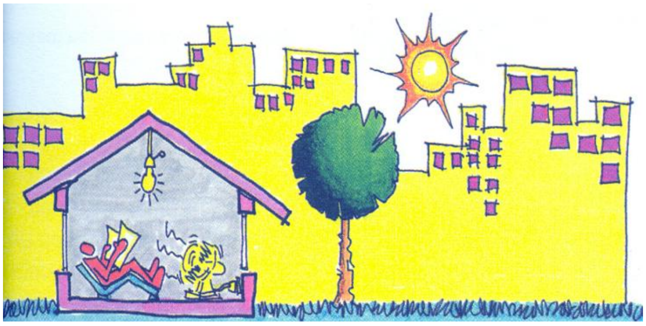
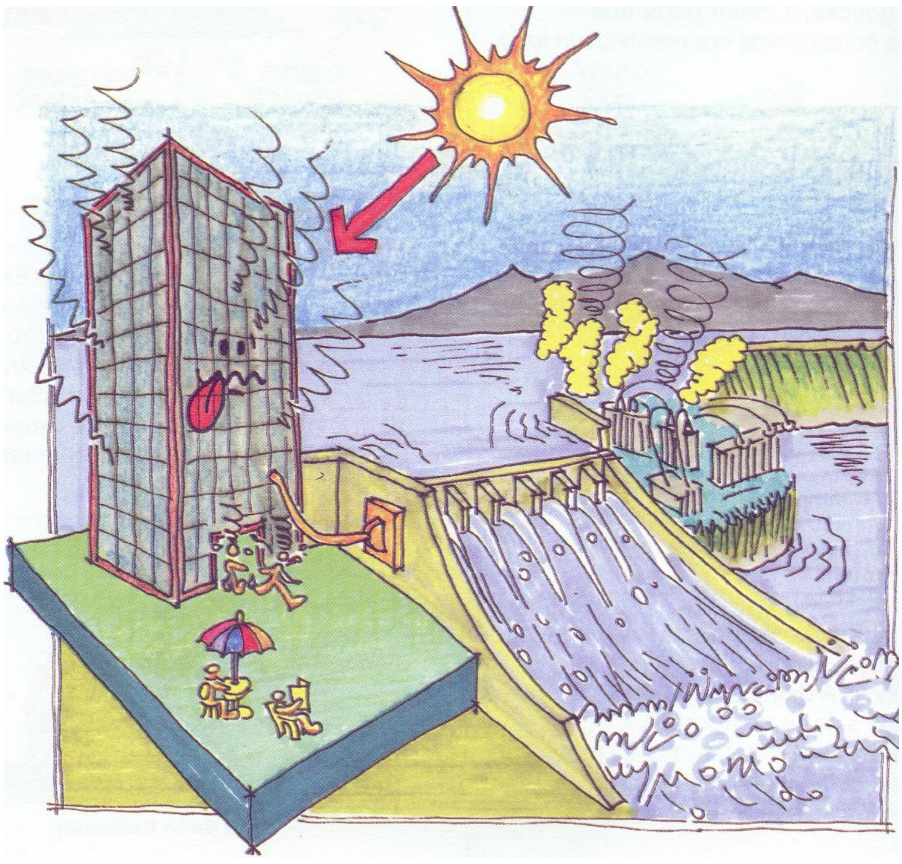
NOTAS DE AULA





1ª aula: “INTRODUÇÃO À TRANSFERÊNCIA DE CALOR”

(ÇENGEL, 2009) – **CAPÍTULO I**

1.CALOR E OUTRAS FORMAS DE ENERGIA

Calor (Q): É uma forma de energia em trânsito através da fronteira de um sistema.

Taxa de transferência de calor ($\dot{Q}$): É a quantidade de calor transferida na unidade de tempo. (o ponto significa uma derivada temporal)

Gradiente de temperatura: É a variação da temperatura por unidade de comprimento, na direção do fluxo de calor.

O calor é transferido de um sistema numa dada temperatura a outro sistema ou meio numa temperatura inferior, em virtude dessa diferença de temperaturas.

Um corpo nunca contém calor, isto é, o calor só pode ser identificado quando atravessa a fronteira do sistema.

A **Transmissão de Calor** estuda a troca de calor entre corpos, provocada por uma diferença de temperatura.

Na **Termodinâmica**, que estuda sistemas em equilíbrio, é calculado o calor trocado, mas não a velocidade com que a troca de calor ocorre, que é estudada pela **Transmissão de Calor**.

Exemplo 1: Sejam dois corpos em contato a temperaturas diferentes. A Termodinâmica estuda a temperatura de equilíbrio e a Transmissão de Calor estuda o tempo necessário para atingi-la.
Exemplo 2: Pode-se calcular a taxa de calor trocado pelo café da garrafa térmica (Termodinâmica) e o tempo que o café levará para esfriar (Transmissão de Calor).




Portanto, o estudo da **Transferência de Calor** não pode ser baseado somente nos princípios (Leis) da Termodinâmica que, na verdade, estabelecem o ambiente de trabalho da ciência da Transferência de Calor:
1ª Lei: a taxa de energia transferida para um sistema é igual à taxa de crescimento da sua energia;
2ª Lei: o calor é transferido na direção da menor temperatura.

Processo Adiabático: não há troca de calor.

Energia: térmica, mecânica, cinética, potencial, elétrica, magnética, química, nuclear.........

E: Energia total do sistema: a soma de todas as energias.

Energia microscópica: forma de energia relacionada à estrutura molecular de um sistema e ao grau de atividade molecular.

U: Energia interna do sistema: soma de todas as formas microscópicas de energia.

Energia sensível ou Calor sensível: parte da energia interna associada à energia cinética das moléculas.

Velocidade média e grau de atividade das moléculas são proporcionais à temperatura. Portanto: T↑ En. Cinética↑ En. Interna↑

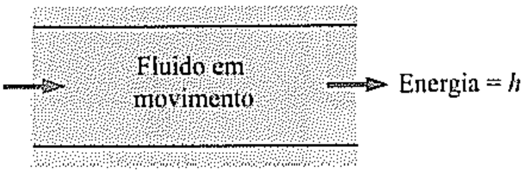
Energia interna⟺forças intermoleculares (que ligam as moléculas de um sistema umas às outras). + fortes em sólidos e + fracas em líquidos.

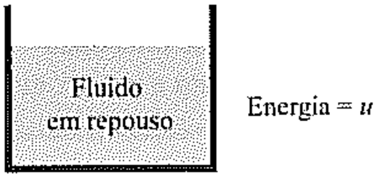
Mudança de fase: quando uma quantidade de energia é adicionada às moléculas de um sólido ou líquido, capaz de romper essas forças moleculares⟺ sistema em gás.

Energia latente ou Calor latente: energia interna associada à fase de um sistema.

Energia química ou de ligação: *energia interna associada às ligações dos átomos numa molécula.*
Energia nuclear: *energia interna associada às ligações dentro do núcleo de um átomo.*
(ambas são absorvidas/liberadas durante reações químicas – não é o foco da T.C.)

Sistemas que envolvem fluxo de fluidos: u⟺ P.v ⟹ **Entalpia (h)** ⟹ h = u + P.v





SISTEMA DE UNIDADES:
Sistema Internacional: joule (J)
Sistema Inglês: *British Thermal Unit* (Btu)
MKS: caloria (cal)

1.1 Calor específico de gases, líquidos e sólidos

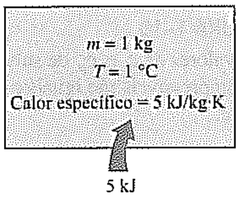
Para um gás ideal:

$$P.v = R.T \quad \text{ou} \quad P = \rho.R.T$$

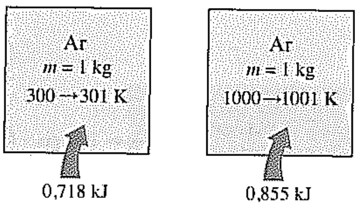
Sendo:
P: pressão absoluta
v: volume específico
R: constante universal dos gases
T: temperatura absoluta
ρ: densidade

Experimentalmente: aproximação do comportamento das variáveis para gases reais com baixas densidades.
$\downarrow$P e T$\uparrow$ $\Longleftrightarrow$ $\rho\downarrow$ $\Longrightarrow$ gás se comporta como gás ideal: Ar, H_2, O_2, N_2, He, Ar, Ne, Kp – até o CO_2 (erro < 1%)
Não vale para vapor d'água e de fluidos refrigerantes (estado próximo à saturação).

Calor específico (c): energia necessária para aumentar a temperatura em um grau de uma unidade de massa de uma dada substância: c_v e c_p.
$c_p > c_v$ (processo isobárico – expansão – trabalho fornecido)
Para gases ideais: $c_p = c_v + R$
Unidades: 1 kJ/kg.ºC = 1 J/g.ºC = 1 kJ/kg.K = 1 J/g.K



Para uma dada substância: c = f(T,P)
Para um gás ideal: c = f(T)
$\downarrow$P gás real $\Longleftrightarrow$ gás ideal $\Longrightarrow$ c = f(T)



$du = c_v.dT$ e $dh = c_p.dT$

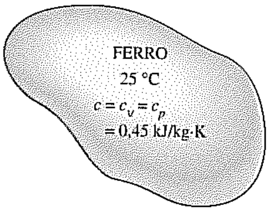
Calor específico para a temperatura média: $c_{p,méd}$ e $c_{v,méd}$

$\Delta u = c_{v,méd} . \Delta T$ e $\Delta h = c_{p,méd} . \Delta T$ (J/g)

ou

$\Delta U = m . c_{v,méd} . \Delta T$ e $\Delta H = m . c_{p,méd} . \Delta T$ (J)

Substância incompressível: volume específico (densidade) não varia com T ou P (líquidos e sólidos) $\Longrightarrow$ $c_p \approx c_v \approx c$



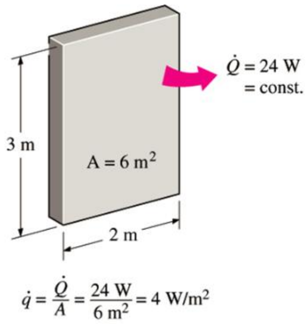
1.2 Transferência de energia

A energia pode ser transferida através de dois mecanismos: **calor (Q)** e **trabalho (W** - pistão subindo, eixo girando ou fio elétrico atravessando a fronteira do sistema).

Comum hoje em dia: *fluxo de calor, calor recebido, calor rejeitado, calor absorvido, ganho de calor, perda de calor, calor armazenado, geração de calor, aquecimento elétrico, calor latente, calor corpóreo e fonte de calor.*
Prática corrente: calor = energia térmica e transferência de energia térmica = transferência de calor.

$$Q = \int_0^{\Delta t} \dot{Q}dt \qquad \text{(J)}$$

Fluxo de calor: taxa de transferência de calor por unidade de área normal à direção da transferência de calor.



$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \qquad (\text{W/m}^2)$$

2. PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

ou Princípio da Conservação da Energia (ou Balanço de Energia)

$$\begin{bmatrix}\text{Variação na}\\ \text{energia total}\\ \text{do sistema}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\text{Energia total}\\ \text{recebida pelo}\\ \text{sistema}\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}\text{Energia total}\\ \text{rejeitada pelo}\\ \text{sistema}\end{bmatrix}$$

2.1 Balanço de energia:

$$E_{\text{entrada}} - E_{\text{saída}} = \Delta E_{\text{sistema}}$$

Na forma de taxas:

$$\dot{E}_{\text{entrada}} - \dot{E}_{\text{saída}} = \frac{dE}{dt}$$

Num processo em Regime Permanente (R.P.):

$$\dot{E}_{entrada} = \dot{E}_{saída}$$

No balanço de energia térmica:

As conversões de qualquer tipo de energia em energia térmica: **calor gerado**

$$Q_{entrada} - Q_{saída} + E_{gerada} = \Delta E_{sist,\ térm}$$

2.1.1 Balanço de energia para sistemas fechados ($m = c^{te}$ [kg])

$$E_{entrada} - E_{saída} = \Delta U = m \,.\, c_v \,.\, \Delta T$$

Quando o processo não envolve trabalho:

$$Q = m \,.\, c_v \,.\, \Delta T \ \ [J]$$

2.1.2 Balanço de energia para sistemas de escoamento permanente ($\dot{m} = c^{te}$ [kg/s])

A **vazão mássica** é o produto da densidade do fluido, velocidade média do fluido na direção do escoamento e área da sessão transversal:

$$\boxed{\dot{m} = \rho \,.\, V \,.\, A_c}$$

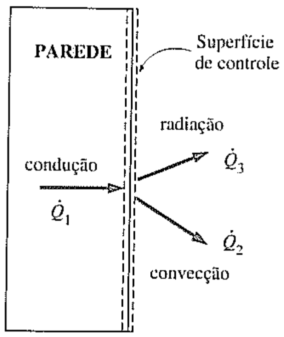
A **vazão volumétrica ($\dot{V}$)** [m³/s] é:

$$\boxed{\dot{V} = V \,.\, A_c = \frac{\dot{m}}{\rho}}$$

Quando $\dot{m} = c^{te}$, E_{cin} e E_{pot} = desprezíveis ($W = 0$), o balanço de energia fica:

$$\dot{Q} = \dot{m} \,.\, \Delta h = \dot{m} \,.\, c_p \,.\, \Delta T \ \ [J/s]$$

2.1.3 Balanço de energia em superfícies



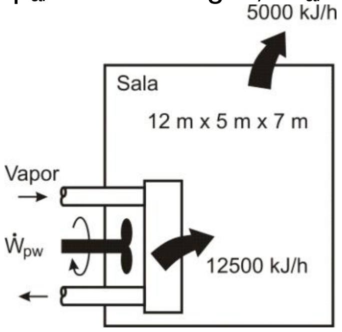
$$\dot{E}_{entrada} = \dot{E}_{saída}$$

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3$$

EXERCÍCIOS PROGRAMADOS:

1) **(ÇENGEL: 1-25)** Uma sala de aula que, normalmente, contém 40 pessoas deve ser equipada com uma unidade de ar-condicionado de janela de 5 kW de capacidade de refrigeração. Pode-se assumir que uma pessoa em repouso dissipa calor a uma taxa de 360 kJ/h. Existem 10 lâmpadas elétricas na sala, cada uma com uma potência de 100 W. A taxa de transferência de calor para a sala de aula através das paredes e das janelas é estimada em 15000 kJ/h. Se o ar da sala deve ser mantido a uma temperatura constante de 21ºC, determinar o número necessário de unidades de ar-condicionado de janela. **Resposta: duas unidades (o cálculo determinou 1,83 unidades).**

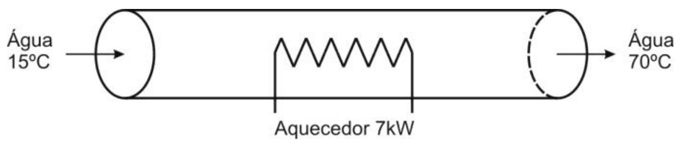
2) **(ÇENGEL: 1-27)** Uma sala de 4 m x 5 m x 7 m é aquecida pelo radiador de um sistema de aquecimento a vapor. O radiador a vapor trransfere a uma taxa de 12500 kJ/h e um ventilador de 100 W é usado para distribuir o ar quente na sala. As perdas de calor da sala são estimadas em uma taxa de cerca de 5000 kJ/h. Se a temperatura inicial do ar da sala é de 10 ºC, determinar quanto tempo vai demorar para que a temperatura do ar suba para 20 ºC. Suponha calor específico constante na temperatura ambiente. Para o ar: R_{ar} = 287 $(Pa.m^3)/(kg.K)$ = 287 J/kg.K; cp_{ar} = 1007 J/kg.K; cv_{ar} = 720 J/kg.K.



Resposta: Supondo que o processo aconteça em pressão constante: tempo = 795 s ou 13,3 min [o processo ocorrerá em pressão constante se ar vazar por frestas ou aberturas na sala]; Supondo que o processo aconteça em volume constante [sem vazamento de ar com a sala completamente vedada]: tempo = 568 s ou 9,5 min.

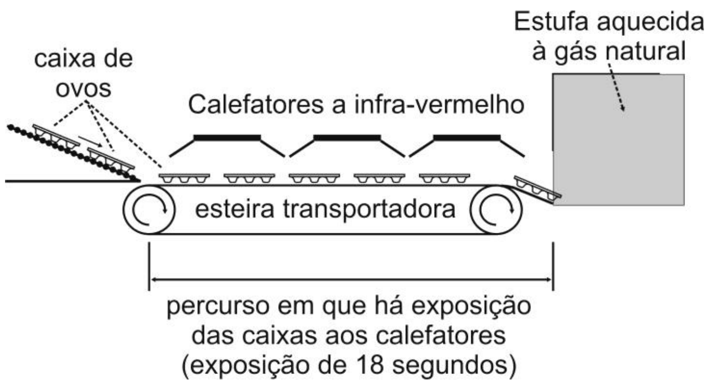
3) **(ÇENGEL: 1-30)** Um quarto de 5 m x 6 m x 8 m é aquecido por um aquecedor de resistência elétrica colocado em um duto curto. Inicialmente, o quarto está a 15 ºC e a pressão atmosférica local é de 98 kPa. O quarto está perdendo calor para o exterior a uma taxa de 200 kJ/min. Um ventilador de 300 W circula continuamente o ar através do duto e do aquecedor elétrico com uma vazão mássica média de 50 kg/min. O duto pode ser assumido como adiabático e não há vazamento do ar para dentro ou para fora do quarto. Se demorar 18 minutos para o ar do quarto chegar a uma temperatura média de 25 ºC, encontrar (a) a potência do aquecedor elétrico e (b) o aumento de temperatura que o ar sofre cada vez que passa pelo aquecedor. Para o ar: R_{ar} = 287 $(Pa.m^3)/(kg.K)$ = 287 J/kg.K; cp_{ar} = 1007 J/kg.K; cv_{ar} = 720 J/kg.K. **Respostas: (a) 4,93 kW ; (b) 6,2 ºC**

4) **(ÇENGEL: 1-35)** A água é aquecida em um tubo isolado e de diâmetro constante por um aquecedor de resistência elétrica de 7 kW. Se a água entra no aquecedor permanentemente a 15 ºC e deixa-o a 70 ºC, determinar a vazão mássica de água. Use $cp_{água}$ = 4,18 kJ/kg.K **Resposta: 0,0304 kg/s**



5) **(EA/GA)** Depois da modelagem no vácuo e a quente, de uma suspensão de fibras de papel, o produto – caixas para ovos – é transportado por uma esteira durante 18 segundos até a entrada de uma estufa aquecida a gás, local onde é dessecado até o teor final de água desejado. A fim de aumentar a produtividade da linha de produção, propõe-se instalar, sobre a esteira transportadora, um bando de calefatores a infravermelho que proporcionam um fluxo radiante uniforme de 5000 W/m^2. Cada caixa tem uma área de exposição de 0,0625 m^2 e uma massa total de 0,220 kg, dos quais 75% são constituídos por água depois do processo de modelagem. O engenheiro responsável pela produção aprovará a instalação dos calefatores se o teor de água das caixas de ovos for reduzido de 75% para 65%. A compra dos calefatores será recomendável? Justifique matematicamente.

Dado: Admitir que o calor de vaporização da água é de hfg = 2400 kJ/kg. Admita que todo o calor emitido pelos calefatores seja absorvido pela caixa de ovos.



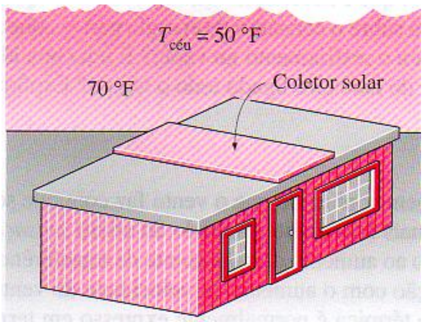
Resposta: A massa evaporada durante o trajeto é de 2,34 g (menor do que a necessária), deste modo, a compra dos calefatores não é recomendável.

2ª aula: "MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR"

(ÇENGEL, 2009) – **CAPÍTULO I**

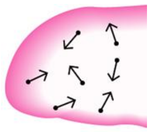
1) **Condução**
2) **Convecção**
3) **Radiação**

Nos três:
- há necessidade de diferença de temperatura;
- ocorrem da maior para a menor temperatura

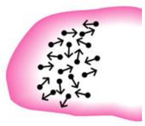


1. "CONDUÇÃO DE CALOR"

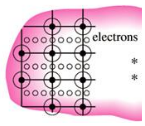
Ocorre em sólidos, líquidos e gases, sendo a única forma de Transmissão de Calor em sólidos.



Gás
- colisões moleculares
- difusão molecular



Líquido
- colisões moleculares
- difusão molecular



Sólido
- vibrações de rede
- fluxo de elétrons livres

O calor é transmitido através de uma agitação molecular em escala microscópica (não há deslocamento visível de massa).

T_2 T_1

...............⟶.............. $T_1 < T_2$

A lei básica para o estudo da T.C. é a ***Lei de Fourier***:

$$\dot{Q} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$

onde: k = condutibilidade térmica do material
A = área de troca (c^{te})
$\dot{Q}$ = taxa de transferência de calor
$\frac{dT}{dx}$ = gradiente de temperatura na direção de $\dot{Q}$

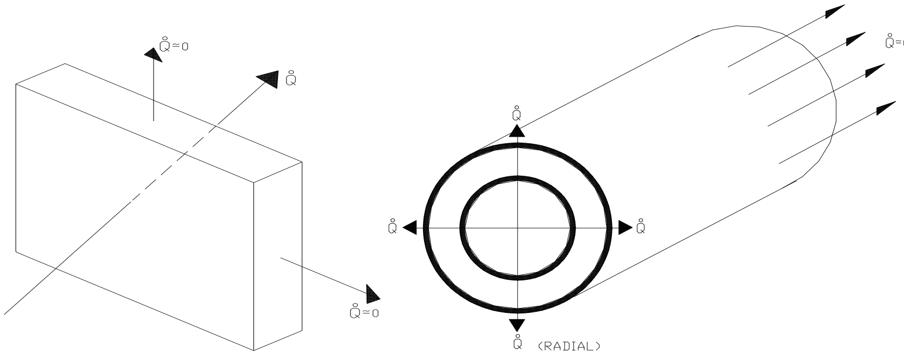
O sinal (-) é devido à 2ª Lei da Termodinâmica (O fluxo de calor é de T_2 p/ T_1, sendo que $T_1 < T_2$).

Unidades: [k] = W/m °C (kcal/h.m.°C)

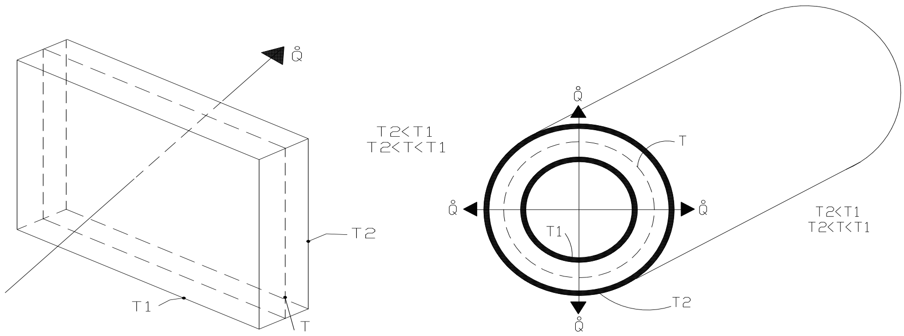
[$\dot{Q}$] = W (kcal/h)

HIPÓTESES SIMPLIFICADORAS

a) O fluxo de calor é unidimensional.



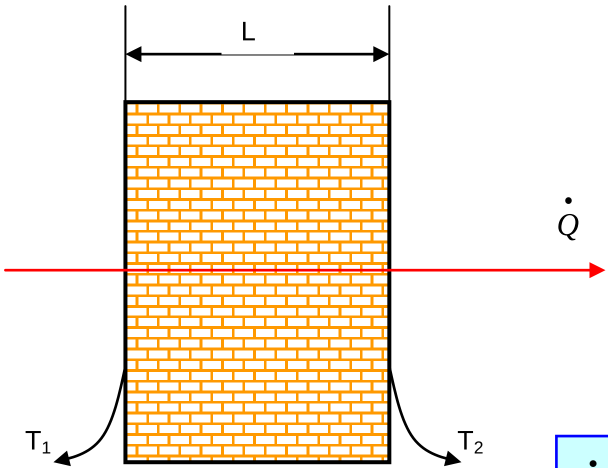
b) As superfícies perpendiculares ao fluxo de calor são isotérmicas (T=cte).



c) O regime é permanente, logo o fluxo de calor é constante e as temperaturas não mudam com o tempo.

1.1 CONDUÇÃO DE CALOR EM PAREDES PLANAS

1.1.1 UMA PAREDE PLANA



$$\dot{Q} = -k.A.\frac{dT}{dx} \Rightarrow \frac{\dot{Q}}{A}dx = -k.dT \Rightarrow$$

$$\int_0^L \frac{\dot{Q}}{A}dx = \int_{T_1}^{T_2} -k\,dT$$

$$\frac{\dot{Q}}{A}\int_0^L dx = -k\int_{T_1}^{T_2} dT \Rightarrow \frac{\dot{Q}}{A}(L-0) = -k(T_2 - T_1)$$

$$\boxed{\dot{Q} = -\frac{kA}{L}(T_2 - T_1) \quad ou \quad \dot{Q} = \frac{kA}{L}(T_1 - T_2)}$$

1.2 CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k)

k = medida da capacidade do material conduzir calor.

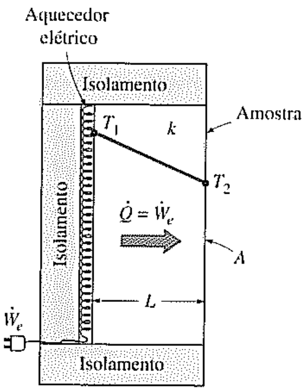
c_p = capacidade do material armazenar energia térmica

Exemplo: $c_{p\ água}$ = 4,18 kJ/kg.ºC
$c_{p\ ferro}$ = 0,45 kJ/kg.ºC
A água pode armazenar ≈ 10 vezes mais energia do que o ferro por unidade de massa.

k = capacidade de um dado material conduzir calor

Exemplo: $k_{água}$ = 0,607 W/m.ºC
k_{ferro} = 80,2 W/m.ºC
O ferro conduz calor ≈ 100 vezes mais rápido do que a água.

