TERMODINÂMICA

Mecanismos de Transferência de Calor

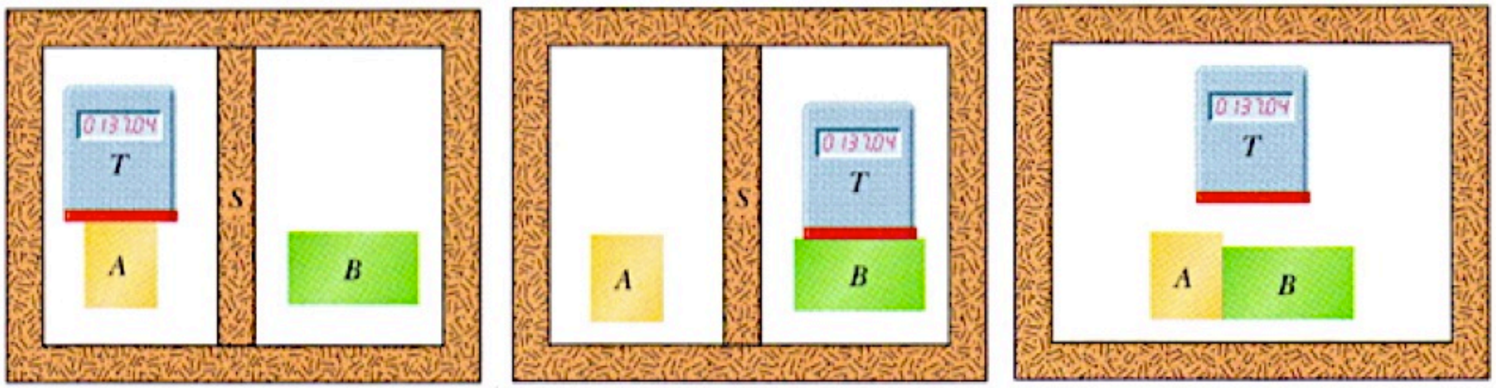
Joaquim Carneiro

Licenciatura em Ciências do Ambiente

Lei-zero da Termodinâmica

- **Se dois corpos A e B estão em equilíbrio térmico com um terceiro corpo C, então A e B estão em equilíbrio térmico entre si.**

- Em linguagem menos formal, a mensagem da lei-zero é: “Cada corpo tem uma propriedade designada por temperatura. Quando dois corpos estão em equilíbrio térmico, a sua temperatura é igual.



A escala Celsius

- Na maioria dos países a escala Celsius (formalmente designada por escala centígrada) representa a escala adoptada para uso industrial/comercial. Se T_C representar a temperatura Celsius e T a temperatura Kelvin, então:

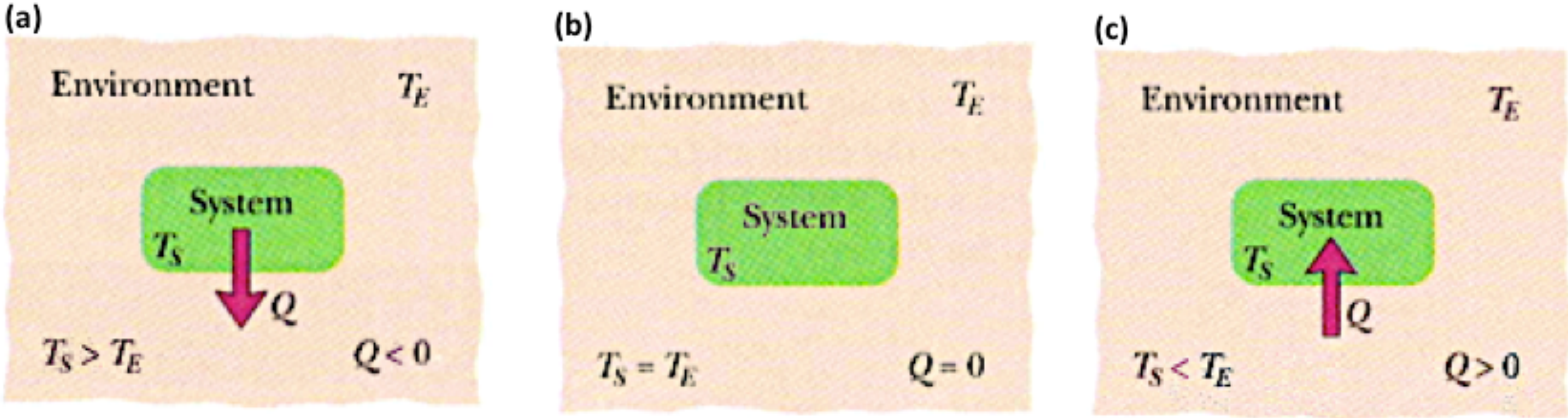
$$\boxed{T_C = T - 273{,}15^\circ}$$

Temperatura e Calor

- Se retirarmos uma garrafa de Coca-Cola do interior de um frigorifico e a colocarmos em cima da mesa da cozinha, a sua temperatura irá inicialmente aumentar rapidamente e posteriormente o aumento será mais lento – até que a temperatura da Coca-Cola iguale a do meio envolvente (deste modo, os dois sistemas estão em equilíbrio térmico).

Temperatura e Calor

- Numa situação geral, a garrafa de Coca-Cola representa o sistema (com temperatura T_S) e a cozinha representa o meio (com temperatura T_E) onde está inserido o sistema. Observa-se que se $T_S \neq T_E$ então T_S irá variar (T_E também pode variar ligeiramente) até que as duas temperaturas sejam iguais e por isso, atingindo-se o equilíbrio térmico.



Perde-se calor (**Q**) do sistema para o meio até que seja atingido o equilíbrio térmico

Atingido o equilíbrio térmico

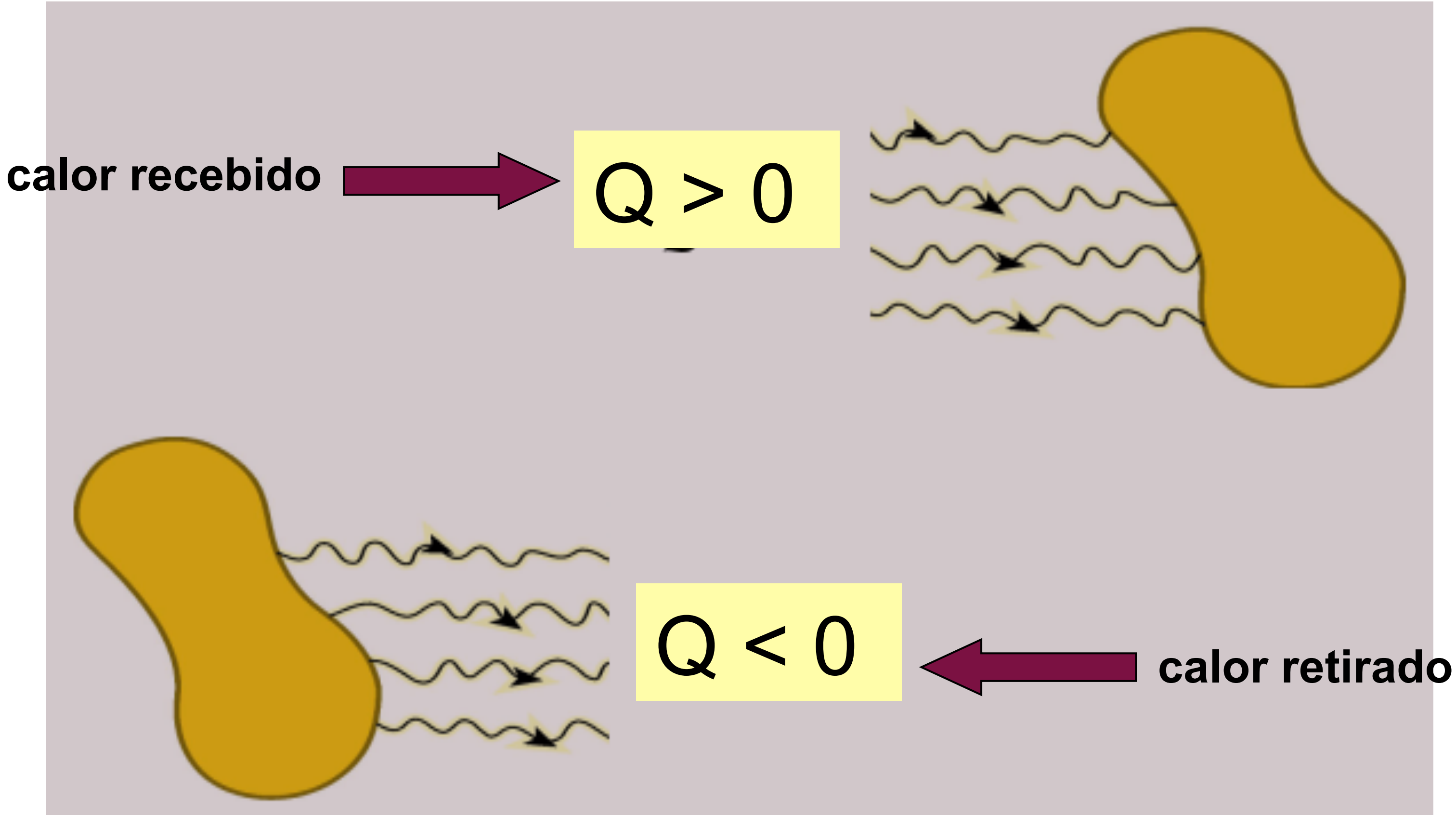
O Sistema absorve calor (**Q**) do meio até que seja atingido o equilíbrio térmico

Temperatura e Calor

- A alteração da temperatura é devida a uma alteração da energia térmica do sistema que decorre de uma transferência de energia entre o sistema e o meio. Com efeito, a energia térmica é uma energia interna que corresponde à soma das energias cinética e potencial, associadas aos movimentos aleatórios dos átomos e moléculas de um corpo. A energia transferida é denominada por **calor** e representa-se pela letra **Q**. O calor é ***positivo*** quando a energia é transferida do meio para o sistema. Quando o calor é transferido do sistema para o meio, o calor é ***negativo*** (diz-se que o calor é libertado ou perdido pelo sistema).

O calor é a energia transferida entre um sistema e o seu meio devido à existência de uma diferença de temperatura entre eles.

Convenção para a Troca de calor



Troca de Calor

Corpos em desequilíbrio térmico trocam calor para alcançar o equilíbrio.

