por radiação com a vizinhança, calcular a temperatura do teto em condições de regime estacionário se a temperatura do ar ambiente é  $20^\circ\text{C}$  e assumindo que o carro absorva toda a radiação solar incidente.
- Se a emissividade do teto do carro for 0.8 e a temperatura do céu for  $-10^\circ\text{C}$ , calcule a temperatura do teto do carro. Assuma que o teto do carro se comporte como um corpo cinza.
- Se a emissividade e absorvidade do teto do carro forem, respectivamente, 0.93 e 0.16, calcule a temperatura do teto do carro quando a temperatura do céu for  $+10^\circ\text{C}$ .

**Exercício 04 (adaptado de um problema industrial trazido para discussão por Daniel R. Domingues da turma 5C d0 2º semestre de 2002)**

Dois tarugos com dimensões idênticas e feitos de uma mesma liga metálica, mas com revestimentos distintos são aquecidos em um forno com temperatura e aquecimento uniformes. Após um certo tempo, os tarugos são retirados e verifica-se que a temperatura em seus centros não é a mesma. Explique este fenômeno.

**Exercício 05**

Interprete o seguinte modelo matemático escrito para descrever um tanque esférico em que se armazena oxigênio líquido e que contém uma válvula de alívio e para o qual se deseja calcular a quantidade de oxigênio evaporada do tanque ao longo de uma semana. Identifique as equações de BM e de BE.

$$\frac{dm}{dt} = -\dot{m}_s$$
$$\dot{m}_s \lambda = q$$
$$q = 4\pi R^2 \left[ h(T_{\text{sup}} - T_{\infty}) + \alpha_e \sigma T_{\text{ceu}}^4 - \varepsilon_e \sigma T_{\text{sup}}^4 + pG_s \right]$$
$$q = \frac{T_{\text{sup}} - T_{\text{eb}}}{\frac{1}{4\pi R_i^2 h_{\text{eb}}} + \left( \frac{1}{R_i} - \frac{1}{R} \right) \frac{1}{4\pi k_e}}$$
$$p = \begin{cases} 1 & ; 5 \leq t \leq 17\text{h} \\ 0 & ; 17 < t < 5\text{h} \end{cases}$$
$$T_{\infty} \text{ (em K)} = \begin{cases} 273 + 5 \text{sen} \left( \frac{2\pi}{24} t \right) & ; 0 \leq t \leq 12\text{h} \\ 273 + 11 \text{sen} \left( \frac{2\pi}{24} t \right) & ; 12 \leq t \leq 24\text{h} \end{cases}$$

**Exercício 06 (adaptado de exercício cedido pelo prof. Oliveira)**

A circulação mantém a temperatura de 36.5°C a 4mm da superfície da pele. Os terminais nervosos indicadores de temperatura estão a 2mm dessa superfície e sua temperatura não pode superar 45°C. Assuma que a condutividade térmica do dedo seja 0.6 (SI) e considere o problema como sendo descrito em coordenadas cartesianas e adote uma base de cálculo para a área de 1m<sup>2</sup>. Pede-se:

- a-) para o critério estabelecido, determinar a temperatura máxima da água com coeficiente de película de 583 (SI) onde uma pessoa pode mergulhar o dedo em o regime permanente. **Resposta:** 58°C
- b-) para o critério estabelecido, determinar a temperatura máxima do ar ambiente com coeficiente de película de 15 (SI) onde uma pessoa pode estar. Assuma regime permanente e não considere efeitos de radiação.
- c-) para o critério estabelecido, determinar a temperatura máxima de uma chapa metálica onde uma pessoa possa colocar o dedo. Assuma contato perfeito entre a chapa e o dedo.

### Exercício 07 (cedido pelo prof. Oliveira)

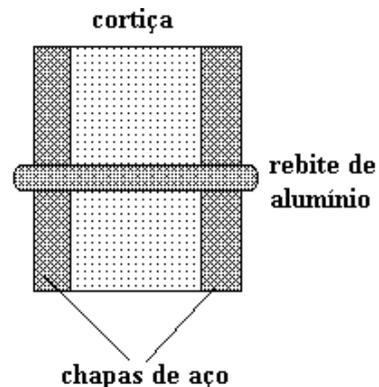
Uma roupa de mergulho é constituída por uma camada de borracha (de espessura de 3.2 mm e condutividade térmica 0.17 (SI)) aplicada sobre o tecido (de espessura de 6.4 mm e condutibilidade 0.035 (W/m°C)) a qual permanece em contato direto com a pele. Assumindo para a pele 27°C e para a superfície externa da borracha a temperatura de 15°C e para uma área corporal de 4.1m<sup>2</sup>, calcular a energia dissipada em uma hora.

**dica:** como as espessuras da roupa de mergulho são pequenas em relação à curvatura das várias partes do corpo humano, podem ser empregadas as equações para paredes planas.

**Resposta:** 878 kJ

### Exercício 08 (cedido pelo prof. Oliveira)

Uma parede é construída com uma placa de cortiça de condutividade 0.034 (SI) de 10 cm, a qual é revestida por duas chapas de aço de condutividade 45 (SI) de 0.64cm de espessura. Para a fixação das chapas à parede são empregados 35 rebites de alumínio de condutividade 229 (SI) por metro quadrado de parede, sendo que cada rebite tem um diâmetro de 0.64 cm. Determinar a resistência térmica por m<sup>2</sup> dessa parede.



### exercício 09 (cedido pelo prof. Oliveira)

Determinar a espessura da camada de gelo que irá se formar sobre a superfície externa de uma esfera de 0.4m de raio mantida a -10°C no ar a 25°C com coeficiente de película de 10 (SI). Adotar para o gelo a condutividade de 2.2 (SI). **Dica:** qual a temperatura da superfície do gelo em contato com o ar. Por quê? A temperatura na camada de gelo será constante?

**Resposta:** 7.4 cm

### exercício 10 (adaptado de exercício cedido pelo prof. Oliveira)

Água à temperatura constante de 2°C escoar por um tubo de cobre de condutividade 380 (SI) e de diâmetros interno e externo de 9.4mm e 12.7mm, respectivamente. Calor é transferido pela parede para o ar ambiente a -30°C. Pede-se:

- determinar a potência dissipada e a vazão de água pelo interior do tubo, sabendo que a temperatura da parede do tubo mantém-se constante em 1°C.
- explicar porque a temperatura da parede do tubo encontra-se mais próxima à da temperatura da água que a do ar.
- discutir se as hipóteses de temperaturas constantes para a água e o tubo são realistas.

São dadas as seguinte expressões para o cálculo dos coeficientes de película:

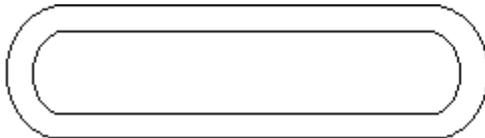
entre a água e o tubo:  $h = 216\sqrt[3]{v_b}$  (SI), sendo  $v_b$  a velocidade média de escoamento da água pelo tubo.

entre o ar e o tubo:  $h = 1.24\sqrt[3]{(T_p - T_\infty)}$  (SI), sendo  $T_p$  a temperatura da parede do tubo e  $T_\infty$  a temperatura do ar.

**exercício 11 (cedido pelo prof. Oliveira)**

Um equipamento para testes é constituído por uma parede cilíndrica de raio externo de 0.203m (8") e comprimento 1.829m (6ft), a qual é fechada por dois hemisférios. Sobre o equipamento temos 2" de um isolante de condutividade 0.067 (SI). Pelo interior do equipamento escoa vapor saturado a 150°C (calor latente de vaporização de 2114kJ/kg), o qual condensa. Determinar a vazão de vapor em kg/h que passa pelo interior do equipamento. A temperatura da face externa do isolante é de 30°C.

**dica:** um hemisfério é a metade de uma esfera.



**Exercício 12 (adaptado do exercício 3.46 de Incropera & De Witt – 5ª edição)**

Uma parede cilíndrica é composta de dois materiais, A e B, de condutividades térmicas, respectivamente de 0.098 (SI) e 15 (SI), que são separados por um aquecedor elétrico delgado para o qual as resistências de contato na interface são desprezíveis. O diâmetro interno do tubo B é de 10cm. A espessura do material B é de 2cm e a do material A é de 5cm.

Um diagrama de um tubo cilíndrico com materiais A e B, aquecedor e condições de contorno. O tubo tem um aquecedor elétrico delgado no centro, com resistência $q''_a, T_a$ . O material B tem espessura $r_2 - r_1$ e o material A tem espessura $r_3 - r_2$ . O diâmetro interno do tubo B é $2r_1$ . O escoamento interno é a água saturada a $T_{sat}, h_i$ e o ar ambiente está a $T_{amb}, h_o$ .	<p>Água saturada a 360K é bombeada através do tubo com coeficiente de convecção de 20000 (SI). A superfície externa é exposta ao ar ambiente que está a 25°C e fornece um coeficiente de película de 15 (SI). Assumindo condições de regime estacionário em que um fluxo de calor uniforme de 9000 W/m<sup>2</sup> é dissipado pelo aquecedor, pede-se:</p>
--	---

- a-) determinar a temperatura do aquecedor ( $T_a$ ).
- b-) sabendo-se que o calor latente de vaporização da água a 360K é de 2291 (kJ/kg), determinar a vazão de vapor escoando pelo tubo que tem 2m de comprimento.

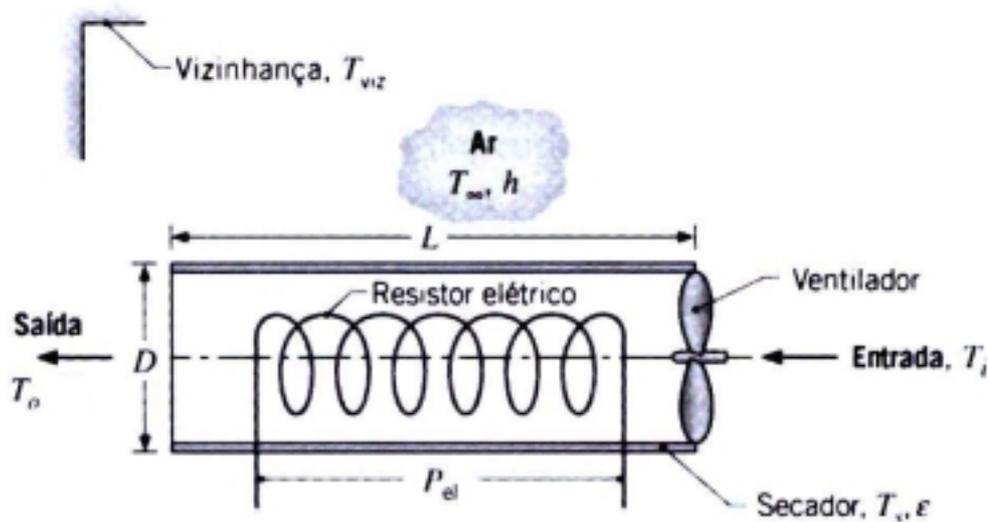
**Respostas: 367.1K; 8.32×10<sup>-4</sup> kg/s**

**exercício 13 (adaptado do exercício 1.39 de Incropera & De Witt –edição de 2001)**

Um secador de cabelo, esquematizado a seguir, pode ser idealizado como sendo um duto circular com um pequeno ventilador que puxa o ar ambiente, onde esse ar é aquecido conforme circula por uma resistência elétrica de formato espiral. Admita que o calor específico do ar seja 1007 J/kgK. Pede-se:

- a-) Se o secador é projetado para operar com um consumo de energia elétrica de 500W e para aquecer o ar da temperatura ambiente de 20°C até a temperatura de saída de 45°C e admitindo uma vazão volumétrica constante, qual a vazão volumétrica na qual o ventilador deveria operar? Qual a velocidade na saída do tubo de 70mm de