Para determinar o k de um material:



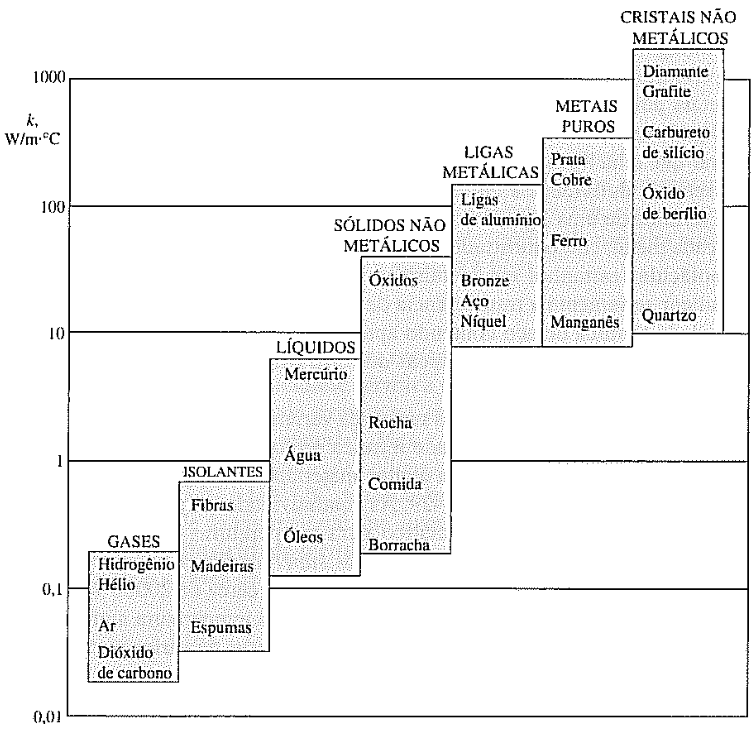
$$k = \frac{L}{A(T_1 - T_2)}\dot{Q}$$

Aquece-se, por meio de uma resistência elétrica, um dos lados de um material de área e espessura conhecidas. Mantém-se o outro lado isolado termicamente e, assim, todo calor é transferido para o material como um todo. Mede-se T_1 do um lado mais quente e T_2 do lado mais frio, substitui-se na expressão com os outros parâmetros e calcula-se k.

MATERIAL	CONDUTIBILIDADE TÉRMICA
	k (kcal/h m °C)
CONCRETOS	
De pedregulho	0,70
De cascalho	1,10
Celulares	0,09
Armado	0,7 – 1,21
ARGAMASSAS	
De cal ou de cimento	0,64
Cimento em pó (portland)	0,25
Cimento agregado	0,90

CERÂMICOS	
Tijolo maciço (artesanal)	0,52
Tijolo maciço (Industrial)	0,54
Tijolo furado	0,78
PÉTREOS	
Mármore	2,5
Granito	2,9
Ardósia	1,8
VIDRARIA	
Vidro	0,65 – 1,4
METÁLICOS	
Alumínio	197
Cobre	330
Ferro	62
Aço	40
ISOLANTES	
Cortiça	0,04
Polietileno expandido – Isopor	0,03
Poliestireno expandido	0,027
Lã de Vidro	0,04
Lã de Rocha	0,02
Amianto	0,15
Espuma rígida de poliuretano	0,02

Comparação da condutividade térmica em sólidos, líquidos e gases.



A condutividade térmica dos materiais varia com a temperatura. Para alguns materiais essa variação é insignificante, mas para outros pode ser importante. Entretanto, geralmente, k é avaliada na temperatura média e tratada como constante nos cálculos.

1.3 DIFUSIVIDADE TÉRMICA

Capacidade térmica: $\rho \cdot c_p$ [J/m^3.ºC]
É a capacidade de armazenamento de calor de um material por unidade de volume.

Difusividade Térmica: $\boxed{\alpha = \dfrac{\text{Calor conduzido}}{\text{Calor armazenado}} = \dfrac{k}{\rho \cdot c_p}}$ [m^2/s]

É a velocidade com que o calor se difunde num material. α mais rápida será a propagação de calor no meio. Regime Transitório.

Exemplo: $\alpha_{\text{água}} = 0{,}14 \times 10^{-6}$ m^2/s
$\alpha_{\text{prata}} = 149 \times 10^{-6}$ m^2/s
$\alpha_{\text{bife}} = 0{,}14 \times 10^{-6}$ m^2/s (carne, vegetais, frutas são constituídos, basicamente, de água)

2. "CONVECÇÃO"

(ÇENGEL, 2009)

O calor é transmitido por uma movimentação macroscópica de massa, implicando em dois sistemas envolvidos a temperaturas diferentes: um sólido e um fluido, que é o responsável pelo transporte de calor (deslocamento de massa).

Combina condução com movimentação de massa e é característica de meios fluidos.

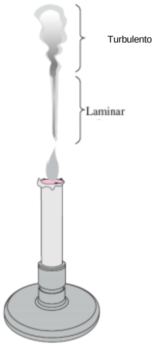
Quando um fluido entra em contato com uma superfície sólida aquecida, recebe calor por condução, a densidade de suas partículas diminui fazendo-as subir, cedendo lugar às mais frias.

A lei básica para o estudo da convecção é a ***Lei de Newton (do resfriamento).***

$$\boxed{\dot{Q} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty)}$$

sendo: h = coeficiente de T.C. por convecção (Determinado experimentalmente: depende da geometria e rugosidade da superfície, das propriedades do fluido, da natureza do movimento do fluido (tipo de escoamento: laminar ou turbulento)

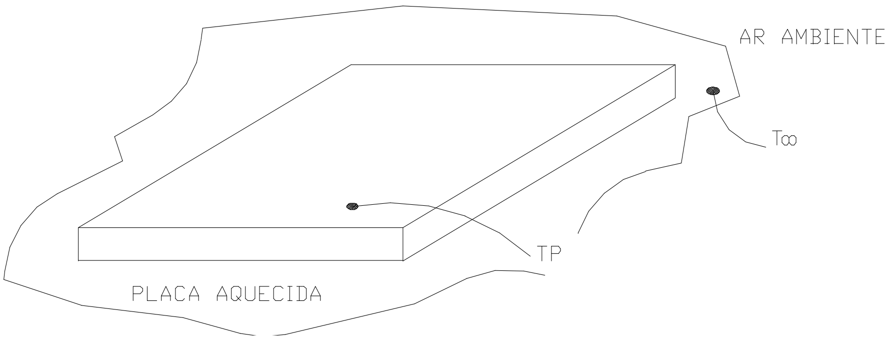
Unidade: [h] = W/m^2.^{0}C (kcal/h.m^2.ºC)



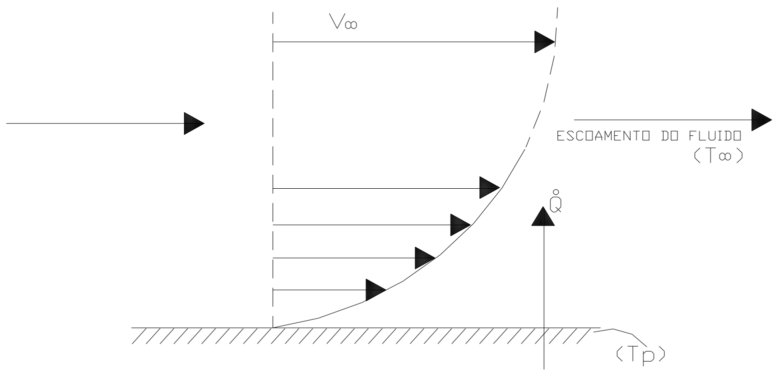
EXEMPLOS:

1 - Resfriar uma placa por exposição ao ar (espontaneamente).

O calor fluirá por condução da placa para as partículas adjacentes de fluido. A energia assim transmitida servirá para aumentar a temperatura e a energia interna dessas partículas fluidas. Então, essas partículas se moverão para uma região de menor temperatura no fluido, onde se misturarão e transferirão uma parte de sua energia para outras partículas fluidas. O fluxo, nesse caso, é tanto de energia como de fluido. A energia é, na realidade, armazenada nas partículas fluidas e transportada como resultado do movimento de massa destas.



2 - Resfriar uma placa, rapidamente, usando um ventilador.



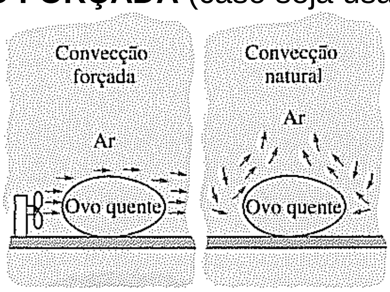
sendo: V= velocidade do fluido num certo ponto
V_∞=velocidade do fluido longe da placa

Quando V= 0 (na placa), o calor é trocado por condução. Nos outros pontos o calor é trocado por convecção, porque a velocidade V provoca um gradiente de temperatura.

$\uparrow V \iff \uparrow \dot{Q}$

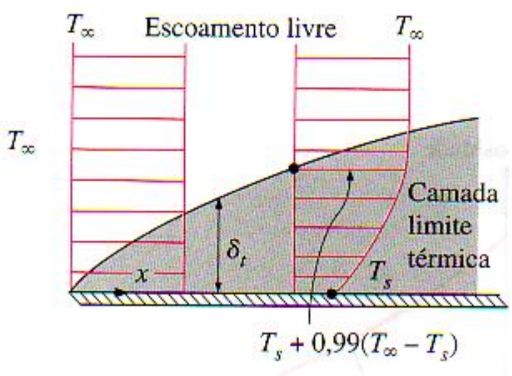
Quando o movimento do fluido não é provocado (placa exposta ao ar ambiente) a Transmissão de Calor é conhecida como **CONVECÇÃO NATURAL ou LIVRE** (espontaneamente).

Quando o movimento é provocado (caso do ventilador) a Transmissão de Calor é conhecida como **CONVECÇÃO FORÇADA** (caso seja usado um agente mecânico).



Camada limite hidrodinâmica: ***FT I*** – se desenvolve quando um fluido escoa ao longo de uma superfície, como resultado da camada de fluido adjacente à superfície assumir a velocidade da superfície (V = 0 em relação à superfície).

Camada limite térmica: se desenvolve quando um fluido escoa a uma temperatura especificada ao longo de uma superfície que se encontra a uma temperatura diferente.



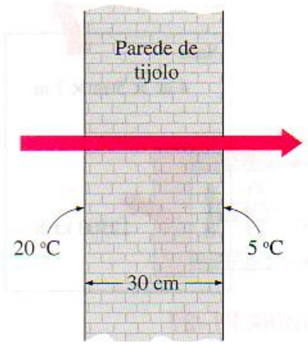
- Escoamento a T_∞ (uniforme) em placa plana isotérmica T_S
- Partículas do fluido na camada adjacente à superfície atingem equilíbrio térmico com a placa e assumem a temperatura T_S (e vão trocando calor)
- Se desenvolve um perfil de temperatura que varia de T_S na superfície a T_∞ suficientemente longe da superfície
- **Camada limite térmica** é a região do escoamento sobre a superfície em que a variação de temperatura na direção normal à superfície é significativa.

A espessura da camada limite δ_t térmica em qualquer local ao longo da superfície é definida como a distância da superfície em que a diferença de temperatura $T - T_S = 0{,}99\ (T_\infty - T_S)$ e aumenta na direção do escoamento.

A taxa de transferência de calor por convecção em qualquer lugar ao longo da superfície está diretamente relacionada ao gradiente de temperatura nesse local.

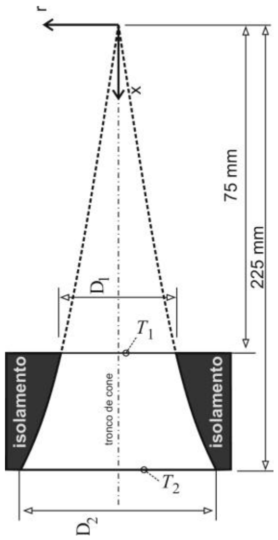
EXERCÍCIOS PROGRAMADOS:

1) **(ÇENGEL: 1-55)** As superfícies interna e externa de uma parede de tijolo de 4 m x 7 m, com espessura de 30 cm e condutividade térmica de 0,69 W/m.K, são mantidas a temperaturas de 20 ºC e 5 ºC, respectivamente. Determinar a taxa de transferência de calor através da parede, em W. **Resposta: 966 W**



2) **(ÇENGEL: 1-56)** As superfícies interna e externa de uma janela de vidro de 2 m x 2 m com 0,5 cm de espessura no inverno apresentam temperaturas de 10 ºC e 3 ºC, respectivamente. Se a condutividade térmica do vidro é 0,78 W/m.K, determinar a perda de calor através do vidro ao longo de um período de 5 h. Qual seria a sua resposta se a espessura do vidro fosse 1 cm? **Respostas: 78,6 MJ e para a espessura de 1 cm = 39,3 MJ**

3) **(EA/GA)** Um sólido de formato cônico (truncado) possui seção transversal circular e o seu diâmetro está relacionado à coordenada axial (x) através de uma expressão: $D = x^{3/2}$ (com o diâmetro e a coordenada axial em metros). A superfície lateral é isolada termicamente, enquanto a superfície superior é mantida a T_1 = 100 ºC e a superfície inferior a T_2 = 20 ºC. Determine a taxa de transferência de calor através do cone. Admita: regime permanente sem geração interna de calor e transferência de calor quase unidimensional. Dica utilize a equação de Fourier. A condutividade térmica do alumínio é igual a 238 W/m.K. **Resposta: 189,26 W**



4) **(ÇENGEL: 1-66)** Para efeitos de transferência de calor, um homem de pé pode ser modelado como um cilindro vertical de 30 cm de diâmetro e 170 cm de altura com ambas as superfícies superior e inferior isoladas e com a superfície lateral a uma temperatura média de 34 ºC. Para um coeficiente de transferência de calor por convecção de 20 W/m².K, determinar a taxa de perda de calor por convecção desse homem em um ambiente a 18 ºC. **Resposta: 513 W**

5) **(EA/GA)** Um compartimento de um congelador fica coberto com uma camada de 2 mm de espessura de gelo. Estando o compartimento exposto ao ar ambiente a 20 ºC e um coeficiente de transferência de calor por convecção de 2 $W/m^2.K$, caracterizando convecção natural na superfície exposta da camada, estime o tempo requerido para completa fusão do gelo. Considere que o gelo tenha densidade igual a 700 kg/m^3 e calor latente de fusão igual a 334 kJ/kg. Admita troca de calor unidimensional e também que a superfície do condensador (parede em contato com o gelo) seja adiabática, despreze quaisquer fenômenos de radiação térmica. **Resposta: 11.690 s**

3ª aula: "RADIAÇÃO E MECANISMOS SIMULTÂNEOS DE T.C."

(ÇENGEL, 2009) – **CAPÍTULO I**

1. "RADIAÇÃO"

Radiação é a Transmissão de Calor que ocorre por meio de ondas eletromagnéticas (ou fótons – que viajam na velocidade da luz no vácuo), podendo ocorrer tanto em um meio material quanto no vácuo.

Um exemplo é como a energia do Sol atinge a Terra.

É um *fenômeno volumétrico* – sólidos, líquidos e gases.

Para sólidos opacos à radiação térmica (metais, madeira e rochas) é considerado um *fenômeno superficial*.

A lei básica para o estudo da radiação é a ***Lei de Stefan-Boltzman.***

$$\boxed{\dot{Q} = \sigma . A_S . \varepsilon . (T_S^4 - T_{arr}^4)}$$

Sendo:

$$\begin{cases} \text{Sist. Internacional} \rightarrow \sigma = 5{,}6697 \times 10^{-8}\ W/m^2\,\text{K}^4 \\ \text{Sist. MKS} \rightarrow \sigma = 4{,}88 \times 10^{-8}\ kcal/h.m^2.K^4\ \text{(constante de Stefan - Boltzmann)} \\ \text{Sist. Inglês} \rightarrow \sigma = 0{,}173 \times 10^{-8}\ Btu/h.ft^2.R^4 \\ T = \text{temperatura absoluta (Kelvin)} \end{cases}$$

<u>Stefan</u> determinou experimentalmente e <u>Boltzmann</u> deduziu matematicamente que, para um corpo negro:

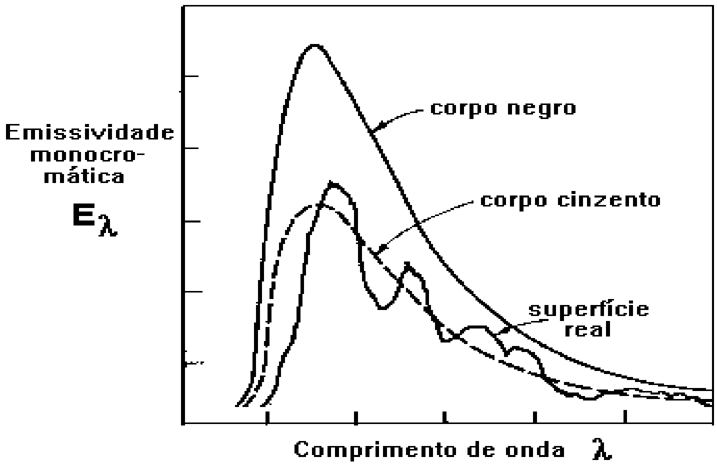
$$\boxed{E_n = \sigma . T^4}$$

CORPO NEGRO e CORPO CINZENTO

<u>Corpo Negro</u> é um conceito teórico padrão que estabelece um limite superior de radiação, de acordo com a segunda lei da termodinâmica, com o qual as características de radiação dos outros meios são comparadas. Portanto, é uma superfície ideal que tem as seguintes propriedades:

- <u>Absorve</u> toda a radiação incidente, independente do comprimento de onda e da direção;
- Para uma temperatura e comprimento de onda dados, nenhuma superfície pode emitir mais energia do que um corpo negro;
- Embora a radiação emitida por um corpo negro seja uma função do comprimento de onda e da temperatura, ela é independente da direção, ou seja, o corpo negro é um emissor difuso.

<u>Corpo Cinzento</u> é o corpo cuja energia emitida ou absorvida é uma fração da energia emitida ou absorvida por um corpo negro, aproximando-se das características dos corpos reais.



<u>Emissividade</u> (ε) é a relação entre o poder de emissão de um corpo real (cinzento) e o poder de emissão de um corpo negro.

$$\boxed{\varepsilon = \frac{E_c}{E_n}}$$

onde, E_c = poder de emissão de um corpo cinzent
E_n = poder de emissão de um corpo negro

$0 \leq \varepsilon \leq 1$

Os corpos cinzentos têm emissividade (ε) sempre menor que 1 e são na maior parte os materiais de utilização industrial, sendo que num pequeno intervalo de temperatura pode-se admitir ε constante e tabelado. Devido às características atômicas dos metais, isto não ocorre. Entretanto, para pequenos intervalos de temperatura, as tabelas fornecem valores constantes de emissividade.

<u>Um corpo negro emitindo calor:</u> $\boxed{\dot{Q} = \sigma . A_s . T_s^4}$

Considerando a troca de calor por radiação entre duas ou mais superfícies, observa-se que essa troca depende das **geometrias e orientações das superfícies e das suas propriedades radioativas e temperatura**. Tais superfícies estão separadas por um meio não participante, que não emite, não absorve e não dispersa, não apresentando nenhum efeito na transferência de radiação entre as superfícies. A maioria dos gases apresenta um comportamento muito aproximado e o vácuo preenche exatamente essas exigências.

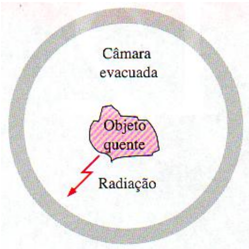
Quando uma superfície de emissividade ε e área superficial A_s, a uma temperatura termodinâmica T_s é totalmente delimitada por uma superfície muito maior (ou negra) a uma temperatura termodinâmica T_{arr}, separados por um gás (como o ar) que não intervém na radiação [<u>superfícies cinzentas (pintadas ou de material polido)</u>]:

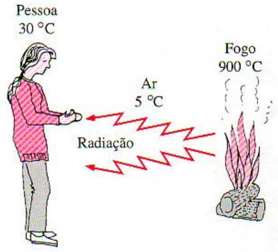
$$\boxed{= \sigma . A_s . \varepsilon . (T_s^4 - T_{arr}^4)}$$

sendo: ε = emissividade
A_s = área superficial
σ = constante de Stefan-Boltzman
$T_s = T_{placa}$ e $T_{arr} = T_{arredores}$

Absortância (α): fração de energia de radiação incidente sobre uma superfície que a absorve. $0 \leq \alpha \leq 1$.

$$\varepsilon \text{ e } \alpha = f(T, \lambda)$$



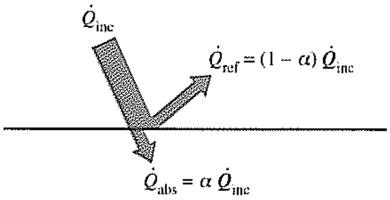


LEI DE KIRCHHOFF da radiação

A ε e α de uma superfície a uma dada T e certo λ são iguais.

Em muitas aplicações práticas a T_s e a $T_{\text{fonte de radiação incidente}}$ são da mesma ordem de grandeza e a α média da superfície é igual a sua ε média.

A taxa com que uma superfície absorve radiação é calculada por:



$$\boxed{\dot{Q}_{abs} = \alpha \, . \, \dot{Q}_{inc}}$$

Para superfícies opacas, a radiação incidente não absorvida pela superfície é refletida de volta.

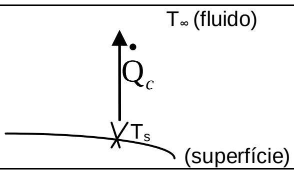
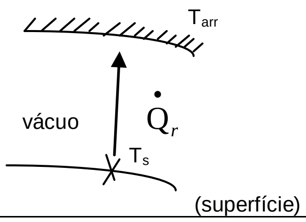
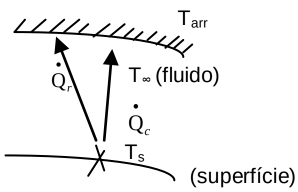
Taxa de absorção > Taxa de emissão $\Longrightarrow$ superfície está ganhando energia

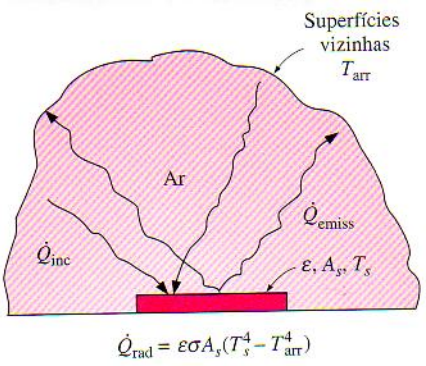
Taxa de absorção < Taxa de emissão $\Longrightarrow$ superfície está perdendo energia

COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA COMBINADO DE CALOR

Sempre que simultaneamente: $T_s > T_\infty$

$T_s > T_{arr}$

	$\dot{Q}_c = h_c \,.\, A_s \,.\, (T_s - T_\infty)$
	$\dot{Q}_r = \sigma \,.\, A_s \,.\, \varepsilon \,.\, (T_s^4 - T_{arr}^4)$
	$\dot{Q}_T = \dot{Q}_c + \dot{Q}_r$ $\dot{Q}_T = h_c \,.\, A_s \,.\, (T_s - T_\infty) + \sigma.A_s.\cancel{\varepsilon.(T_s^4} - T_{arr}^4)$ $\dot{Q}_T = h_c \,.\, A_s \,.\, (T_s - T_\infty) + h_r \,.\, A_s \,.\, (T_s - T_{arr})$ $\sigma.\cancel{A_s}.\varepsilon.(T_s^4 - T_{arr}^4) = h_r \,.\, \cancel{A_s} \,.\, (T_s - T_{arr})$ $h_r = \dfrac{\sigma.\varepsilon.(T_s^4 - T_{arr}^4)}{(T_s - T_{arr})}$



Se $\underline{T_\infty = T_{arr}}$, pode-se calcular o coeficiente de T.C. combinado:

$\dot{Q}_T = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad}$

$\dot{Q}_T = h_c.A_S.(T_S - T_\infty) + \sigma.A_S.\varepsilon.(T_S^4 - T_{arr}^4)$

$\dot{Q}_T = h_c.A_S.(T_S - T_\infty) + h_r.A_S.(T_S - T_{arr})$ alternativa

$\dot{Q}_T = h_c.A_S.(T_S - T_\infty) + h_r.A_S.(T_S - T_\infty)$

$\dot{Q}_T = \underbrace{(h_c + h_r)}_{h_{combinado}}.A_S.(T_S - T_\infty)$

2. "RADIAÇÃO TÉRMICA"

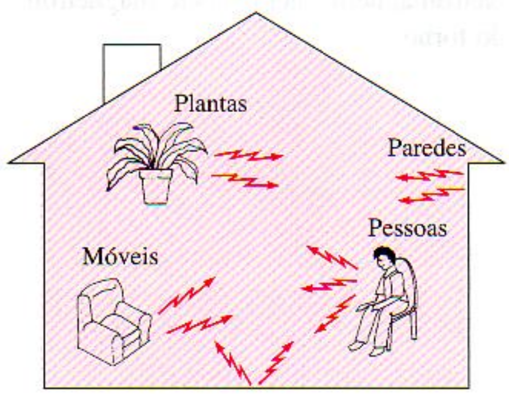
(ÇENGEL, 2009)

Radiação térmica: radiação emitida (como resultado das transições de energia de moléculas, átomos e elétrons) pelos corpos devido à sua temperatura.

Todos os corpos com T acima do zero absoluto emitem continuamente radiação térmica.