Num sistema isolado, a quantidade total de calor trocado entre os corpos é nula, ou seja, o calor total recebido pelos corpos mais frios é igual ao calor total retirado dos corpos mais quentes.

$$\sum Q = 0$$

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \cdots + Q_n = 0$$

Temperatura e Calor

- É importante referir que a energia também pode ser transferida entre um sistema e o seu meio na forma de trabalho, ***W*** através da força exercida sobre o sistema. **Calor** e **trabalho**, ao contrário da ***temperatura***, ***pressão*** e ***volume*** não representam propriedades intrínsecas de um sistema. **Calor** e **trabalho** só têm significado desde que descrevam a transferência de energia para dentro ou para fora do sistema. Por exemplo, pode-se dizer: "durante os últimos 3 min, foram transferidos para um sistema 15 J a partir do seu meio". Contudo, é errado dizer-se que "o sistema contém 15 J de calor".
- Antes de os cientistas terem reconhecido que o calor é uma transferência de energia, o calor era medido em termos da sua capacidade em aumentar a temperatura da água. Por isso, a **caloria** (cal) foi definida como sendo a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de 1 g de água de 14,5°C para 15,5°C. No sistema inglês, a unidade correspondente de calor foi a designada British thermal unit (Btu), definida sendo a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de 1 lb de água de 63°F para 64°F.

Temperatura e Calor

- Em 1948 a comunidade científica decidiu adotar o **Joule** para a unidade SI do calor (assim como de trabalho). A relação entre a caloria e o joule é definida da seguinte maneira:

$$\boxed{1\,cal = 3{,}968\times 10^{-3}\,Btu = 4{,}1868\,J}$$

✓ O que ocorre com a temperatura de um corpo quando lhe é transferido calor ?

A temperatura pode aumentar ou não!

A absorção de Calor por Sólidos e Líquidos

Capacidade calorífica

- A capacidade calorífica (C) de um objecto é a constante de proporcionalidade entre o calor Q que um objecto absorve (ou perde) e a correspondente variação de temperatura ΔT sofrida pelo objecto. Quando o calor é utilizado pela substância para variar apenas a sua temperatura, **sem alterar o seu estado físico**, fala-se de *Capacidade Calorífica*.

✓ Ex.: aquecimento da água numa panela antes da fervura.

$$Q = C\,\Delta T$$

Q = quantidade de calor trocado [J, cal, kcal, BTU etc];

C = capacidade calorífica do corpo [J/ °C];

ΔT = variação da temperatura [K, °C].

Capacidade calorífica

- Por outras palavras, a capacidade calorífica corresponde à quantidade de calor absorvida ou perdida pelo objecto para que este sofra uma variação de temperatura de 1 grau.

$$\boxed{Q = C\,\Delta T = C\,(T_f - T_i)}$$

- Por exemplo, a capacidade calorífica de uma lajeta de mármore pode ser escrita como sendo 179 cal/°C ou 179 cal/K ou então 749,44 J/K.

Calor específico

- Dois objetos constituídos pelo mesmo material (ex. Ferro) terão capacidades caloríficas proporcionais à sua massa. Por isso, é conveniente definir uma grandeza, a "*capacidade calorífica por unidade de massa*" ou seja o **calor específico**, ***c*** .

$$\boxed{c = \frac{C}{m} \quad \Rightarrow \quad Q = c\,m\,\Delta T = c\,m\,(T_f - T_i)}$$

Calor específico

- A tabela seguinte apresenta os calores específicos de alguns materiais à temperatura ambiente. Note-se que o calor específico da água é relativamente elevado. Por outro lado, não obstante o calor específico depender da temperatura, os valores apresentados na tabela são razoavelmente bem aplicados numa gama de temperaturas próximas da temperatura ambiente.

✓ **PROBLEMA**: Uma determinada quantidade de calor Q irá aquecer 1g do material A (aumentando a sua temperatura em 3 ºC) e 1g do material B (aumentando a sua temperatura em 4 ºC). Qual dos dois materiais tem maior calor especifico?

Alguns Calores Específicos e Calores Específicos Molares à Temperatura Ambiente

Substance	Specific Heat $\frac{cal}{g \cdot K}$	Specific Heat $\frac{J}{kg \cdot K}$	Molar Specific Heat $\frac{J}{mol \cdot K}$
Elemental Solids			
Lead	0.0305	128	26.5
Tungsten	0.0321	134	24.8
Silver	0.0564	236	25.5
Copper	0.0923	386	24.5
Aluminum	0.215	900	24.4
Other Solids			
Brass	0.092	380	
Granite	0.19	790	
Glass	0.20	840	
Ice (−10°C)	0.530	2220	
Liquids			
Mercury	0.033	140	
Ethyl alcohol	0.58	2430	
Seawater	0.93	3900	
Water	1.00	4180	

Calor específico

✓ **RESOLUÇÃO**: O calor fornecido para aquecer a mesma quantidade de massa é igual para ambos os materiais. Contudo, a variação de temperatura ocorrida é diferente. Por isso:

$$\begin{cases} Material\ A: \ Q = c_A\, m\, \Delta T_A \\ Material\ B: \ Q = c_B\, m\, \Delta T_B \end{cases} \rightarrow \quad c_A\, m\, \Delta T_A = c_B\, m\, \Delta T_B \quad \Leftrightarrow \quad \frac{c_A}{c_B} = \frac{\Delta T_B}{\Delta T_A} = \frac{4}{3}$$

☛ **O material A tem maior calor específico do que o material B.**

Calor Latente

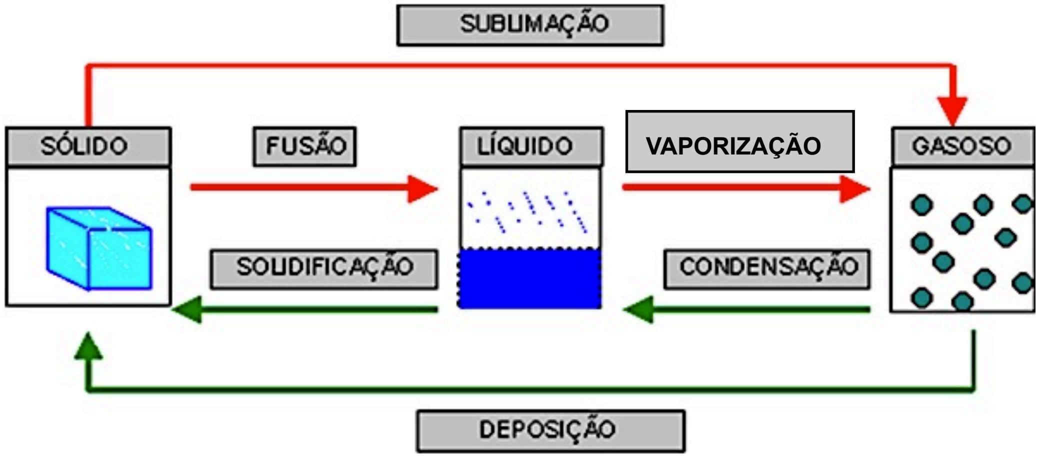
- O Calor Latente (L) é a grandeza física relacionada com a quantidade de calor que uma unidade de massa de uma determinada substância deve receber ou ceder para mudar de fase (estado físico), ou seja, passe de sólido para líquido, de líquido para gás e vice versa. Durante a mudança de fase a **temperatura da substância não varia**, mas o seu estado de agregação é modificado.

Calor Latente

- Por exemplo, na fusão de um sólido o processo requer energia porque as moléculas do sólido devem ser "libertadas" da sua estrutura rígida. Por outro lado, a solidificação de um liquido (representa o processo inverso da fusão do sólido) requer que seja removida energia do liquido, de modo a que as moléculas sejam colocadas na sua estrutura rígida inicial. Na vaporização de um líquido, o processo tal como na fusão, requer energia porque as moléculas do liquido devem ser "libertadas" da sua estrutura em forma de agregados (clusters). Pelo contrário, a condensação de um liquido (representa o processo inverso da vaporização do liquido) requer que seja removida energia do gás, de modo a que as moléculas se possam novamente agregar.

- Quando uma substância de massa ***m*** sofre completamente uma mudança de fase, a quantidade total de energia transferida é:

$$\boxed{Q = Lm}$$



Calor Latente

- Quando a mudança de fase se processa de liquido para gás (a substância absorve calor) ou de gás para liquido (a substância liberta calor), o calor latente denomina-se por **calor latente de vaporização**, L_V.
- Quando a mudança de fase ocorre de sólido para liquido (a substância absorve calor) ou de liquido para sólido (a substância liberta calor), o calor latente denomina-se por **calor latente de fusão**, L_F.

Calores Latentes de algumas substâncias

	Melting		Boiling	
Substance	Melting Point (K)	Heat of Fusion L_F (kJ/kg)	Boiling Point (K)	Heat of Vaporization L_V (kJ/kg)
Hydrogen	14.0	58.0	20.3	455
Oxygen	54.8	13.9	90.2	213
Mercury	234	11.4	630	296
Water	273	333	373	2256
Lead	601	23.2	2017	858
Silver	1235	105	2323	2336
Copper	1356	207	2868	4730

Calor Latente

✓ **PROBLEMA**: Um pedaço de gelo com massa igual a 720 g é recolhido de um glaciar (temperatura inicial de -10ºC). Através do fornecimento de calor o pedaço de gelo é totalmente transformado em liquido à temperatura de 15ºC.

a) Calcule a quantidade de calor que deve ser fornecida (e por isso, absorvida pelo pedaço de gelo) de modo a se obter o liquido à temperatura de 15ºC .

b) Admitindo que foi fornecida uma quantidade de calor igual a 210 kJ, indique qual é o estado físico final, a temperatura da água e a massa de gelo e de água que compõem a mistura.

✓ **RESOLUÇÃO**:

a) O processo de aquecimento desenvolve-se em três etapas: (1) aquecimento do pedaço de gelo até atingir a sua temperatura de fusão – nesta etapa a energia transferida produz aumento de temperatura . (2) A temperatura não aumenta até que todo o gelo seja fundido – toda a energia transferida é utilizada para promover a mudança de estado físico (sólido para liquido). (3) Agora, toda a energia transferida (na forma de calor) para a água liquida é utilizada para provocar um aumento de temperatura.