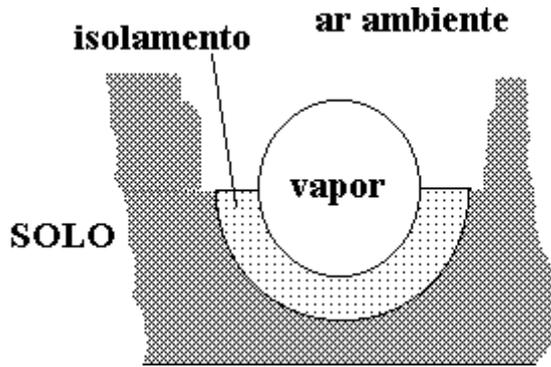
- diâmetro? Admita que a perda de calor do protetor para o ambiente possa ser desprezada bem como a energia consumida pelo ventilador.
- b-) Considere que o duto tenha 150 mm de comprimento e que a emissividade de sua superfície seja de 0.8. Se o coeficiente de convecção natural com o ambiente for de 4 (SI) e se a temperatura da vizinhança e do ambiente forem iguais a 20°C, verifique se de fato a perda de calor para o ambiente pode ser desprezada. Assuma que a superfície externa do casco seja uniforme e igual a 40°C.
- c-) A vazão volumétrica que passa pelo secador de calor é de fato constante? Discuta como o problema poderia ser resolvido na ausência desta hipótese simplificadora.
- d-) No item b-) foi estimada a temperatura de 40°C para a superfície do duto e no item a-) a energia gasta pelo ventilador foi desprezada. Discuta como o problema poderia ser modelado de forma a se levar em conta a energia gasta no ventilador e a se calcular a temperatura do duto.



#### exercício 14

As obras de escavação danificaram o isolamento de uma tubulação de vapor. Para avaliar a extensão dos danos, os técnicos removeram a parte superior do isolamento ao longo de um trecho de 4m da tubulação, conforme esquematizado na figura, sem constatar nenhuma avaria mais grave. A temperatura do vapor é de 210°C e o diâmetro externo da tubulação de vapor é de 20cm. A espessura do isolamento é de 10cm e sua condutividade térmica é 0.07(SI). O ar ambiente está a 17°C e a temperatura do céu é igual a -12°C. O coeficiente de película para o ar ambiente é igual a 15 (SI). Sabendo-se que a emissividade da tubulação é igual 0.25, pede-se calcular a taxa total de perda de calor sabendo-se que a temperatura do solo em contato com o isolamento é de 15°C e que a resistência térmica de contato entre o isolamento e o solo é de

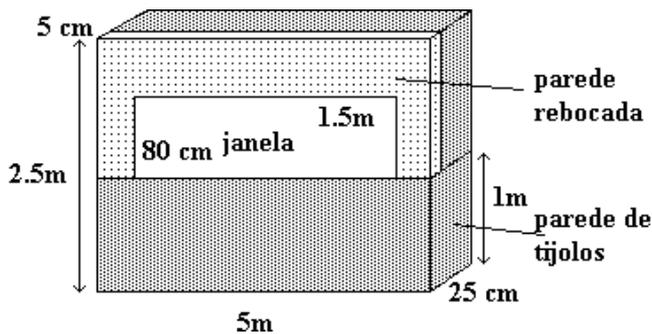
$$R_c'' = 0.9 \times 10^{-4} \left( \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}} \right). \text{ Colocar todas as hipóteses realizadas.}$$



**exercício 15 (prova da turma 5C do 2º semestre de 2002)**

Considere a parede de uma casa de dimensões  $5 \times 2.5$  m e com uma espessura total de 25 cm, esquematizada na figura a seguir. A janela de vidro tem dimensões  $1.5 \times 80$  cm  $\times$  8 mm. A parede é dividida em duas partes, sendo que a porção inferior é feita de tijolos e ocupa uma altura de 1 m. A parede superior é feita de tijolos rebocados com cimento apenas na face externa. A espessura da camada de reboco é de 5 cm. São dadas as condutividades térmicas dos materiais em questão e os coeficientes de película do lado interno e externo da casa, a saber:

material	condutividade térmica (no SI)	material	condutividade térmica (no SI)
ar	0.025	tijolos cimentados	1.3
vidro	1.4	reboco de cimento	0.72
coeficiente de película do lado interno da casa (SI)	10	coeficiente de película do lado externo da casa (SI)	25



circuito térmico

Sabendo-se que a temperatura interna da casa é sempre mantida em  $25^\circ\text{C}$ , pede-se:

- Para um dia em que a temperatura ambiente é de  $5^\circ\text{C}$  e desprezando quaisquer efeitos de radiação, qual será a energia dissipada pela parede? **Dica:** esboce o circuito térmico para a parede. Pense em um circuito em uma associação do tipo série-paralelo.
- Nos dias de inverno, o consumo de energia será maior nos dias com ou sem ventania? Justifique.

**exercício 16 – adaptado do exercício 1.40 de Kreith (2003)**

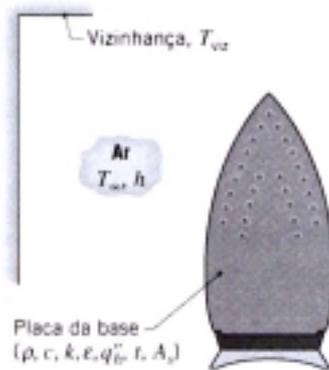
Um aquecedor solar simples consiste de uma placa plana de vidro colocada em uma panela rasa totalmente preenchida com água de forma que a água esteja em contato com a placa de vidro sobre ela. A radiação solar passa através do vidro a uma taxa de  $491.79 \text{ W/m}^2$ . Em condições de regime estacionário, a água está a uma temperatura de  $93.3^\circ\text{C}$  e o ar ao seu redor está a  $26.7^\circ\text{C}$ . Se os coeficientes de transferência de calor entre a água e o vidro e entre o vidro e o ar forem, respectivamente  $28.39 \text{ W/m}^2\text{K}$  e  $11.356 \text{ W/m}^2\text{K}$  e desprezando a condução pelo vidro, determine o tempo necessário para transferir  $105.51 \text{ kW}$  por metro quadrado da superfície para a água na panela. No tocante à radiação considere que o único fluxo relevante seja o da radiação solar.

**exercício 17 – cedido pelo prof. Oliveira (resposta: 11 min)**

Determinar o tempo para o aquecimento de um cubo com aresta de  $20\text{mm}$  inicialmente a  $30^\circ\text{C}$  até  $200^\circ\text{C}$  imerso em um banho a  $300^\circ\text{C}$  com coeficiente de película de  $15 \text{ (SI)}$ . A condutividade do cubo é de  $52 \text{ (SI)}$  e a sua difusividade térmica é de  $1.7 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ .

**exercício 18 – exercício 5.8 da 5ª edição de Incropera & De Witt**

A placa da base de um ferro de passar roupa com uma espessura  $L=7\text{mm}$  é feita de uma liga de alumínio (densidade de  $2800 \text{ (SI)}$ , capacidade calorífica de  $900 \text{ (J/kgK)}$ , condutividade térmica de  $180 \text{ (W/mK)}$ , emissividade de  $0.8$ ). Um aquecedor de resistência elétrica é colocado no interior da placa, enquanto a superfície externa é exposta ao ar ambiente e uma grande vizinhança a  $25^\circ\text{C}$ . As áreas interna e externa das superfícies são  $0.040\text{m}^2$ . Se um fluxo de calor aproximadamente uniforme de  $1.25 \times 10^4 \text{ (W/m}^2)$  for aplicado à superfície interna da base da placa e se o coeficiente de convecção na superfície externa for de  $10 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ , estime o tempo necessário para a placa alcançar a temperatura de  $135^\circ\text{C}$ .



**exercício 19 (adaptado de exercício cedido pelo Prof. Oliveira)**

Por um tubo de diâmetro interno de  $38 \text{ mm}$  escoar água com uma velocidade média de  $3 \text{ m/s}$ . A temperatura na superfície do tubo se mantém a  $50^\circ\text{C}$ , enquanto a água se aquece de  $16^\circ\text{C}$  a  $24^\circ\text{C}$ . Admita que para este tipo de situação o coeficiente global de troca térmica possa ser definido de forma simplificada como:

$$q = UA \left( T_p - \frac{T_e + T_s}{2} \right)$$

sendo,  $T_e$  e  $T_s$  a temperatura da alimentação e saída da corrente de água,  $T_p$  a temperatura da parede e demais variáveis seguem a nomenclatura de aula.

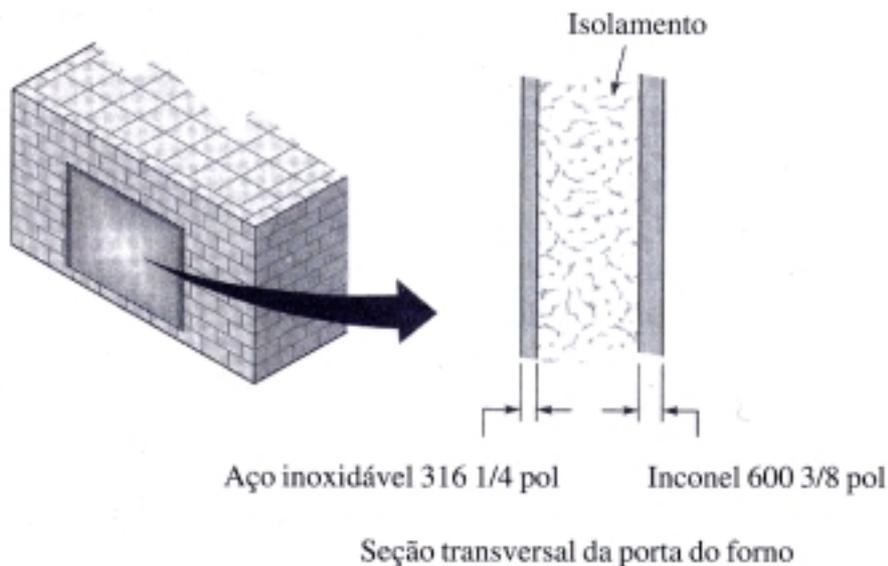
Admita coeficiente de convecção constante de  $8800 \text{ (SI)}$ . Pede-se determinar o comprimento da tubulação.