É o processo pelo qual calor é transferido de um corpo sem o auxílio de um meio, em virtude de sua temperatura, ao contrário dos outros dois mecanismos:

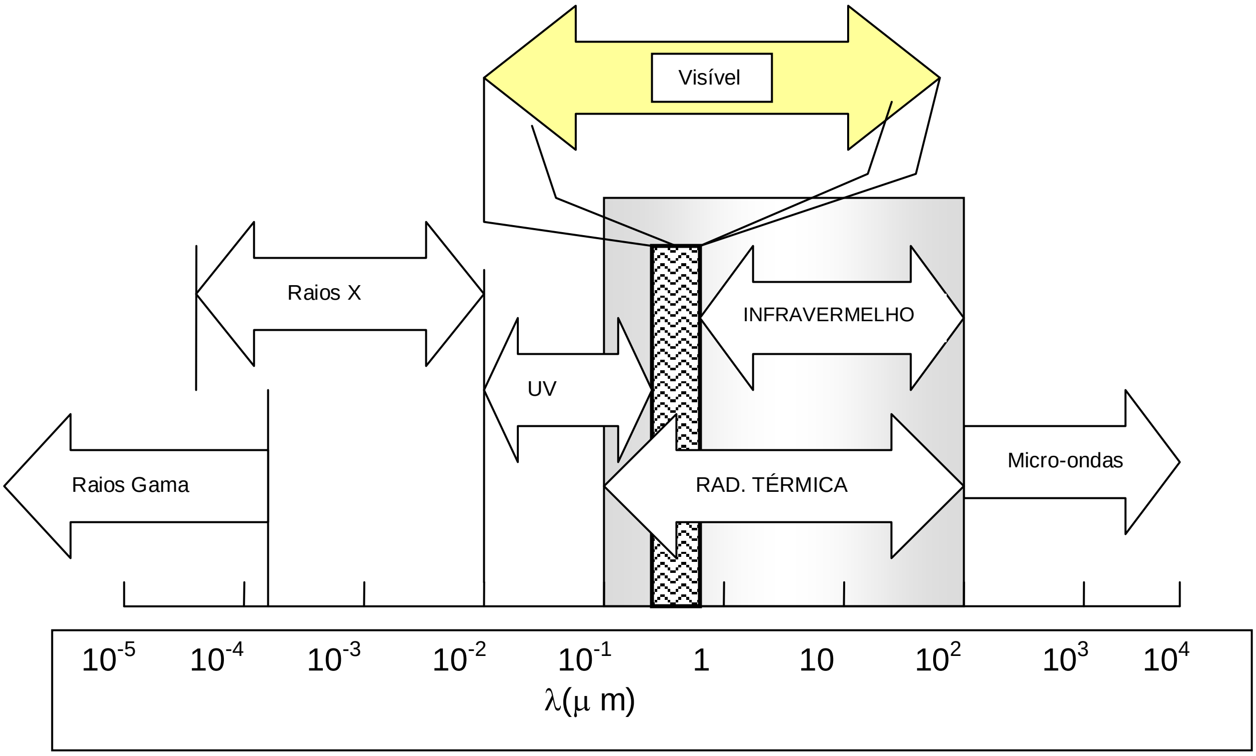
- condução ➔ choque entre as partículas
- convecção ➔ transferência de massa
- radiação ➔ ondas eletromagnéticas



A radiação térmica é utilizada em muitos processos industriais de aquecimento, resfriamento e secagem. Ocorre <u>perfeitamente no vácuo</u>, pois a radiação térmica se propaga através de ondas eletromagnéticas.

É um <u>fenômeno ondulatório</u> semelhante às ondas de rádio, radiações luminosas, raios-X, raios-gama, etc., diferindo apenas no <u>comprimento de onda</u> (λ), conhecido como <u>espectro eletromagnético.</u>

A intensidade da radiação varia com o comprimento de onda é comandada pela temperatura da superfície emissora.



A faixa de comprimentos de onda englobados pela **radiação térmica** é subdividida em **ultravioleta**, **visível** e **infravermelho**.

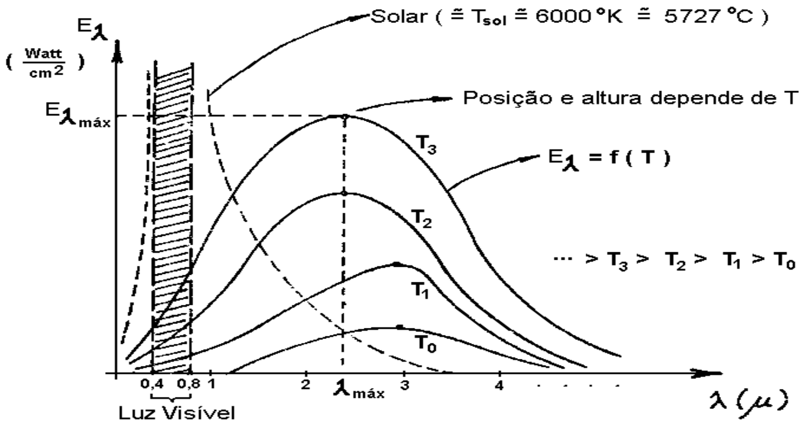
Região do **visível**: radiação idêntica às outras radiações eletromagnéticas, que aciona a sensação da visão do olho humano: luz. O Sol é a principal fonte de luz.

Região do **infravermelho:** radiação emitida pelos corpos na temperatura ambiente. Só acima de 800 K a radiação se torna visível.
Exemplo: o filamento de tungstênio de uma lâmpada deve ultrapassar 2000 K para ser notado.

Região do **ultravioleta:** radiação que deve ser evitada, pois pode causar sérios danos à saúde humana e a outros seres vivos. 12% da radiação solar estão nesse intervalo e a camada de O_3 na atmosfera absorve a maior parte dessa radiação. Entretanto, deve-se tomar cuidado com os raios que ainda permanecem na luz solar e provocam queimaduras e câncer. Foram proibidas algumas substâncias químicas que destroem a camada de O_3.

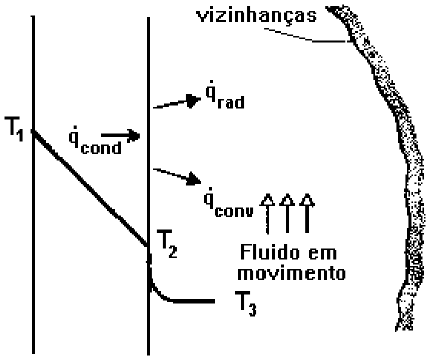
Poder de emissão (E) é a energia radiante total emitida por um corpo, por unidade de tempo e por unidade de área (kcal/h.m^2; W/m^2).

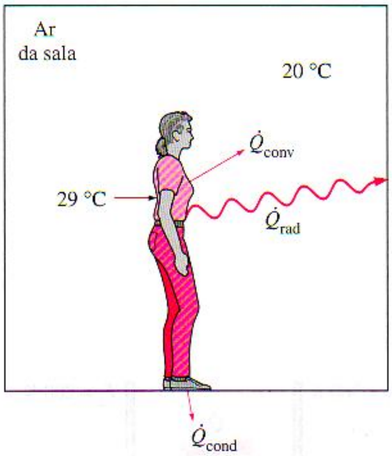
A análise espectroscópica mostra que o pico máximo de emissão ocorre para um comprimento de onda ($\lambda_{máx}$), cuja posição é função da temperatura absoluta do emissor (radiador).



EFEITO COMBINADO CONVECÇÃO - RADIAÇÃO
MECANISMOS SIMULTÂNEOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Uma parede plana qualquer submetida a uma diferença de temperatura, tem na face interna a temperatura T_1 e na face externa uma temperatura T_2, maior que a temperatura do ar ambiente T_3. Neste caso, através da parede ocorre uma transferência de calor por condução até a superfície externa. A superfície transfere calor por convecção para o ambiente e existe também uma parcela de transferência de calor por radiação da superfície para as vizinhanças. Portanto, a transferência de calor total é a soma das duas parcelas:





$$\boxed{\dot{Q} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad}}$$

RADIAÇÃO ATMOSFÉRICA E SOLAR

A energia que vem do Sol, a energia solar, chega sob a forma de ondas eletromagnéticas depois de experimentar interações com os constituintes da atmosfera (radiação emitida/refletida forma a radiação atmosférica).

Sol:

corpo quase esférico
$D \approx 1{,}39 \times 10^9$ m
$m \approx 2 \times 10^{30}$ kg
$L = 1{,}5 \times 10^{11}$ m (distância média da terra)
$E_{sol} \approx 3{,}8 \times 10^{26}$ W (taxa de energia de radiação contínua)
$1{,}7 \times 10^{17}$ W atinge a terra
T na região exterior do sol é de cerca de 5800 K.

A energia solar que atinge a atmosfera da Terra é chamada de **irradiância solar total** (**Gs**), ou constante solar, cujo valor é 1373 W/m^2, e representa a taxa em que a energia solar incide sobre uma superfície normal aos raios solares, na borda exterior da atmosfera quando a Terra está na sua distância média do Sol.

O valor da irradiância solar total pode ser utilizado para estimar a temperatura efetiva da superfície do Sol a partir da expressão:

$$\boxed{\left(4\pi L^2\right)G_s = \left(4\pi r^2\right)\sigma T_{sun}^4}$$

A radiação solar sofre atenuação considerável à medida que atravessa a atmosfera, como um resultado da absorção e de dispersão. A radiação é absorvida pelos gases O_2, O_3, H_2O e CO_2.

Portanto, a energia solar que atinge a superfície da Terra é enfraquecida pela atmosfera e cai para cerca de 950 W/m^2 num dia claro e bem menor em dias nublados ou com poluição.

Outro mecanismo que atenua a radiação solar que atravessa a atmosfera é de dispersão ou reflexão por moléculas de ar e poeira, poluição e gotículas de água suspensas na atmosfera.

EXERCÍCIOS PROGRAMADOS:

1) **(ÇENGEL 1-64)** Considere uma pessoa de pé em uma sala mantida todo o tempo a 20ºC. As superfícies internas das pareces, pisos e teto da casa estavam a uma temperatura média de 12ºC no inverno e 23ºC no verão. Determine as taxas de transferência de calor por radiação entre essa pessoa e as superfícies em torno no verão e no inverno, se a superfície exposta, a emissividade e a temperatura média da superfície da pessoa são 1,6 m2; 0,95 e 32ºC, respectivamente. **Respostas: 84,2 W (verão); 177,2 W (inverno)**

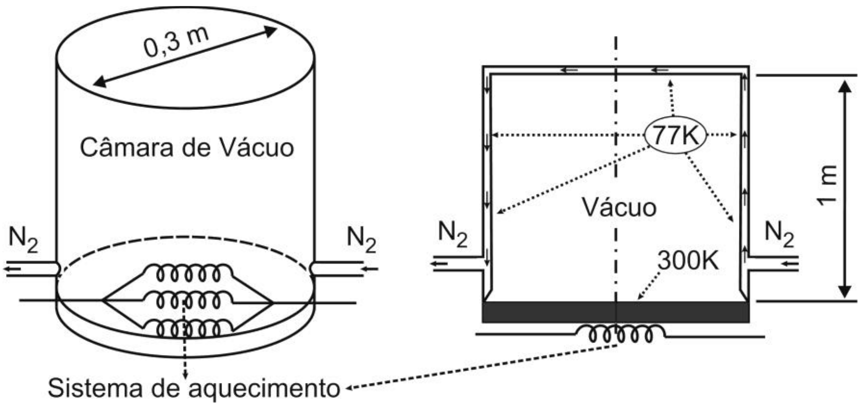
2) **(EA/GA)** Uma câmara de vácuo é usada em experimentos em um laboratório. A base da câmara é formada por uma placa cilíndrica, cuja temperatura na face superior (de emissividade 0,25) é mantida permanentemente a 300 K por um sistema elétrico de aquecimento. No interior da câmara há canais de resfriamento por onde escoa nitrogênio líquido a temperatura de 77 K.

Determine:

(a) Qual a potência do sistema elétrico de aquecimento?

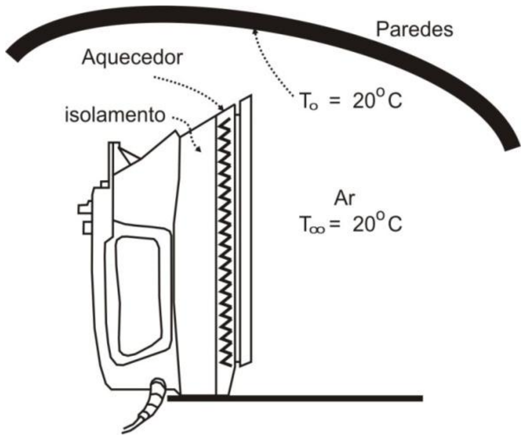
(b) Qual a vazão em massa de nitrogênio líquido? (Admita calor latente de vaporização do nitrogênio como 125 kJ/kg).

(c) Para reduzir a quantidade de nitrogênio líquido é proposto o revestimento da base da câmara por uma fina camada de Alumínio cuja emissividade é de 0,09. Quanto será economizado no consumo de nitrogênio em reais por ano de funcionamento ininterrupto do sistema se a modificação for implementada? **(EA/GA)**



Dados: Custo do nitrogênio R$ 2,00 por litro, Densidade do Nitrogênio líquido: 800 kg/m3.
OBS: O DISPOSITIVO EM QUESTÃO É ISOLADO EXTERNAMENTE, ou seja, não perde calor para o ar ambiente externo por nenhuma face lateral, superior ou inferior.
Respostas: a) 8,08W; b) $6{,}46.10^{-5}$ kg/s; c) R$ 3261,88 por ano.

3) **(EA/GA)** Deseja-se limitar a temperatura superficial da chapa inferior de um ferro de passar em 674 ºC, sabendo que normalmente é deixado sobre a tábua de passar com a sua base exposta ao ar e a um ambiente à temperatura de 20 ºC.
O coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície da base e o ar nas vizinhanças estima-se de 35 W/m^2K. Se a base tem uma emissividade de 0,6 e uma área de 200 cm^2, pede-se determinar a potência do ferro. Admita que toda a energia seja dissipada pela base do ferro e suponha regime permanente.
Resposta: 1000W



4) **(PROVÃO MEC)** Em uma empresa existem 500 metros de linha de vapor a 150 ºC, com diâmetro externo de 0,1 m, sem isolamento térmico, em um ambiente fechado a 30 ºC. O vapor estava sendo gerado a partir da queima de lenha que produzia energia a baixo custo, porém causando grandes danos ambientais. Diante disso, esse processo foi substituído por um sistema de gás natural adaptado à caldeira que polui menos e ainda apresenta vantagens no custo do kWh.

Objetivando a racionalização de energia nessa empresa, propõe-se o isolamento da tubulação a partir de uma análise dos custos envolvidos. Para tanto, considere um coeficiente de transferência convectiva de calor h = 7 W/m^2. K entre a tubulação e o ar ambiente. Despreze as resistências térmicas por convecção interna e condução na parede da tubulação e suponha que as temperaturas das paredes internas do recinto sejam iguais 27 ºC.

a) cite dois fatores importantes que devem ser considerados na seleção de um isolante térmico;

b) determine a economia de energia diária, em Joules, que pode ser obtida isolando-se a tubulação com uma camada de 0,05 m de lã de vidro (k = 0,04 W/m.K). Despreze trocas térmicas radiativas entre o isolante e o ambiente e considere o coeficiente de convecção h = 3,5 W/ m^2. K;

c) O orçamento para a colocação do isolamento térmico é de R$ 60.000,00 e o custo do kWh é R$ 0,10. Calcule o tempo de amortização do investimento. (valor: 2,0 pontos)

Dados / Informações adicionais:

K = ºC + 273

Emissividade da parede externa da tubulação: $\varepsilon = 0{,}9$

Constante de Steffan-Boltzmann: $\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}$ W/m^2. K

Respostas: b) Ec = 26.127 MJ/dia; c) Tempo = 83 dias

4ª aula: "EQUAÇÃO GERAL DA CONDUÇÃO DE CALOR"

(ÇENGEL) – **CAPÍTULO II**

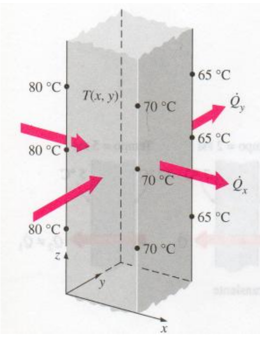
TRANSFERÊNCIA DE CALOR MULTIDIMENSIONAL

Os problemas de T.C. podem ser:
- unidimensionais
- bidimensionais
- tridimensionais

... dependendo da magnitude das taxas de calor em diferentes direções e do nível de exatidão desejada.

No caso mais geral, são **tridimensionais**, sendo que:

- T varia ao longo das 3 direções;
- a distribuição de T em qualquer momento e $\dot{Q}$ em qualquer posição podem ser descritas por um conjunto de 3 coordenadas, como x, y, z – no sistema de coordenadas retangulares. A distribuição de T é expressa: T(x, y, z, t).

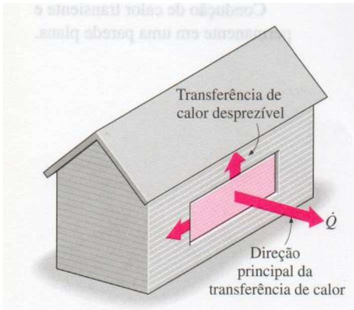


Variação de T em duas direções:

T(x, y) [$\dot{Q}$ também]

Δt = 0

bidimensional



Variação de $\dot{Q}$ e T em uma única direção

unidimensional

$\dot{Q} = -k.A.\dfrac{dT}{dx}$	$\dot{Q}_x = -k.A_x.\dfrac{\partial T}{\partial x}$ (**direção x**) $\dot{Q}_y = -k.A_y.\dfrac{\partial T}{\partial y}$ (**direção y**) $\dot{Q}_z = -k.A_z.\dfrac{\partial T}{\partial z}$ (**direção z**)

GERAÇÃO DE CALOR

A conversão de energia mecânica, elétrica, nuclear e química em calor é chamada de Geração de Calor (ou Energia Térmica).

Exemplos:
- conversão de energia elétrica em calor: $R.I^2$
- conversão da energia nuclear em calor (fissão do urânio)
- conversão da energia do sol em calor (fusão do H_2 e He)
- reação química exotérmica

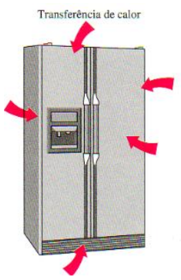
A geração de calor é um fenômeno volumétrico e a taxa de calor gerado em um corpo ($\dot{e}$ = W/m^3) pode variar com o tempo.

$$\boxed{\dot{E} = \dot{e}_{ger} \cdot V}$$

EXEMPLOS

1) Ganho de calor em uma geladeira

Para determinar o tamanho do compressor de uma geladeira, deve-se determinar a taxa de transferência de calor do ar da cozinha para o espaço refrigerado (paredes, porta, topo e fundo) da geladeira. É um problema de T.C. em R.P. ou R.T.? Unidimensional ou multidimensional?
Justifique.



Solução:

1) **Típico R.T.:** as condições térmicas da geladeira e da cozinha mudam com o tempo.
   ✓ Para a solução, considerar R.P. no pior caso (condições de projeto):
   - termostato: T mais baixa
   - cozinha: T mais alta

   Para que o compressor atenda a todas as condições possíveis
2) **Tridimensional:** pelos 6 lados da geladeira
   Como em qualquer lado a T.C. ocorre na direção normal à superfície, o caso pode ser analisado como unidimensional. A taxa de calor é calculada para cada lado e somada.

2) Geração de calor em um secador de cabelo

O fio da resistência de um secador de cabelo de 1200 W possui 80 cm de comprimento e diâmetro de 0,3 cm, Determine a taxa de geração de calor no fio por unidade de volume (W/cm^3) e o fluxo de calor (W/cm^2) na superfície externa do fio como resultado da geração de calor.

Solução: dada a potência gerada, calcular a geração e o fluxo de calor.
O secador converte energia elétrica em calor na resistência a uma taxa de 1200 W (J/s).

$$\dot{e}_{ger} = \frac{\dot{E}_{ger}}{V_{fio}} = \frac{\dot{E}_{ger}}{\left(\frac{\pi D^2}{4}\right) L} = \frac{1200\ W}{[\frac{\pi(0{,}3\ cm)^2}{4}](80\ cm)} = 212\ W/cm^3$$

$$\dot{q}_{fio} = \frac{\dot{E}_{ger}}{A_{fio}} = \frac{\dot{E}_{ger}}{\pi D L} = \frac{1200\ W}{\pi(0{,}3\ cm)(80\ cm)} = 15{,}9\ W$$

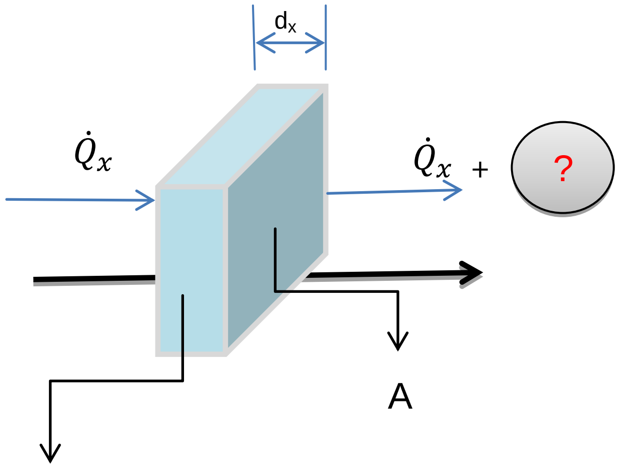
EQUAÇÃO DA CONDUÇÃO DE CALOR EM UMA EXTENSA PAREDE PLANA

O formato geral das equações de conservação é:

Entra – Sai + Gerado = Acumulado

Condução Unidimensional

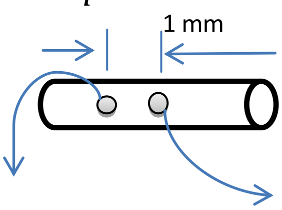
$$\dot{Q}_x = -kA\,\frac{dT}{dx} \qquad (\textit{direção } x)$$



$$\dot{q}_G\left(\frac{W}{m^3}\right)$$

$$\dot{Q}_x + \frac{\partial \dot{Q}_x}{\partial x}\,d_x$$

$Ex.\ expansão\ em\ série\ de\ Taylor$



$T_0 = 20℃$ $\qquad T_1 = 23℃$

$+\,3$ ℃/mm

$$T_1 = T_0 + \Delta T$$

$$T_1 = (20+3)\frac{℃}{mm}.1mm$$

$$\varphi_1 = \varphi_0 + \frac{\partial \varphi}{\partial x}d_x$$

$$\dot{Q}_x - \left(\dot{Q}_x + \frac{\partial \dot{Q}_x}{\partial_x}d_x\right) + \dot{q}_G A d_x = dm.c.\frac{\partial_T}{\partial t}$$

$$\cancel{\dot{Q}_x} - \cancel{\dot{Q}_x} - \frac{\partial \dot{Q}_x}{\partial_x}d_x + \dot{q}_G A d_x = \rho A d_x c\frac{\partial_T}{\partial_t}$$

$$-\frac{\partial}{\partial_x}\left(-kA\frac{\partial_T}{\partial_x}\right)dx + \dot{q}_G A d_x = \rho A d_x c\frac{\partial_T}{\partial_t}$$

$$\rho = \frac{massa}{volume}$$

$$\rho = \frac{dm}{Adx} \quad \rightarrow \quad dm = \rho A dx$$

$$k\cancel{A}\,\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\,\cancel{d}\cancel{x} + \dot{q}_G\,\cancel{A}\cancel{dx} = \rho\,\cancel{A}\cancel{dx}\,c\,\frac{\partial_T}{\partial_t} \qquad (\div k)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{q}_G}{k} = \frac{\rho c}{k}\,\frac{\partial T}{\partial t} \qquad \left[\alpha = \frac{k}{\rho\,c}\right]$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{q}_G}{k} = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} \qquad T = T(x, y, z, t)$$

$$\boxed{\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}_G}{k} = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t}}$$

Em Regime Permanente: $(\frac{\partial}{\partial t} = 0)$

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{\dot{q}_G}{k} = 0$$

Em Regime Permanente sem geração: $(\frac{\partial}{\partial t} = 0$ e $\dot{q}_G = 0)$

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0$$

Em Regime Transiente sem geração: $(\dot{q}_G = 0)$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t}$$

No caso da condução unidimensional em Regime Permanente deve-se substituir derivada parcial por derivada ordinária, pois a função depende de uma só variável [t = T(x)]

EXEMPLOS:

1) Condução de calor através do fundo de uma panela

Considere uma panela de aço colocada em cima de um fogão elétrico para cozinhar. O fundo da panela possui 0,4 cm de espessura 18 cm de diâmetro. A boca do fogão consome 800 W de potência e 80% do calor gerado é transferido uniformemente para a panela. Assumindo-se condutividade térmica constante, obtenha a equação diferencial que descreve a variação de temperatura no fundo da panela durante uma operação em Regime Permanente.

Solução:

A partir de uma panela de aço em cima de um fogão ⟶ obter equação diferencial para variação de T no fundo da panela.

Considerações:

- ✓ fundo da panela ⟶ parede plana infinita ⟶ A>>>>>> “e”
- ✓ Como – o calor é aplicado uniformemente no fundo da panela
  – as condições na superfície interna também são uniformes

... espera-se que a T.C. ocorra da superfície inferior em direção ao topo ∴ **unidimensional**

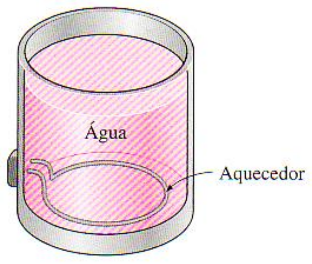
- ✓ Adotando a direção normal à superfície inferior da panela como eixo x:
  - T = T(x): **Regime Permanente**
- ✓ k = cte.
- ✓ $\dot{e}_{ger} = 0$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\cancel{\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}}+\cancel{\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}}+\cancel{\frac{\dot{q}_G}{k}}=\cancel{\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t}}$$

$$\boxed{\frac{d^2T}{dx^2}=0}$$

2) Condução de calor em um aquecedor

A resistência de um aquecedor usado para ferver água é um fio com determinado k, D e L. A variação de k em função da temperatura é desprezível. Obtenha a equação diferencial que descreve a variação de temperatura no fio durante uma operação em Regime Permanente.



Solução:

A partir do fio da resistência do aquecedor ⟶ obter equação diferencial para variação de T no fio.