Calor Latente

✓ **Aquecimento do gelo**

$$Q_1 = c_{gelo} \cdot m\,(T_f - T_i)$$

$$Q_1 = (2220\,J/K \cdot kg)\,(720 \times 10^{-3}\,kg)\,[(0^\circ C) - (-10^\circ C)] = 15984\,J \approx 15{,}984\,kJ$$

✓ **Fusão do gelo**

O calor necessário (Q_2)para fundir completamente o gelo é:

$$Q_2 = L_F^{gelo}\,m = (333\,kJ/kg)\,(720 \times 10^{-3}\,kg) \approx 239{,}8\,kJ$$

✓ **Aquecimento da água**

O calor necessário (Q_3) para aumentar a temperatura da água a partir do seu valor inicial T_i = 0ºC até ao seu valor final T_f = 15ºC é:

$$Q_3 = c_{liquido} \cdot m\,(T_f - T_i)$$

$$Q_3 = (4180\,J/K \cdot kg)\,(720 \times 10^{-3}\,kg)\,[(15^\circ C) - (0^\circ C)] = 45144\,J \approx 45{,}14\,kJ$$

Calor Latente

- **Total:** A quantidade de calor total corresponde à soma das quantidades de calor envolvidas nas três etapas:

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$
$$Q_{total} = (15{,}98\,kJ + 239{,}8\,kJ + 45{,}14\,kJ)$$
$$Q_{total} \approx 301\,kJ$$

- **RESOLUÇÃO**:

b) A partir da etapa 1 sabe-se que é necessário fornecer 15,98 kJ para aumentar a temperatura do gelo até ao seu ponto de fusão. A quantidade de calor remanescente é por isso Q_{rem}= (210 – 15,98) ≈ 194 kJ. A partir da etapa 2, verifica-se que esta quantidade de calor é insuficiente para fundir completamente o gelo. Como o processo de fusão do gelo é incompleto, é espectável que após o fornecimento de Q_{rem} o sistema seja constituído por uma mistura de gelo e água. A massa de gelo que é fundida pela energia remanescente é:

$$m = \frac{Q_{rem}}{L_F^{gelo}} = \left(\frac{194}{333}\right)kg \approx 582{,}6\,g$$

Calor Latente

- A massa de gelo remanescente (que fica por fundir) é:

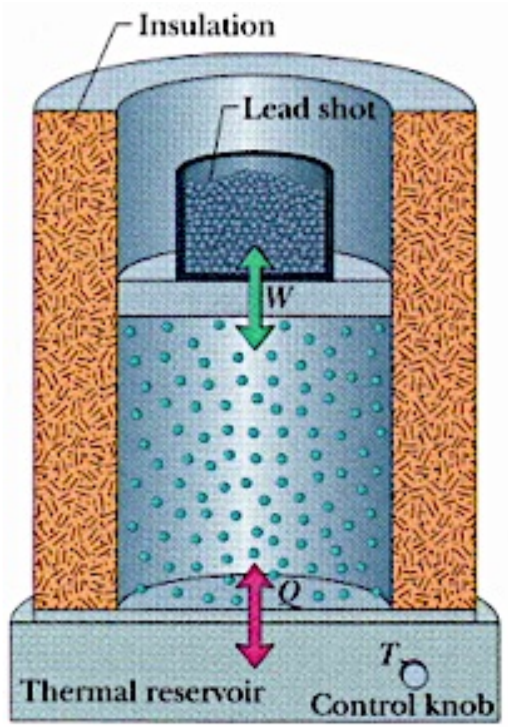
$$m_{gelo}^{rem} = (720 - 582,6)\,g = 137,4\,g$$

- **Balanço Final:**

✧ **582,6 g** de água e **137,4 g** de gelo, a **T = 0ºC**.

Calor e Trabalho

- Agora, irá estudar-se com algum detalhe o modo pelo qual a energia pode ser transferida como calor e trabalho entre um sistema e o seu meio. Para o efeito, consideremos que o nosso sistema é o gás confinado por um cilindro que contém um pistão móvel.



Joaquim Carneiro

Calor e Trabalho

- Numa situação de equilíbrio estático, a força vertical (para cima) que actua sobre o pistão é devida à pressão do gás confinado, e é igual ao peso das bolas de chumbo colocadas em cima do pistão. As paredes do cilindro são revestidas por um material isolador de modo a garantir que não ocorre transferência de energia sob a forma de calor. A base do cilindro está assente sobre um reservatório de energia térmica, um reservatório térmico (eventualmente uma placa de aquecimento) cuja temperatura pode ser controlada externamente.
- O sistema começa num ***estado inicial i***, descrito por uma pressão p_i, um volume V_i e uma temperatura T_i. Admitamos que queremos alterar o sistema para um ***estado final f***, descrito descrito por uma pressão p_f, um volume V_f e uma temperatura T_f. O procedimento pelo qual o sistema é alterado do seu estado inicial para o estado final é denominado por ***processo termodinâmico***.

Calor e Trabalho

- Durante um processo termodinâmico, a energia pode ser transferida para o sistema a partir do reservatório térmico (calor positivo) ou vice versa (calor negativo). Além disso, o sistema pode realizar trabalho sobre o pistão, empurrando o pistão (trabalho positivo) ou baixando o pistão (trabalho negativo). Assumindo-se que todas as alterações ocorrem lentamente, o sistema está permanentemente (aproximadamente) em equilíbrio térmico.
- Supondo-se que agora são removidas algumas esferas de chumbo, o gás irá exercer sobre o pistão uma força **F**. O resultado será o movimento do pistão através de um deslocamento elementar **ds**. A força F tem intensidade constante na medida em que se trata de um deslocamento elementar **ds**. A intensidade da força **F** é igual a *p A*, onde *p* representa a pressão do gás e *A* é a área da secção transversal do pistão. O trabalho elementar efectuado pelo gás durante o deslocamento elementar do pistão é:

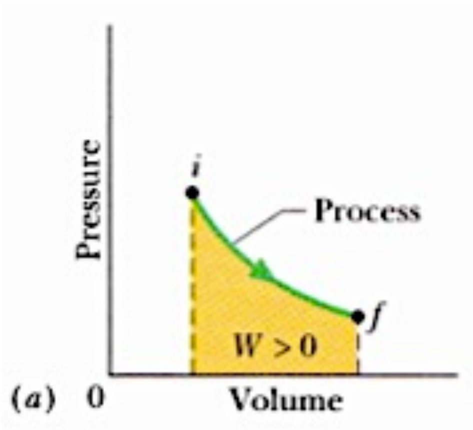
$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{s} = (pA)(ds) = p(A\,ds) = p\,dV$$

Calor e Trabalho

- ✓ dV representa a alteração diferencial do volume do gás devido ao movimento do pistão. Se forem removidas uma quantidade determinada de esferas de chumbo (de modo a permitir que o volume do gás seja alterado de V_i para V_f), o trabalho total realizado pelo gás é:

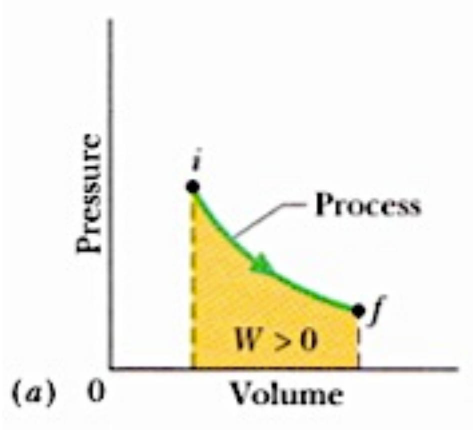
$$\boxed{W = \int dW = \int_{V_i}^{V_f} p\,dV}$$

- Durante a alteração do volume, a **pressão** e a **temperatura** do gás também podem variar. Afim de se avaliar o integral anterior, precisamos conhecer o modo pelo qual a pressão varia com o volume durante o processo pelo qual o sistema muda do estado i para o estado f. Na verdade, há muitas maneiras de "conduzir" o gás do estado i para o estado f. Uma das formas é mostrada na figura.

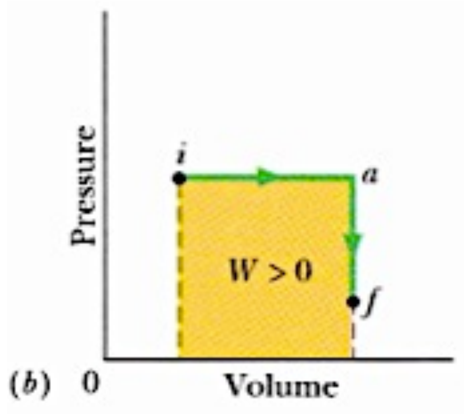


Calor e Trabalho

- Na figura (a) a curva (diagrama $p - V$) mostra que a pressão diminui com o aumento do volume. O trabalho W realizado pelo gás é representado pela área sombreada abaixo da curva, entre os pontos *i* e *f*. Independentemente da maneira como se "leva" o gás do ponto *i* para o ponto *f*, o trabalho é positivo, já que o volume do gás aumenta devido à força que se exerce sobre o pistão (força o pistão a mover-se para cima).



- Outra maneira de "levar" o gás do ponto *i* para o ponto *f* é mostrada na figura (b). Neste caso, a alteração processa-se em duas etapas – a primeira, do estado *i* ao estado ***a***, e a segunda do estado ***a*** ao estado *f*. A etapa ***ia*** deste processo é realizada a pressão constante (**expansão isobárica**), o que significa que temos que manter a mesma quantidade de esferas de chumbo dentro do pistão, mostrado na figura da página 16.

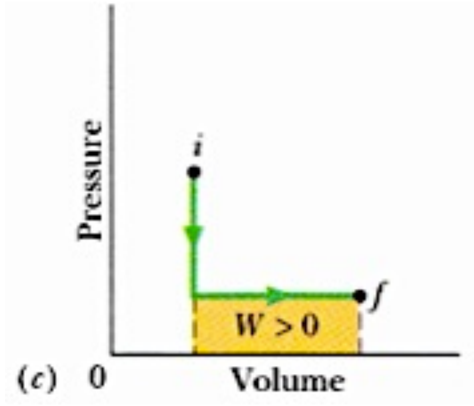


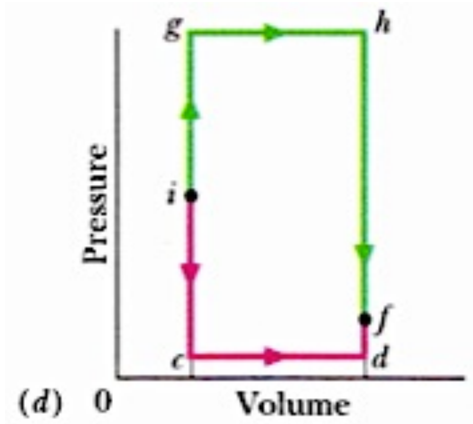
Calor e Trabalho

- Na etapa ***ia*** o aumento do volume (de V_i para V_f) é conseguida através do **aumento da temperatura** do gás (aumentando a temperatura aumenta também a força exercida pelo gás sobre o pistão – movendo-o para cima). Durante esta etapa o gás expandido realiza trabalho; por outro lado, o sistema (o gás) absorve calor do reservatório térmico. O calor é positivo porque este é adicionado ao sistema.
- A etapa ***af*** do processo mostrado na figura (b) da página anterior é conduzida a volume constante. Para o efeito, o pistão deve ser fixado (impedindo-o de se movimentar) e a temperatura deve baixar. Durante esta etapa o sistema perde calor para o reservatório térmico. Para o processo total ***i-a-f***, o trabalho W (positivo) só é realizado na etapa ***i-a***. No entanto, durante o processo total (etapas ***ia*** e ***af***) é transferida energia sob a forma de calor, sendo Q a energia liquida transferida.

Calor e Trabalho

- A figura (c) mostra um processo no qual as duas etapas anteriores são realizadas por ordem inversa. Neste caso, o trabalho W (assim como a energia liquida absorvida) é inferior ao do da figura (b) da página 23.
- A figura (d) sugere que se pode tornar o trabalho realizado pelo gás tão pequeno quanto queiramos (efetuando o caminho ***i-c-d-f***) ou tão grande quanto queiramos (efetuando o caminho ***i-g-h-f***).
- **RESUMINDO:** Um sistema pode ser "levado" de um estado inicial a um estado final através de um número infinito de processos. No processo o calor pode estar (ou não) envolvido, e em geral, o trabalho W e o calor Q terão diferentes valores para diferentes processos. Por isso, diz-se que o trabalho e o calor são grandezas que **dependem do "caminho"**.