Dados complementares:

T (°C)	densidade da água (SI)	calor específico da água (kJ/kg °C)
10	999.7	4.191
20	998.2	4.183
30	995.7	4.174

**exercício 20 (questão da PAF da turma 5C do 1º semestre de 2003) ( exercício adaptado do exemplo 1.11 de Kreith & Bohn, 2003)**

A porta de um forno industrial a gás apresenta uma área superficial de 2m por 4m e deve ser isolada para reduzir a perda máxima de calor para 1200 W/m<sup>2</sup>. A porta é mostrada esquematicamente na figura a seguir. A superfície interna é uma chapa de Inconel 600 com 3/8 de polegada de espessura e condutividade térmica de 28 (SI) e a superfície externa é uma chapa de aço inoxidável 316 com 1/4 de polegada de espessura e condutividade térmica de 25 (SI). Entre essas chapas metálicas, deve ser colocada uma espessura adequada de material isolante. A temperatura efetiva do gás dentro do forno é de 1200°C e o coeficiente global de transferência de calor entre o gás e a porta é de 20 (W/m<sup>2</sup>K). O coeficiente de película entre a superfície externa da porta e a vizinhança a 20°C é de 5 W/m<sup>2</sup>K. Pede-se:



- a-) Que mecanismos de transferência de calor estão englobados no coeficiente global de transferência de calor tratado no enunciado? – **valor 0.5**
- b-) Considere os seguintes isolantes:

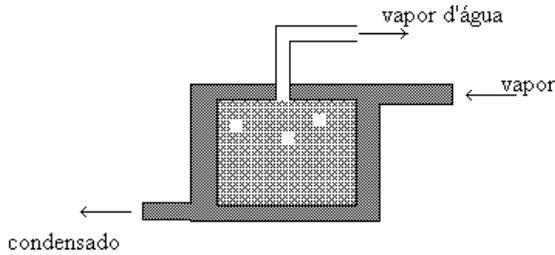
isolante	temperatura máxima suportada (°C)	condutividade térmica (SI)	
		400 (°C)	600 (°C)
pó de zircônia	980	0.21	0.24
pó de sílica	960	0.075	0.09
alumina sílica	1260	0.145	0.24

Qual deles você usaria como isolamento para a porta? Qual a espessura que deve ser usada deste isolamento? – **valor 2.25**

- c-) O que irá ocorrer se for aumentada a espessura do isolamento? – **valor 0.25**

**Observação:** 1 in = 2.54 cm

**exercício 21 (exercício 1.15 de Kreith & Bohn, 2003)**



A água a uma temperatura de  $77^{\circ}\text{C}$  deve ser evaporada lentamente de uma vasilha. Ela está em um recipiente de baixa pressão, envolvido por vapor, como mostrado no desenho a seguir. O vapor está condensando a  $107^{\circ}\text{C}$ . O coeficiente total de transferência de calor entre a água e o vapor é  $1100\text{ W/m}^2\text{ K}$ . Calcule a área necessária da superfície do recipiente para evaporar a água a uma taxa de  $0.01\text{ kg/s}$ .

**exercício 22 (adaptado do exercício 2.16 de Kreith & Bohn, 2003)**

Uma tubulação de aço padrão com 4" (diâmetro interno de 4.026" e diâmetro externo de 4.500") transporta vapor superaquecido a  $1200^{\circ}\text{F}$  em um espaço fechado onde existe risco de incêndio, limitando a temperatura da superfície externa a  $100^{\circ}\text{F}$ . Para minimizar o custo do isolamento, dois materiais serão utilizados: primeiro um isolamento para altas temperaturas relativamente caro será aplicado sobre a tubulação. A seguir, será aplicado óxido de magnésio, um material mais barato na parte externa. A temperatura máxima do óxido de magnésio deve ser  $600^{\circ}\text{F}$ . As constantes a seguir são conhecidas:

coeficiente de película do lado do vapor:	$100\text{ BTU/h ft}^2\text{ }^{\circ}\text{F}$
condutividade do isolamento para altas temperaturas:	$0.06\text{ BTU/h ft }^{\circ}\text{F}$
condutividade do óxido de magnésio:	$0.045\text{ BTU/h ft }^{\circ}\text{F}$
coeficiente externo de transferência de calor:	$2\text{ BTU/h ft}^2\text{ }^{\circ}\text{F}$
condutividade do aço:	$25\text{ BTU/h ft }^{\circ}\text{F}$
temperatura ambiente:	$70^{\circ}\text{F}$

Lembre-se que:  $1\text{ BTU} = 1.055 \times 10^3\text{ J}$ ;  $1\text{ ft} = 0.3048\text{ m}$ ;  $1\text{ BTU/hft}^2\text{ }^{\circ}\text{F} = 5.678\text{ W/m}^2\text{ K}$ ;  $1\text{ BTU/hft }^{\circ}\text{F} = 1.731\text{ W/mK}$ ;  $1\text{ BTU/hft}^2 = 3.1525\text{ W/m}^2$ .

Pede-se:

- determinar a quantidade de calor transferida por hora por pé linear da tubulação.
- especificar a espessura para cada material de isolamento
- calcular o coeficiente total de transferência de calor com base no diâmetro externo da tubulação
- determinar a fração da resistência total atribuída à resistência do lado do vapor, à resistência da tubulação de aço, ao isolamento (à combinação dos dois materiais), à resistência externa

**exercício 23 (resolução anexada)**

No interior de um reator tubular de diâmetro interno  $d$  escoam um fluido reacional hipotético a uma velocidade média  $v_m$  com densidade  $\rho$  e calor específico  $cp$ , os quais podem ser considerados constantes. O reator é contido em um tubo de diâmetro interno  $D$  e no espaço anular entre o tubo reacional e o tubo externo escoam vapor saturado a uma temperatura  $T_{vap}$ . O fluido reacional entra no reator a uma temperatura  $T_o$  e na saída do reator a sua temperatura não pode ultrapassar  $T_s$ . Pede-se:

- explicar a razão da seguinte simplificação: "em muitas situações práticas, efetua-se a simplificação de que a temperatura de uma parede em contato com vapor saturado tem a mesma temperatura do vapor saturado".

- b-) para a situação em que no reator ocorre uma reação exotérmica que libera uma energia  $\dot{E}_g$ , obter uma expressão analítica para a taxa de calor trocada entre o fluido reacional e o vapor.
- c-) obter também uma expressão analítica para a vazão de vapor que deve ser usada.
- d-) o problema é de transferência uni ou bidimensional? Para que serve a abordagem unidimensional?
- e-) obter uma expressão analítica que permite o cálculo da temperatura da parede do tubo do reator.
- f-) obter a taxa de calor trocada e vazão de vapor para os seguintes casos:
- caso 1:**  $T_{vap}=95^\circ\text{C}$  e  $\dot{E}_g = 11.4\text{kW}$
- caso 2:**  $T_{vap}=90^\circ\text{C}$  e  $\dot{E}_g = 11.4\text{kW}$
- caso 3:**  $T_{vap}=90^\circ\text{C}$  e  $\dot{E}_g = 29.4\text{kW}$
- dados adicionais:**  $d=2.54\text{cm}$ ;  $v_m=2.5 \text{ m/s}$ ,  $\rho=1050 \text{ (SI)}$ ;  $cp=4300 \text{ (J/kgK)}$ ;  $D=5\text{cm}$ ;  $T_e=90^\circ\text{C}$ ;  $T_s=95^\circ\text{C}$
- g-) Para os casos 1 e 3 do item f-), a hipótese em a-) é razoável?

Dados:

Temperatura (K)	Temperatura ( $^\circ\text{C}$ )	calor latente de vaporização da água: $\lambda$ (J/kg)
360	87	2291
365	92	2278
368	95	2266

**Exercício 24 (adaptado exercício 12.122 Incropera P2 das turmas 5C e 4E do 1º semestre de 2004)**

É comum encontrar gatos dormindo pela manhã sobre telhados de casas. Isso ocorre porque a superfície do telhado é quente e o gato sente-se aquecido. Admita que a emissividade e a absorvidade de um telhado sejam respectivamente 0.65 e 0.8 e que o lado inferior do telhado seja bem isolado. Se o fluxo de irradiação solar incidente é de  $600\text{W/m}^2$  e a temperatura do telhado seja de  $40^\circ\text{C}$ , calcular o coeficiente de película entre o telhado e o ar ambiente que se encontra a  $10^\circ\text{C}$ . Neste dia frio a temperatura do céu pode ser considerada  $-40^\circ\text{C}$ .

**Exercício 25**

Atribuir um significado físico ao seguinte modelo matemático:

$$mC_p \frac{dT}{dt} = -h \cdot (4\pi r^2) \cdot (T - T_\infty) - \epsilon\sigma(4\pi r^2)(T^4 - T_{c\acute{e}u}^4)$$

**Exercício 26 (adaptado exercício 5.10 Incropera – P2 da turma 4E do 1º semestre de 2004)**

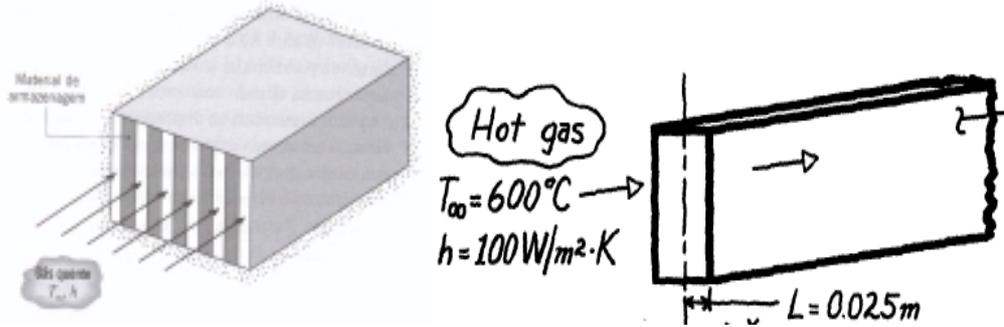
Uma forma de armazenar energia térmica consiste em um grande canal retangular englobando camadas alternadas de uma placa e de um canal para escoamento de um gás. A análise a ser feita será em uma placa de alumínio de largura de 0,05m numa temperatura inicial de  $25^\circ\text{C}$ . O alumínio tem densidade  $2702 \text{ kg/m}^3$ , calor específico a pressão constante de  $1033 \text{ J/kg.K}$  e condutividade térmica de  $231 \text{ W/m.K}$ . Considere que um gás quente passe apenas pela placa à temperatura de  $600^\circ\text{C}$  com coeficiente de película de 100 (SI). Considere a informação que levará um tempo de 968s para que a placa armazene 75% da energia máxima possível. Pede-se:

- a) pelo balanço de energia, qual será a temperatura da placa de alumínio nesse instante? **Resposta:** 456.4°C
- b) sabendo-se que a equação integrada para o cálculo da taxa de calor transferida é dada por:

$$Q = \rho V c_p (T_0 - T_\infty) \left[ 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right]; \text{ sendo } T_0 \text{ a temperatura inicial e } \tau = \frac{\rho V c_p}{h A_{\text{sup}}},$$

expressar a taxa máxima de calor que será armazenada.

- c) qual é a temperatura no centro da placa de alumínio? Justificar.



### Exercício 27

Uma peça esférica de aço carbono AISI 1010 inicialmente a 600 K é inserida em um grande tanque em que um fluido é mantido à temperatura uniforme de 300 K. O seguinte modelo matemático foi proposto por um estagiário para calcular a variação de temperatura da peça.

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \frac{3h}{r} (T_\infty - T)$$

Pede-se estabelecer para que diâmetros da peça o modelo matemático pode ser usado, sabendo-se que a peça deve ser resfriada até 400K e sendo disponíveis os seguintes dados de condutividade térmica. Considere que o coeficiente de película seja de 200 (SI).

	300K	400K	600K	800K
Condutividade térmica (W/mK)	63.9	58.7	48.8	39.2

### exercício 28

Considere a seguinte situação: (a) você está tomando banho no chuveiro e gastando 1 m<sup>3</sup>/h de água que sai aquecida a 39°C; (b) você está tomando banho no chuveiro e está gastando 2 m<sup>3</sup>/h de água que também sai aquecida a 39°C (isto pode acontecer pois a temperatura da entrada da água no chuveiro pode ser diferente nos dois casos). O fluxo térmico e a sensação térmica nas duas situações serão os mesmos? Justifique.