Considerações:

- ✓ fio ⟶ cilindro longo ⟶ L = + 100 x D
- ✓ Como – o calor é gerado uniformemente no fio
  – as condições na superfície externa do fio também são uniformes
  Espera-se que a T no fio varie só na direção radial ∴ **unidimensional**
- ✓ k = cte.
- ✓ T = T(r): **Regime Permanente**
- ✓ $\dot{e}_{ger}$ pode ser calculada

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\cancel{\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}}+\cancel{\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}}+\frac{\dot{q}_G}{k}=\cancel{\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t}}$$

(1ª parcela escrita com as variáveis da direção radial e derivada ordinária)

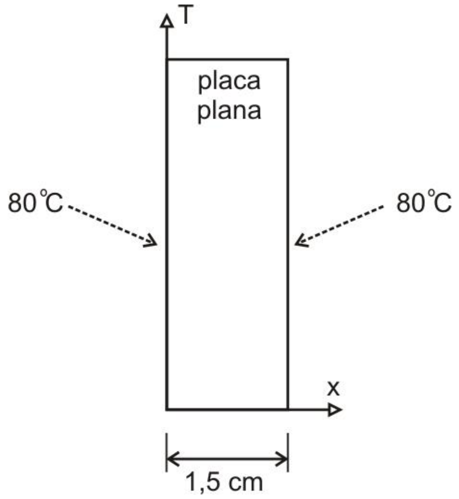
EXERCÍCIOS PROGRAMADOS:

1) **(EA/GA)** Um painel solar montado em uma aeronave espacial tem formato de placa plana com um **1 m²** de área superficial em cada uma das suas faces. Sabe-se que **12%** da energia solar absorvida é convertida em energia elétrica, e é enviada à aeronave continuamente. O lado do painel que contém o lado fotovoltaico tem emissividade de **0,8** e uma absortividade solar igual a **0,8**. A parte de trás do painel tem emissividade de **0,7**. O conjunto está orientado de forma a estar normal à irradiação solar de **1500 W/m²**. A transmissividade do painel é igual a zero. **Determine a temperatura em regime permanente do painel**. Admita que o painel solar seja uma fina placa com temperatura uniforme e que não há trocas térmicas por radiação com nenhuma outra fonte (além do Sol). **Resposta: 60,8ºC**

2) **(EA/GA)** O terminal conector de um cabo elétrico de alta potência é fabricado em cobre e possui a geometria de uma placa plana com **1,5 cm** de espessura. A corrente e a tensão que ele suporta são tais que resultam em uma geração interna de calor de **5x10^8 W/m^3**. As temperaturas nas duas superfícies laterais, em regime permanente, são de **80ºC**. Se a condutividade térmica do cobre é uniforme e possui um valor de **400 W/mK**, determine a equação da distribuição de temperatura T(x) através da placa (Temperatura em ºC e posição x em metros).
A equação de condução de calor em coordenadas cartesianas é:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+\frac{\dot{q}_G}{k}=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t}$$

Admita: I) Regime permanente e II) Condução unidimensional de calor – apenas na direção x.
UTILIZE OBRIGATORIAMENTE O SISTEMA CARTESIANO ORIENTADO E LOCALIZADO CONFORME A FIGURA.
Atenção: É obrigatório o uso e a simplificação da equação da condução, indicando todas as passagens até a solução.

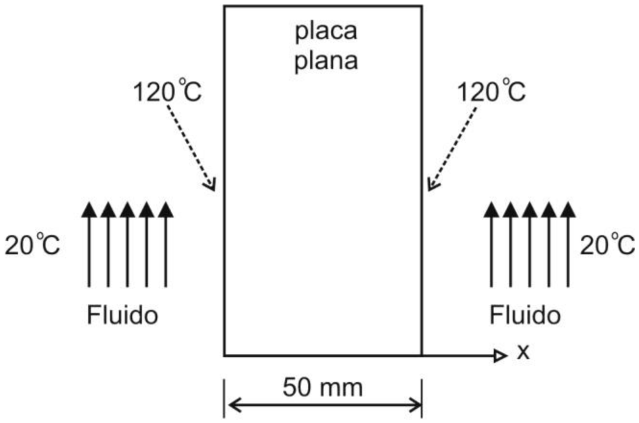


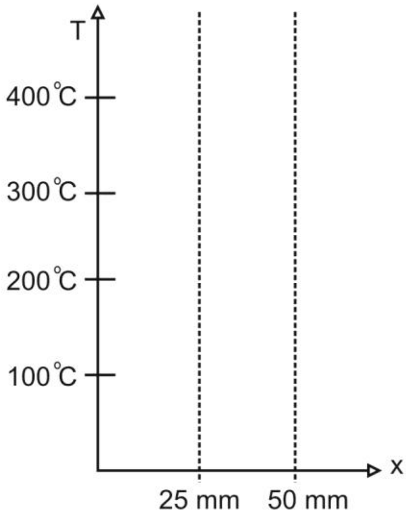
Resposta: $T=-625000x^2+9375x+80$ **(para x em metros e a temperatura em Celsius)**

3) **(EA/GA)** Condução unidimensional (apenas na direção x), em regime permanente, com geração de energia interna uniforme ocorre em uma parede plana com espessura de 50 mm e uma condutividade térmica constante igual a 5 W/mK. Nessas condições, a distribuição de temperaturas na placa plana segue a expressão:

$T(x)=a+b\,x+c\,x^2$ (onde *T* é a temperatura em ºC e *x* a cota em m).

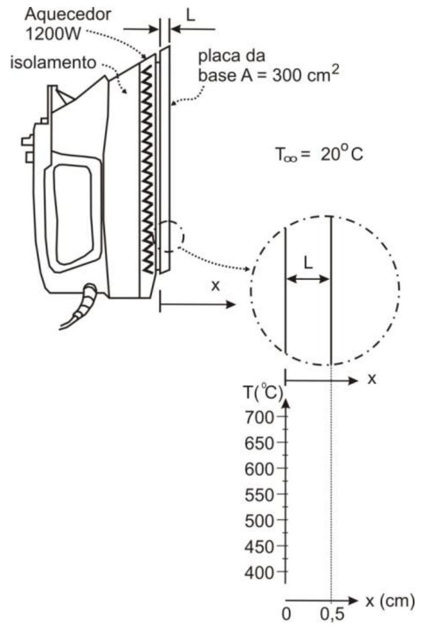
São conhecidas as temperaturas: em *x* = 0 mm que é de $T(x=0m)=120^0C$ e *x* = 50 mm que também está a $T(x=0,05m)=120^0C$. Nessas superfícies, há convecção com um fluido a $T_\infty=20^0C$ com coeficiente de troca de calor por convecção de 500 W/m^{2}K.
(a) Utilizando um balanço de energia global na parede, calcule a taxa de geração interna de energia.
(b) Determine os coeficientes a, b e c aplicando as condições de contorno na distribuição de temperaturas especificada. Use os resultados para calcular e representar graficamente a distribuição de temperaturas.





Respostas: a) 2.10⁶ W/m³; b) curva em forma de parábola, com concavidade voltada "para baixo" em x = 0 mm temperatura de 120ºC, em x = 25 mm temperatura de 245ºC e em x = 50 mm temperatura de 120ºC a equação da parábola é $T = 120 + 10000x - 200000x^2$ **(para x em metros e a temperatura em Celsius)**

4) **(EA/GA)** Considere que a placa da base de um ferro de passar de 1200W tenha espessura de L = 0,5 cm, área da base A = 300 cm^2 e condutividade térmica 15 W/mK. A superfície interna da placa é submetida a uma taxa de transferência de calor uniforme, gerada pela resistência elétrica interna, enquanto a superfície externa perde calor para o meio (de temperatura 20ºC) por convecção térmica, como indicado na figura. Assumindo que o coeficiente de transferência de calor por convecção é de 80 W/m^{2}K e desprezando a perda de calor por radiação, **obtenha uma expressão para a variação de temperatura na placa da base do ferro**. A expressão deve ser do tipo T = T(x) onde T deve estar obrigatoriamente em ºC e x em metros. **Determine também a temperatura em x = 0 e x = L [NO DETALHE INDIQUE GRAFICAMENTE O RESULTADO NA PLACA].**



A orientação do sistema de coordenadas está indicada na figura e não pode ser alterada. Suponha operação em regime permanente e troca de calor unidimensional (apenas na direção x). Indique claramente quais os termos a serem desprezados na Equação da condução e as hipóteses simplificadoras adotadas!

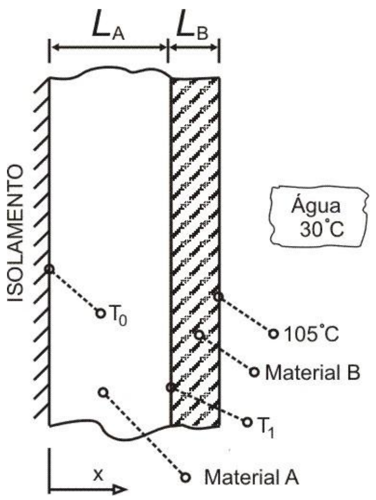
Equação da condução para coordenadas cartesianas:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+\frac{\dot{q}_G}{k}=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t}$$

Respostas:
Expressão: $T=-2666,7x+533,3$

Temperatura em x = 0 **T = 533,3ºC** e
x = L **T = 520ºC** [reta]

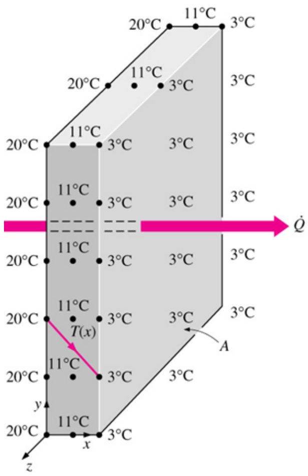
5) **(EA/GA)** Uma parede plana é composta por duas camadas de materiais, A e B. Na camada A há geração de calor uniforme com taxa de geração volumétrica e uniforme igual a $\dot{q}_G$. A camada B não apresenta geração de calor. A superfície esquerda da camada A, está perfeitamente isolada, enquanto a superfície direita da camada B é resfriada por uma corrente de água com temperatura de 30ºC e coeficiente de troca de calor por convecção igual a 1000 W/(m^{2}K) e se mantém a temperatura de 105ºC. Determine a temperatura na superfície isolada. São dados: condutividade térmica do material da camada A igual a 75 W/m.K, condutividade térmica do material da camada B igual a 150 W/mK. Admita regime permanente, troca de calor unidimensional (apenas na direção x), resistência de contato desprezível e efeitos de transferência de calor por radiação desprezível.
Importante: no material A, a distribuição de temperaturas segue uma função parabólica com a posição x: $T=a\,x^2+b\,x+c$. **Dados:** $L_A=50\,mm$ e $L_B=20\,mm$. **Resposta: 140 ºC**



5ª aula: "CONDUÇÃO DE CALOR PERMANENTE"

(ÇENGEL, 2009) – **CAPÍTULO III**

CONDUÇÃO DE CALOR PERMANENTE EM PAREDES PLANAS



$$\dot{Q} = -\frac{kA}{L}(T_2 - T_1) \quad ou \quad \dot{Q} = \frac{kA}{L}(T_1 - T_2)$$

Conceito de Resistência Térmica

ANALOGIA ENTRE TRANSMISSÃO DE CALOR E O FLUXO DE UMA CORRENTE ELÉTRICA

Lei de Ohm

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R_k} \qquad I = \frac{U}{R_e}$$

$$\dot{Q} \Leftrightarrow I$$
$$T_1 - T_2 \Leftrightarrow U$$
$$R_k \Leftrightarrow R_e$$

CONDUÇÃO

$$\dot{Q} = \frac{k.A}{L}(T_1 - T_2) = \frac{T_1 - T_2}{\underbrace{\frac{L}{k.A}}_{R_k}} \qquad onde: \frac{L}{k.A} = R_k = resistência\ térmica\ à\ condução$$

$$R_k = (^oC/W)(^oC/kcal.h)$$

Os bons condutores de eletricidade são também bons condutores de calor.

Quem conduz a eletricidade nos metais são os elétrons livres e quem conduz o calor nos metais também são os elétrons livres.

$$\boxed{R_k = \frac{L}{A.k}} \qquad R_e = \frac{L}{A.\rho'} \qquad \rho' = \frac{1}{\rho}$$

$onde: k = condutibilidade\ térmica$ $\qquad onde: \rho' = condutividade\ elétrica$

$$\boxed{\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R_K}}$$

CONVECÇÃO

$$\dot{Q} = h.A.\Delta T \Rightarrow \underbrace{\Delta T}_{U} = \underbrace{\frac{1}{h.A}}_{R} \underbrace{\dot{Q}}_{I}$$

Lei de Ohm $\Rightarrow$ **U = R** I

$$\boxed{R_t = \frac{1}{h.A}}$$

RADIAÇÃO

$$\dot{Q} = \varepsilon.\sigma.A_S.(T_S^4 - T_{arr}^4)$$

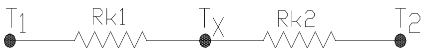
$$\dot{Q} = \underbrace{\frac{\varepsilon.\sigma.(T_S^4 - T_{arr}^4).A_S}{(T_S - T_{arr})}}_{h_{rad}} . (T_S - T_{arr}) \Rightarrow \dot{Q} = h_{rad} . A_S . (T_S - T_{arr})$$

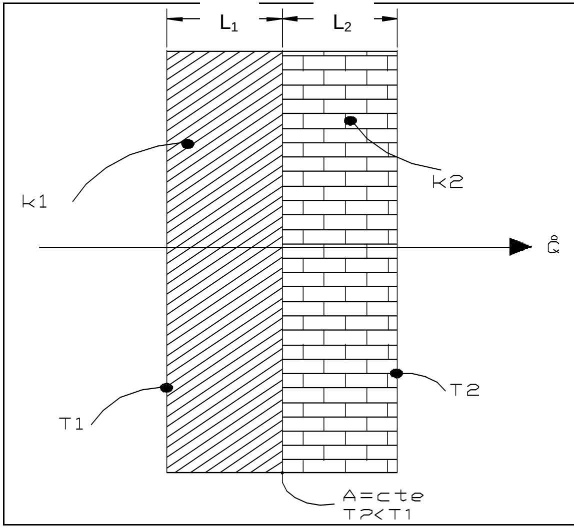
$$\dot{Q} = \frac{(T_S - T_{arr})}{\underbrace{\frac{1}{h_{rad} . A_S}}_{R_{rad}}} \Rightarrow \dot{Q} = \frac{(T_S - T_{arr})}{R_{rad}}$$

REDES DE RESISTÊNCIA TÉRMICA GENERALIZADA

PAREDES MULTICAMADAS

1. PAREDES PLANAS EM SÉRIE





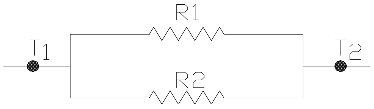
$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R_{teq}} \quad onde: R_{teq} = R_{t1} + R_{t2} = \frac{L_1}{k_1.A} + \frac{L_2}{k_2.A}$$

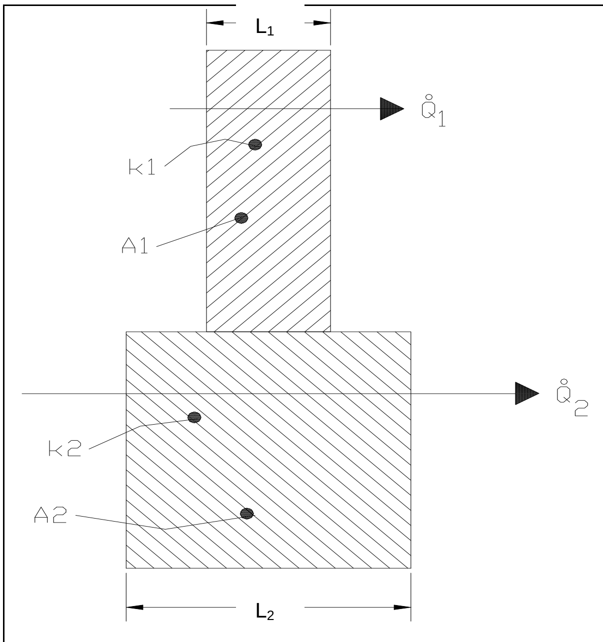
Genericamente:

$$\boxed{R_{teq} = \sum_{i=1}^{n} R_{ti} = \sum_{i=1}^{n} \frac{L_i}{k_i.A}}$$

onde n = n$^{\underline{0}}$ de paredes planas (em série)

2. PAREDES PLANAS EM PARALELO





$$\dot{Q} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2$$

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R_{teq}} \quad onde: \frac{1}{R_{teq}} = \frac{1}{\frac{L_1}{k_1.A_1}} + \frac{1}{\frac{L_2}{k_2.A_2}}$$

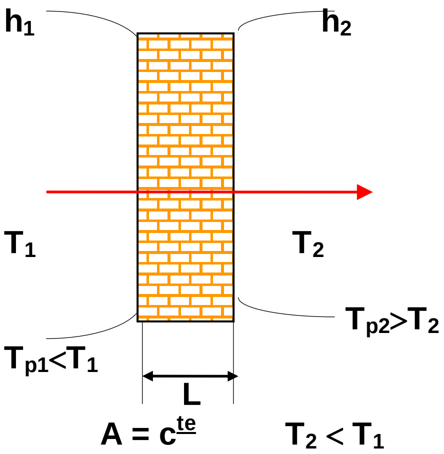
Genericamente:

$$\boxed{\therefore \quad \dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R_{eq}}}$$

onde: n = n$^{\underline{0}}$ de paredes planas (em paralelo)

3. EFEITOS COMBINADOS DE CONDUÇÃO E CONVECÇÃO

3.1 UMA PAREDE PLANA



$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{teq}}$$

onde $R_{teq} = R_{tf1} + R_{tp} + R_{tf2}$

$$R_{teq} = \frac{1}{h_1.A} + \frac{L}{k.A} + \frac{1}{h_2.A}$$

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{\dfrac{1}{h_1.A} + \dfrac{L}{k.A} + \dfrac{1}{h_2.A}}$$

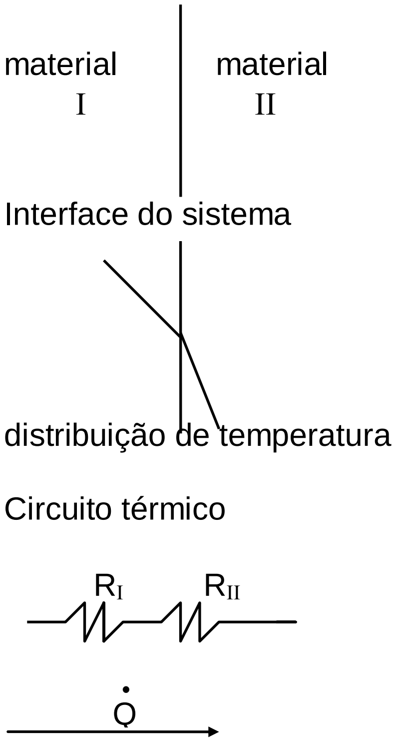
3.2 PAREDES PLANAS EM SÉRIE

$$\dot{Q} = \frac{(T_1 - T_2)}{\dfrac{1}{A.h_1} + \dfrac{1}{A}\sum_{i=1}^{n}\dfrac{L_i}{k_i} + \dfrac{1}{A.h_2}}$$

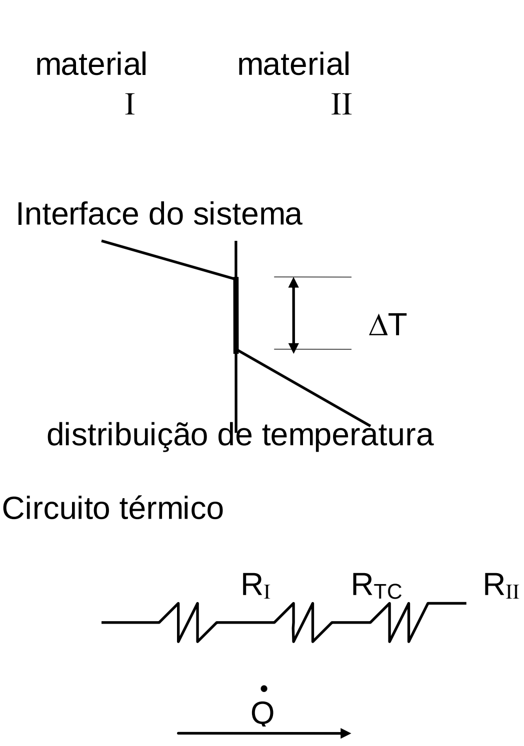
$onde: n \quad é \quad o \quad n^O \; de \; paredes \; em \; série$

"RESISTÊNCIA TÉRMICA DE CONTATO"

Sistema composto com contato térmico perfeito



Sistema composto com contato térmico imperfeito



sendo: $R_{TC} = \dfrac{1}{h_{TC}\,A}$

O coeficiente de contato térmico h_{TC} depende do material, da aspereza da superfície, da pressão de contato e da temperatura.

h_{TC} < para aço inox. ($\cong$ 3 kW/m^2 ^{0}C)

h_{TC} > para cobre ($\cong$ 150 kW/m^2 ^{0}C)

Um meio prático de reduzir a resistência térmica de contato é inserir um material de boa condutividade térmica entre as duas superfícies. Existem graxas com alta condutividade, contendo silício, destinadas a este fim. Em certas aplicações podem ser usadas também folhas delgadas de metais moles.

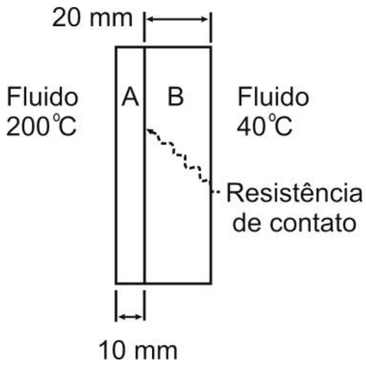
Exercício:

1) **(EA/GA)** Considere uma parede plana composta de dois materiais de condutividade térmica k_A = 0,1 W / m K e k_B = 0,04 W / m K e espessura L_A = 10 mm e L_B = 20 mm, respectivamente. O material A é exposto a um fluido a 200ºC e o coeficiente de troca de calor por convecção é de 10 W / m^2 K. O material B é exposto a um fluido de 40ºC de temperatura e o coeficiente de troca de calor por convecção é de 20 W / m^2 K. A resistência de contato entre os dois materiais descritos é de 0,3 m^2 K / W.

a) Esquematize o circuito térmico equivalente.

b) Determine qual a taxa de transferência de calor admitindo uma parede de 2 m de altura por 2,5 m de largura.

a) Circuito térmico equivalente:



Resposta: b) 761,9 W

EXERCÍCIOS PROGRAMADOS:

1) **(EA/GA)** A figura ilustra esquematicamente um detalhe do sistema de aquecimento do reservatório de água de uma cafeteira elétrica. Um aquecedor elétrico dissipa (constantemente) uma quantidade de energia equivalente a 80000 J de energia em 100 segundos de operação nas condições a seguir descritas:

Temperatura da água = 100ºC; Temperatura do ar ambiente = 25ºC; espessura da chapa de aço = 2 mm; espessura da camada de isolante = 4 mm. Admita em sua solução:

I) Regime permanente;

II) Condução de calor unidimensional (apenas na direção x);

III) Aquecedor com temperatura homogênea em todo o seu interior e superfície;

IV) Que os efeitos da radiação térmica possam ser desprezados;

V) Que a troca de calor através dos pés do equipamento possa ser desprezada;

VI) Que as resistências de contato são pequenas.