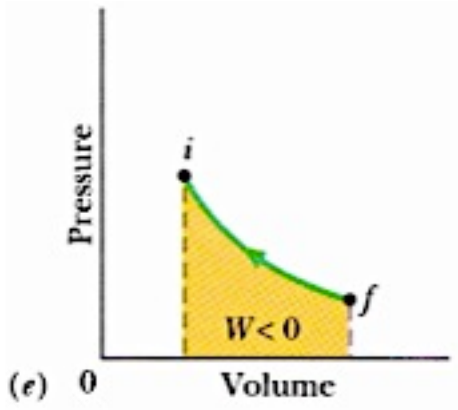




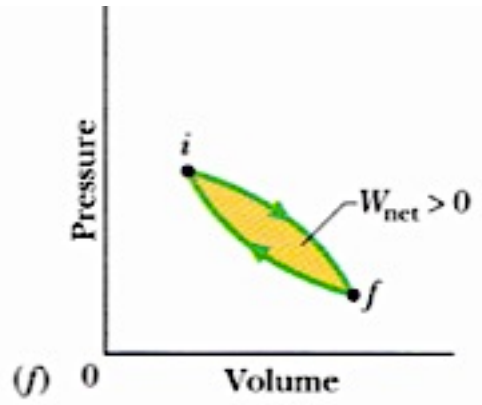
Joaquim Carneiro

Calor e Trabalho

- A figura (e) mostra um processo no qual o sistema realiza trabalho negativo (já que o sistema é eventualmente actuado por uma força compressiva, reduzindo por isso o seu volume). O valor absoluto do trabalho realizado continua a ser igual à área abaixo da curva $p - V$, mas devido à circunstância do gás estar comprimido, o trabalho realizado pelo gás é negativo.



- A figura (f) mostra um ciclo termodinâmico no qual o sistema é “levado” do estado inicial *i* para o estado final *f*, e posteriormente regressando ao estado *i*. O trabalho liquido realizado pelo sistema (gás) durante o ciclo, resulta da soma do trabalho positivo realizado durante a expansão e o trabalho negativo efectuado durante a compressão. Na figura (f), o W liquido é positivo porque a área abaixo da curva de expansão é maior do que a área abaixo da curva de compressão.



Primeira Lei da Termodinâmica

- Verificamos que quando um sistema muda de um determinado estado inicial para um estado final, tanto o trabalho W quanto o calor Q dependem da natureza do processo termodinâmico (dependem do caminho). Contudo, experimentalmente verifica-se que a quantidade (Q – W) mantém-se igual para todos os processos. Esta quantidade depende apenas do estado inicial e do estado final e não na maneira como o sistema passa de um estado para o outro. A quantidade (Q – W) deve representar a variação de uma propriedade intrínseca do sistema. Designamos esta propriedade por ***energia interna*** $\mathbf{E_{int}}$ e escreve-se:

$$\boxed{\Delta E_{\text{int}} = E_{\text{int},f} - E_{\text{int},i} = Q - W}$$

✓ **A Energia interna de um sistema E_{int} aumenta quando transferimos calor para um sistema (Q > 0) e diminui quando o sistema perde energia através da realização de trabalho (W > 0) sobre o exterior.**

Joaquim Carneiro

Primeira Lei da Termodinâmica

- Se um sistema termodinâmico sofrer apenas uma variação diferencial, a primeira lei da termodinâmica pode-se ser escrita da seguinte maneira:

$$\boxed{dE_{\text{int}} = dQ - dW}$$

✓ ***dE*** é um diferencial exato

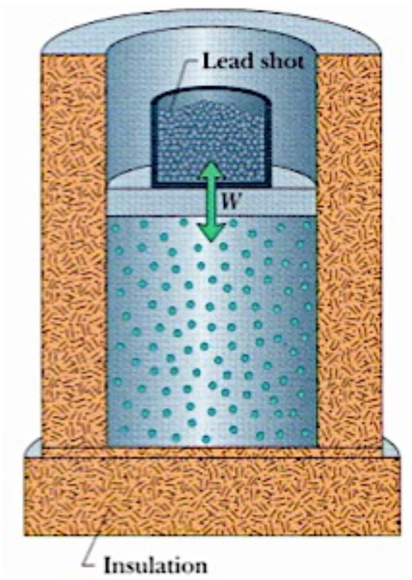
$$\Delta E_{\text{int}} = \int_{i,caminho}^{f} dQ - \int_{i,caminho}^{f} dW = E_{\text{int},f} - E_{\text{int},i}$$

✓ A energia de um sistema isolado é constante

Casos Especiais da Primeira Lei da Termodinâmica

- Quatro processos principais: ***Adiabático***, ***Volume Constante***, ***Ciclo Fechado*** e ***Expansão Livre***.

✓ **Adiabático**: Trata-se de um processo que ocorre muito rapidamente ou então ocorre num sistema tão bem isolado que não ocorre transferência de energia (na forma de **calor**) entre o sistema e o meio. Aplicando a 1ª lei da termodinâmica (com Q = 0) obtém-se:



$$\boxed{\Delta E_{\mathrm{int}} = -W}$$

✓ Se o sistema (gás) realizar trabalho (W>0), por exemplo retirando-se bolas do pistão (i.e. o gás expande-se), a energia interna do sistema **diminui**. Inversamente, se for realizado trabalho sobre o sistema (W<0), por exemplo adicionando-se bolas ao pistão (i.e. comprimindo-se o gás), a energia interna do sistema **aumenta**.

Casos Especiais da Primeira Lei da Termodinâmica

- ✓ **Volume Constante**: Se o volume do sistema (gás) é mantido constante (ex. fixando o pistão), o sistema não pode realizar trabalho. Aplicando a 1ª lei da termodinâmica (com $W = 0$) obtém-se:

$$\boxed{\Delta E_{int} = Q}$$

- Por isso, se o sistema absorver calor ($Q > 0$) a energia interna do sistema aumenta. Inversamente, se durante o processo termodinâmico o sistema perder calor a sua energia interna diminui.

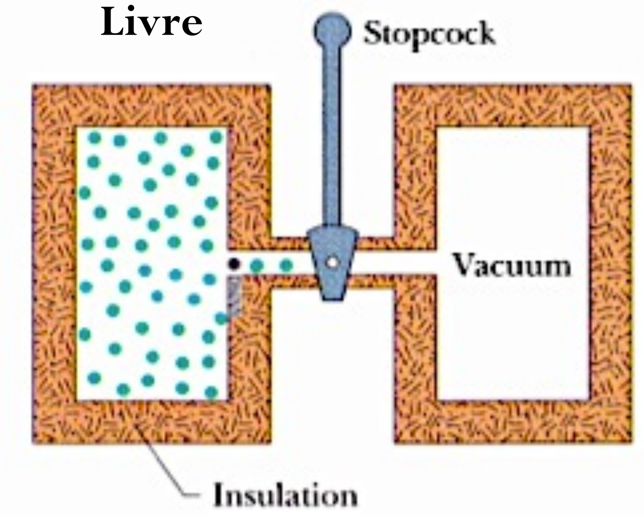
- ✓ **Ciclo Fechado**: Há processos nos quais após algumas alterações mútuas de calor e trabalho, o sistema regressa ao seu estado inicial (ver o ciclo fechado da curva $p - V$ da figura (f) da pág. 26). Neste caso, a energia interna do sistema é constante ($\Delta E_{int} = 0$) e por isso, $W = Q$.

Casos Especiais da Primeira Lei da Termodinâmica

✓ **Expansão Livre**: Trata-se de um processo adiabático no qual não ocorre transferência de energia (sob a forma de calor) entre o sistema e o meio e também não há realização de trabalho, pelo ou sobre o sistema. Por isso:

$$\boxed{Q = W = 0 \quad \Rightarrow \quad \Delta E_{int} = 0}$$

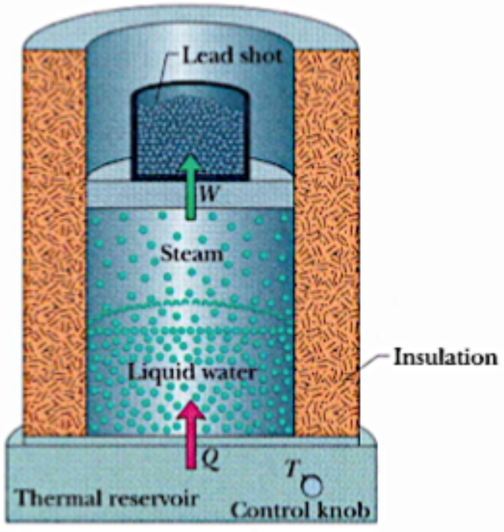
Expansão Livre



	Restrição	Consequência
Adiabático	$Q=0$	$\Delta E_{int}=-W$
Volume constante	$W=0$	$\Delta E_{int}=Q$
Ciclo Fechado	$\Delta E_{int}=0$	$Q=W$
Expansão livre	$Q=W=0$	$\Delta E_{int}=0$

- O estado inicial referente ao processo de expansão livre. Após a abertura da válvula, o gás irá preencher ambas as câmaras, atingindo um estado de equilíbrio.

✓ **PROBLEMA**: A figura mostra um reservatório térmico que contém 1 kg de água inicialmente no estado liquido (volume inicial igual a 1L). Aumentando a temperatura até 100°C a água começa a evaporar (à pressão atmosférica: $p = 1\text{atm}$). Após algum tempo, a água transforma-se totalmente em vapor de água (volume final igual a 1,671 m^3).



a) Calcule o trabalho realizado pelo sistema (gás) durante o processo de mudança de fase.

b) Calcule a quantidade de calor absorvida pelo sistema durante o processo de mudança de fase.

c) Calcule a variação da energia interna do sistema durante o processo.