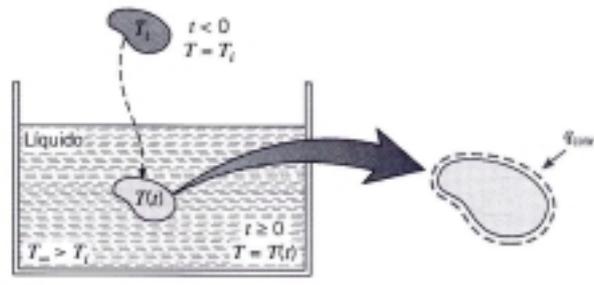
### exercício 29

Considere que um autoforno que contém uma liga metálica tenha formato cilíndrico com diâmetro interno de 4m e que a altura da massa fundida no autoforno seja de 6m. A base do autoforno pode ser considerada adiabática e o autoforno é aberto de modo que a massa fundida a 1700K está exposta ao ar ambiente. Considere que a parede seja feita de um material refratário com 50cm de espessura e condutividade térmica de 0.75 (W/mK). Admita que todo o ar adjacente ao autoforno (inclusive aquele em contato com

a massa fundida) esteja a  $40^{\circ}\text{C}$  com coeficiente de película constante de  $25 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ . O coeficiente de convecção entre a massa fundida e a parede refratária pode ser considerada de  $1000 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ . Não considerando a troca térmica por radiação, qual a energia dissipada para o meio ambiente?

**exercício 30**

Um importante processo industrial de modificação das propriedades de ligas metálicas, consiste na introdução de pequenas esferas, denominadas *pellets*, contendo um metal de interesse na massa fundida da liga que se deseja modificar, como mostrado na figura a seguir. Esses *pellets* ao entrarem em contato com a massa fundida são aquecidos até à fusão, quando passam a se difundir na massa fundida da liga metálica a ser modificada.



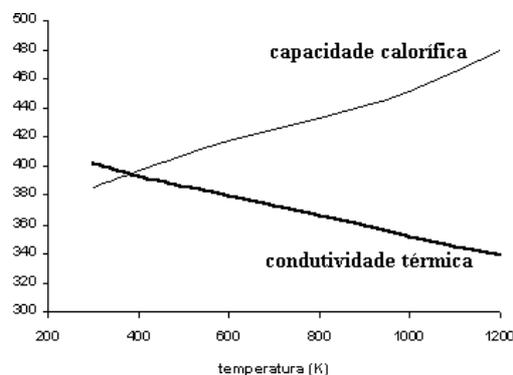
Considere que *pellets* de cobre sejam introduzidos em uma liga de metal fundido que se encontra a  $1700\text{K}$ , com a qual os *pellets* de cobre trocam calor por convecção com coeficiente de película de  $1000 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ . Os *pellets* são alimentados a  $300\text{K}$  e a temperatura de fusão do cobre é de  $1358\text{K}$ . O banho de metal fundido **não** é agitado. As seguintes propriedades, extraídas de Incropera & De Witt estão disponíveis:

**Densidade do cobre puro a 300K:**

$8933 \text{ kg/m}^3$

Dados de capacidade calorífica e condutividade térmica do cobre puro

$T \text{ (K)}$	capacidade calorífica (J/kg K)	condutividade térmica (W/mK)	$T \text{ (K)}$	capacidade calorífica (J/kg K)	condutividade térmica (W/mK)
300	385	401	800	433	366
400	397	393	1000	451	352
600	417	379	1200	480	339



- gráfico para o cobre puro

Pede-se:

- a-) Qual deve ser o diâmetro máximo do *pellet* de cobre puro para que o método da capacitância global possa ser usado na descrição da transferência transitória de

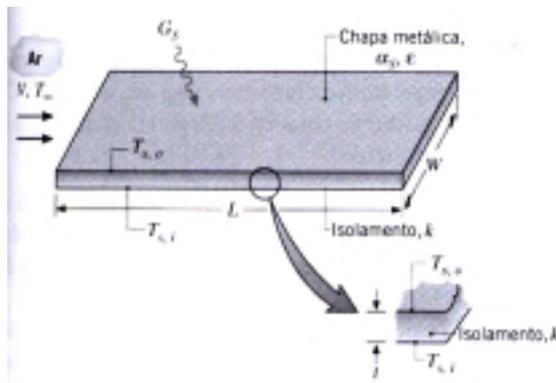
energia (i.e. qual o diâmetro máximo para que a esfera de cobre possa ser considerada como um corpo homogêneo)?

- b-) Admita, por questões de segurança, que o diâmetro do *pellet* efetivamente usado seja 10% do valor que você obteve no item b-). Em quanto tempo um *pellet* atingirá a sua temperatura de fusão?
- c-) Qual das seguintes expressões pode ser usada para confirmar se a estimativa para o coeficiente de película entre o *pellet* e o aço fundido é adequada? Justifique brevemente.

**opção 1:** 
$$Nu_D = 2 + \frac{0.589 Ra_D^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.469}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}}$$

**opção 2:** 
$$Nu_D = 0.3 + \left\{0.62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3} \left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{-1/4}\right\} \left\{1 + \left(\frac{Re_D}{282000}\right)^{5/8}\right\}^{4/5}$$

**exercício 31 (adaptado do exercício 12.119 de Incropera & De Witt)**



O teto plano de um compartimento de um refrigerador de um caminhão de entrega de alimentos possui comprimento  $L=5\text{m}$  e largura  $W=2\text{m}$  (conforme a figura). Ele é fabricado de chapa metálica **delgada**, à qual um material isolante de fibra de espessura de 25mm e condutividade térmica de 0.05 W/mK é colado. Durante operação normal, o caminhão move-se com uma velocidade de 30m/s no ar a 27°C, com irradiação solar no topo do teto de 900W/m<sup>2</sup>. A superfície inferior do teto é mantida a -13°C.

- a-) Três tintas estão disponíveis para o recobrimento do teto exposto à radiação solar, a saber tinta negra (com absorvidade e emissividade solar, respectivamente de 0.98 e 0.98), tinta branca acrílica (com absorvidade e emissividade solar, respectivamente de 0.26 e 0.90) e tinta branca com óxido de zinco (com absorvidade e emissividade solar, respectivamente de 0.16 e 0.93), sendo que a tinta escolhida para o recobrimento foi a tinta branca com óxido de zinco. Justifique brevemente.
- b-) O coeficiente de película médio para o escoamento do ar sobre o teto do carro pode ser obtido a partir da seguinte fórmula:

$$Nu_L = 0.037 Re_L^{4/5} Pr^{1/3}; Re_L = \frac{\rho v L}{\mu}; Nu_L = \frac{h L}{k_{ar}}; L \text{ como no esquema.}$$

Esta fórmula é válida para convecção natural ou forçada? **Justifique brevemente.**

- c-) Calcule o coeficiente de película sabendo-se que nas condições do enunciado para o ar as seguintes propriedades podem ser consideradas: condutividade térmica do ar igual a 0.026 (W/mK), número de Prandtl igual a 0.71 e viscosidade cinemática (definida como a razão entre a viscosidade absoluta e a densidade) igual a  $15 \times 10^{-6}$  (m<sup>2</sup>/s)

- d-) Desconsiderando a emissão do ar atmosférico e assumindo que o contato entre o isolante e a chapa metálica é perfeito, mostre que a temperatura da superfície do teto do caminhão exposta ao ar ambiente é de 295.2K.
- e-) Determine a taxa de transferência de calor através do teto do caminhão e discuta como a temperatura do teto do caminhão pode ser mantida a  $-13^{\circ}\text{C}$ .
- f-) Discuta o que mudaria na resolução dos itens d-) e e-) se o contato entre o isolamento e a chapa metálica não fosse perfeito.

### exercício 32

O inverno rigoroso na floresta deixou o lobo mau acamado. Enquanto isto, os três porquinhos se empenhavam em manter a temperatura do ar interior de suas respectivas casas em  $25^{\circ}\text{C}$ , contra uma temperatura do ar externo de  $-10^{\circ}\text{C}$ , alimentando suas lareiras com carvão. Todas as três casas tinham a mesma área construída, com paredes laterais de 2 m x 6 m, e frente/fundos de 2 m x 2 m, sem janelas (por medida de segurança, obviamente). Sabe-se que cada quilograma de carvão queimado libera uma energia de cerca de 23 MJ. Considerando que os coeficientes de transferência de calor por convecção nos lados interno e externo das casas são iguais a  $7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  e  $40 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , respectivamente, e desprezando a transferência de calor pelo piso e pelo teto que são bem isolados, pede-se:

- (a) Montar o circuito térmico equivalente para a transferência de calor que ocorre em **regime permanente** (estacionário) na casa do porquinho **P1**;
- (b) Calcular a taxa de perda de calor **em watts** através das paredes dessa casa;
- (c) Calcular a temperatura da **superfície interna** das paredes, relativa ao circuito do item (a);
- (d) Calcular a perda diária de energia em MJ (megajoules) correspondente ao circuito do item (a);
- (e) Fazer um balanço de energia na casa e calcular o consumo diário de carvão, necessário para manter a temperatura interior no nível mencionado. Para tanto, considere que o corpo de um porquinho ocioso em seu lar libera energia a uma taxa de  $100 \text{ J/s}$ ;
- (f) Qual das casas irá consumir mais carvão? Por quê? Obs: não é necessário calcular, apenas observe a tabela dada.

Casa pertencente ao porquinho:	P1	P2	P3
Material	Palha	Madeira	Tijolos
Espessura das paredes	10 cm	4 cm	10 cm
Conductividade térmica (SI)	0,07	0,14	0,72

Obs:  $1 \text{ MJ} = 10^6 \text{ J}$ .

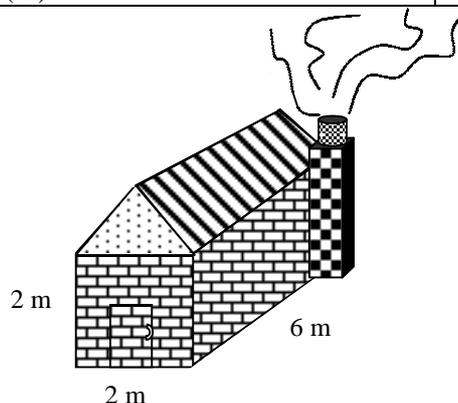


Figura1. Desenho esquemático de uma das casas mostrando suas dimensões.

### exercício 33

As freqüentes saídas para buscar lenha na floresta representavam sério risco para os três porquinhos. O porquinho Prático, considerado inteligente por ter construído sua casa com tijolos, na verdade, era o que mais se expunha a esses riscos, pois sua casa era termicamente mais ineficiente que as demais e, por isto, precisava de mais lenha para mantê-la aquecida. Também, quem mandou ser reprovado na disciplina de Fenômenos de Transporte II no Mackenzie?

Decidido a não ter um fim trágico antes do tempo, ele resolve contratar você para resolver o problema. Ele quer reduzir as perdas de calor através das paredes de sua casa em 50%, de modo a reduzir suas saídas para repor a lenha queimada na lareira. Para o serviço, você pode dispor da palha ou da madeira que sobraram da construção das outras duas casas (dos irmãos do porquinho Prático).

Escolha um desses materiais e proponha uma solução para o problema do Prático, calculando a **espessura** desse material, necessária para obter a redução desejada na troca térmica. Calcule, também, a nova **taxa de transferência de calor**, para que o Prático estime a quantidade diária de lenha que precisará queimar. **Listar as hipóteses adotadas!**

**Obs:** a transferência de calor pelo piso e pelo teto, que são bem isolados, pode ser desprezada.

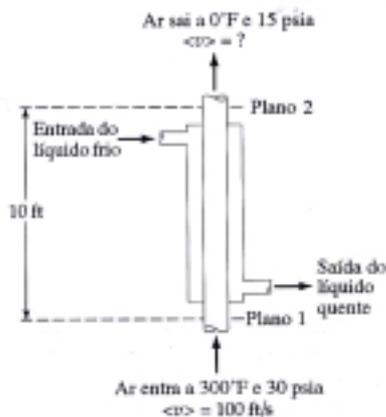
**Dados:** espessura da parede de tijolos = 10 cm; temperatura do ar no interior da casa = 25°C; temperatura do ar externo à casa = -10°C; dimensões da casa: paredes laterais de 2 m x 6 m, e frente/fundos de 2 m x 2 m, sem janelas (por medida de segurança, obviamente).