Dados:

Condutividade térmica do aço = 40 W/mK; Condutividade térmica do isolante = 0,06 W/mK;

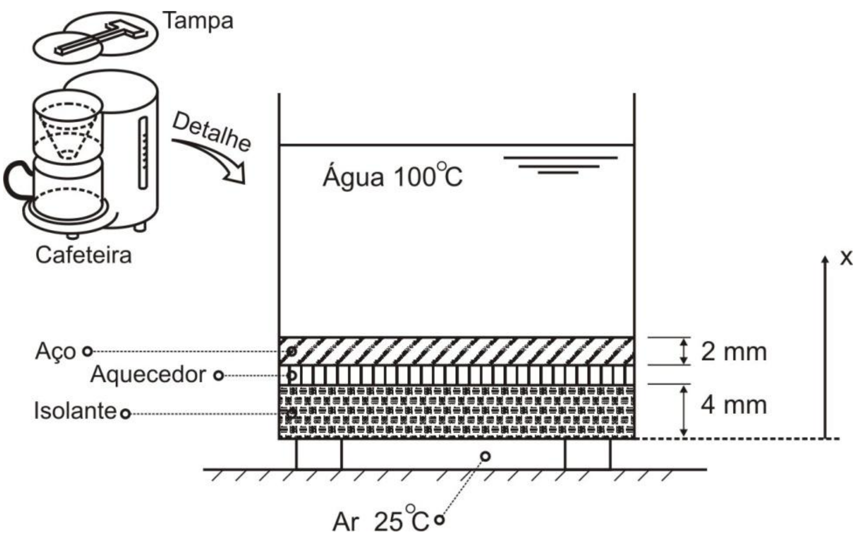
Coeficiente de troca de calor por convecção entre o aço e a água = 3000 W/m^{2}K;

Coeficiente de troca de calor por convecção entre o isolante e o ar = 10 W/m^{2}K;

Área de contato entre a água e o aço 180 cm^2;

Área de contato entre o isolante e o ar 180 cm^2;

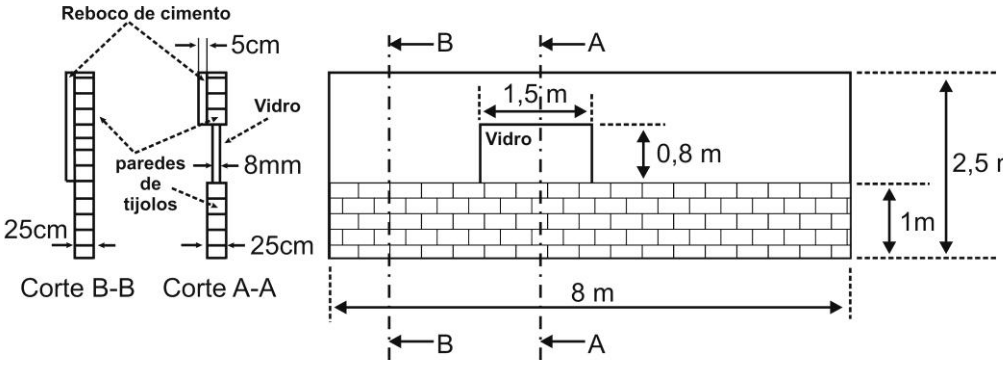
Determine a temperatura do elemento de aquecimento. Desenhe o circuito térmico equivalente. **Resposta: 116,825ºC**



2) **(EA/GA)** Considere a parede de uma casa de dimensões 8 m x 2,5 m. Uma janela de vidro instalada na parede tem dimensões de 1,5 m x 0,8 m x 0,008 m. A parede é dividida em duas partes, sendo que a porção inferior é feita de tijolos e ocupa uma altura de 1m. 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 troca de calor por convecção do lado interno e externo da casa, a saber:

Condutividade térmica do **vidro:** 1,4 W/m K; **tijolos cimentados:** 1,3 W/m K; **reboco de cimento:** 0,72 W/mK	Coeficiente de troca de calor por convecção **Interno:** 10 W/m^2 K **Externo:** 25 W/m^2 K

A temperatura do ar no interior da casa é mantida por um sistema de aquecimento em 25ºC, desprezando quaisquer efeitos de radiação, qual será a energia total dissipada pela parede se o ar do ambiente externo está a temperatura de 5ºC? **Resposta: 1183,83 W**

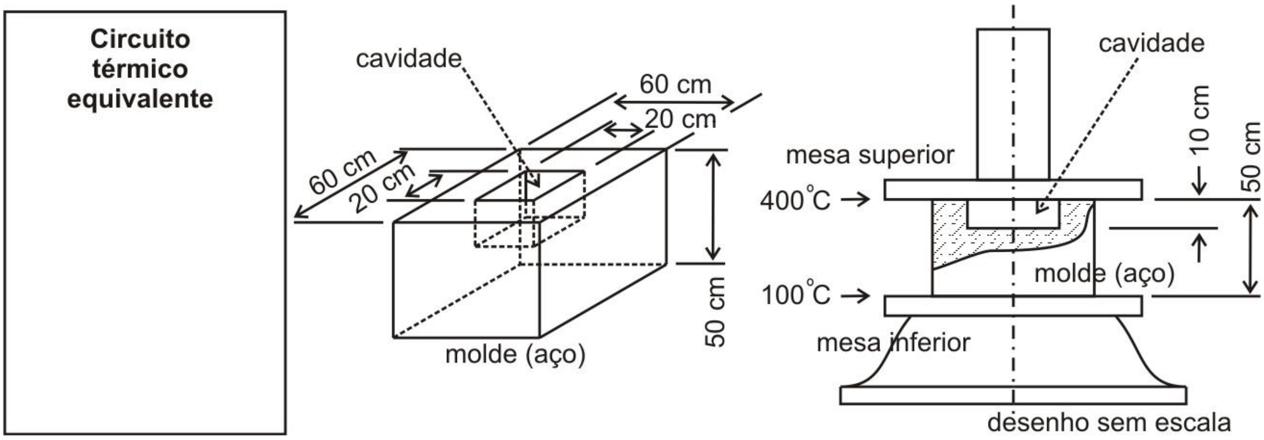


3) Um molde[1] de vulcanização (60 cm x 60 cm x 50 cm), de uma peça de borracha em formato de paralelepípedo (com 20 cm x 20 cm x 10 cm) é colocado entre as mesas de uma prensa de vulcanização. As temperaturas das mesas, superior e inferior da prensa são, respectivamente, 400ºC e 100ºC. Admita que o molde esteja completamente isolado em suas laterais e não perde calor por convecção (esse isolamento não está representado na figura abaixo), admita também regime permanente e resistências de contato desprezíveis, bem como ausência de efeitos de radiação térmica e que a condução é unidimensional.

São dados: Condutividade térmica do aço: 43 W / m K, Condutividade térmica da borracha (que preenche toda a cavidade do molde): 0,465 W / m K; Custo da energia R$ 0,40 por 1 KWh.

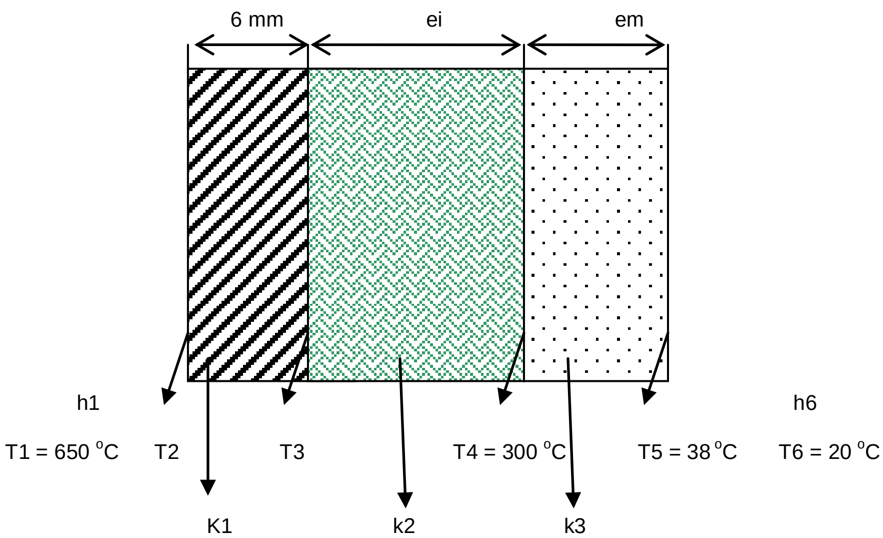
ESQUEMATIZE O CIRCUITO TÉRMICO UTILIZADO NA SOLUÇÃO. Determine: a) a taxa de transferência de calor total que atravessa o molde de aço; b) a menor temperatura na peça de borracha; c) o custo em energia para produzir uma peça que fica em média 25 minutos na prensa.

[1] Não é necessário na solução do problema, entretanto, o molde tem uma lateral removível para retirada ("desmoldagem") da peça vulcanizada.



Obs. Há várias possibilidades de escolha do circuito térmico. Obviamente, todas as escolhas (desde que corretas) levarão as seguintes respostas:
Respostas: a) 8309,5 W; b) 112,4ºC; c) R$ 1,39.

4) No interior de uma estufa de alta temperatura os gases atingem 650 ^{o}C. A parede da estufa é de aço, tem 6 mm de espessura e fica em um espaço fechado onde há risco de incêndio, sendo necessário limitar uma temperatura da superfície em 38^{o}C. Para minimizar os custos de isolação, dois materiais serão usados: primeiro, isolante de alta temperatura (mais caro, com k = 0,0894 kcal/hm ^{o}C, aplicado sobre o aço de k = 37,24 kcal/hm ^{o}C) e depois, magnésio (mais barato, com k = 0,0670 kcal/hm ^{o}C) externamente. A temperatura máxima suportada pelo magnésio é 300 ^{o}C. Pede-se:
a) Especificar a espessura de cada material isolante (em cm);
b) Sabendo que o custo do isolante de alta temperatura, por cm de espessura colocado, é 2 vezes o do magnésio, calcular a elevação percentual de custo se apenas o isolante de alta temperatura fosse utilizado.
Dados:
Temperatura ambiente = 20 ^{o}C
h_1 = 490 kcal/hm^2 ^{o}C
h_6 = 20 kcal/hm^2 ^{o}C
Resposta: a) e_m = 4,88 cm; e_i = 8,67 cm; b) 36,6%



6ª aula: "EXERCÍCIOS"

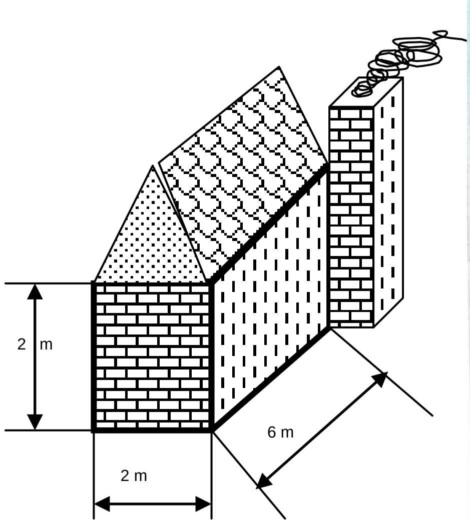
Exercícios aula de teoria:

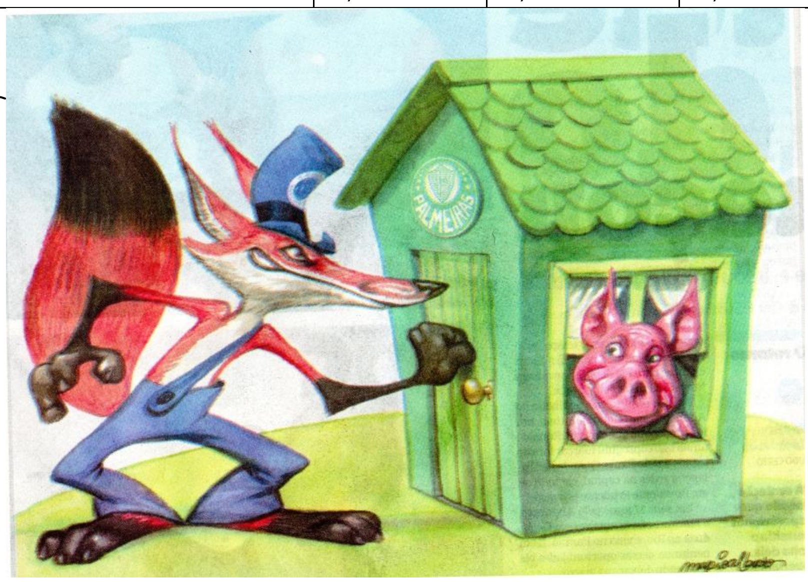
1) **(EA/GA)** Uma grande parede tem espessura L = 0,05 m e condutividade térmica k = 0,7 W/mK. Na superfície frontal da parede, cuja emissividade é 0,8, há troca radiativa com uma vizinhança de grande porte e transferência de calor pela convecção para o ar. O ar e as vizinhanças estão a 300 K e o coeficiente de transferência de calor por convecção é de 20 W/m^2 K. Se a superfície frontal tiver uma temperatura de 400K, qual é a temperatura da superfície traseira? Faça um esquema do problema. Admita regime permanente. **Resposta 327ºC**

2) O inverno rigoroso na floresta deixou o lobo mau acamado. Enquanto isto, os três porquinhos se empenham em manter a temperatura do ar interior de suas respectivas casas em 25 ºC, contra uma temperatura do ar externo de -10 ºC, 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 W/m^2.K e 40 W/m^2.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 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
Condutividade térmica (SI)	0,07	0,14	0,72





Respostas: b) 702 W; c) 21,96 ºC; d) 59 MJ/dia; e) 2,19 kg/dia

3) Uma empresa vem controlando o seu consumo de energia desde 2001, por conta do racionamento imposto pelo governo à sociedade. Seu principal gasto é com energia, inclusive aquela desperdiçada no forno, cuja parede é constituída de uma camada de 0,20 m de tijolos refratários (k = 1,2 W/m ^{o}C) e outra de 0,10 m de tijolos isolantes (k = 0,8 W/m ^{o}C).

Um grave problema é que, sendo a temperatura interna igual a 1700 ^{o}C, a parede mais externa chega a 100 ^{o}C, prejudicando a saúde do operador. Foi proposto o acréscimo de 2 cm à parede externa, de um determinado material isolante (k = 0,15 W/m ^{o}C) a fim de que a temperatura nessa face caia para 27 ^{o}C. Calcular:

a) a redução percentual de calor com a colocação do isolamento;

b) o tempo de amortização do investimento, sabendo que:

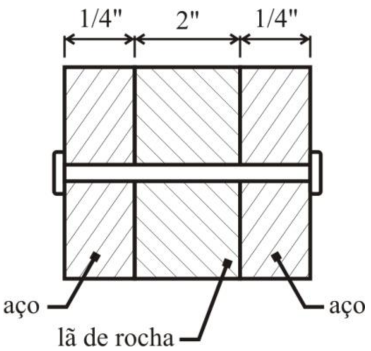
Custo do isolante = 100 U$/m^2

Custo de energia = 2 U$/GJ

Respostas: a) 28,24%; b) 374 dias

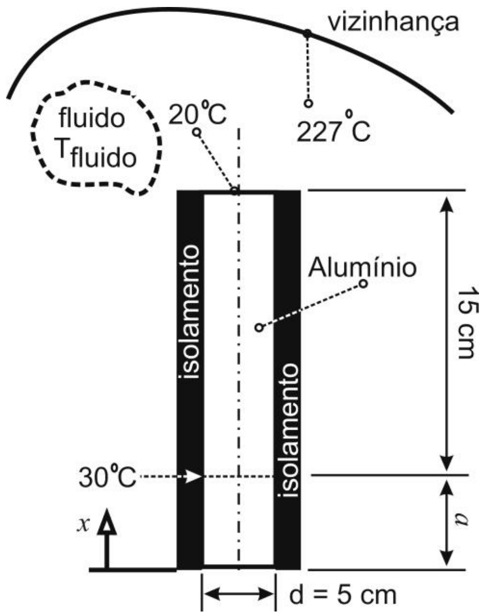
EXERCÍCIOS PROGRAMADOS:

1) Uma parede é construída com uma placa de lã de rocha (k = 0,05 W/mºC) de 2 polegadas de espessura, revestida por duas chapas de aço, com k = 50 W/mºC e ¼ de polegada de espessura cada. Para a fixação são empregados 25 rebites de alumínio (k = 200 W/mºC) por metro quadrado, com diâmetro de ¼ de polegada. Calcular a resistência térmica total de 1 m^2 dessa parede. Dado: 1” = 2,54 cm. **Resposta: 0,2876 ºC/W**

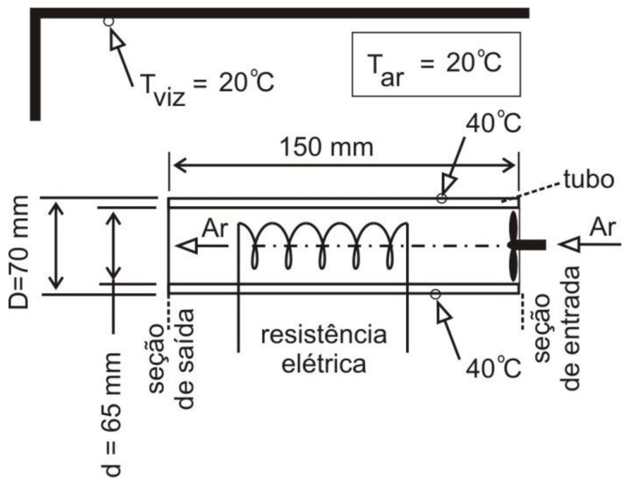


2) **(EA/GA)** A parede de um forno de secagem é construída com a colocação de um material isolante de condutividade térmica 0,05 W/m.K entre folhas finas de metal. O ar no interior do forno está a 300 ºC e o coeficiente de transferência de calor por convecção no interior do forno é de 30 W/m^2.K. A superfície interna da parede absorve uma taxa de transferência de calor por radiação por área de 100 W/m^2 proveniente de objetos quentes no interior do forno. A temperatura no ambiente externo (ar e vizinhanças) do forno é de 25 ºC e o coeficiente combinado (convecção e radiação externas) para a superfície externa é de 10 W/m^2.K. Determine qual deve ser a espessura do material isolante para que a temperatura da parede externa do forno seja de 40 ºC. Despreze a resistência à condução oferecida pelas folhas finas de metal e também as resistências de contato. Obrigatório: faça um esboço do problema e também do circuito térmico equivalente! **Resposta: 8,61 cm**

3) **(EA/GA)** Uma barra cilíndrica de alumínio (condutividade térmica igual a **176 W/m.K**) é completamente isolada em suas laterais. Em uma determinada posição distante ***a*** de sua base tem temperatura de 30 ºC e a sua superfície superior tem temperatura de 20 ºC. Sabendo que em sua porção superior esta troca calor com um fluido desenvolvendo um coeficiente de troca de calor por convecção igual a 1500 W/m^2.K e que também, a mesma superfície superior troca calor com uma vizinhança de grandes dimensões com temperatura igual a 227 ºC, determine qual é a temperatura do fluido. Admita troca de calor unidimensional (direção x) em regime permanente. A emissividade da superfície superior é igual a emissividade de um corpo negro. **Resposta: 10,09ºC**



4) **(EA/GA)** Um secador de cabelos pode ser idealizado como um duto circular através do qual um pequeno ventilador sopra ar ambiente, e dentro do qual o ar é aquecido ao escoar sobre uma resistência elétrica na forma de um fio helicoidal. O aquecedor foi projetado para operar sob tensão de 100 V e corrente elétrica de 5,1 A, para aquecer o ar que está na entrada do duto a 20 ºC até 45 ºC (na saída do mesmo), sabendo que o diâmetro externo do duto tem 70 mm e a temperatura externa do duto é de 40 ºC (uniforme) determine, quando se estabelece condições de regime permanente, **a vazão em massa de ar (em gramas por segundo) que passa pelo ventilador**. São dados: Comprimento do duto do secador de 150 mm, emissividade da superfície do duto do secador igual a 0,8, coeficiente de troca de calor por convecção natural do lado externo do duto igual a 4 W/m^2.K, temperatura do ar da sala e das vizinhanças igual a 20 ºC. Admita que a sala tenha grandes dimensões e, por esse motivo, a temperatura média do ar da sala não se altera com o tempo. O calor específico do ar é de 1,007 kJ/kg.K e a densidade média do ar vale 1,1 kg/m^3. O duto é confeccionado em material com densidade de 2702 kg/m^3, condutividade térmica de 237 W/m.K e calor específico de 903 J/kg.K. **Resposta: 20 g/s**

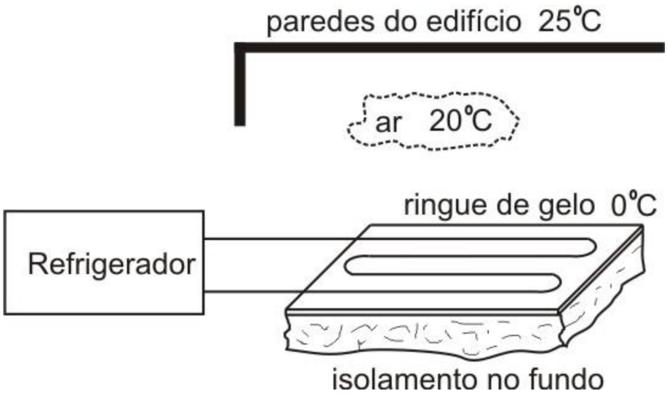


7ª aula: "PROVA P1"

PROVA NA AULA DE TEORIA

EXERCÍCIOS PROGRAMADOS:

1) **(EA/GA)** Um ringue de patinação está localizado em um edifício onde o ar está a temperatura de T_{ar} = 20 ºC e as paredes estão a $T_{paredes}$ = 25 ºC. O coeficiente de transferência de calor por convecção entre o gelo e o ar circundante é de 10 W/m^2.K. A emissividade do gelo é de 0,95. O calor latente de fusão do gelo é 333,7 kJ/kg e sua densidade é 920 kg/m^3. (a) Calcular a carga do sistema de refrigeração necessária para manter o gelo a temperatura superficial T_S = 0 ºC em um ringue de patinação de 12 m por 40 m. (b) Quanto tempo levaria para derreter 3 mm de gelo da superfície do ringue, caso não seja fornecido resfriamento para a superfície (admita que não se altere a condição de transferência de calor durante o derretimento). Considere a base e as laterais do ringue de patinação perfeitamente isoladas.
Obs. A carga térmica solicitada é a própria taxa de transferência de calor.

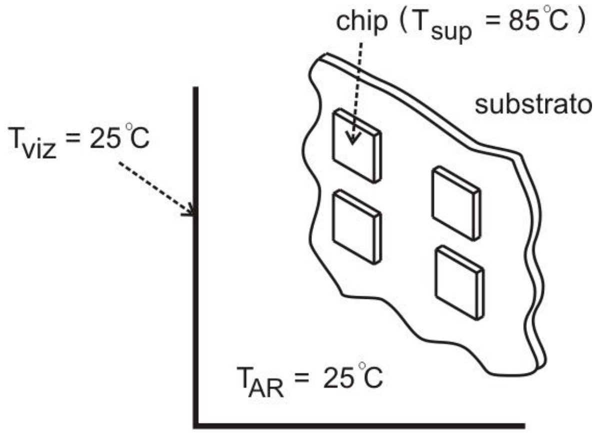


Respostas: a) 156283,43 W; b) 2828,74 segundos.

2) **(EA/GA)** Chips quadrados de Lado L = 15 mm e espessura 2 mm são montados em um substrato isolante que se localiza em uma câmara cujas paredes e o ar interior são mantidos à temperatura de T_{viz} = T_{AR} = 25 ºC. Os chips têm uma emissividade de 0,6 e temperatura superficial máxima de trabalho permitida de 85 ºC. Se calor é descartado pelo chip por radiação e convecção natural, determine:
a) a taxa de transferência de calor total trocada por cada chip.
b) a taxa de geração de energia operacional máxima por volume unitário em cada chip.
O coeficiente de troca de calor por convecção natural pode ser determinado pela seguinte expressão empírica:

$h = C \cdot (T_{SUPERFICIE} - T_{AR})^{1/4}$, onde $C = 4{,}2\ W/\left(m^2 K^{5/4}\right)$

Admita: I) Regime permanente e II) Perdas de calor pela lateral e fundo dos chips desprezíveis. **Respostas: a) 0,223 W; b) 4,959.10^{-4} W/mm^3**



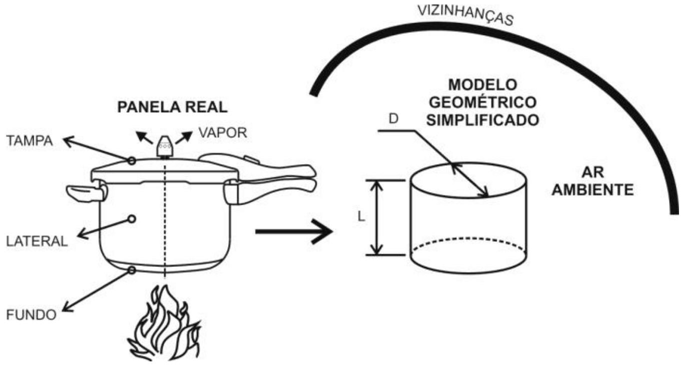
3) **(EA/GA)** O telhado de uma casa consiste em uma laje plana de concreto de 15 cm de espessura (de material com condutividade térmica de 2 W/m.K) com 15 metros de largura e 20 m de comprimento. A emissividade da superfície externa do telhado é 0,9. A superfície interna do telhado é mantida a 15 ºC enquanto a superfície externa do mesmo mantém-se a 8,64 ºC. Em uma noite clara de inverno, o ar ambiente (externo) está a 10 ºC, enquanto a temperatura noturna do céu para a troca de calor por radiação é de 255K. Determinar o coeficiente de transferência por convecção (médio) externo. **Resposta: 15,1 W/m^2.K**

4) **(EA/GA)** Uma panela de pressão está sendo testada em laboratório e deseja-se obter a vazão em massa de vapor de água que sai da válvula durante a operação. No teste a taxa de transferência de calor pelo fundo da panela é igual a 350 W (panela recebendo energia). Usando um modelo geométrico simplificado (no qual a panela é aproximada por um cilindro de diâmetro igual 20 cm a e altura igual a 12 cm) determine a vazão em massa de vapor lançada no ambiente quando a panela opera a pressão interna absoluta (e constante) de 198530 Paabs. Em seus cálculos admita que o ar ambiente e as vizinhanças estejam em temperatura de 28ºC. Admita que o coeficiente de transferência de calor por convecção interno à panela seja extremamente elevado, que a resistência à condução na parede da panela seja desprezível, o coeficiente de transferência de calor externo (com o ar) tenha valor de 20 W/m^2.K e a superfície externa da panela tenha emissividade de 0,8. O teste é conduzido em condição em que sempre há água líquida e vapor no interior da panela. Admita como uma simplificação grosseira a hipótese de regime permanente, ou seja, que a mesma quantidade de vapor retirada pela válvula é acrescentada de água líquida na temperatura de 120ºC (por uma tubulação ligada à panela e não indicada no desenho). Assuma que o fundo da panela só troque calor com os gases quentes da combustão. De uma tabela de saturação para a água sabe-se:

T (ºC)	P (MPaabs)	v_l (m^3/kg)	v_V (m^3/kg)	h_l (kJ/kg)	h_v (kJ/kg)	s_l (kJ/kg.K)	s_v (kJ/kg.K)
120	0,19853	0,001060	0,8919	503,69	2706,3	5,6020	7,1295

Resposta:

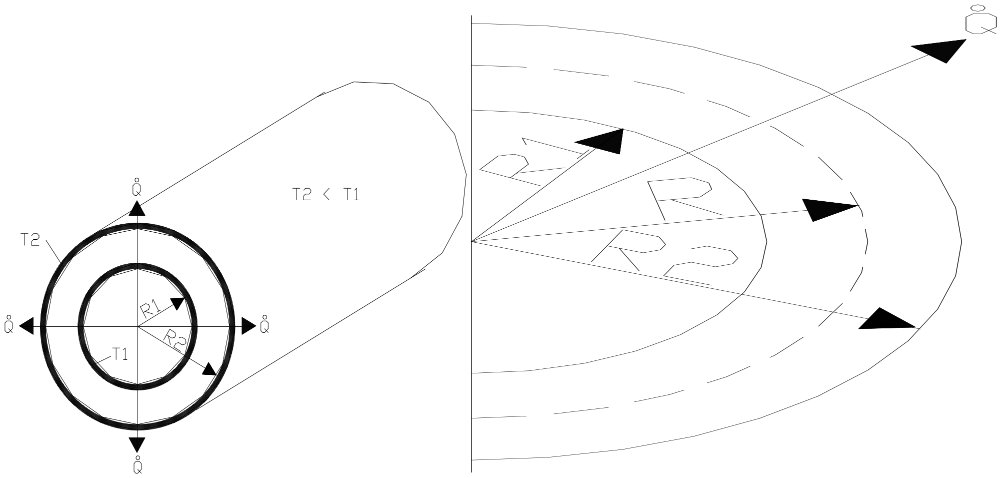
$$\dot{m}_{vapor} = 0,03525\, g/s$$



8ª aula: "TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM CILINDROS E ESFERAS"