✓ RESOLUÇÃO

a) O trabalho realizado pelo sistema é positivo porque o volume aumenta. Atendendo a que o processo ocorre a pressão constante (p = 1atm ≈ $1{,}01 \times 10^5$ Pa), obtém-se:

$$W = \int dW = p\int_{V_i}^{V_f} dV = p(V_f - V_i)$$

$$W = (1{,}01 \times 10^5\,Pa)\cdot(1{,}671\,m^3 - 1{,}0 \times 10^{-3}\,m^3) \approx 1{,}69 \times 10^5\,J = 169\,kJ$$

b) O calor é absorvido para efectuar a mudança de fase (a temperatura não varia).

$$Q = L_V\,m = (2256 \times kJ/kg)\cdot(1\,kg) = 2256\,kJ$$

c) Aplicando a primeira lei da termodinâmica obtém-se:

$$\Delta E_{\text{int}} = Q - W \quad \Leftrightarrow \quad \Delta E_{\text{int}} = (2256\,kJ - 169\,kJ) = 2087\,kJ \approx 2{,}09\,MJ$$

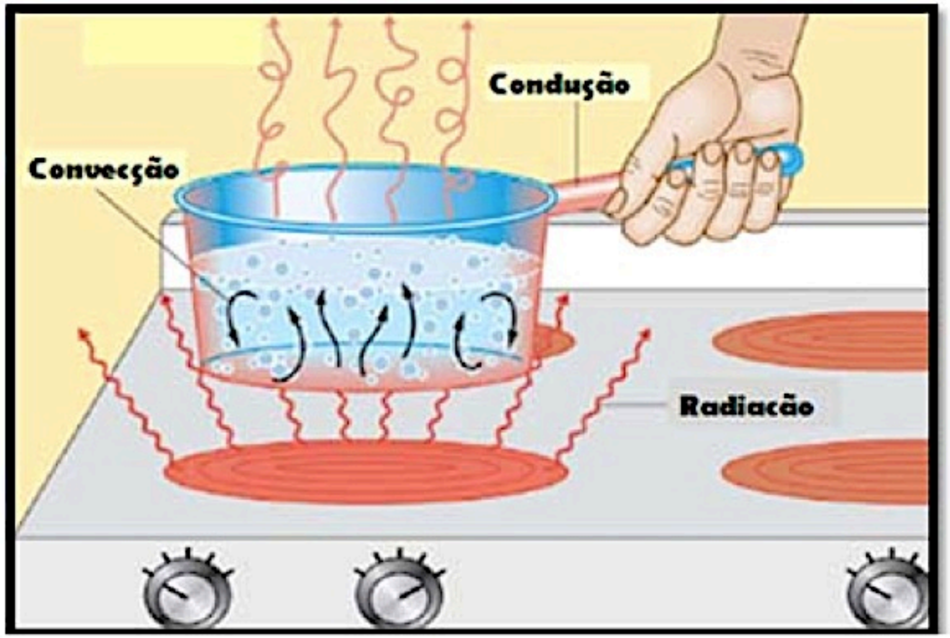
Esta quantidade é positiva indicando que a energia interna do sistema aumentou durante o processo. Esta energia, é utilizada no processo de separação das moléculas de H_2O que se atraíam fortemente na fase liquida. Quando a água evapora, apenas cerca de 7,5% (=169 kJ / 2256 kJ) do calor é utilizado para realizar W. O restante vai para energia interna.

Mecanismos de Transferência de Calor

- A transferência de calor pode ser definida como a transferência de energia de uma região para outra como resultado de uma diferença de temperatura entre elas. É necessário o entendimento dos mecanismos físicos que permitem a transferência de calor de modo a poder quantificar a quantidade de energia transferida na unidade de tempo (potência térmica). Os mecanismos de transferência de calor podem ser classificados da seguinte maneira:

✓ **CONDUÇÃO**
✓ **CONVECÇÃO**
✓ **RADIAÇÃO**

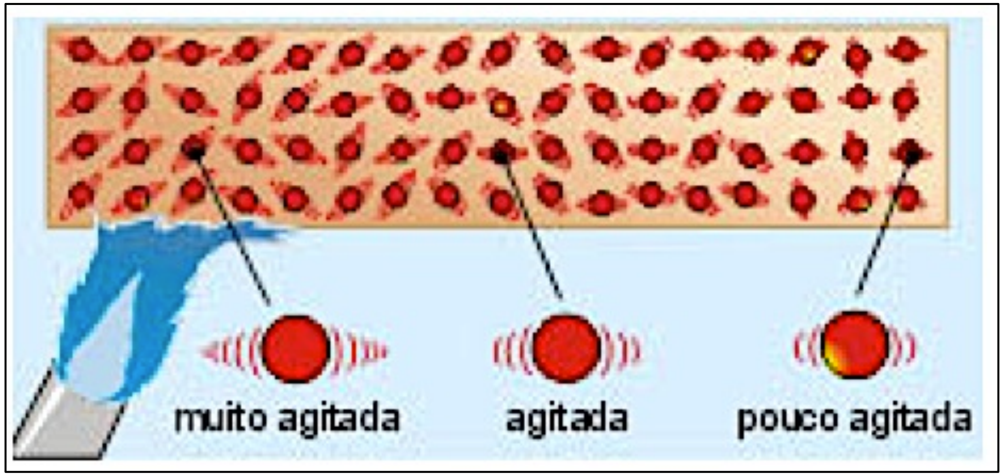
Dependem apenas de um **ΔT**



Joaquim Carneiro

Mecanismos de Transferência de Calor

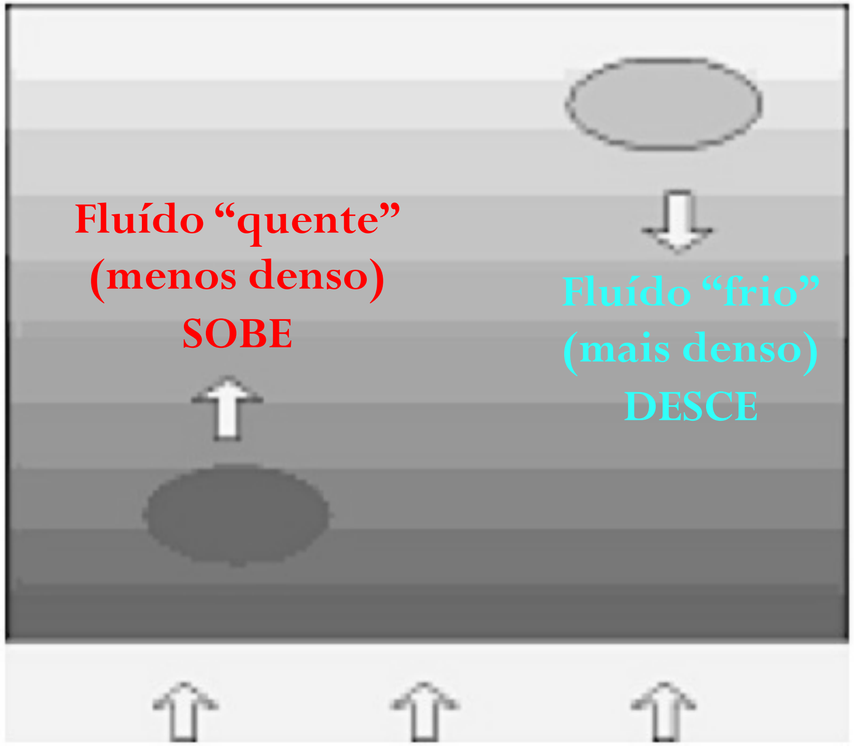
- ***Condução:*** A condução pode ser definida como o processo pelo qual a energia é transferida de uma região a elevada temperatura para outra de temperatura mais baixa dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou entre meios diferentes em contato direto. Este mecanismo pode ser visualizado como a transferência de energia ao longo do material através da colisão entre átomos adjacentes.



- A amplitude de vibração dos átomos e eletrões no lado mais quente (perto da chama) é relativamente elevada. A energia associada (à amplitude de vibração) transfere-se ao longo do material através da colisão entre os átomos adjacentes.

Mecanismos de Transferência de Calor

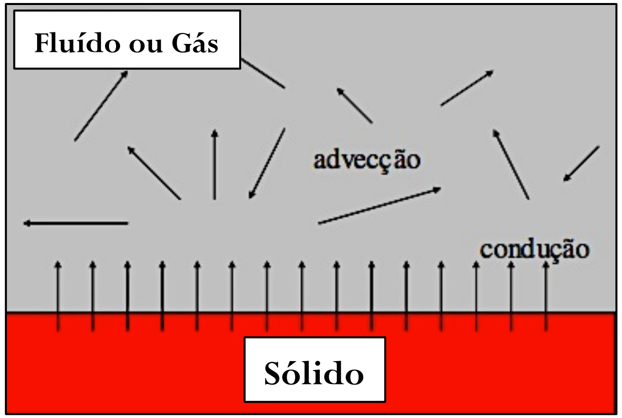
✓ ***Convecção:*** A convecção térmica é um fenómeno que combina o processo de transferência de energia por condução térmica com o **movimento de massa** (havendo portanto, deslocamento de partículas). Por isso, a convecção térmica é um fenómeno que se processa exclusivamente em meios fluídos, ou seja, em líquidos e gases.



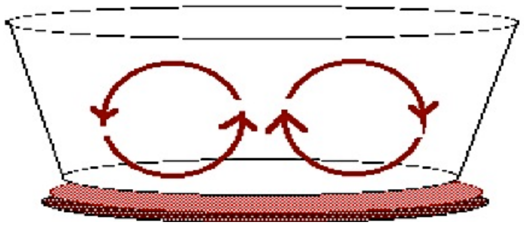
Formas da Convecção

✓ A convecção térmica é normalmente subdividida em dois grandes grupos de acordo com a "força motriz do escoamento":

- ***Convecção Forçada ou Advecção***



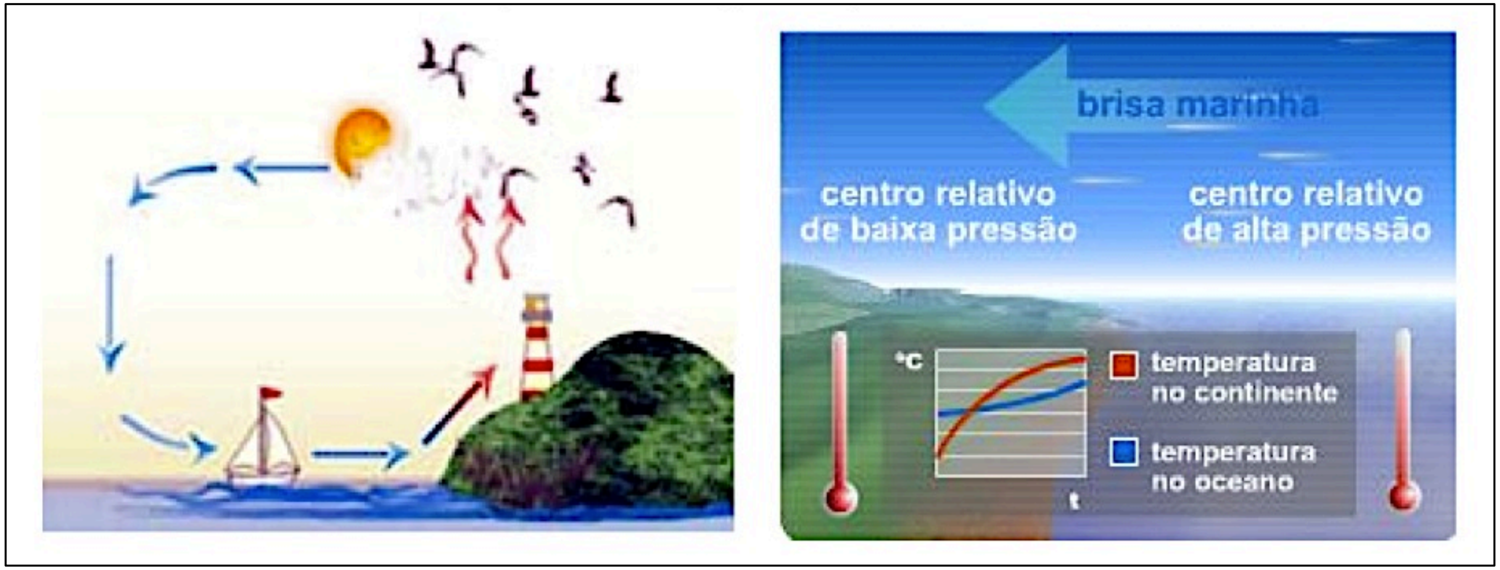
- ***Convecção Natural ou Convecção Livre***