Os coeficientes de transferência de calor por convecção nos lados interno e externo da casa são iguais a 5 W/m<sup>2</sup>.K e 15 W/m<sup>2</sup>.K, respectivamente.

Material	Palha	Madeira	Tijolos
Condutividade térmica (SI)	0,07	0,14	0,72

### exercício 34 (exemplo 15.3-1 de Bird, p. 437)



Duzentas libras por hora de ar seco entram no tubo interno do trocador de calor mostrado na figura ao lado a 300°F e 30psia, com uma velocidade de 100 ft/s. O ar sai do trocador a 0°F e 15 psia, e 10 ft acima do trocador. Calcule a taxa de remoção de energia através da parede do tubo. Considere o escoamento turbulento e o comportamento de gás ideal. Use a seguinte expressão para a capacidade calorífica do ar:

$$\tilde{c}_p = 6.39 + 9.8 \times 10^{-4} T - 8.18 \times 10^{-8} T^2$$

sendo,  $\tilde{c}_p$  dado em Btu/(lbmol R) e  $T$  em R (Rankine).

**resp.:** 14380Btu/h

### exercício 35

Em países de clima muito frio, onde o solo encontra-se freqüentemente congelado, são necessários calçados especiais, com solado de borracha macia de grande espessura, para manter os pés confortavelmente aquecidos. Sabe-se que a temperatura na parte **interna** da pele dos pés é mantida sempre a 37°C pelo metabolismo humano, mas a temperatura superficial da pele pode cair significativamente.

Após uma violenta tempestade de neve, um siberiano se perde no meio da neve. Somente após 10 horas de buscas **arrastando** seus sapatos pelo solo congelado a -17°C, é que ele consegue encontrar um vilarejo para abrigo. Neste problema deseja-se avaliar o processo de transferência

de calor que ocorre através do solado do sapato do siberiano. Supondo que a temperatura da parte do emborrachado em contato com o solo é igual à temperatura do solo, e considerando válida a abordagem por geometria plana, pede-se:

- faça um desenho resumindo a geometria, os materiais e as temperaturas envolvidas nesse processo.
- desenhe o circuito térmico correspondente a esse processo de transferência de calor.
- calcule a **taxa total** de perda de calor através do solado dos sapatos (**dois pés**).
- estime as perdas acumuladas em quilocalorias durante as 10 horas de caminhada na neve, supondo que todas as condições permaneceram constantes nesse período.
- qual seria o aumento percentual das perdas caso o siberiano não estivesse usando meias?

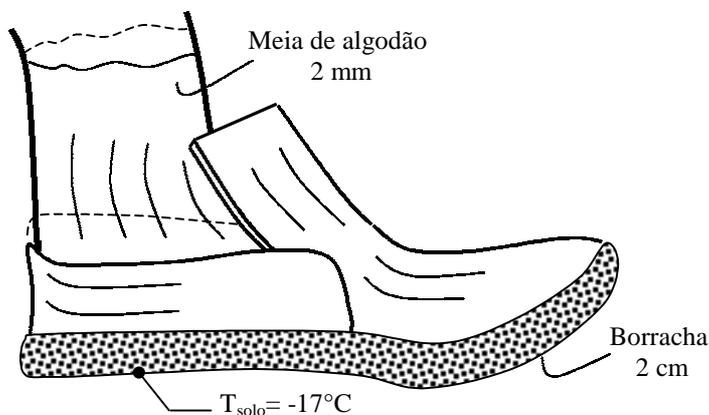
**Dados:**

Área média de um pé:  $0,02 \text{ m}^2$ .

Condutividade térmica da borracha:  $0,13 \text{ W/m.K}$ ; espessura:  $2 \text{ cm}$ .

Condutividade térmica da meia de algodão:  $0,06 \text{ W/m.K}$ ; espessura:  $2 \text{ mm}$ .

Condutividade térmica da pele:  $0,37 \text{ W/m.K}$ ; espessura:  $4 \text{ mm}$ .



**exercício 36**

Um coletor solar plano sem placa de cobertura possui uma superfície de absorção seletiva com emissividade de 0.1 e absorvidade na faixa de 0.95. Em uma determinada hora do dia, a temperatura da superfície absorvedora é de  $120^\circ\text{C}$ , enquanto a irradiação solar é de  $750 \text{ W/m}^2$ , a temperatura efetiva do céu é de  $-10^\circ\text{C}$ , e a temperatura do ar ambiente é de  $30^\circ\text{C}$ . Admita que o coeficiente de transferência de calor por convecção em condições de dia calmo possa ser estimado pela expressão:

$$h = 0.22(T_{\text{sup}} - T_{\infty})^{1/3} \dots \quad \text{em unidades do SI, } T_{\text{sup}} \text{ é a temperatura da superfície e } T_{\infty} \text{ a}$$

temperatura do ar ambiente

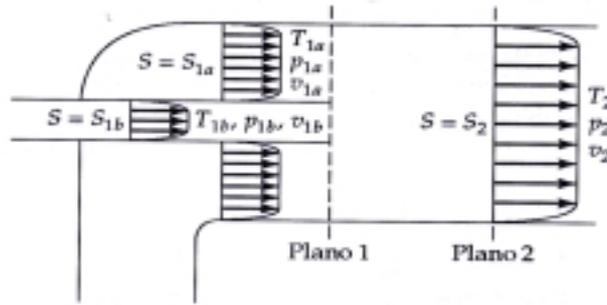
Nessas condições, calcule a taxa útil de remoção de calor ( $\text{W/m}^2$ ) do coletor. Qual é a eficiência correspondente do coletor? Quais as implicações da hipótese “um dia calmo”?

**exercício 37**

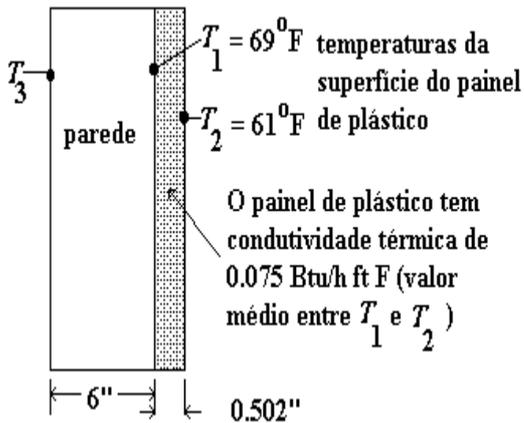
Explique como o organismo mantém a temperatura constante quando a pessoa está em um ambiente a  $42^\circ\text{C}$ . A pessoa poderá ficar muito tempo neste ambiente? Explique também porque pessoas morrem de frio e de calor.

**exercício 38 (exemplo 15.3-2 de Bird, p. 438)**

Duas correntes turbulentas e em regime permanente do mesmo gás ideal, escoando a diferentes velocidades, temperaturas e pressões, são misturadas, conforme mostrado na figura a seguir. Calcule a velocidade, a temperatura e a pressão da corrente resultante.



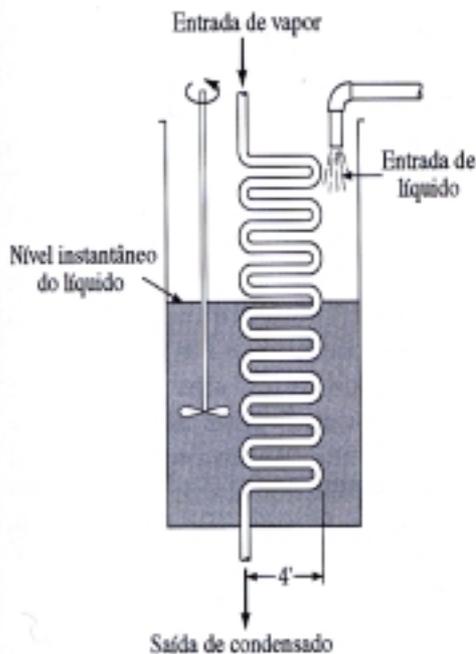
**exercício 39 (exercício 10A.6 de Bird, p. 308)**



O “poder isolante” de uma parede pode ser medido por meio de um arranjo como na figura ao lado. Coloca-se um painel plástico contra a parede. No painel montam-se dois termopares sobre as superfícies do painel. A condutividade térmica e a espessura do painel são conhecidas. Da medida das temperaturas no regime permanente mostrada na figura calcule:

- (a) O fluxo térmico permanente através da parede.
  - (b) A resistência térmica da parede.
- resp.: 14.3 Btu/hft<sup>2</sup>; 4.2 ft<sup>2</sup>h°F/Btu

**exercício 40 (exemplo 15.5-1 de Bird, p. 444)**



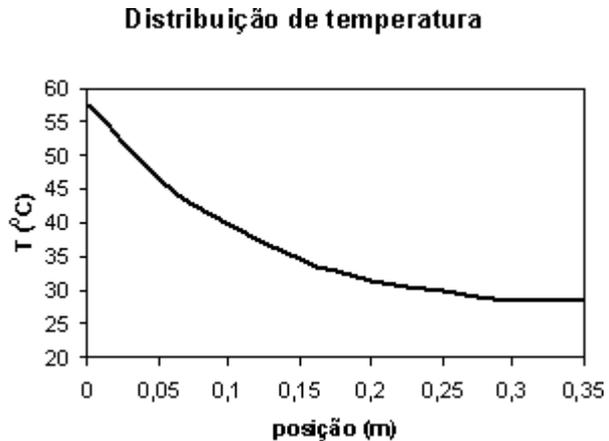
Um tanque cilíndrico, capaz de reter 1000ft<sup>3</sup> de líquido, está equipado com um agitador com potência suficiente para manter o conteúdo do líquido a uma temperatura uniforme (veja figura ao lado). O calor é transferido para o conteúdo por meio de uma serpentina colocada de forma que a área disponível para a transferência de calor seja proporcional à quantidade de líquido no tanque. Essa serpentina de aquecimento consiste em voltas, 4ft de diâmetro, com tubos tendo 1 in de diâmetro externo. Água a 20°C é alimentada nesse tanque, a uma taxa de 20lb<sub>m</sub>/min, começando sem água no tanque no tempo t=0. Vapor, a 105°C, escoo através da serpentina de aquecimento e o coeficiente global de transferência de calor é 100 Btu/(h ft<sup>2</sup> °F). Qual será a temperatura da água quando o tanque estiver cheio? **Resp.: 76°C**

**Exercício 41**

Um tarugo de latão de 350mm de comprimento e 10mm de diâmetro é soldado a uma parede, a qual tem uma temperatura uniforme de 57.6°C e o tarugo e a parede

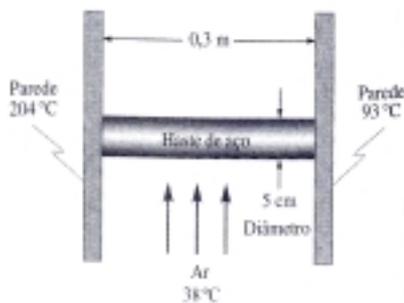
encontram-se expostos ao ar ambiente a  $23.8^{\circ}\text{C}$ . Foram coletadas medidas de temperatura ao longo do tarugo como mostram a tabela e figura a seguir.

Distância da base (m)	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
0,05	46,5
0,10	39,7
0,15	34,6
0,20	31,5
0,25	29,8
0,30	28,4
0,35	28,4



Pede-se apresentar as condições de contorno que podem ser usadas na extremidade do tarugo para efetuar a sua modelagem matemática. Justificar.