(ÇENGEL, 2009) - **CAPÍTULO III**

1. UMA PAREDE CILÍNDRICA - CONDUÇÃO



$$\dot{Q} = -k.A.\frac{dT}{dR} \qquad onde: \quad A = 2.\pi.R.L$$

$$\log o \Rightarrow \dot{Q} = -k.2.\pi.R.L.\frac{dT}{dR} \Rightarrow \frac{\dot{Q}}{2.\pi.L}\frac{dR}{R} = -k.dT \Rightarrow \frac{\dot{Q}}{2.\pi.L}\int_{R_1}^{R_2}\frac{dR}{R} = -k\int_{T_1}^{T_2} dT$$

$$\frac{\dot{Q}}{2.\pi.L}(\ln R_2 - \ln R_1) = -k(T_2 - T_1) \Rightarrow \frac{\dot{Q}}{2.\pi.L}\ln\frac{R_2}{R_1} = k(T_1 - T_2)$$

$$\boxed{\dot{Q} = \frac{2.\pi.k.L(T_1 - T_2)}{\ln\dfrac{R_2}{R_1}}}$$

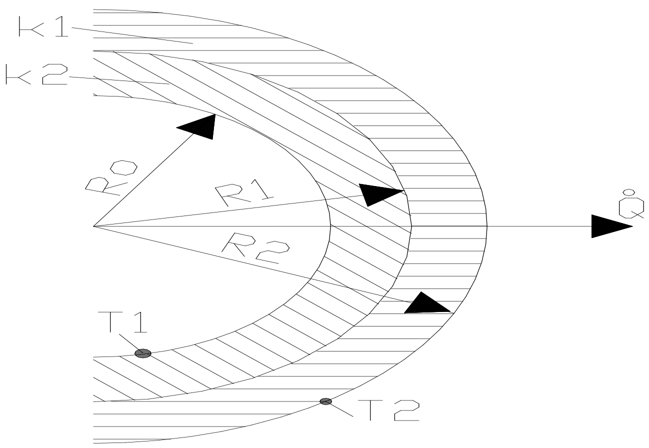
“Resistência térmica de uma parede cilíndrica”

$$\dot{Q} = \frac{2.\pi.k.L(T_1 - T_2)}{\ln\frac{R_2}{R_1}} \Rightarrow \underbrace{T_1 - T_2}_{U} = \underbrace{\frac{\ln\frac{R_2}{R_1}}{2.\pi.k.L}}_{R} \underbrace{\dot{Q}}_{I}$$

$$R_t = \frac{\ln\frac{R_2}{R_1}}{2.\pi.k.L}$$

$$\boxed{\therefore \quad \dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R_{eq}}}$$

2. PAREDES CILÍNDRICAS EM SÉRIE - CONDUÇÃO

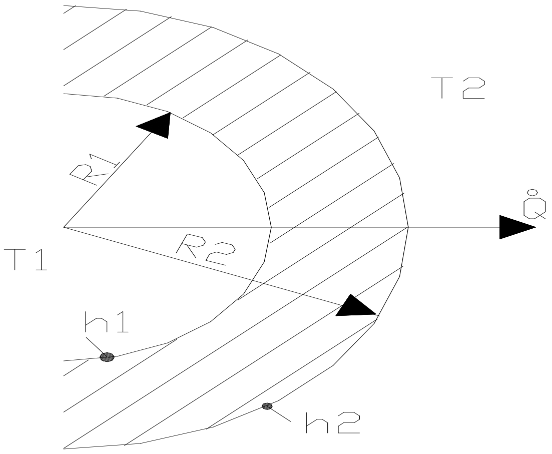


$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R_{teq}} \quad onde: \quad R_{teq} = R_{t1} + R_{t2} = \frac{\ln\frac{R_1}{R_0}}{2.\pi.k_1.L} + \frac{\ln\frac{R_2}{R_1}}{2.\pi.k_2.L}$$

Genericamente:
$$\boxed{R_{teq} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \ln\frac{R\rangle}{R\langle}}{2.\pi.k_i.L}}$$

onde n = nº de paredes cilíndricas (em série)

3. UMA PAREDE CILÍNDRICA - CONVECÇÃO



Comprimento da parede: L

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{teq}} \qquad onde: R_{teq} = R_{tf1} + R_{tp} + R_{tf2}$$

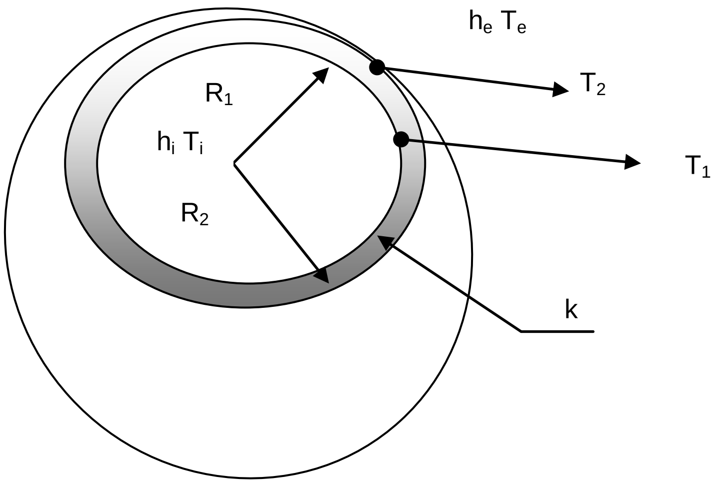
$$R_{teq} = \frac{1}{h_1.2\pi.R_1.L} + \frac{\ln\frac{R_2}{R_1}}{2\pi.k.L} + \frac{1}{h_2.2\pi.R_2.L} \quad \Rightarrow$$

$$\boxed{\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{h_1.2.\pi.R_1.L} + \frac{\ln\frac{R_2}{R_1}}{2.\pi.k.L} + \frac{1}{h_2.2.\pi.R_2.L}}}$$

4. VÁRIAS PAREDES CILÍNDRICAS - CONVECÇÃO

$$\boxed{\dot{Q} = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{1}{h_1.2.\pi.R_1.L} + \frac{1}{2.\pi.L}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{k_i}\ln\frac{R\rangle}{R\langle} + \frac{1}{h_2.2.\pi.R_{n+1}.L}}}$$

5. PAREDES ESFÉRICAS – CONDUÇÃO E CONVECÇÃO



CONDUÇÃO

$$\dot{Q} = -k\,A\frac{dT}{dR}$$

$$\dot{Q} = -k(4.\pi.R^2)\frac{dT}{dR}$$

$$\dot{Q}\int_{R_1}^{R_2}\frac{dR}{R^2} = -k.4.\pi\int_{T_1}^{T_2} dT$$

$$\dot{Q}\int_{R_1}^{R_2} R^{-2}\,dR = -k.4.\pi\,(T_2 - T_1)$$

$$\dot{Q}\left[-R^{-1}\right]_{R_1}^{R_2} = k.4.\pi\,(T_1 - T_2)$$

$$\dot{Q}\left[-\frac{1}{R_2} - \left(-\frac{1}{R_1}\right)\right] = 4.k.\pi\,(T_1 - T_2)$$

$$\dot{Q} = \frac{4.k.\pi\,(T_1 - T_2)}{\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)}$$

$$\boxed{\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{4.k.\pi}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)}}$$

CONVECÇÃO

$$R_h = \frac{1}{h.A}$$

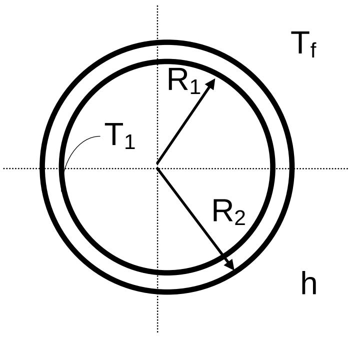
$$\boxed{R_h = \frac{1}{h.4.\pi.R^2}}$$

“RAIO CRÍTICO”

(ÇENGEL, 2009)

O aumento da espessura de uma parede plana sempre reduz o fluxo de transferência de calor através da parede. Como é natural, uma redução no fluxo de transferência de calor realiza-se, com maior facilidade, mediante o uso de um material isolante de baixa condutividade térmica. Por outro lado, um aumento na espessura da parede, ou a adição de material isolante, nem sempre provoca uma diminuição no fluxo de transferência de calor, quando a geometria do sistema tem uma área de seção reta não constante.

Exemplo: Cilindro oco



$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_f}{\dfrac{\ln R_2/R_1}{2\,\pi\,k\,L} + \dfrac{1}{h\,2\,\pi\,R_2\,L}}$$

Se mantivermos T_1 , T_f e h constantes o que acontecerá se aumentarmos o raio externo R_2?

Um aumento de R_2 provoca $\uparrow R_k$ e $\downarrow R_h$; portanto a adição de material pode $\downarrow$ ou $\uparrow$ o fluxo de calor, dependendo da variação da $R_{total} = R_k + R_h$

$R_c = \dfrac{k}{h}$	Raio Crítico: raio externo do tubo isolado que corresponde a mínima resistência térmica total.
Se $R_2 > R_c$	A adição de material (isolante) <u>diminuirá</u> o fluxo de transferência de calor.
Se $R_2 < R_c$	A adição de material (isolante) <u>aumentará</u> o fluxo de transferência de calor, até que $R_2 = R_c$ depois do que, o aumento de R_2 provocará $\downarrow \dot{Q}$.

Esse princípio é largamente utilizado na engenharia elétrica, onde material isolante é fornecido para fios e cabos condutores de corrente, não para reduzir a perda de calor, mas para aumentá-la. Isso é importante, também, na refrigeração, onde o fluxo de calor para o refrigerante frio deve ser conservado num mínimo. Em muitas dessas instalações, onde tubos de pequeno diâmetro são usados, um isolamento na superfície externa aumentaria o calor transmitido por unidade de tempo.

Para esferas: $R_c = \dfrac{2\,k}{h}$

Exercícios aula de teoria:

1) Um submarino deve ser projetado para proporcionar uma temperatura agradável à tripulação, não inferior a 20°C. O submarino pode ser idealizado como um cilindro de 10m de diâmetro e 70m de comprimento.

A construção das paredes do submarino é do tipo sanduíche com uma camada externa de 19 mm de aço inoxidável (k = 14 kcal/hm °C), uma camada de 25 mm de fibra de vidro (k = 0,034 kcal/hm °C) e outra camada de 6 mm de alumínio no interior (k = 175 kcal/hm °C). O h_i = 12 kcal/hm^2 °C, enquanto o h_e = 70 kcal/hm^2 °C (parado) e h_e = 600 kcal/hm^2 °C) (em velocidade máxima).

Determinar a potência requerida em kW, da unidade de aquecimento, sabendo que a temperatura do mar varia entre 7 °C e 12 °C. Faça o desenho. **Resposta: 40 kW**

2) Uma tubulação de 20 cm de diâmetro interno, espessura de 1,8 cm e (k = 50 W/ m °C) que atravessa o galpão de uma fábrica de 300 m, transporta água quente a 200 °C (h = 10 W/ m^2 °C). Devido ao mau isolamento térmico, que consiste numa camada de 15 cm (k = 0,15 W/ m °C), durante os meses de junho e julho, quando a temperatura ambiente cai a 12 °C e o coeficiente de transferência de calor é igual a 8 W/m^2 ºC (período em que o problema se agrava por conta do inverno), há a necessidade de reaquecer a água quando chega ao seu destino, a partir de uma energia que custa R$ 0,10/kW h. Pede-se:
a) Calcular a taxa de calor;
b) Se a camada de isolamento for aumentada para 25 cm, qual é o custo adicional justificável para comprar o isolamento?
Respostas: a) 51.048 W; b) (39.682 W) 1.637 R$/ano

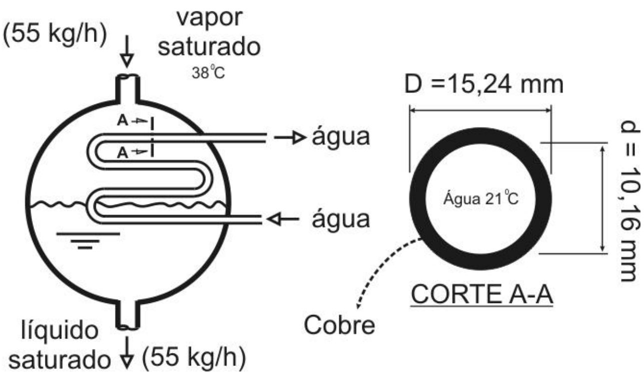
EXERCÍCIOS PROGRAMADOS:

1) **(EA/GA)** Um tubo de aço inoxidável utilizado para transportar produtos farmacêuticos resfriados tem diâmetro interno de 36 mm e espessura da parede de 2 mm. As temperaturas dos produtos farmacêuticos e do ar são de 6 ºC e 23 ºC, respectivamente, enquanto os coeficientes de convecção correspondentes às superfícies interna e externa são 400 W/m^2.K e 6 W/m^2.K, respectivamente. A condutividade térmica do aço inoxidável pode ser considerada como 15 W/m.K.
a) Faça um desenho esquemático e construa o circuito térmico equivalente.
b) Determine qual é a taxa de transferência de calor por unidade de comprimento do duto.
Resposta: b) 12,6 W/m

2) **(EA/GA)** Um engenheiro decidiu isolar um tubo de aço que transporta vapor de água a 250 ºC, com o intuito de diminuir a perda de calor para o ambiente (20 ºC). O tubo tem diâmetro externo de 25 mm e a temperatura externa é de 243 ºC. A espessura da manta de isolante (de condutividade térmica 0,15 W/m.K) disponível é de 2,5 mm, sabendo que o coeficiente de transferência de calor por convecção é de 10 W/m^2·K (externo) você apoia a decisão do engenheiro? Justifique com cálculos. O comprimento da tubulação é de 43,56 metros.
Resposta: Como o raio externo do isolamento coincide com o raio crítico de isolamento, a taxa de transferência de calor será máxima, contrariando as necessidades apresentadas. A decisão do engenheiro é equivocada.

3) **(EA/GA)** Vapor na saída de uma turbina (com vazão em massa constante de 55 kg/h) em uma instalação termoelétrica está a 38 ºC e é condensado em um grande condensador por uma corrente de água (líquida) passando internamente por um tubo de

cobre. O tubo é feito de cobre e têm diâmetro interno de 10,16 mm e diâmetro externo de 15,24 mm. A temperatura média da água no interior dos tubos é de 21 ºC. São dados:
Coeficiente de troca de calor por convecção do lado do vapor: h_{vapor} = 9000 W / m^2.K
Coeficiente de troca de calor por convecção do lado da água: $h_{água}$ = 210 W / m^2.K
Entalpia de vaporização na pressão de alimentação do vapor: 2430 kJ/kg
Condutividade térmica do cobre: 386 W/m.K
Determine o comprimento do tubo de cobre. **Resposta: 331,23 m**



4) **(EA/GA)** Um recipiente de ferro (condutividade de 80,2 W/m.K) de formato esférico e oco, com 20 cm de diâmetro externo e 0,4 cm de espessura, é preenchido com água e gelo a 0 ºC. Se a temperatura da superfície externa do recipiente é de 5 ºC, determinar a taxa que o gelo (em g/s) derrete no recipiente. Despreze a resistência à convecção interna. O calor de fusão da água é de 333,7 kJ/kg. **Resposta: 36,24 g/s**

5) O tanque da carreta mostrada na figura abaixo possui uma seção cilíndrica, com comprimento e diâmetro interno de *L* = 8m e D_i = 2m, respectivamente, e duas seções esféricas nas extremidades. O tanque é usado para transportar oxigênio líquido e mantém a sua superfície interna a uma temperatura de – 180 ºC. **Procura-se um isolamento térmico**, cuja espessura não deve ultrapassar 15 cm, que reduza a taxa de transferência de calor a não mais que 900 kcal/h. Observe que o tanque encontra-se exposto ao ar ambiente a uma temperatura que varia entre 12 ºC (no inverno) e 40 ºC (no verão).
Resposta: 0,008976 kcal/h.m.ºC

Fonte: http://www.airliquide.com.br/secao_entr_gas.html 15/03/2005.

9ª aula: "TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM SUPERFÍCIES ALETADAS"

(ÇENGEL, 2009) – **CAPÍTULO III**

1. INTRODUÇÃO

São frequentes as situações em que se procuram meios para aumentar a quantidade de calor transferido, por convecção, de uma superfície.

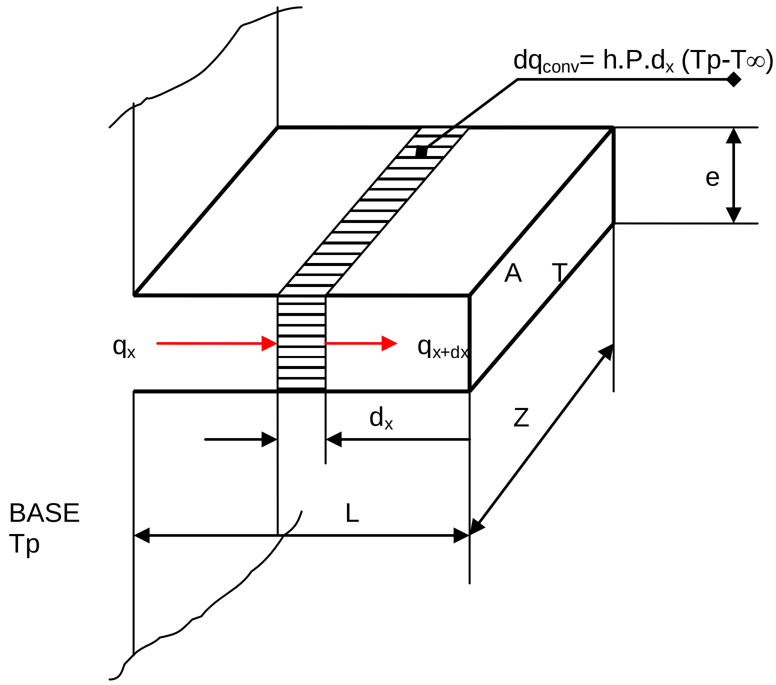
A lei de Newton: $\dot{Q} = h\,A\,(T_1 - T_2)$ sugere que se pode aumentar $\dot{Q}$ mediante o aumento de h, $(T_1 - T_2)$ ou de A. Conforme já verificamos, h é função da geometria, das propriedades do fluido e do escoamento. A modulação de h mediante o controle destes fatores oferece um procedimento pelo qual $\dot{Q}$ pode ser aumentado ou diminuído. No que se refere ao efeito de $(T_1 - T_2)$ sobre $\dot{Q}$ encontram-se frequentemente dificuldades, por exemplo, nos sistemas de refrigeração de motores de automóveis, em dias muito quentes, pois T_2 será muito elevada. Em relação à área da superfície que se expõe ao fluido, esta pode ser, muitas vezes, "estendida", mediante o uso de aletas.

Constituem aplicações familiares destes dispositivos de transferência de calor com superfícies aletadas os radiadores de automóveis, as montagens de transistores de potência e dos transformadores elétricos de alta tensão.

Tendo como referência a extensão de uma parede plana o calor passa da parede para a aleta mediante condução e sai da superfície da aleta por efeito convectivo. Portanto, a diminuição da resistência superficial convectiva R_h provocada por um aumento na área superficial é acompanhada por um aumento da resistência condutiva R_k. Para que se eleve o fluxo de transferência de calor da parede, mediante a extensão da superfície, a diminuição de R_h deve ser maior que o aumento em R_k. Na verdade, a resistência superficial deve ser o fator controlador nas aplicações práticas de aletas ($R_k < R_h$ ou, preferivelmente, $R_k <<<< R_h$)

2. CÁLCULO DO FLUXO DE CALOR EM ALETAS DE SEÇÃO UNIFORME

A aleta desenhada a seguir está fixada em uma superfície com temperatura T_p e em contato com um fluido com temperatura T_∞.



Fazendo um balanço de energia em um elemento diferencial da aleta. Sob as condições de regime permanente a partir das quantidades de energia:

Energia entrando pela face esquerda $= q_x = -kA\dfrac{dT}{dx}$

Energia saindo pela face direita $= q_{x+dx} = -kA\left.\dfrac{dT}{dx}\right]_{x+dx}$

Energia perdida por convecção $= q_{conv} = h.(P.dx)(T - T_\infty)$

Obtém-se a equação:

$$\dot{q}_x = \dot{q}_{x+dx} + \dot{q}_{conv}$$

$$-k.A_t.\frac{dT}{dx} = \left[-k.A_t.\frac{dT}{dx} + \frac{d}{dx}\left(-k.A_t.\frac{dT}{dx}\right)dx\right] + h.(P.dx)(T - T_\infty)$$

onde P é o perímetro da aleta, A_t área da seção transversal da aleta e (P.dx) a área entre as seções x e (x+dx) em contato com o fluido. Considerando h e k constantes a equação pode ser simplificada:

$$-h.P.dx.(T - T_\infty) = \frac{d}{dx}\left(-k.A_t.\frac{dT}{dx}\right)dx$$

$$h.P.(T - T_\infty) = k.A_t.\frac{d^2T}{dx^2}$$

$$\boxed{\frac{d^2T}{dx^2} = m^2.(T - T_\infty)}$$

onde ; $m = \sqrt{\dfrac{h.P}{k.A_t}}$, é o coeficiente da aleta (m^{-1})

A equação diferencial linear de segunda ordem, acima, tem solução geral:

$$T - T_\infty = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx}$$

onde C_1 e C_2 são constantes e determinadas por meio das seguintes condições de contorno na base e na ponta da aleta:

1º) que a temperatura da base da barra seja igual à temperatura da parede na qual ela está afixada, ou seja:

• $em\ x = 0 \rightarrow T = T_p$

2º) depende das hipóteses adotadas:

Caso (a) → Barra infinitamente longa ($T_{ponta\ aleta} = T_\infty$)

Sua temperatura na extremidade se aproxima da temperatura do fluido: T = T∞

$$T - T_\infty = 0 = C_1 e^{m.\infty} + C_2 e^{-m.\infty}$$

Se o segundo termo da equação é zero, a condição de contorno é satisfeita apenas se C_1=0. Substituindo C_1 por 0:

$$C_2 = T_s - T_\infty$$

A distribuição de temperatura fica:

$$T - T_\infty = (T_p - T_\infty).e^{-m.\infty} \qquad \text{(I)}$$

Como o calor transferido por condução através da base da aleta deve ser transferido por convecção da superfície para o fluido, tem-se:

$$\dot{q}_{aleta} = -k.A.\left.\frac{dT}{dx}\right|_{x=0} \qquad \text{(II)}$$

Diferenciando a equação (I) e substituindo o resultado para x=0 na equação (II):

$$\dot{q}_{aleta} = -k.A.\left[-m.(T_p - T_\infty).e^{(-m).0}\right]_{x=0} = -k.A.\left[-\sqrt{\frac{h.P}{k.A}}.(T_p - T_\infty)\right]$$

$$\boxed{\dot{q}_{aleta} = \sqrt{h.P.k.A}.(T_p - T_\infty)}$$

A equação calcula o calor transferido aproximado, na unidade de tempo, em uma aleta finita, se seu comprimento for muito grande em comparação com a área de sua seção transversal.

Caso (b) → Barra de comprimento finito, com perda de calor pela extremidade desprezível (ponta da aleta adiabática $Q_{ponta\ aleta} = 0$)

A segunda condição de contorno exigirá que o gradiente de temperatura em x = L seja zero, ou seja, $dT/dx = 0$ em x=L. Com as seguintes condições:

$$C_1 = \frac{T_p - T_\infty}{1 + e^{2.m.L}} \quad \text{e} \quad C_2 = \frac{T_p - T_\infty}{1 + e^{-2.m.L}}$$

Substituindo as equações anteriores em: $T - T_\infty = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx}$

$$T - T_\infty = \left(T_p - T_\infty\right)\left(\frac{e^{m.x}}{1+e^{2.m.L}} + \frac{e^{-m.x}}{1+e^{-2.m.L}}\right)$$

Considerando que o cosseno hiperbólico é definido como: $\cosh x = \left(e^x + e^{-x}\right)/2$, a equação anterior pode ser escrita na forma adimensional simplificada:

$$\frac{T - T_\infty}{T_p - T_\infty} = \frac{\cosh m(L-x)}{\cosh(m.L)}$$

A transferência de calor pode ser obtida por meio da equação (II), substituindo o gradiente de temperatura na base:

$$\left.\frac{dT}{dx}\right|_{x=0} = \left(T_p - T_\infty\right).m.\left(\frac{1}{1+e^{2.m.L}} + \frac{1}{1+e^{-2.m..L}}\right) = \left(T_p - T_\infty\right).m.\left(\frac{e^{m.L} - e^{-m.L}}{e^{m.L} + e^{-m.L}}\right)$$

$$\left.\frac{dT}{dx}\right|_{x=0} = \left(T_P - T_\infty\right).m.\, tgh\,(m.L)$$

O calor transferido, na unidade de tempo é:

$$\boxed{q_{aleta} = \sqrt{h.P.k.A}.\left(T_P - T_\infty\right).\, tgh\,(m.L)}$$

A diferença da equação anterior (aletas muito compridas) para aletas com perda de calor desprezível na ponta diferem pelo fator $tgh\,(m.L)$, que se aproxima de 1 quando L se torna muito grande.