Convecção Térmica

Brisa Marítima

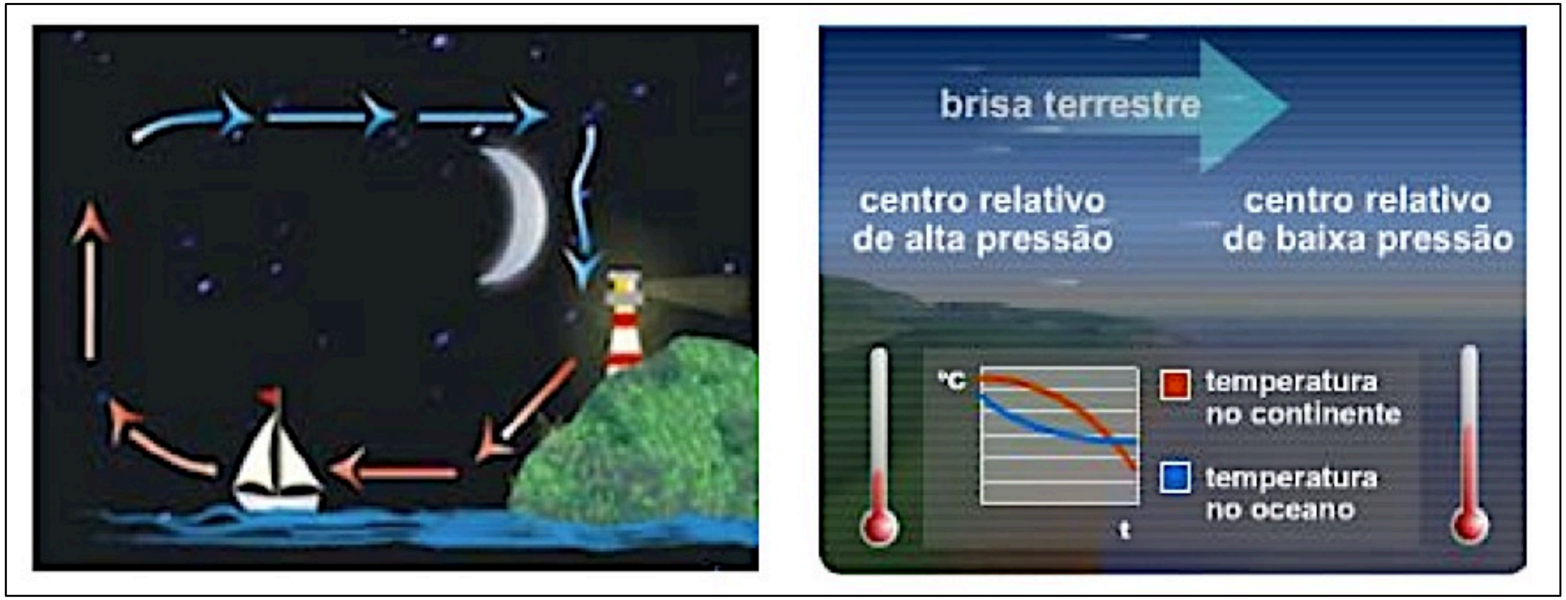
- ✓ Durante o dia a areia da praia aquece-se mais rapidamente do que a água do mar; por convecção natural, o ar mais quente próximo da areia sobe (menos denso) e o ar mais frio (mais denso) proveniente do mar ocupa este espaço, produzindo a brisa marítima.



Convecção Térmica

Brisa Terrestre

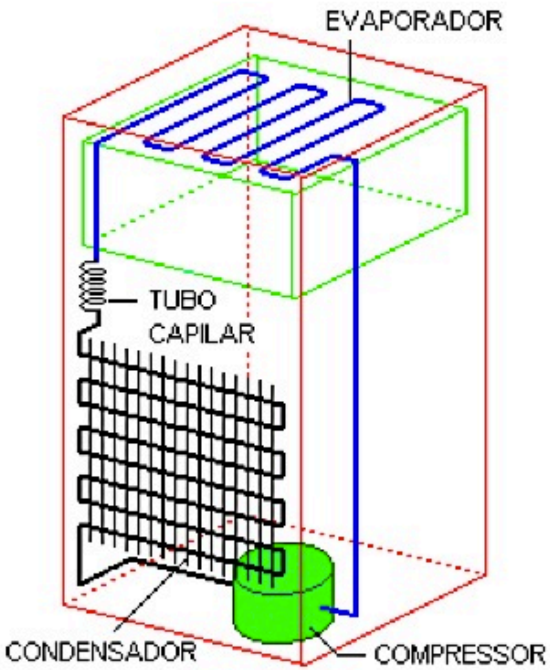
✓ Durante a noite a areia da praia arrefece mais rapidamente do que a água do mar; por convecção natural, o ar mais quente quente próximo da água do mar sobe (menos denso) e o ar mais frio (mais denso) proveniente da areia ocupa este espaço, produzindo a brisa terrestre.

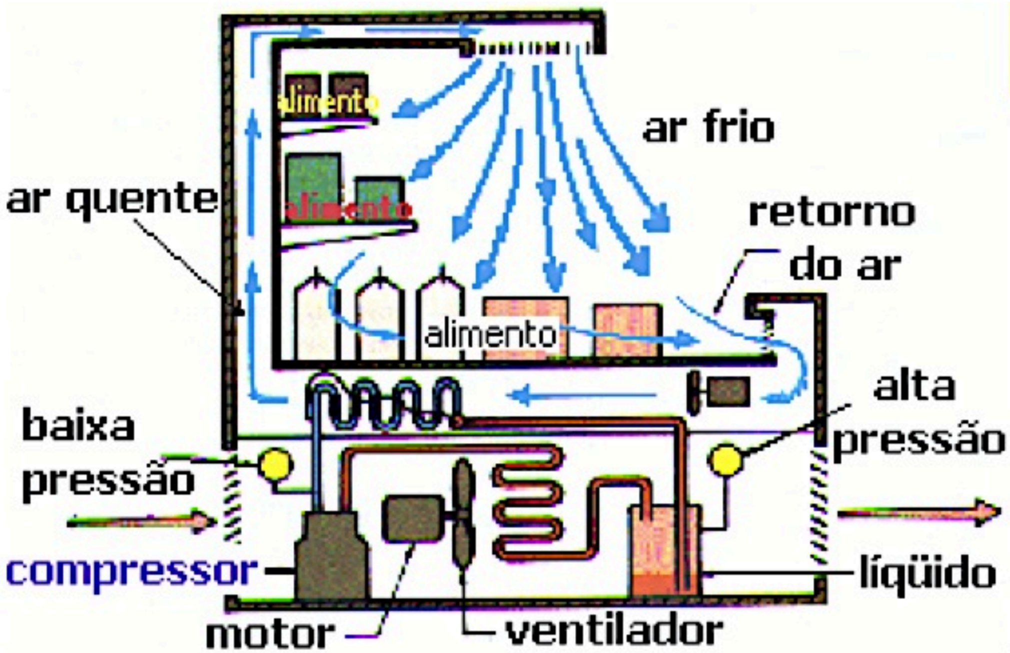


Convecção Térmica

Refrigeração

✓ Os frigoríficos retiram calor de uma região fria e transferem-no para uma região mais quente. As correntes de convecção decorrem das diferenças de densidade do ar. O ar mais frio (camadas superiores) desce e o ar mais quente (camadas inferiores) sobe ocupando o lugar deixado pelas massas mais frias.





Convecção Térmica

Inversão Térmica

- ✓ Em condições normais o ar presente nos primeiros quilómetros da atmosfera (troposfera – a altitude varia entre 8 a 20 km) circula com movimentos verticais. Isto acontece devido à diferença de temperatura existente entre o ar das camadas mais baixas e das camadas mais altas. Nas camadas mais baixas o ar é mais quente e menos denso (mais leve)devido à acção da radiação solar. À medida que sobe, o ar vai arrefecendo até atingir a camada designada por "tropopausa" arrastando consigo partículas poluentes. Enquanto isso, o ar mais frio (mais pesado) desce indo ocupar o espaço deixado pelo ar mais quente.

Joaquim Carneiro

Convecção Térmica

Inversão Térmica

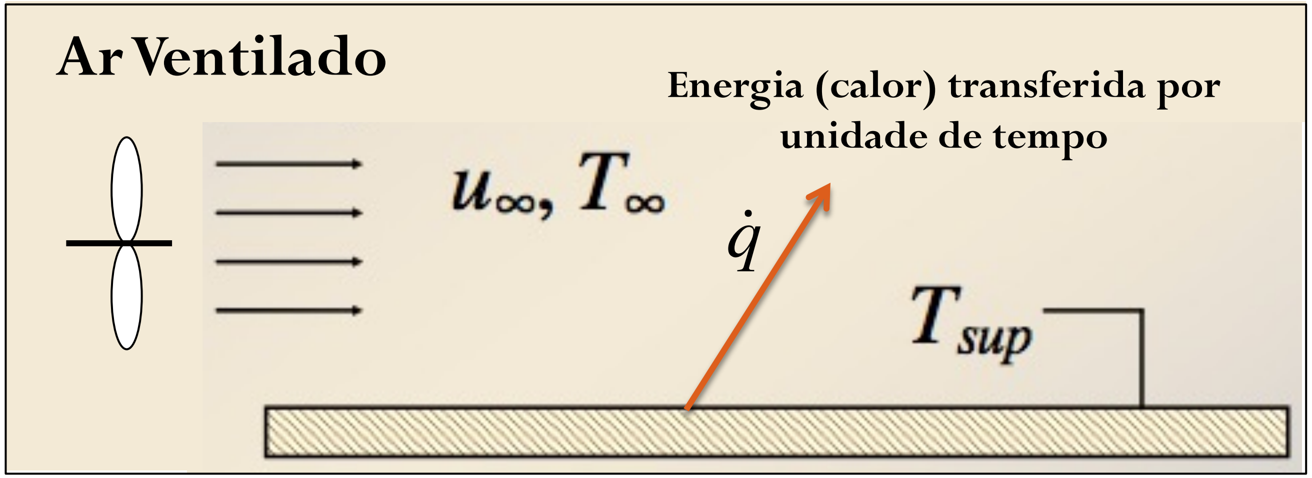
- ✓ Acontece que em alguns dias (mais frequentemente no inverno, quando as noites são mais longas e a humidade baixa) a superfície da terra sobre alguns locais arrefece muito rapidamente e é criada uma camada de ar frio abaixo da primeira camada de ar quente. Esta camada de ar frio, tende a ficar retida pela camada de ar quente, retendo por isso os agentes poluentes (já que deixa de haver circulação de ar). Deste modo, ocorre o fenómeno de ***inversão térmica*** que se pode detectar através da observação no horizonte de uma faixa cinza-alaranjada. Este fenómeno pode agravar os problemas de saúde (respiratórios).