**exercício 42 (adaptado do exercício 2.33 de Kreith)**



Uma extremidade de uma haste de aço com 0,3 m de comprimento e condutividade térmica de 15 (SI) está ligada em uma parede a  $204^{\circ}\text{C}$ . A outra extremidade está ligada em uma parede que é mantida a  $93^{\circ}\text{C}$ . Um fluxo de ar é passado sobre a haste de forma a manter um coeficiente de transferência de calor de  $17 \text{ W/m}^2\text{K}$  sobre toda a superfície. Se o diâmetro da haste for 5cm e a temperatura do ar for  $38^{\circ}\text{C}$ , pede-se:

- a-) a temperatura no meio da haste. **Resposta:**  $88^{\circ}\text{C}$
- b-) a taxa de calor que transferida entre a parede a  $204^{\circ}\text{C}$  e a haste.
- b-) a taxa de calor que transferida entre a parede a  $93^{\circ}\text{C}$  e a haste.
- c-) a taxa líquida de perda de calor para o ar.

**exercício 43 (adaptado das notas de aula do Prof. Oliveira)**

Ambas as extremidades de uma barra de cobre de condutividade de 380 (SI), comprimento de 0,5m e diâmetro de 6,35mm e com formato em “U” estão fixadas numa parede vertical cuja temperatura é de  $100^{\circ}\text{C}$ . A barra de cobre está exposta a um ambiente a  $40^{\circ}\text{C}$  com coeficiente de película de 35 (SI), calcular a potência dissipada pela barra e a temperatura no seu ponto médio. **Resposta:** 10,50W;  $57^{\circ}\text{C}$

**exercício 44 (extraídos/adaptados das notas de aula do Prof. Oliveira)**

Metade de uma longa haste sólida, com 2,5cm de diâmetro, foi inserida em um forno, enquanto a outra metade se projeta no ar ambiente a  $27^{\circ}\text{C}$ . Após o estado estacionário

ser alcançado, as temperaturas medidas em dois pontos na porção da haste em contato com o ar ambiente, distantes de 7.6cm um do outro, foram medidas e resultaram respectivamente em 126°C e 91°C. O coeficiente de transferência de calor sobre a superfície da haste exposta ao ar foi estimado em 22.7W/m<sup>2</sup>K. Qual é a condutividade térmica da haste?

**exercício 45** (adaptado das notas de aula do Prof. Oliveira)

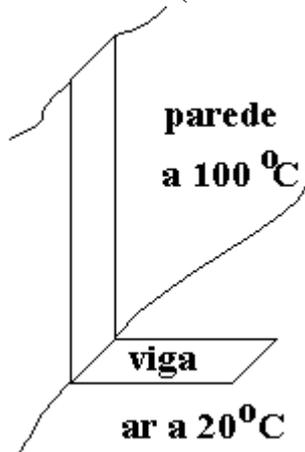
O cabo maciço de uma concha para vaziar chumbo líquido a 327°C (veja figura anexada) tem condutividade térmica de 35 (SI) e dimensões 20 mm × 12 mm × 0.3 m. Para este foi feita a especificação de que a temperatura na extremidade deve ser mantida num valor menor que 25°C. Para o ar ambiente a 20°C com coeficiente de película de 10W/m<sup>2</sup>°C, verificar que a especificação não é satisfeita. Em seguida, calcule o comprimento de um cabo com seção vazada com as mesmas dimensões externas e 1.6 mm de espessura.

**Observação:** ocorre transferência de calor no interior da parte vazada?

**Resposta:** com convecção no interior da seção vazada: 0.25m; sem convecção 0.34m.



**exercício 46** (extraídos/adaptados das notas de aula do Prof. Oliveira)



Uma viga em L (veja figura ao lado) de dimensões 8.9 cm por 12.7 cm e espessura 1.91 cm e largura 40cm e condutividade térmica 30 W/m°C tem sua aba maior acoplada a uma parede e mantida a 100°C. A viga está exposta ao ar ambiente a 20°C com coeficiente de película de 15W/m<sup>2</sup>°C. Calcular a potência dissipada pela viga e a temperatura na extremidade da aba menor.

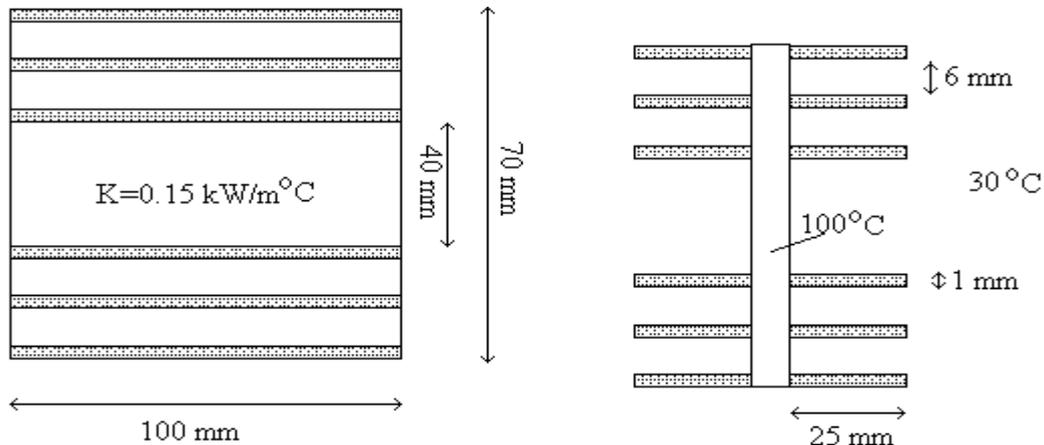
**exercício 47** (extraídos/adaptados das notas de aula do Prof. Oliveira)

Um tubo de raios externo e interno de 25mm e 20mm com condutividade térmica de 40 (SI) e de comprimento de 1m possui 15 aletas longitudinais de comprimento de 15mm e espessura de 1mm e condutividade térmica de 40 (SI). Pelo interior do tubo circula vapor a 200°C e o tubo está exposto ao ar ambiente de 30°C com coeficiente de película de 15 (SI). Determinar a potência dissipada. **Resposta:** 1.5kW

**exercício 48 (extraídos/adaptados das notas de aula do Prof. Oliveira)**

Num equipamento elétrico são colocadas 12 aletas, conforme a figura a seguir. A temperatura na superfície do equipamento é de  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  e a do ambiente é de  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Admitindo um coeficiente de película de 30 (SI), determinar o calor dissipado.

**Resposta:** 0.15kW



**exercício 49 (PAF da turma 5C do 2º semestre de 2002)**

As fotografias a seguir mostram um trocador de calor constituído de um tubo de alumínio aletado por onde  $\text{CO}_2$  líquido escoia e troca calor com o ar ambiente que se encontra a 300K de forma que ocorre a vaporização do  $\text{CO}_2$ . Ao tubo são colocadas 8 aletas longitudinais (seção de área retangular) com espessura de 5mm e comprimento de 10cm ("distância para fora do tubo de alumínio"). Os coeficientes de película com o ar ambiente e com o  $\text{CO}_2$  em vaporização são respectivamente de  $50\text{ W/m}^2\text{K}$  e  $5000\text{ W/m}^2\text{K}$ . Sabe-se que o trocador de calor processa 80 ton/dia de  $\text{CO}_2$ . Pede-se:

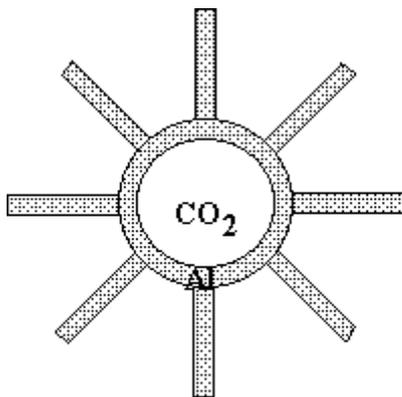
- colocar na figura esquematiza após as fotografias os dados fornecidos no problema, **indicando também o sentido da transferência de calor**.
- montar o circuito térmico entre a temperatura ao seio do escoamento do  $\text{CO}_2$  e a temperatura ambiente.
- justificar porque o coeficiente de película interno ao tubo é maior que o externo.
- justificar o porquê das aletas terem sido colocadas externamente ao tubo de alumínio
- calcular a temperatura da superfície externa do tubo de alumínio e o comprimento do trocador de calor (comprimento do tubo), desprezando a troca de calor por radiação. **Dica: efetue um BE e também verifique como a taxa de calor trocado com o meio externo pode ser obtida a partir das resistências térmicas. Resposta: 228.8K e 75m**
- explicar se o valor da temperatura da superfície externa do tubo é um valor coerente e com base neste valor discutir se há a possibilidade de formação de gelo sobre a superfície externa do trocador de calor.
- justificar com base no comprimento obtido no item anterior a disposição do trocador de calor mostrada na fotografia.
- justificar do porque do uso de um trocador de calor de alumínio.

**Dados complementares do problema:**

- a temperatura normal de ebulição do  $\text{CO}_2$  de 216.6K
- massa molar do  $\text{CO}_2$  de 44.01 g/mol
- calor latente de vaporização do  $\text{CO}_2$  17.15 kJ/mol
- condutividade térmica do alumínio de 237 W/mK
- densidade do alumínio 2702 kg/m<sup>3</sup>
- diâmetro interno do tubo de alumínio 2.664 cm
- diâmetro externo do tubo de alumínio 3.34 cm



(fotografias cedidas por Juliano Barbosa da turma 5C do 2º semestre de 2002)

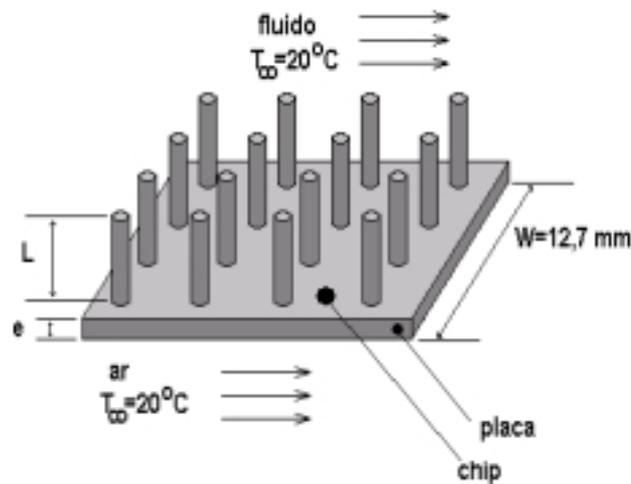


**ar ambiente**

#### **exercício 50 (PAF da turma 5C do 1º semestre de 2002)**

A operação eficiente de um chip está limitada à sua máxima temperatura de operação. Assim, é importante que a dissipação de calor seja eficiente. Para tanto, duas opções são freqüentemente adotadas no projeto do sistema de dissipação de calor para um chip. A primeira consiste em se usar um fluido dielétrico ao invés de ar como fluido em contato com o chip. A segunda opção consiste na utilização de aletas. A figura a seguir mostra um chip muito fino colado perfeitamente de um lado a uma placa quadrada de bakelite (condutividade térmica de 1.4 W/mK). A placa de bakelite tem espessura  $e=5$  (mm) e lado de dimensão de 12.7 mm. A máxima temperatura de operação do chip é de 75°C. A superfície oposta da placa de bakelite (aquela que não está colada ao chip) encontra-se em contato com ar refrigerado a uma temperatura de 20°C com coeficiente de película de 40 (W/m<sup>2</sup>K). A outra superfície do chip (aquela que não está colada à bakelite) encontra-se aletada. Para tanto são usadas 16 aletas piniformes de seção de área

constante e circular de diâmetro 1.5mm e comprimento 15mm, arranados num esquema 4x4, conforme a figura. A superfície aletada encontra-se em contato com um fluido dielétrico também a 20°C mas com coeficiente de película de 1000 (SI).