Caso (c) $\rightarrow$ Barra de comprimento finito, com perda de calor por convecção pela extremidade

Neste caso, o princípio é o mesmo e o fluxo de calor transferido é:

$$\boxed{q_{aleta} = \sqrt{h.P.k.A}.\left(T_p - T_\infty\right).\left(\frac{senh(m.L) + (h/m.k).\cosh(m.L)}{\cosh(m.L) + (h/m.k).senh(m.L)}\right)}$$

Geralmente, a $A_{ponta\ aleta}$ <<<< A_{aleta} e para contabilizar a perda de calor na extremidade é só corrigir o comprimento da aleta (L):

$$L_c = L + \frac{A_{ponta}}{P} \qquad L_c P = LP + \frac{A_{ponta}}{P} P$$

$$A_{corr} = A_{aleta} + A_{ponta} \qquad L_{c\ aleta\ retangular} = L + \frac{t}{2} \quad e \quad L_{c\ aleta\ cilíndrica} = L + \frac{D}{4}$$

Caso (d) → Temperatura fixa na extremidade da aleta

Neste caso, o calor transferido é calculado por:

$$\boxed{q_{aleta} = \frac{\cosh ML - \left[(T_L - T_\infty)/(T_p - T_\infty)\right]}{senh\ ML}}$$

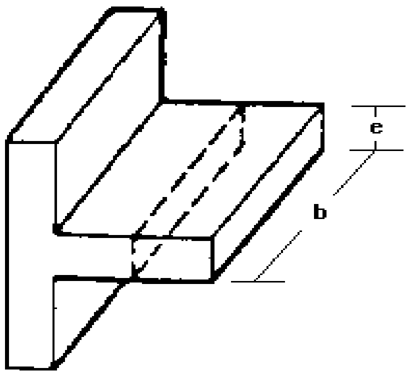
Sendo:

- $M = \sqrt{h.P.k.A}\ .(T_p - T_\infty)$
- $T_L =$ Temperatura na ponta da aleta.

3. TIPOS DE ALETAS

Diversas aplicações industriais apresentam vários tipos de aletas e alguns dos mais encontrados industrialmente, são mostrados a seguir:

1) Aletas de Seção Retangular



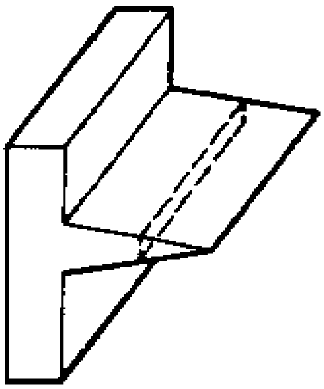
Aleta de seção retangular assentada longitudinalmente em uma superfície plana. Considerando que a aleta tem espessura **e** e largura **b (= Z)** (espessura pequena em relação à largura), o coeficiente da aleta **m** pode ser calculado assim:

$$P = 2.Z + 2.e$$

$$A_t = Z.e$$

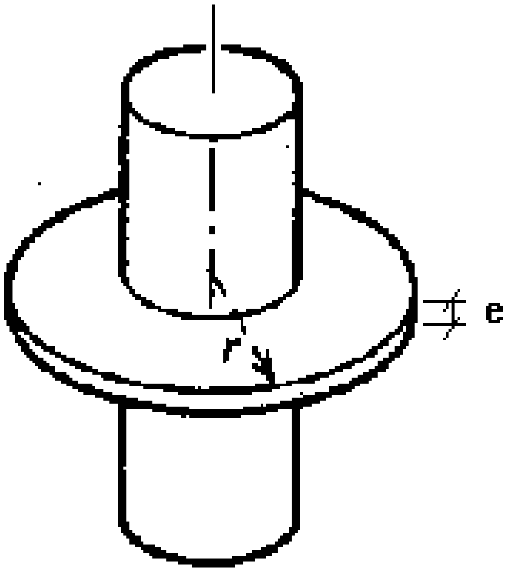
$$m = \sqrt{\frac{h.P}{k.A_t}}$$

2) Aletas de Seção Não-Retangular



As aletas de seção triangular, como as aletas de seção parabólica, trapezoidal etc, também são comuns. O cálculo do coeficiente **m** pode ser feito de modo similar ao caso anterior, considerando uma área transversal média.

3) Aletas Curvas



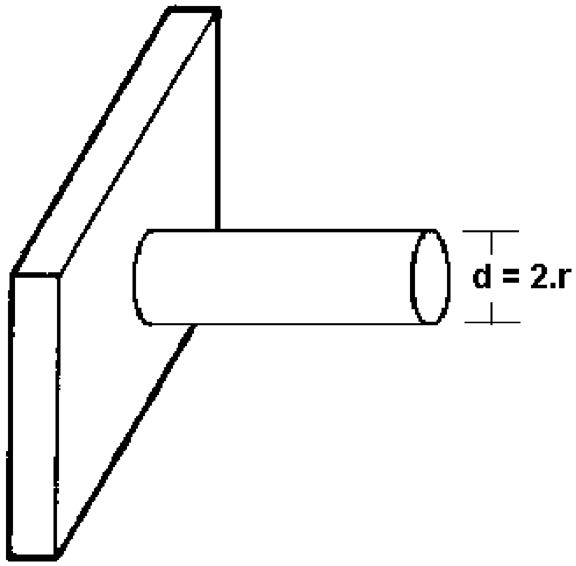
As aletas colocadas sobre superfícies curvas podem ter colocação radial (transversal) como na figura ou axial (longitudinal), assentando aletas do tipo retangular. O assentamento radial ou axial de aletas sobre superfícies cilíndricas depende da direção do escoamento do fluido externo, onde as aletas devem prejudicar o mínimo possível o coeficiente de película, ou seja, não podem provocar estagnação do fluido. O cálculo do coeficiente **m** é feito da seguinte forma:

$$P = 2.(2.\pi.r) + 2.e \cong 4.\pi.r$$

$$A_t = 2.\pi.r.e$$

$$m = \sqrt{\frac{h.P}{k.A_t}}$$

4) Aletas Pino



Em certas aplicações aletas tipo pino são necessárias para não prejudicar demasiadamente o coeficiente de película. A figura mostra uma aleta pino de seção circular. Neste caso o cálculo do coeficiente **m** é feito assim:

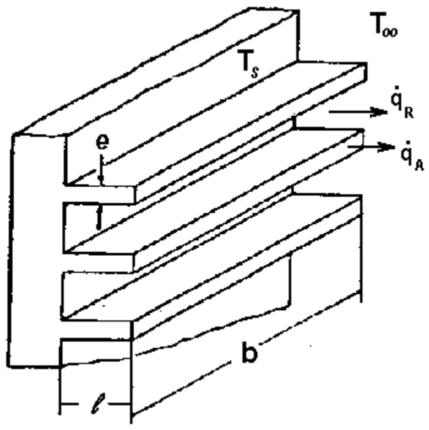
$$P = 2.\pi.r$$

$$A_t = \pi.r^2$$

$$m = \sqrt{\frac{h.P}{k.A_t}}$$

4. EFICIÊNCIA DE UMA ALETA

Em uma superfície sobre a qual estão fixadas aletas de seção transversal uniforme, como mostra a figura a seguir, as aletas têm espessura **e**, altura **l (= L)** e largura **b (=Z)**. A superfície base está na temperatura T_S ($=T_p$) maior que a temperatura ambiente T_∞.



O fluxo de calor total transferido através da superfície com as aletas é igual ao fluxo transferido pela área exposta das aletas (A_{AL}) mais o fluxo transferido pela área exposta da superfície base (A_P):

$$\dot{q} = q_P + q_{AL} \text{ , onde} \begin{cases} \dot{q}_P = h.A_P.(T_P - T_\infty) \\ \dot{q}_{AL} = h.A_{AL}.(T_? - T_\infty) \end{cases}$$

A diferença de temperatura para a área das aletas ($T_?$ -T_∞) é desconhecida. A temperatura T_P é da base da aleta, pois à medida que a aleta perde calor, a sua temperatura diminui, ou seja, A_{AL} não trabalha com o mesmo potencial térmico em relação ao fluido.

Por este motivo $\dot{q}_{AL}$, calculado com o potencial (T_P - T_∞), deve ser corrigido, multiplicando este valor pela eficiência da aleta (η). A eficiência da aleta pode ser definida como:

$$\eta = \frac{\text{calor realmente trocado pela aleta}}{\text{calor que seria trocado se } A_{AL} \text{ estivesse na temperatura } T_P}$$

Portanto,

$$\eta = \frac{\dot{q}_{AL}}{h.A_{AL}.(T_P - T_\infty)}$$

Sendo assim, o fluxo de calor trocado pela área das aletas é:

$$\dot{q}_{AL} = h.A_{AL}.(T_P - T_\infty).\eta$$

O fluxo de calor em uma aleta cuja troca de calor pela extremidade é desprezível é obtido por meio da equação:

$$\dot{q}_{AL} = \sqrt{h.P.k.A_t}.(T_P - T_\infty).tgh(m.L)$$

Desprezar a transferência de calor pela extremidade da aleta é uma simplificação para as aletas de uso industrial. Entretanto, como as aletas têm espessura pequena, a área de troca de calor na extremidade é pequena; além disto, a diferença de temperatura entre a aleta e o fluido é menor na extremidade. Portanto, na maioria dos casos, devido à pequena área de troca de calor e ao menor potencial térmico, a transferência de calor pela extremidade da aleta pode ser desprezada.

Igualando as duas equações para o fluxo de calor, tem-se:

$$h.A_{AL}.(T_P - T_\infty).\eta = \sqrt{h.P.k.A_t}.(T_P - T_\infty).tgh(m.L)$$

Isolando a eficiência da aleta, obtém-se:

$$\eta = \frac{\sqrt{h.Pk.A_t}}{h.A_{AL}}.tgh(m.L)$$

A área de troca de calor da aleta pode ser aproximada para:

$$A_{AL} = P.L$$

Substituindo, obtém-se:

$$\eta = \frac{h^{1/2}.P^{1/2}.\sqrt{k.A_t}}{h.(P.L)}.tgh(m.L) = \frac{\sqrt{k.A_t}}{\sqrt{h.P.L}}.tgh(m.L) = \frac{tgh(m.L)}{\frac{\sqrt{h.P}}{\sqrt{k.A_t}}.L}$$

O coeficiente da aleta (**m**) pode ser introduzido na equação acima para dar a expressão final da eficiência da aleta:

$$\boxed{\eta = \frac{tgh(m.L)}{m.L}}$$

onde, $m = \sqrt{\frac{h.P}{k.A_t}}$ (coeficiente da aleta)

e $$tgh(m.L) = \frac{e^{m.L} - e^{-m.L}}{e^{m.L} + e^{-m.L}}$$

A equação anterior mostra que a eficiência da aleta é função do produto "**m**.**L**". De acordo com as funções hiperbólicas, à medida que o produto "**m**.**L**" aumenta a eficiência da aleta diminui, pois o numerador aumenta em menor proporção. Portanto, quanto maior o coeficiente da aleta e/ou quanto maior a altura, menor é a eficiência. Em compensação, quanto maior a altura, maior é a área de transferência de calor da aleta (A_{AL}).

O fluxo de calor trocado em uma superfície aletada por ser calculado:

$$\dot{q} = \dot{q}_p + \dot{q}_{AL}$$

$$\dot{q} = h.A_p.(T_p - T_\infty) + h.A_{AL}.(T_p - T_\infty).\eta$$

Colocando o ΔT e o coeficiente de película em evidência, obtem-se:

$$\boxed{\dot{q} = h.\left(A_p + \eta\,.\,A_{AL}\right).(T_p - T_\infty)}$$

A eficiência da aletas é obtida a partir da equação demonstrada e as áreas Ap (da parede aletada) e A_{AL} (das aletas) são obtidas por meio de relações geométricas.

Para a maioria das aletas de espessura constante encontradas na prática, a espessura é muito menor que o comprimento e, portanto, a área da ponta é desprezível.

Aletas com perfis triangulares e parabólicos contém menos material e são mais eficientes que as aletas com perfis retangulares e, portanto, são mais adequas para aplicações que exijam peso mínimo (aplicações espaciais).

Seleção do comprimento da aleta:

- quanto mais comprida, maior a área de T.C., maior a $\dot{Q}$;
- quanto maior a aleta, maior a massa, o preço e o atrito com o fluido;
- quanto maior a aleta, a eficiência e menor (L$\rightarrow \eta$ <60% deve ser evitado).

Logo, o aumento pode não ser justificado e os benefícios adicionais têm que justificar os custos adicionais.

5. EFICÁCIA DE UMA ALETA

$$\varepsilon_{aleta} = \frac{\dot{Q}_{aleta}}{\dot{Q}_{sem\ aleta}} = \frac{\eta_{aleta} h A_{aleta}(T_p - T_\infty)}{h A_p (T_p - T_\infty)} = \eta_{aleta} \frac{A_{aleta}}{A_p}$$

No caso de uma aleta longa ($A_c = A_p$):

$$\varepsilon_{aleta} = \frac{\dot{Q}_{aleta}}{\dot{Q}_{sem\ aleta}} = \frac{\sqrt{hPkA_c}(T_p - T_\infty)}{h A_p (T_p - T_\infty)} = \frac{\sqrt{kP}}{\sqrt{hA_c}}$$

Apreciação de projeto e seleção de aletas:

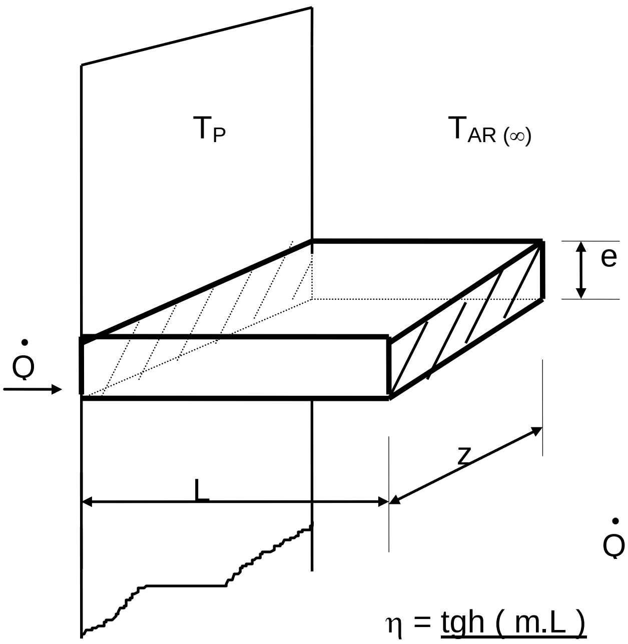
- k do material da aleta deve ser o mais elevado possível;
- a razão P/A_c deve ser a mais elevada possível (chapas finas e aletas delgadas tipo pino;
- baixo h (quando o meio é um gás em vez de um líquido e a convecção é natural e não forçada). Explo: No radiador do automóvel as aletas são colocadas do lado do gás.

6. FUNÇÃO HIPERBÓLICA:

$$\operatorname{senh}(x) = \frac{e^{x} - e^{-x}}{2}$$

$$\cosh(x) = \frac{e^{x} + e^{-x}}{2}$$

$$\operatorname{tgh}(x) = \frac{\operatorname{senh}(x)}{\cosh(x)}$$



$$\dot{Q} = \dot{Q}_P + \dot{Q}_{AL}$$

$$\dot{Q}_P = h \cdot A_P \cdot (T_P - T_{AR})$$

$$\dot{Q}_{AL} = h.\eta.A_{AL}.(T_P - T_{AR})$$

$$\dot{Q} = h.(A_P + \eta.A_{AL}).(T_P - T_{AR})$$

$$\eta = \frac{\operatorname{tgh}(m.L)}{m.L}$$

$$m = \sqrt{\frac{P \cdot h}{A \cdot k}} \quad (m^{-1})$$

$P = 2.(z + e)$ projeção na parede

$A = z.e$

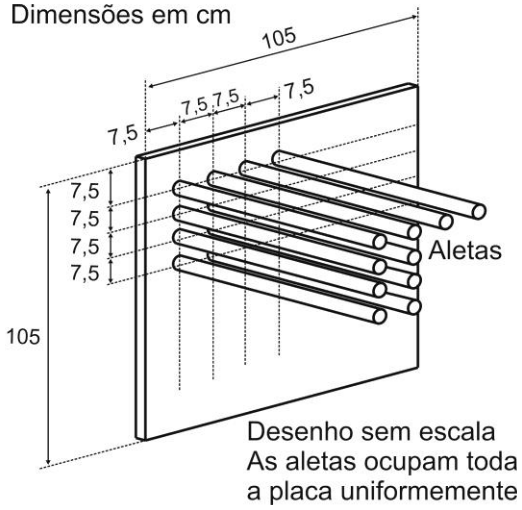
$A_P = A'_P - (N_{AL} \cdot z \cdot e) \Rightarrow$ Área da parede aletada

$A_{AL} = N_{AL} \cdot P \cdot L \Rightarrow$ Área da aleta

EXERCÍCIOS PROGRAMADOS:

1) **(EA/GA)** Aletas cilíndricas de 5 mm de diâmetro, 5 cm de comprimento são soldadas a uma placa plana de 1,05 m x 1,05 m de área e 5 mm de espessura. Tanto as aletas quanto a placa são feitas de aço-carbono (condutividade térmica de 60,5 W / m K). A superfície não aletada é mantida à temperatura superficial uniforme de 180 ºC, estando todo o conjunto em contato com o ar a 20 ºC. O coeficiente médio de troca de calor por convecção é estimado em 10 W/m^{2}K (para as aletas e para a área não aletada). Resolva obrigatoriamente através do método analítico, IDENTIFIQUE e JUSTIFIQUE qual a condição adequada para a troca de calor na ponta da aleta.

a) Determine o **número total** de aletas soldadas na placa;
b) Determine a quantidade de calor trocada por **todas as aletas**.
c) Determine a quantidade de calor trocada pela parte **não aletada** da placa (0,5 ponto);



Respostas: a) 169 aletas; b) TC por convecção e 195,6 W; 1758,7 W

2) **(EA/GA)** Deseja-se incrementar a troca de calor em um trocador de calor duplo tubo. O trocador tem como objetivo aumentar a temperatura de uma quantidade de ar usando vapor de água excedente de uma caldeira. Através do tubo interno escoa vapor de água saturado a uma temperatura de 450 ºC. Em uma determinada seção, cuja temperatura do ar é de 20 ºC, foram instaladas 8 aletas cilíndricas (ocas) de cobre. Desprezando todos os efeitos de radiação, **<u>determine a taxa de transferência de calor cedida pelas oito aletas ao ar, determine também a eficiência da aleta</u>**. Despreze a resistência térmica do tubo interno de 3 cm de diâmetro e a resistência à convecção interna do lado do vapor. Indique qual a condição na ponta da aleta.

São dados:

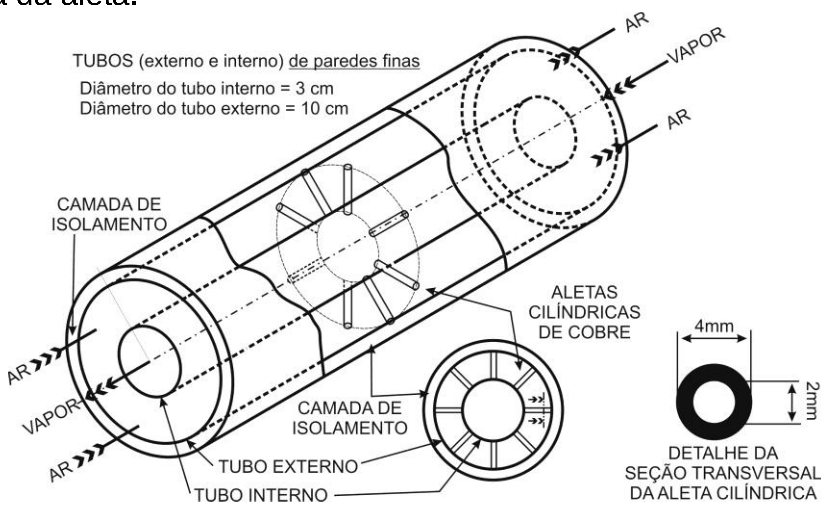
Para o cobre:

densidade: 8933 kg/m^3;

difusividade: 116,6.10^{-6} m^2/s

condutividade térmica: 400 W/mK

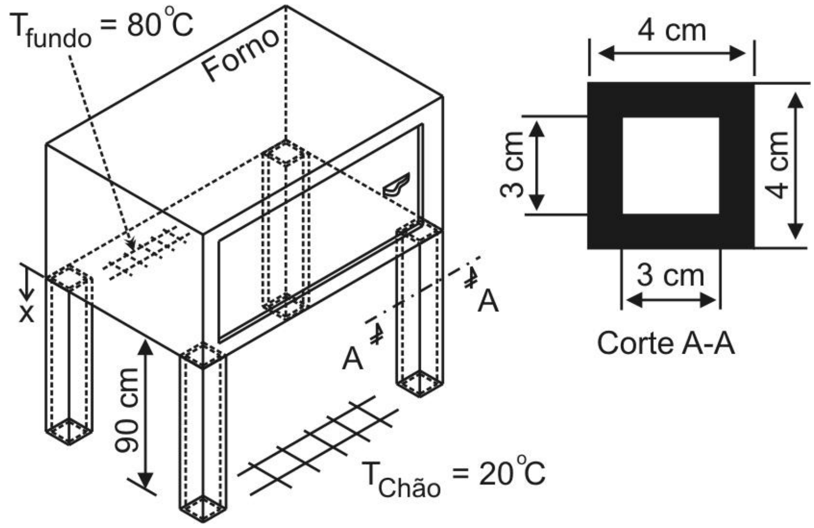
Coeficiente de troca de calor por convecção para aleta-ar 50 W/m^{2}K



Respostas: A aleta é adiabática na ponta, a taxa de transferência de calor pelas oito aletas é de 70,89W e a eficiência da aleta é de 93,7%

3) **(EA/GA)** Um pequeno forno tem temperatura (uniforme) em sua chapa de fundo de 80ºC, sabendo que o mesmo é construído completamente em aço carbono, determine, supondo que as pernas do forno são aletas, a taxa de transferência de calor perna e a eficiência das mesmas. A temperatura do ar da sala é de 15ºC. Despreze efeitos de radiação.

São dados:
Para o aço carbono:
densidade: 7801 kg/m^3;
difusividade: 1,172.10^{-5} m^2/s
condutividade térmica: 43 W/mK
Coeficiente de troca de calor por convecção para pernas - ar de 10 W/m^{2}K.



Respostas: A condição na ponta da aleta é temperatura fixa; a taxa de transferência de calor por perna é de 14,26W e a eficiência da aleta é de 15,23%.

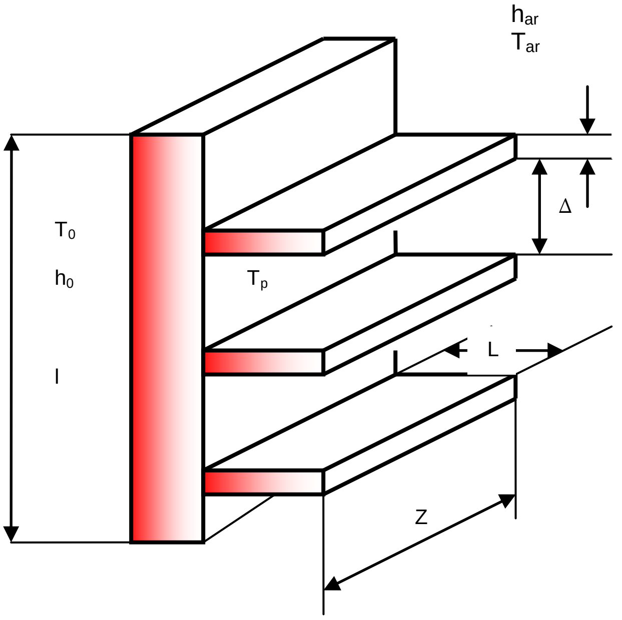
4) Deseja-se aumentar em 30% **a eficiência** de uma aleta cilíndrica maciça **LONGA** de diâmetro D e comprimento L, alterando apenas seu diâmetro. Para tanto, suponha que a temperatura da base e do fluido não se modifiquem, nem tão pouco o coeficiente de troca de calor por convecção. Determine qual deve ser o novo diâmetro D' da aleta com base no diâmetro D (inicial).
Resposta: D' = 1,69 D

10ª aula: "EXERCÍCIOS - ALETAS"

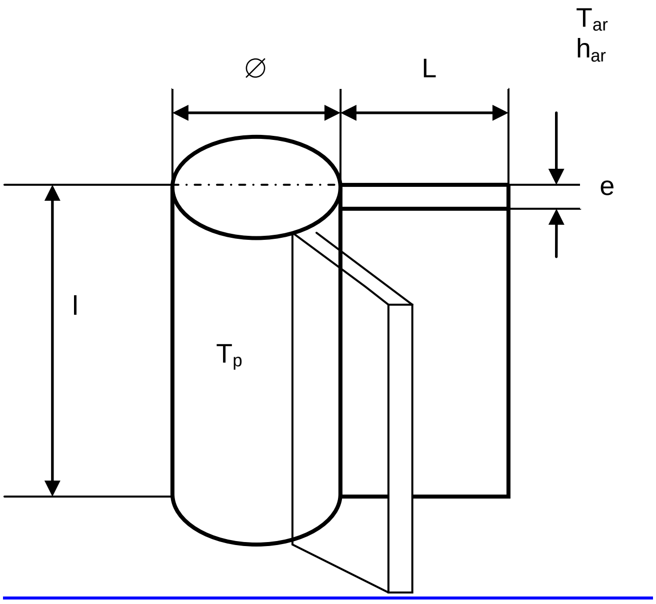
(ÇENGEL, 2009) – **CAPÍTULO III**

AULA DE TEORIA:

1) Uma placa plana de alumínio (k = 175 kcal/h.m.ºC) de resistência térmica desprezível tem aletas retangulares de 1,5 mm de espessura e 12 mm de altura, espaçadas entre si de 12 mm, ocupando toda a largura da placa. O lado com aletas está em contato com ar a 40 ºC e coeficiente de película 25 kcal/h.m^2.ºC. No lado sem aletas escoa óleo a 150 ºC e coeficiente de película 225 kcal/h.m^2.ºC. Calcule, por unidade de área da placa:
a) Fluxo de calor pela placa aletada desprezando a resistência da película de óleo;
b) Idem ao item anterior, levando em conta a resistência à convecção na película de óleo.
Respostas: a) 5.625 kcal/h; b) 7.292 kcal/h

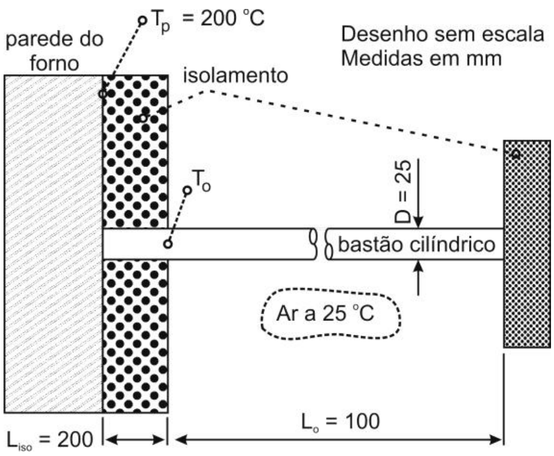


2) Um tubo de diâmetro 2" e 1,2 m de comprimento transporta um fluido a 150 ºC, com coeficiente de película de 1800 kcal/h.m^2.ºC. Para facilitar a troca de calor com o ar ambiente foi sugerido o aletamento do tubo, com aletas longitudinais de 2 mm de espessura e 19 mm de altura, montadas com espaçamento aproximado de 6 mm (na base). O tubo e as aletas de aço tem coeficiente de condutividade térmica igual a 40 kcal/h.m.ºC e emissividade 0,86. O ar ambiente está a 28 ºC, com coeficiente de película 15 kcal/h.m^2.ºC. Desprezando a resistência da película interna, pede-se:
a) o calor transferido por convecção pelo tubo sem as aletas
b) o calor transferido por radiação pelo tubo sem as aletas
c) o número de aletas
d) o calor transferido por convecção pelo tubo aletado
e) o calor transferido por radiação pelo tubo aletado
Respostas: a) 350 kcal/h; b) 191 kcal/h; c) 20 aletas; d) 1.862 kcal/h; e) 1.054 kcal/h)



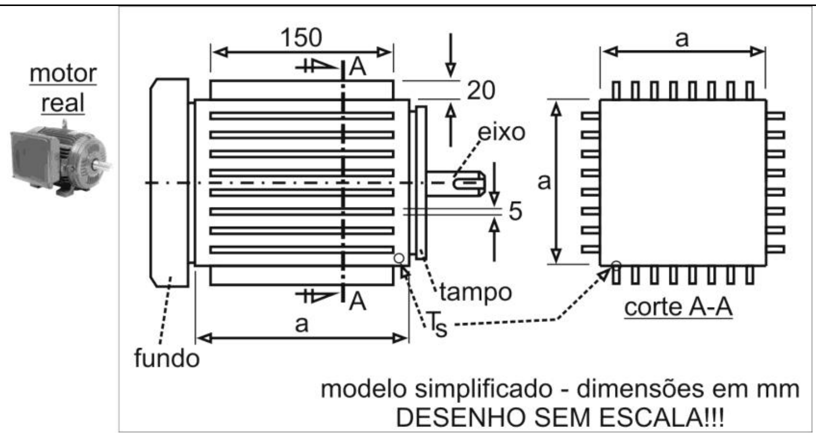
EXERCÍCIOS PROGRAMADOS:

1) **(EA/GA)** Um bastão cilíndrico com diâmetro D = 25 mm e condutividade térmica 60 W/(m.K) se estende perpendicularmente da parede externa de um forno que está a T_p = 200ºC e está coberto parcialmente por um isolante com espessura L_{iso} = 200 mm. O bastão está soldado à parede do forno e é utilizado para sustentação de cabos de instrumentação (não indicados na figura). A fim de evitar danos aos cabos, a temperatura na superfície **exposta do bastão** deve ser mantida abaixo de um limite operacional especificado de T_{max} = 100ºC. A temperatura do ar ambiente é de T_{amb} = 25ºC e o coeficiente de transferência de calor por convecção é igual a 15 W/(m^2.K). Admitindo regime permanente e desprezando troca térmica por radiação e a resistência de contato entre o bastão e a parede externa do forno, determine a temperatura T_o. Indique se a máxima temperatura (na superfície exposta) no bastão ultrapassa o limite estabelecido. Dica: a parte isolada do bastão NÃO é uma aleta, entretanto, a parte exposta ao ar pode ser tratada como um aleta de seção transversal (circular) constante!