Poluentes aprisionados

Alterações de temperatura e humidade retêm a poluição junto ao solo

Formas da Convecção

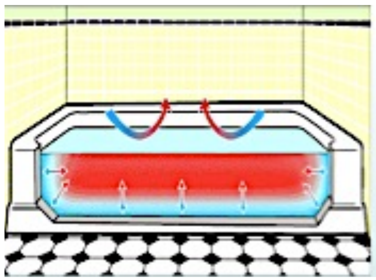
- O mecanismo da convecção pode ser mais facilmente entendido considerando, por exemplo, um circuito impresso (chip) que é arrefecido através de ar ventilado.

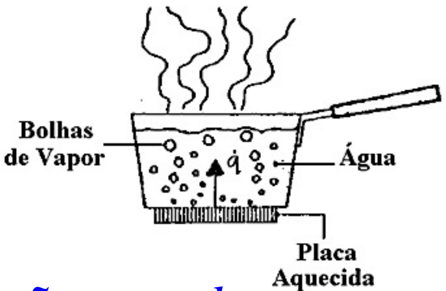


1. A velocidade da camada de ar próxima da superfície é muito baixa devido à acção das forças de atrito (viscoso).
2. Nesta região, o calor é transferido por condução térmica. Ocorre portanto um armazenamento de energia pelas partículas (ar) presentes nesta região.
3. À medida que estas partículas passam para a região de alta velocidade, elas são arrastadas transferindo energia para as partículas mais "frias".

Formas da Convecção

- No caso da figura da página 43 dizemos que a ***convecção foi forçada***, pois o movimento do ar foi induzido por um agente externo, neste caso um ventilador.
- Suponhamos que o ventilador seja retirado. Neste caso, as partículas que estão próximas da superfície continuam a receber calor por ***condução*** e armazenam energia. Estas partículas estão a temperatura elevada e, portanto têm baixa densidade. Atendendo a que são mais leves, elas sobem trocando calor com as partículas mais frias (e mais pesadas) que descem.
- Neste caso dizemos que a ***convecção é natural*** (é óbvio que no primeiro caso a quantidade de calor transferido é maior).
- Um exemplo bastante conhecido de convecção natural é o aquecimento de água numa panela doméstica como mostrado na figura. Para este caso, o movimento das moléculas de água pode ser observado visualmente.





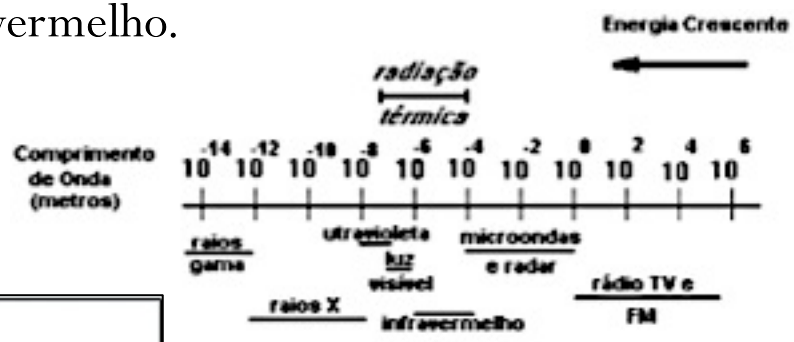
Convecção natural

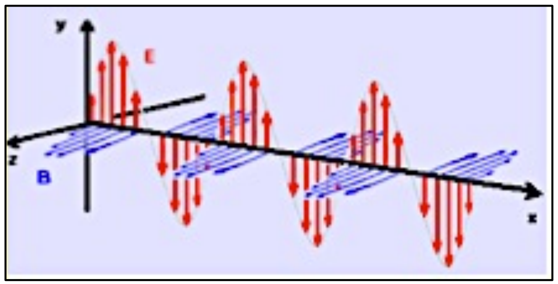
Convecção forçada

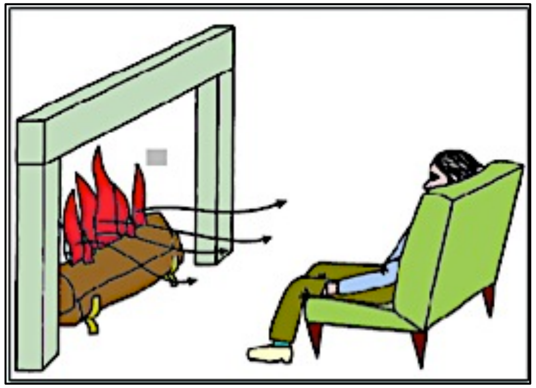
- ✓ ***Radiação:*** A radiação pode se definida como o processo pelo qual o calor é transferido de um superfície a elevada temperatura para um superfície a uma temperatura mais baixa, estando essas superfícies **separadas no espaço** (ainda que exista vácuo entre elas). A energia assim transferida é denominada por ***radiação térmica*** e é efetuada sob a forma de ***ondas eletromagnéticas***.
- O exemplo mais evidente que se pode dar refere-se ao próprio calor que recebemos do sol. Neste caso, mesmo havendo vácuo entre a superfície do sol (cuja temperatura é de aproximadamente 5500 ºC) e a superfície da terra, a vida na terra depende desta energia recebida. Esta energia chega até nós na forma de ondas eletromagnéticas. As ondas eletromagnéticas são comuns a muitos outros fenômenos: raios-X, ondas de rádio e TV, microondas e outros tipos de radiações.
- ✓ As emissões de ondas eletromagnéticas podem ser atribuídas a variações das configurações electrónicas dos átomos e moléculas, e ocorrem devido a vários fenómenos, porém, para a transferência de calor interessam apenas as ondas eletromagnéticas resultantes de uma diferença de temperatura (radiações térmicas). As suas características são:

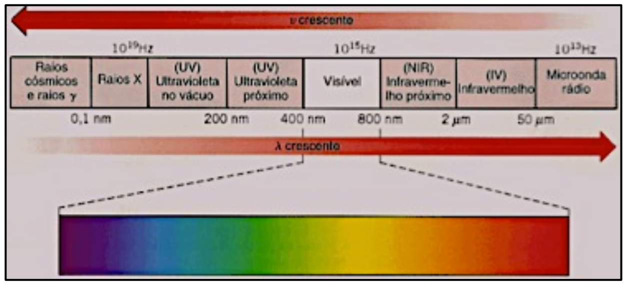
✓ *Radiação:*

- Todos corpos a uma temperatura acima do zero absoluto (0 K) emitem continuamente radiação térmica;
- A intensidade das emissões depende apenas da temperatura e da natureza da superfície emissora. **Não é necessário a presença de um meio material** pois a energia é transportada através de ondas eletromagnéticas. A transferência de calor ocorre devido à propagação de energia através de fotões;
- A região espectral da radiação térmica inclui uma faixa da radiação ultravioleta e todas as faixas da luz visível e da radiação infravermelho.





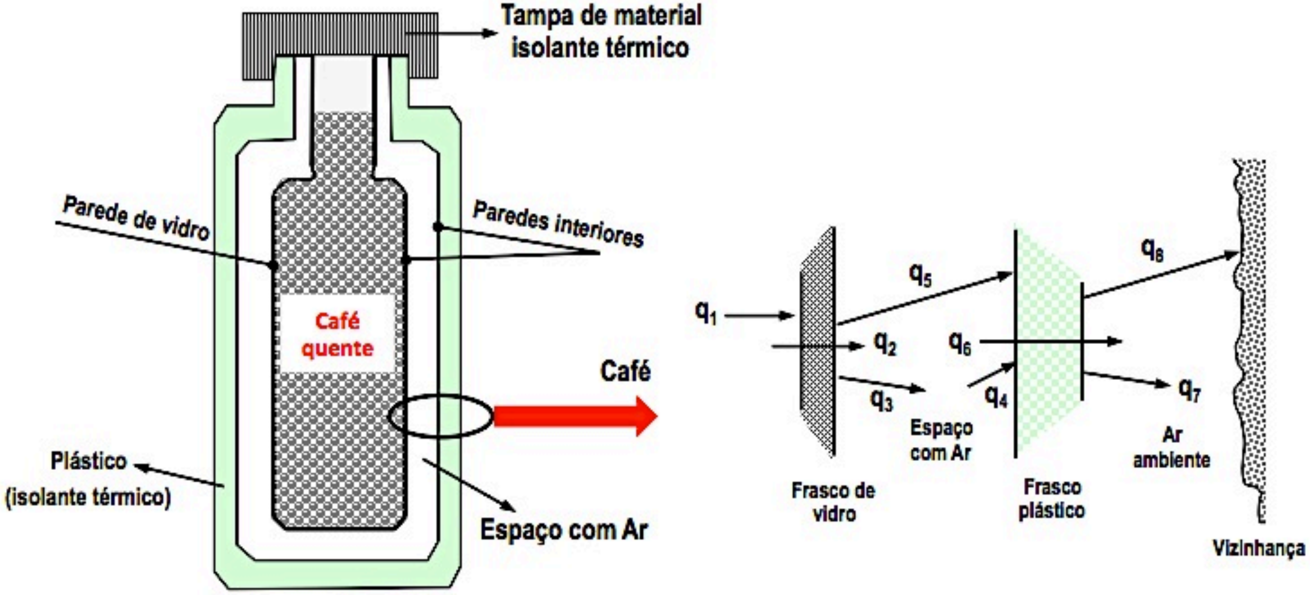




Joaquim Carneiro

✓ *Mecanismos combinados:*

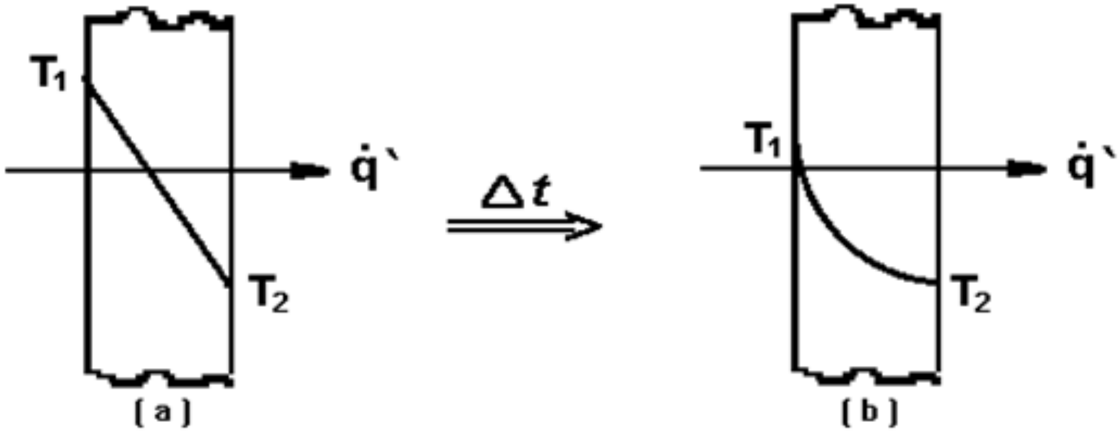
Como exemplo de um sistema onde ocorrem ao mesmo tempo vários mecanismos de transferência de calor consideremos uma garrafa térmica. Neste caso, podemos ter a atuação conjunta dos seguintes mecanismos esquematizados na figura.