Pede-se:

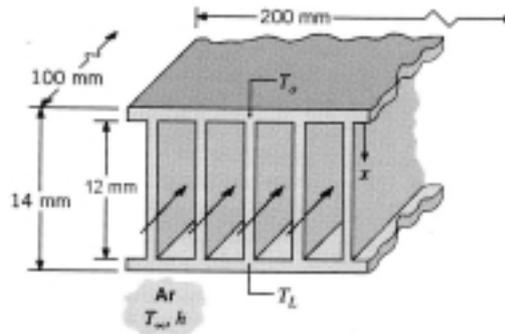
- Indique na figura **a direção e o sentido** de todos os possíveis fluxos de calor por condução.
- Indique na figura **a direção e o sentido** de todos os possíveis fluxos de calor por convecção.
- Considere a tabela a seguir que contém o valor da condutividade térmica de alguns materiais. Complete a tabela indicando o tipo de ligação química predominante e se a estrutura do material é cristalina ou não. Explique ainda a diferença nos valores da condutividade térmica.

material	condutividade térmica (SI)	tipo de ligação predominante	caracterização da estrutura molecular
alumínio liga 195, fundida com 4.5% de Cu	168		
cobre puro	401		
diamante	2300		

- Qual dos materiais da tabela do item anterior você escolheria para confeccionar as aletas? Justifique.
- Qual a razão para o uso do fluido dielétrico ao invés do ar?
- Ao projetar o sistema acima, um engenheiro desconsiderou o mecanismo de troca térmica por radiação e desprezou a resistência térmica de contato. Justifique este procedimento.
- Calcule a taxa de dissipação de calor do chip **para o fluido dielétrico** na ausência das aletas.
- Calcule a taxa total de transferência de calor do chip com as aletas.
- Calcule a temperatura nas extremidades das aletas.
- A placa de bakelite está funcionando como isolante ou dissipador de calor? Por que foi usado este material?

**exercício 51 (adaptado do exercício 3.114 de Incropera & De Witt – PAF da turma 5C do 2º semestre de 2003)**

Passagens aletadas são frequentemente formadas entre placas paralelas para melhorar a transferência de calor por convecção em trocadores de calor compactos. Uma importante aplicação é o resfriamento de equipamentos eletrônicos, em que uma ou mais séries de aletas, resfriadas a ar são posicionadas entre componentes eletrônicos que dissipam calor. Considere uma única série de aletas retangulares, com comprimento  $L$  e espessura  $t$ , onde as condições de transferência de calor por convecção são representadas por  $h$  e  $T_\infty$ , como mostrado na figura a seguir.



Em uma determinada aplicação tem-se:

- 50 aletas de espessura 1mm e comprimento 12mm, com condutividade térmica 240 (SI).
- temperatura da base superior de 400K e temperatura da base inferior de 350K
- temperatura do ar de 300K com coeficiente de película da 150 W/m<sup>2</sup>K

Pede-se determinar a taxa de calor retirada da superfície superior. **Resposta:** 5975 W

**exercício 52**

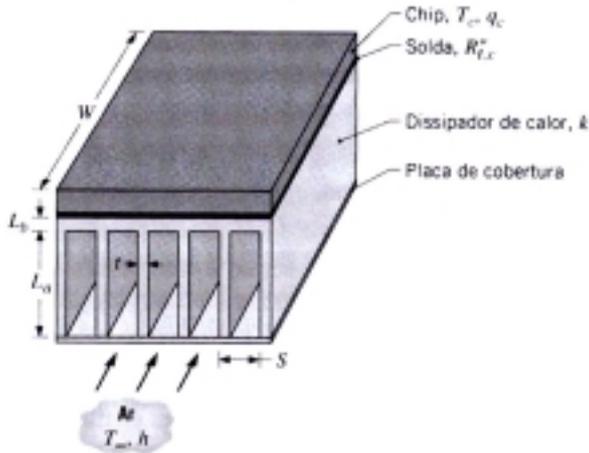
A parede de um trocador de calor líquido-gás tem uma área superficial no lado do líquido de 1.8m<sup>2</sup> (0.6m × 0.3m), com um coeficiente de transferência de calor de 255W/m<sup>2</sup>K. No outro lado do trocador de calor flui um gás e a parede tem 96 aletas retangulares finas de aço, com 0.5cm de espessura e 1.25cm de altura (com condutividade térmica de 3W/mK). As aletas têm 3m de comprimento e o coeficiente de transferência de calor no lado do gás é 57W/m<sup>2</sup>K. Supondo que a resistência térmica da parede seja desprezível, determine a taxa de transferência de calor se a diferença de temperatura total é de 38°C.

**Exercício 53**

Um chip de silício isotérmico de largura  $W=20\text{mm}$  é soldado em um lado a um dissipador de calor de alumínio (com condutividade térmica de 180W/mK) de mesma largura. A base do dissipador de calor tem uma espessura de  $L_b=3\text{mm}$  e uma matriz de aletas retangulares com comprimento de  $L_a=15\text{mm}$ . A espessura de cada uma das 11 aletas é de 0.182mm e elas são fixadas a uma placa de cobertura para mantê-las rígidas. Uma corrente de ar à temperatura de 20°C (com coeficiente convectivo de 100 W/m<sup>2</sup>K) é mantida através dos canais formados pelas aletas e a placa de cobertura. A junção soldada possui uma resistência térmica de contato de  $R_{tc}'' = 2 \times 10^{-6} \left( \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}} \right)$ .

Considerando que a máxima temperatura permitida no chip é de 85°C e **que a troca de calor na placa de cobertura pode ser desprezada**, pede-se:

- (a) determinar a taxa de calor dissipada pelo dissipador de alumínio (**valor 2.5**)  
 (b) calcular a temperatura na placa de cobertura (**valor 1.0**)  
 (OBSERVAÇÃO: - atente para a unidade da resistência de contato!)



### Exercício 54

A formulação do modelo matemático analítico de aletas é feita a partir da realização de um balanço de energia microscópico. Postuladas algumas hipóteses, efetuou-se um balanço de energia a um elemento diferencial obtendo-se a equação (I).

$$q_x = q_{x+dx} + q_{conv} \quad (I)$$

A equação (I) foi então transformada na equação (II) à qual aplicaram-se algumas hipóteses chegando-se na equação (III).

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \left( \frac{1}{A_{ST}} \frac{dA_{ST}}{dx} \right) \frac{dT}{dx} - \left( \frac{1}{A_{ST}} \frac{h}{k} \frac{dA_{sup}}{dx} \right) (T - T_\infty) = 0 \quad (II)$$

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - m^2\theta = 0 \quad ; \quad m^2 = \frac{hP}{kA_{ST}} \quad (III)$$

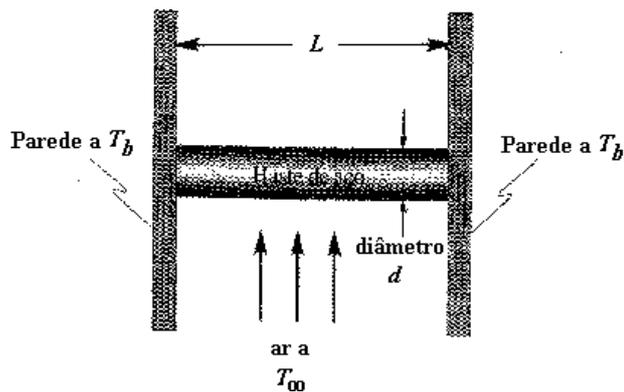
A solução geral da equação (III) é dada pela equação (IV) em que as constantes  $C_1$  e  $C_2$  são obtidas a partir da aplicação de condições de contorno adequadas.

$$\theta(x) = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx} \quad (IV)$$

Pede-se:

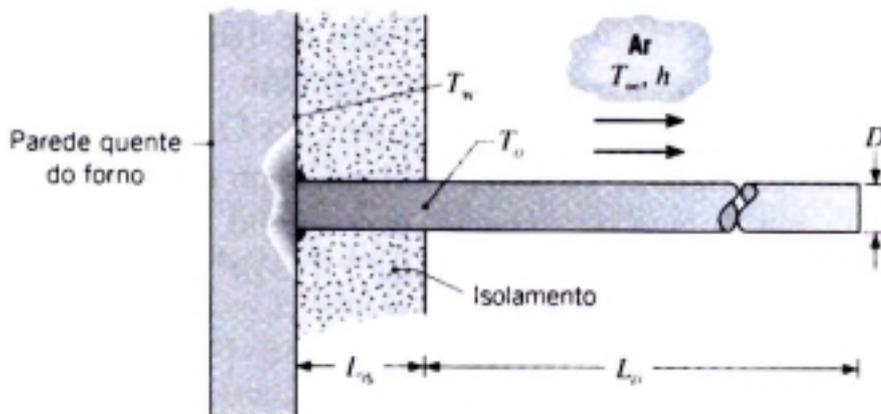
- apresentar a(s) hipótese(s) usadas para o estabelecimento da equação (I)
- apresentar a(s) hipótese(s) adotadas para transformar a equação (II) na equação (III).
- descrever o volume de controle infinitesimal que foi usado para se propor a equação (I), quantificando-o para uma aleta de comprimento  $L$  e de seção transversal constante e circular de diâmetro  $d$ .
- apresentar como os termos  $q_{conv}$ ,  $q_x$  e  $q_{x+\Delta x}$  são equacionados.
- determinar se a equação (III) é válida para as aletas em que a condutividade térmica não for constante.
- discutir em que situações a hipótese de condução unidirecional é verificada.

- g-) para a aleta em que a temperatura da extremidade é conhecida, sabe-se que poderá ocorrer a existência de valor mínimo ou máximo de temperatura ao longo da aleta. Sabendo-se que para estas aletas  $\frac{d\theta}{dx} = \frac{m}{\sinh mL} [\theta_L \cosh mx - \theta_b \cosh m(L-x)]$ , a partir de que equação é possível obter a posição de máxima ou mínima temperatura.
- h-) quais as condições de contorno que deverão ser aplicadas à equação (IV) para se resolver o problema associado à aleta descrita na figura a seguir.
- i-) para a aleta do item e-), escrever a expressão analítica da taxa de calor dissipado pela aleta.



**Exercício 55 (adaptado do problema 3.111 de Incropera & De Witt – 5ª edição)**

Uma barra de diâmetro de 25mm e condutividade térmica de 14 (SI) conforme mostrada na figura se projeta na direção normal a partir de uma parede de uma fornalha que está a uma temperatura de 200°C e é coberta com um isolamento de espessura  $L_{is}=200\text{mm}$ . A barra é soldada à parede da fornalha e é utilizada como um gancho para suporte de cabos de instrumentação. Para evitar danos aos cabos, a temperatura da barra em sua superfície exposta,  $T_o$ , deve ser mantida abaixo do limite de operação especificado de  $T_{max}=100^\circ\text{C}$ . A temperatura ambiente é de 25°C e o coeficiente de convecção de 15 (SI). Pede-se determinar a taxa de transferência de calor da parede do forno para a barra e o comprimento exposto da barra  $L_o$ . Colocar todas as hipóteses realizadas.



### exercício 56

Sabe-se que o calor conduzido a partir da raiz da aleta deve ser igual ao calor transferido por convecção a partir da superfície da aleta para o fluido.