Respostas: Temperatura T_0 igual a 127,45ºC [ULTRAPASSA O LIMITE]

2) **(EA/GA)** Durante o pré-projeto de um motor elétrico é necessário que se façam algumas determinações preliminares em um modelo simplificado como o indicado na figura. Como uma premissa de projeto, espera-se que 72% do calor dissipado pelo motor ocorra no conjunto formado por 32 aletas fixadas rigidamente à lateral do mesmo.



Sabe-se que a potência elétrica de alimentação do motor é igual a 1512 W e que a potência mecânica em seu eixo é de 1492 W (durante operação em regime permanente). Determine: (a) qual deve ser a temperatura na base das aletas (T_S); (b) qual deve ser a cota a no desenho para a condição do item anterior; (c) Supondo que a cota de 20 mm indicada no modelo possa sofrer aumento ou diminuição de modo irrestrito (no projeto), encontre qual seria a menor temperatura possível na base das aletas (T_S) [nesta condição todas as grandezas, à exceção da cota de 20 mm estão fixadas].

Admita que o fundo, o tampo e o eixo não participem das trocas térmicas. Suponha que a troca térmica na ponta das aletas seja desprezível e que a resistência de contato entre a base das aletas e as aletas também seja desprezível. O coeficiente de transferência de calor combinado (convecção e radiação) vale 4 W/m^2K e as aletas são confeccionadas em material com condutividade térmica igual a 200 W/mK. A temperatura do ar e das vizinhanças é igual a 25ºC.

Respostas: a) 43,165ºC; b) 0,15895 m; c) 26,04ºC

3) **(EA/GA)** Durante o projeto de um refrigerador para uso doméstico dois engenheiros discutem sobre a configuração do condensador. O fluido refrigerante escolhido é o R134a. No modelo A apenas um tubo de cobre com diâmetro externo de 9 mm e 4,5 m de comprimento é utilizado na confecção do condensador. No modelo B são acrescentadas oito placas de cobre (de espessura de 4 mm) soldadas à superfície do tubo (conforme desenho indicativo).

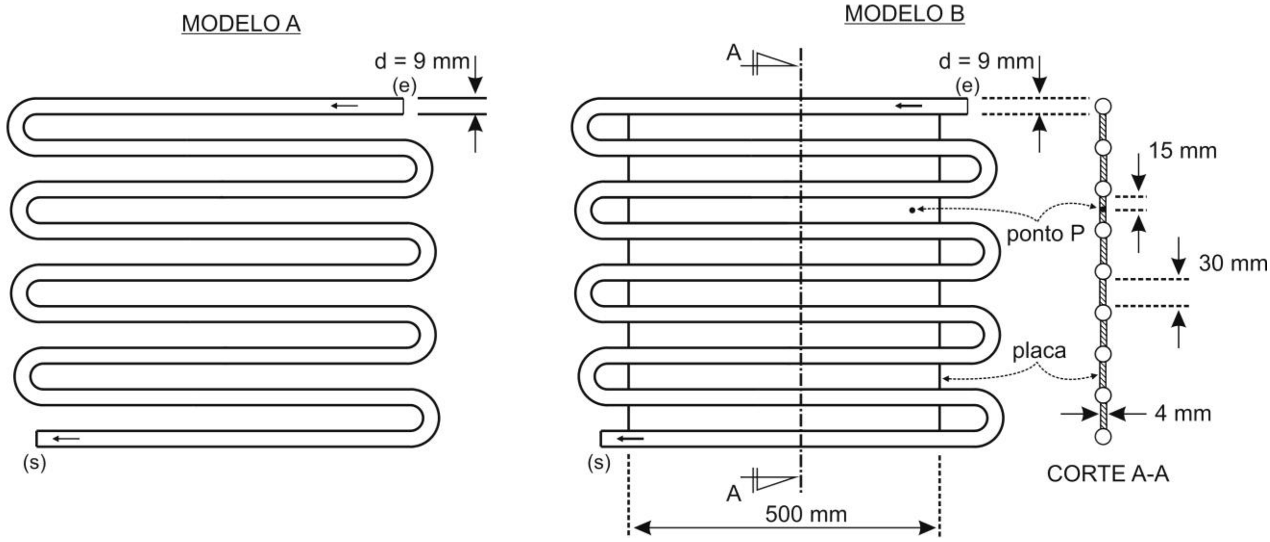
Admita para as duas configurações: - regime permanente; - temperatura na superfície externa do tubo igual a 50ºC; - temperatura do ar e das vizinhanças de 25ºC; - coeficiente combinado de transferência de calor na superfície do tubo e das placas de 26 $W/m^2.K$; - entrada (e) no condensador de vapor saturado; - saída (s) do condensador de líquido saturado; - temperatura de entrada do fluido refrigerante no condensador de 52,43ºC.

Determine: (a) a vazão em massa de fluido refrigerante no modelo A. (b) a taxa de transferência de calor por uma placa de cobre do modelo B. (c) a temperatura no ponto P indicado no desenho do modelo B. (d) a vazão em massa de fluido refrigerante no modelo B.

Despreze a resistência de contato entre as placas de cobre e a superfície do tubo. Admita condutividade térmica do cobre de 380 W/m.K.

Para o R134a saturado:

Pressão (MPa)	Temperatura (ºC)	v_L (m^3/kg)	v_V (m^3/kg)	h_L (kJ/kg)	h_V (kJ/kg)
1,4	52,43	0,000916	0,014	125,26	273,4



Respostas: a) 0,55827 g/s; b) 19,6 W; c) 49,9ºC; d) 1,476 g/s

11ª aula: "ANÁLISE DE SISTEMAS CONCENTRADOS"

(ÇENGEL, 2009) – **CAPÍTULO IV**

1. INTRODUÇÃO

Até aqui, tratamos a condução de calor somente no estado estacionário. Entretanto, após o início do processo de transferência de calor, antes que as condições do estado estacionário sejam atingidas, transcorrerá certo tempo. Durante esse período, chamado transitório, a temperatura e a energia interna variam. A análise do fluxo de calor em estado transitório apresenta grande importância prática nos sistemas industriais de aquecimento e resfriamento.

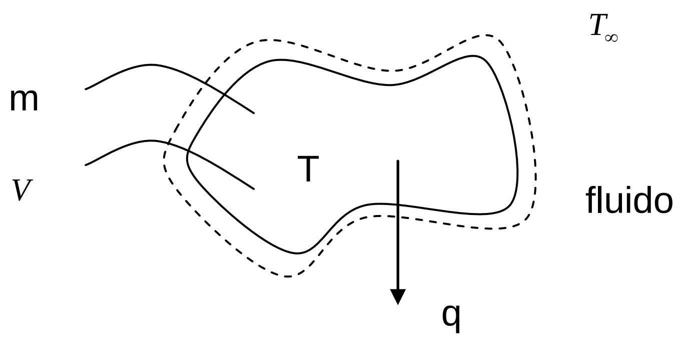
Além do fluxo de calor em estado transitório, quando o sistema passa de um estado estacionário a outro existem problemas de engenharia envolvendo variações periódicas no fluxo e na temperatura como, por exemplo, o fluxo de calor entre os períodos diurno e noturno num edifício, além do fluxo de calor em motor de combustão interna.

Alguns problemas podem ser simplificados pela suposição de que a temperatura é somente uma função do tempo e é uniforme em todo o sistema a qualquer momento e o método de análise é apresentado a seguir.

2. SISTEMAS COM RESISTÊNCIA INTERNA DESPREZÍVEL (SISTEMAS CONCENTRADOS)

Embora não exista material na natureza que apresente condutividade térmica infinita, muitos problemas de fluxo de calor transitório podem ser resolvidos a partir da suposição de que a resistência condutiva interna do sistema é tão pequena que a temperatura no seu interior é uniforme em qualquer instante. Esta simplificação é válida quando a resistência térmica externa entre a superfície do sistema e o meio à sua volta é tão grande, quando comparada à interna, que ela controla o processo de transferência de calor.

O número de Biot (Bi) é uma medida da importância relativa da resistência térmica dentro de um corpo sólido:



$$B_i = \frac{R_{interna}}{R_{externa}} = \frac{\bar{h}.L}{k}$$

$$B_i \angle 0{,}1 - concentrados$$

Onde:

$\bar{h}$ é o coeficiente de transferência de calor médio (cte);
L é a dimensão de comprimento significativo (volume do corpo / área superficial do corpo);
k é a condutividade térmica do corpo.

Considere o resfriamento acima de um corpo retirado de um forno, em um banho, onde:
T_o é a temperatura do corpo ao sair do forno;
T_∞ é a temperatura do banho (cte);
T é a temperatura média do corpo;
t = 0 é o tempo em que o resfriamento começa.

Fazendo um balanço de energia para o corpo em um intervalo de tempo dt, considerando a hipótese de que T é uniforme em qualquer instante:

$$\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \rho . V \qquad dE = \rho.V.c.dT$$

Variação de energia interna do corpo durante dt	=	fluxo líquido de calor do corpo para o banho durante dt
$\rho.V.c\frac{dT}{dt}$	=	$-\bar{h}.A_s.(T - T\infty)$

Sendo:
ρ = densidade do corpo (kg/m^3);
V = volume do corpo (m^3);
c = calor específico do corpo (J/kg.K);

$\bar{h}$ é o coeficiente de transferência de calor médio (cte);
A_s = área da superfície (m^2);
dT = variação da temperatura (K) durante o intervalo de tempo dt (s).

$$\frac{dT}{T - T_\infty} = \frac{d(T - T_\infty)}{(T - T_\infty)} = -\frac{\bar{h}.A_s}{\rho.V.c}dt$$

$$\int_{T_0}^{T} \frac{d(T - T_\infty)}{T - T_\infty} = -\frac{\bar{h}.A_s}{\rho.V.c}\int_0^t dt \qquad \ln\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = -\frac{\bar{h}.A_s}{\rho.V.c}t \qquad \frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = e^{-(\bar{h}.A_s/c.\rho.V)t}$$

$$B_i = \frac{\bar{h}.L}{k} \qquad F_o = \frac{\alpha.t}{L^2} \qquad \alpha = \frac{k}{\rho.c}$$

$$B_i F_o = \frac{\bar{h}.L}{k}.\frac{\alpha.t}{L^2} = \frac{\bar{h}.L}{k}.\frac{k}{\rho.c}.\frac{t}{L^2}$$

$$\boxed{\frac{T - T_\infty}{T_o - T_\infty} = e^{-B_i F_o}}$$

Exercícios da aula de teoria

1) **(EA/GA)** No processo de produção de lâmpadas convencionais de bulbo, há necessidade de resfriamento de 400 ^oC até 45 ^oC, em 11 segundos. O resfriamento é alcançado por exposição direta ao ar cuja temperatura média pode ser estimada em 28 ^oC.
Admita que:

I) A lâmpada tenha formato esférico e parede fina.
II) O volume da quantidade de vidro componente da lâmpada possa ser estimado como a área superficial da esfera multiplicada pela espessura da parede da lâmpada.
III) O sistema tenha resistência interna desprezível.
IV) Calor específico do vidro = 780 J/kg.K; Condutividade térmica do vidro = 1,4 W/m.K; densidade do vidro = 2600 kg/m^3
V) Raio externo da lâmpada = 5 cm; espessura do vidro = 0,2 mm.

Determine:

a) o coeficiente de transmissão de calor por convecção nesse processo;
b) qual deveria ser a espessura do vidro para que a hipótese de sistema com resistência interna desprezível não fosse verdadeira.

Respostas: a) 113,78 W/ m^2.K; b) e > 1,23 mm

2) **(EA/GA)** Quando movido de um meio a outro em temperatura diferente, o termopar deve dispor de um tempo suficiente para atingir o equilíbrio térmico nas novas condições antes que se faça qualquer leitura de medição. Considere um fio de termopar em cobre, com 0,1 cm de diâmetro, originalmente a 150 ^oC. Determine a resposta à temperatura quando esse fio é rapidamente imerso em:
a) água a 40 ^oC (h = 80 W/m^2.K)
b) ar a 40 ^oC (h = 10 W/m^2.K)

Dados para o cobre: k= 391 W/m.K; c = 383 J/kg.K; ρ= 8930 kg/m^3

3) **(EA/GA)** Uma haste de aço de baixo carbono com 0,6 cm de diâmetro, a 38 ^oC é rapidamente imersa em um meio liquido a 93 ^oC com hc = 110 W/m^2.K. Determine o tempo necessário para a haste aquecer até 88 ^oC.

Dados para o cobre: k= 43 W/m.K; c = 473 J/kg.K; ρ= 7801 kg/m^3; α = 1,172.10^{-5} m^2/s

Resposta: t = 120,69 s

4) **(EA/GA)** Um satélite com envoltório esférico (3 m de diâmetro esférico, paredes em aço inoxidável com 1,25 cm de espessura) reentra na atmosfera vindo do espaço exterior. Se sua temperatura original for 38 ^oC, a temperatura média efetiva da atmosfera for 1093 ^oC e o coeficiente efetivo de transferência de calor for 115 W/m^2. ^oC, calcule a temperatura do envoltório após a reentrada, supondo que o tempo de reentrada seja de 10 minutos e o interior do envoltório esteja vazio.

Dados para o aço inox: k= 14,4 W/m.K; c = 461 J/kg.K; ρ= 7817 kg/m^3; α = 0,387.10^{-5} m^2/s

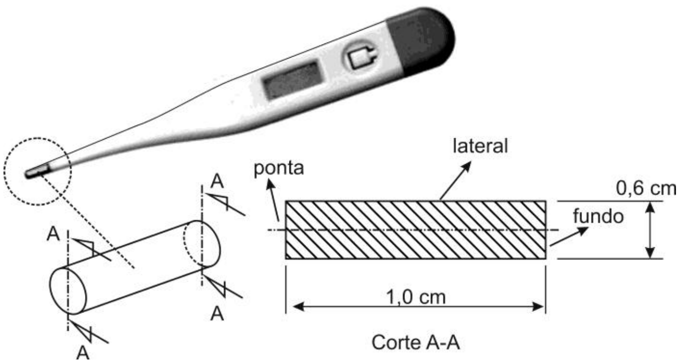
Resposta: T = 856,64 ^oC

5) **(EA/GA)** Os coeficientes de transferência de calor para o fluxo de ar a 26,6 ^oC sobre uma esfera com 1,25 cm de diâmetro são medidos, pela observação do histórico temperatura-tempo de uma esfera de cobre (c = 376 J/kg.K e ρ= 8928 kg/m^3), por 2 termopares, um localizado no centro e outro próximo a superfície. Os dois registraram, dentro da precisão dos instrumentos de precisão, a mesma temperatura em qualquer instante determinado. Em uma execução de teste, a temperatura inicial da esfera era de 60 ^oC e diminuiu 7 ^oC em 1,15

minutos. Calcule o coeficiente de transferência de calor para esse caso. **Resposta: 19,826 W/ m^2.K**

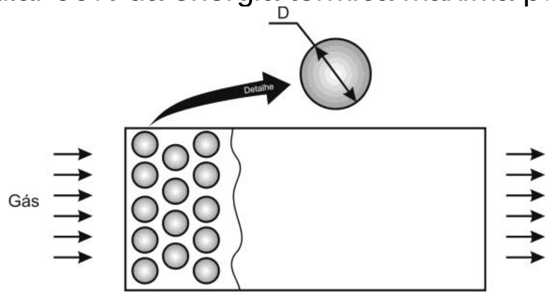
EXERCÍCIOS PROGRAMADOS:

1) **(EA/GA)** Para um termômetro de aplicações médicas determine o tempo necessário para que a extremidade atinja a temperatura de **37,95ºC** quando estiver em contato com a pele em temperatura de **38ºC**, partindo de um valor inicial de **25ºC**. Admita que a extremidade metálica do termômetro esteja completamente (todos os lados, exceto o fundo) em contato com a pele de uma pessoa.
O material da ponta é aço inoxidável com difusividade térmica de **0,05 cm^2/s**, calor específico à pressão constante de **451 J/(kg.K)** e condutividade térmica de **17,2 W/m.K**. A resistência de contato entre a pele e a extremidade metálica é estimada em **31,529 K/W**. Admita que a extremidade metálica do termômetro possa ser considerada um sistema com resistência interna à condução de calor desprezível.



Resposta: 170,52 segundos

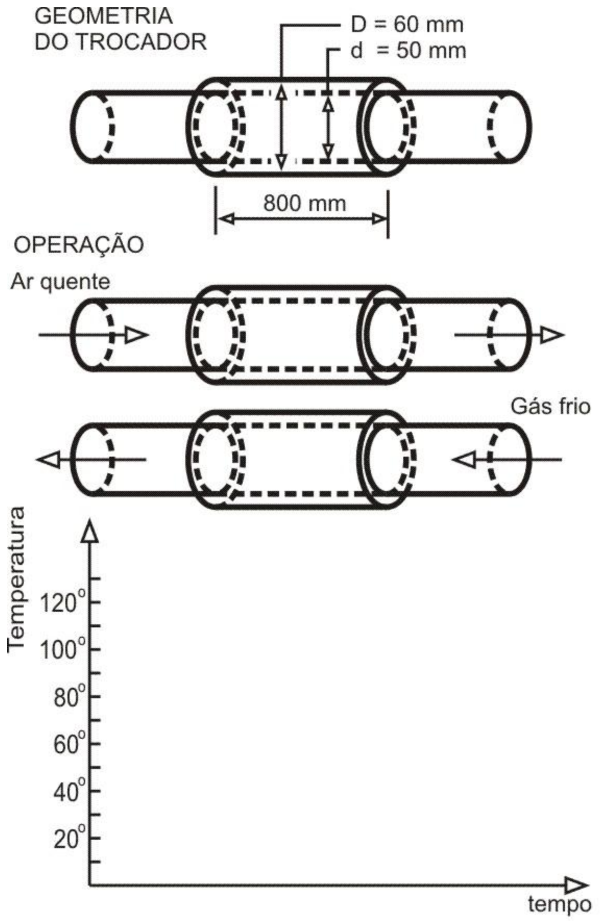
2) **(EA/GA)** Sistemas de armazenamento de energia térmica normalmente envolvem um “leito” de esferas sólidas, através do qual um gás quente escoa se o sistema estiver sendo carregado ou um gás frio se o sistema estiver sendo descarregado. Em um processo de carregamento, a transferência de calor do gás quente aumenta a energia térmica armazenada nas esferas mais frias; durante a descarga, a energia armazenada diminui na medida em que calor é transferido das esferas quentes para o gás mais frio. Considere um leito de esferas de alumínio (densidade 2700 kg/m^3, calor específico 0,950 kJ/kg.K e condutividade térmica 240 W/m.K) com 75 mm de diâmetro em um processo de carregamento no qual o gás entra na unidade de armazenamento a uma temperatura de 300ºC. Se a temperatura inicial das esferas for de 25ºC e o coeficiente de transferência de calor por convecção for de 75 W/m^2.K, quanto tempo demora para uma esfera próxima à entrada do sistema acumular 90% da energia térmica máxima possível?



Resposta: tempo de 984,35 s [atingir a temperatura de 272,5ºC]

4) **(EA/GA)** Um trocador de calor que opera como uma unidade de acumulação de energia térmica tem geometria conforme indicada na figura. O trocador é construído de cobre e está bem isolado nas faces externas (o isolamento não é indicado). A menor

temperatura do corpo do trocador de calor durante o ciclo de funcionamento é de 50ºC e a maior é de 80ºC. Considerando as condições de carga da unidade mediante a passagem de ar quente, admitindo que a temperatura média do ar e o coeficiente de troca de calor por convecção tenham os valores iguais a 120ºC e 20 W/m^{2}K e, para a condição de regeneração do calor, passagem de um gás frio com temperatura média igual a 20ºC e coeficiente de troca de calor por convecção de 20 W/m^{2}K. Determine: a) O tempo em que o ar quente deve circular (t_1), b) O tempo que o gás frio deve circular (t_2), c) faça um gráfico temperatura versus tempo (esquemático) para o corpo do trocador (no local indicado!).

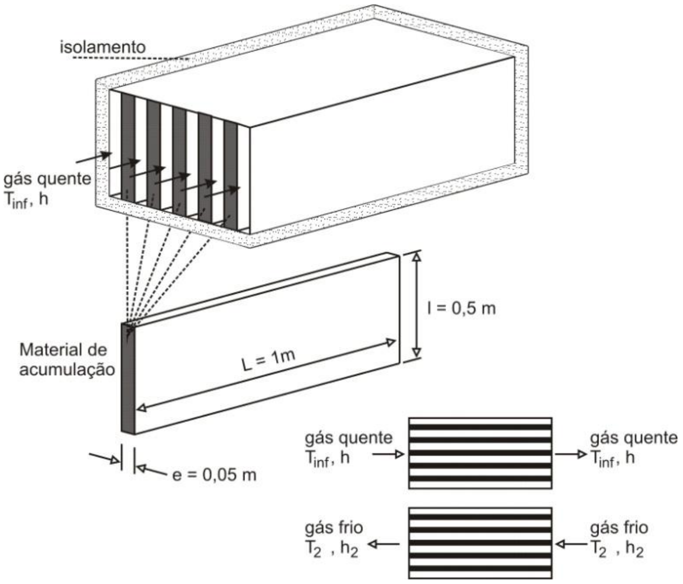


	Cobre	Ar	Gás
Condutividade térmica [W/mK]	400	0,0307	0,17
densidade [kg/m^3]	8933	0,916	0,133
difusividade térmica [m^2/ s]	$116{,}6.10^{-6}$	$33{,}6.10^{-6}$	$2{,}1.10^{-4}$

Respostas: a) 527,94 s; b) 653,91 s

5) **(EA/GA)** Um trocador de calor, que opera como uma unidade de acumulação de energia térmica tem geometria de um grande canal retangular. O trocador é bem isolado nas faces externas, e contém seções alternadas de material de acumulação (sólido - maciço) e de regiões livres para passagem de uma corrente de gás quente. Cada seção do material de acumulação é composta por alumínio que está a

uma temperatura inicial de 25ºC. Consideramos as condições de carga da unidade mediante a passagem de um gás quente através dos canais, admitindo que a temperatura do gás e o coeficiente de convecção tenham os valores constantes e iguais a Tinf = 600ºC e h = 100 W/m^2K ao longo de todo o canal.



a) Qual o intervalo de tempo necessário para se atingir 75% da máxima quantidade de energia que se pode acumular? b) Qual a temperatura do alumínio neste instante? Para o alumínio: condutividade térmica de 237 W/mK, calor específico à pressão constante: 0,903 kJ/kg K, densidade 2702 kg/m^3, ponto de fusão 933 K, difusividade térmica: $9{,}713.10^{-5}$ m^2/s.

Respostas: a) 845,65 s; b) 456,25ºC

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1.CENGEL, Yunus. Transferência de Calor e massa: uma abordagem prática. São Paulo: McGraw-Hill, 2009. (livro-texto).