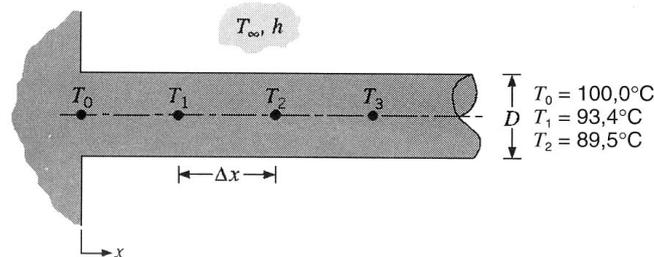
- Para uma aleta longa, mostre como obter a taxa de transferência de calor a partir da taxa de convecção da superfície da mesma para o fluido.
- Qual será a troca de calor na extremidade de uma aleta longa e qual será a temperatura na extremidade da aleta longa?
- O modelo de aleta considera a transferência de calor por condução unidimensional. Com base em que argumento esse modelo unidimensional é usado? A condução é de fato unidimensional?

### exercício 57

Qual dos seguintes materiais: diamante, cobre puro ou alumínio liga 195, fundida com 4.5% de cobre, você usaria para aletar uma superfície? Justifique. Pense nas ligações químicas, estrutura do reticulado e propriedades mecânicas dos materiais destacados.

### exercício 58 (adaptado do exercício 4.51 da 4ª edição de Incropera & De Witt)

Uma análise de diferenças finitas em estado estacionário foi efetuada em uma aleta cilíndrica com diâmetro de 12mm e condutividade térmica de 15 W/mK, esquematizada a seguir. O processo de convecção é caracterizado por um fluido à temperatura de 25°C e coeficiente de transferência de calor de 25 W/m<sup>2</sup>K.



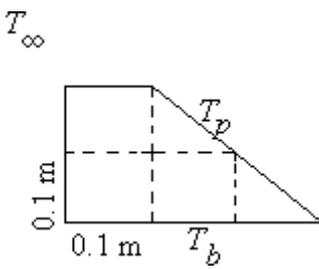
As temperaturas para os três primeiros nós, separados por um incremento espacial de  $\Delta x=10\text{mm}$  são fornecidas no esboço. Pede-se:

- Use a fórmula de diferenças finitas para a taxa de condução na posição  $x=0$  e calcule o calor dissipado pela aleta.
- Efetue um balanço de energia em diferenças finitas para o nó 1. Admita que apenas as temperaturas  $T_1$  e  $T_2$  sejam conhecidas e calcule a taxa de calor dissipado pela aleta. Compare a resposta com o valor obtido no item a-).

### exercício 59

Deduza a equação do balanço de energia em diferenças finitas para um ponto nodal sobre uma superfície plana com convecção e geração uniforme de calor, na presença de radiação e na condição de regime permanente.

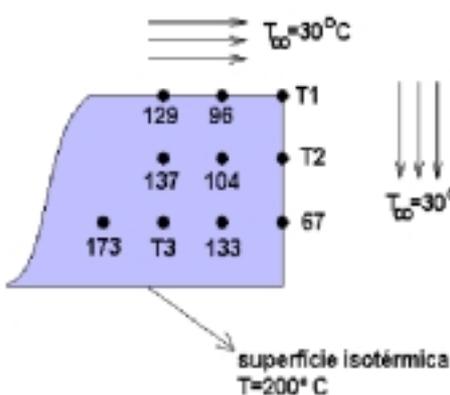
### exercício 60

	<p>A vista de topo de um prisma é mostrada na figura ao lado. Duas de suas superfícies são mantidas constantes nas temperaturas <math>T_b=100^\circ\text{C}</math> e <math>T_p=120^\circ\text{C}</math>. Sabendo-se que as duas outras superfícies estão expostas ao ar ambiente (<math>T_\infty=25^\circ\text{C}</math> e <math>h=15\text{W}/\text{m}^2\text{C}</math>), pede-se montar o sistema de equações, a partir do qual é possível determinar as temperaturas desconhecidas conforme a discretização apresentada. Pede-se determinar também a expressão que permite obter o calor dissipado para o meio ambiente.</p>
---	--

### exercício 61

Uma superfície fina com alta condutividade térmica está em contato de um lado com um gás com o qual troca calor por convecção natural e de outro lado em contato com um líquido com o qual troca calor por convecção forçada. Efeitos de radiação não são significativos. Qual a resistência térmica limitante no processo de transferência de calor? Como você afetaria a superfície de modo a aumentar a taxa de transferência de calor?

### exercício 62

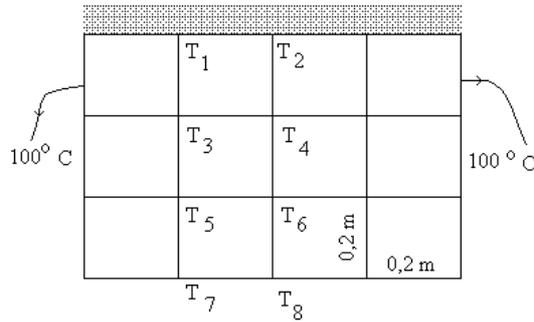


As temperaturas em regime estacionário em alguns pontos nodais selecionados em um sistema bidimensional com condutividade térmica de  $2,5\text{W}/\text{mK}$ , são mostradas na figura. Determine as temperaturas  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3$ , sabendo-se que o coeficiente de troca térmica por convecção com o fluido a  $30^\circ\text{C}$  é  $25$  (SI). A malha usada tem a seguinte dimensão:  $\Delta x = \Delta y = 1\text{cm}$ . Calcule também a taxa de transferência de calor por convecção.

### exercício 63 (PAF do 2º semestre de 2001 – turma 5C)

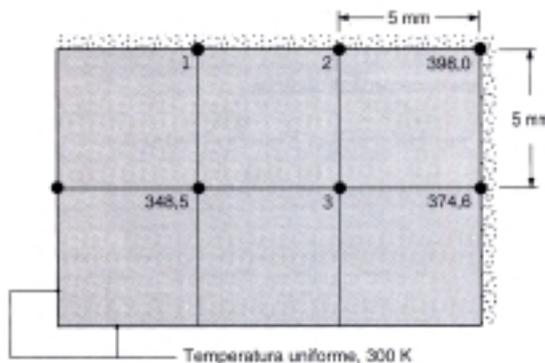
Considere a superfície esquematizada na figura a seguir, a qual tem uma superfície isolada (adiabática), duas superfícies mantidas a  $100^\circ\text{C}$  e uma superfície exposta ao ar atmosférico que está a  $25^\circ\text{C}$ , com o qual troca calor por convecção (coeficiente de troca térmica por convecção de  $10$  (SI)). Sabendo-se que a condutividade térmica da superfície é de  $1$  (SI), pede-se:

- montar as equações a partir das quais é possível determinar todas as temperaturas.  
(não as resolva!)
- Sabendo-se que  $T_4=84^\circ\text{C}$ ,  $T_5=77,74^\circ\text{C}$ ,  $T_6=72,18^\circ\text{C}$ ,  $T_8=49,26^\circ\text{C}$  e  $T_1=90,96^\circ\text{C}$ , determinar  $T_3$ ,  $T_7$  e  $T_2$ .
- Determinar o calor trocado por convecção.



**exercício 64 (adaptada do exercício 4.48 de Incropera & De Witt – PAF da turma 5C do 1º semestre de 2003)**

As temperaturas em (K) em regime permanente em três pontos nodais de uma barra retangular comprida, são fornecidos na figura. A barra experimenta uma geração volumétrica de calor uniforme a uma taxa de  $5 \times 10^7 \text{ W/m}^3$  e possui uma condutividade térmica de  $20 \text{ W/mK}$ . Dois de seus lados são mantidos a uma temperatura uniforme de  $300 \text{ K}$ , enquanto os demais se encontram termicamente isolados. Sabendo que a temperatura do nodo 2 é de  $390.2 \text{ K}$ , determine a temperatura do nodo 1.

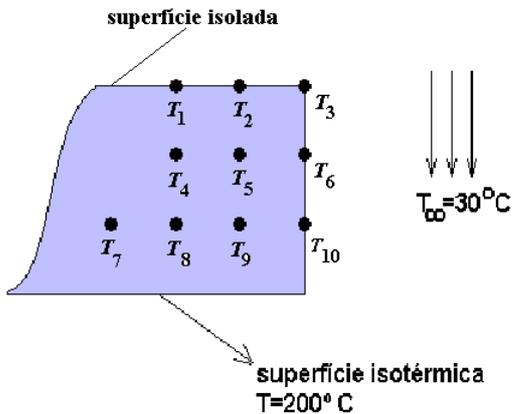


**Exercício 65**

A superfície da figura esquematizada abaixo tem condutividade térmica de  $1.5 \text{ (SI)}$  e tem uma face exposta a um fluido que está a  $30^\circ \text{C}$  com o qual troca calor por convecção com coeficiente de película de  $50 \text{ (SI)}$ . A superfície foi discretizada com uma malha quadrada de  $0.1 \text{ m}$  como indicado na figura. As seguintes temperaturas já foram calculadas:  $T_2=95.6$ ;  $T_4=137$ ;  $T_5=103.5$ ;  $T_6=48.7$ ;  $T_7=172.9$ ;  $T_9=132.8$ ;  $T_{10}=67^\circ \text{C}$ . Pedese:

- a-) Efetuar um balanço de energia para o ponto nodal correspondente à temperatura  $T_3$  e deduzir a expressão do balanço de energia em diferenças finitas para este ponto nodal. Compare a expressão obtida com a equação do caso 4 do formulário.
- b-) Determinar as temperaturas  $T_1$ ,  $T_3$  e  $T_8$ .
- c-) Calcular a taxa de transferência de calor trocada por convecção por unidade de comprimento da superfície para o fluido que está a  $30^\circ \text{C}$ .

- d-) Calcular a taxa de condução por unidade de comprimento que chega à superfície exposta ao fluido que está a 30°C e discutir as razões da discrepância do valor encontrado frente ao calculado no item c-).



**Exercício 66 (PAFe da turma 5C do 2º semestre de 2003)**

Atribua um significado físico ao seguinte modelo matemático:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

c.i.  $t = 0; r = 0: T = T_o$

c.c.  $r = R, \forall t: -k \frac{\partial T}{\partial r} = h(T - T_\infty)$

$r = 0, \forall t: \frac{\partial T}{\partial r} = 0$

**Exercício 67**

Uma mistura quimicamente reativa é armazenada em um recipiente esférico com paredes finas, de raio  $r_1=200\text{mm}$ . A reação exotérmica gera calor de maneira uniforme, a uma taxa volumétrica que depende da temperatura e que pode ser representada pela expressão  $\dot{q} = \dot{q}_o e^{-A/T_o}$ , onde  $\dot{q}_o = 5000(\text{W/m}^3)$ ;  $A = 75(\text{K})$  e  $T_o$  é a temperatura da mistura em (K). O recipiente é envolto por uma camada de material isolante, que possui raio externo,  $r_2$ , condutividade térmica,  $k$  e emissividade  $\epsilon$ . A superfície externa do isolamento troca calor por convecção e radiação, respectivamente, com o ar adjacente e com uma grande vizinhança. Pede-se:

- a-) Desenhe o problema e escreva o modelo matemático que descreve o comportamento da temperatura ao longo do isolante térmico. (**Dica:** Use a equação de difusão, não se esquecendo de caracterizar as condições de contorno).
- b-) A seguinte equação para o perfil de temperaturas na camada de isolamento térmico satisfaz o modelo proposto no item a-)?

$$T(r) = T_{\text{sup},1} - (T_{\text{sup},1} - T_{\text{sup},2}) \frac{1 - r_1/r}{1 - r_1/r_2}$$

- c-) Use, a partir do perfil de temperaturas proposto no item b-), a lei de Fourier para estabelecer a taxa de transferência de calor por condução na camada de isolamento.
- d-) Qual o valor da taxa de transferência de calor por condução?