q1 : convecção natural entre o café e a parede do frasco de vidro
q2 : condução através da parede do frasco de vidro
q3 : convecção natural do frasco para o ar
q4 : convecção natural do ar para a frasco plástico
q5 : radiação entre as superfícies externa do frasco de vidro e interna do frasco plástico
q6 : condução através do frasco plástico
q7 : convecção natural do frasco plástico para o ar ambiente
q8 : radiação entre a superfície externa do frasco plástico e a vizinhança

Regimes de Transferência de Calor

- O conceito de regime de transferência de calor pode ser melhor entendido através de exemplos práticos. Analisemos, por exemplo, a transferência de calor através duma parede de uma estufa qualquer. Consideremos duas situações : ***operação normal*** e ***desligar***.
- Durante a ***operação normal***, enquanto a estufa estiver ligada a temperatura na superfície interna da parede não varia. Se a temperatura ambiente externa não variar significativamente, a temperatura da superfície externa também é constante. Sob estas condições a quantidade de calor transferida para fora é constante e o perfil de temperatura ao longo da parede, mostrado na **figura (a)**, não varia. Neste caso, dizemos que estamos no **regime permanente ou estacionário**.



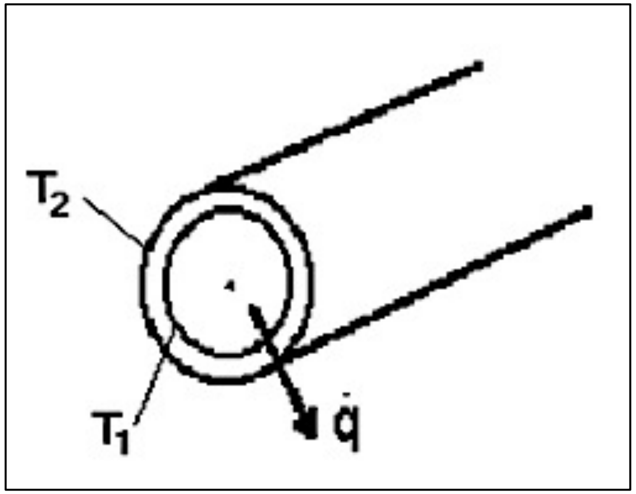
Joaquim Carneiro

Regimes de Transferência de Calor

- Na outra situação consideremos, por exemplo, a operação de ***desligar***. Quando a estufa é desligada, a temperatura na superfície interna diminui gradualmente, de modo que o perfil de temperatura varia com o tempo, como pode ser observado na **figura (b) da página 48**. Como consequência, a quantidade de calor transferida para fora é cada vez menor. Portanto, a temperatura em cada ponto da parede varia. Neste caso, dizemos que se está perante um **regime transiente**.
- Os problemas de fluxo de calor em regime transiente são mais complexos. **Entretanto, a maioria dos problemas de transferência de calor são ou podem ser tratados como regime permanente.**

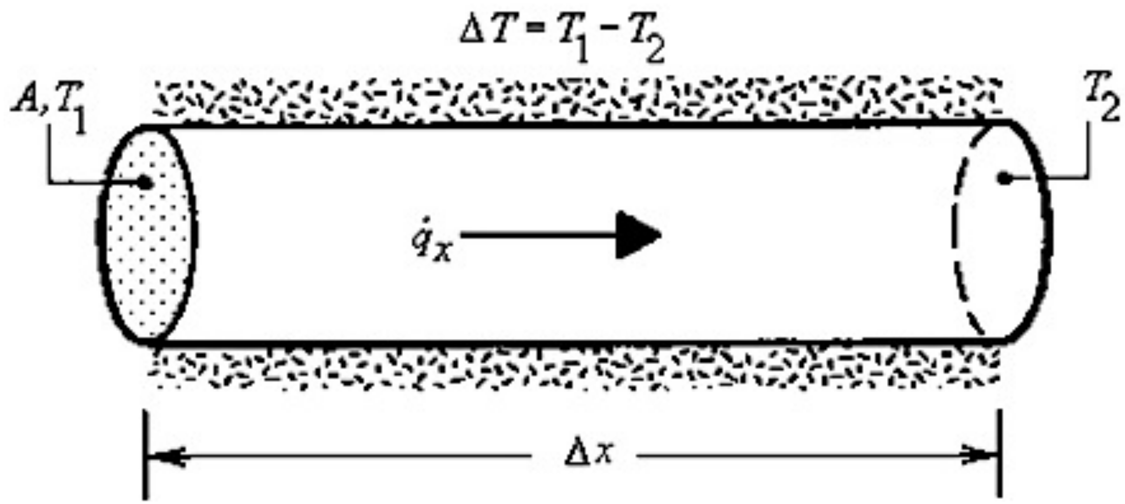
ANÁLISE QUANTITATIVA

- No tratamento unidimensional a temperatura é função de apenas uma coordenada. Este tipo de tratamento pode ser aplicado em muitos dos problemas industriais. Por exemplo, no caso da transferência de calor num sistema que consiste num fluido que escoa ao longo de um tubo, a temperatura da parede do tubo pode ser considerada função apenas do raio do tubo. Esta suposição é válida se o fluido escoa uniformemente ao longo de toda a superfície interna e se o tubo não for suficientemente longo para que ocorram grandes variações de temperatura do fluido devido à transferência de calor.



- **LEI DE FOURIER**

✓ A lei de Fourier é empírica, ou seja, foi desenvolvida a partir da observação dos fenómenos da natureza durante a realização de determinadas atividades experimentais. Imaginemos uma experiência onde o **fluxo de calor** resultante é medido após a variação das condições experimentais. Consideremos, por exemplo, a transferência de calor através de uma barra de ferro com uma das extremidades aquecidas e com a área lateral isolada termicamente, como mostra a figura :



Joaquim Carneiro

ANÁLISE QUANTITATIVA

✓ A lei de Fourier pode ser enunciada do seguinte modo:

- **A quantidade de calor transferida por condução, na unidade de tempo, através de um material, é igual ao produto das seguintes quantidades:**

$$\boxed{P = \frac{Q}{t} = \dot{q} = -k\,A\,\frac{dT}{dx}}$$

Potência térmica = energia é transferida ao longo do material pela colisão entre átomos adjacentes

onde,

$\dot{q}$, **potência térmica** (ou fluxo de calor) por condução (J/s);

k, **condutividade térmica** do material (W/m.K);

A, área da seção através da qual o calor flui por condução, medida perpendicularmente à direção do fluxo (m^2);

dT/dx, gradiente de temperatura na seção, isto é, a taxa de variação da temperatura T com a distância, na direção x do fluxo de calor (K/m) ."

ANÁLISE QUANTITATIVA

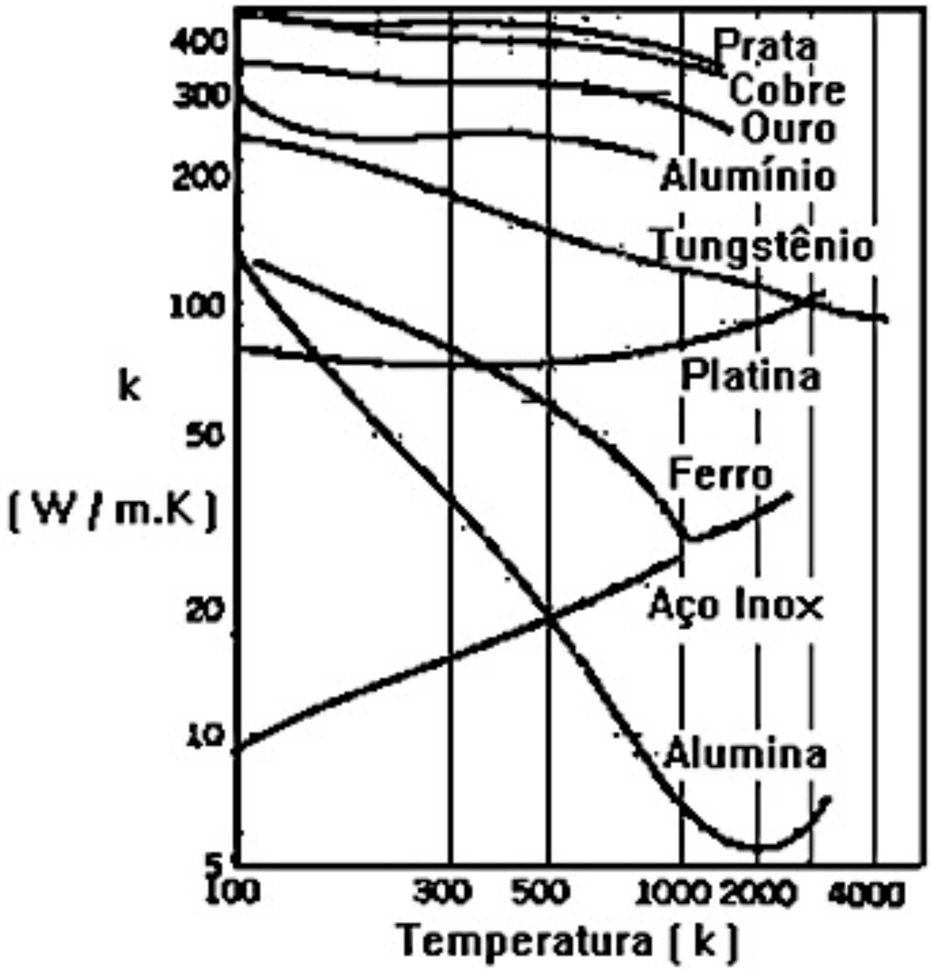
- A razão do sinal menos na equação de Fourier deve-se ao facto de que o sentido do aumento da distância x deve ser o sentido do fluxo de calor positivo. Como o calor flui do ponto a temperatura mais elevada para o de temperatura mais baixa (gradiente negativo), o fluxo só será positivo quando o gradiente for positivo (multiplicado por -1).
- O fator de proporcionalidade ***k*** (condutividade térmica) que aparece na equação de Fourier é uma **propriedade de cada material** e exprime a maior ou menor facilidade que um material apresenta à condução de calor.
- Os valores numéricos de ***k*** variam bastante dependendo da constituição química, estado físico e temperatura dos materiais. Quando o valor de *k* é elevado o material é considerado um bom **condutor térmico** e, caso contrário, um **isolante térmico**

ALGUNS VALORES DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Substância	k (W/m.K)	Substância	k(W/m.K)
Aço inox	14	ar (seco)	0,026
Chumbo	35	Hélio	0,15
Ferro	67	Hidrogênio	0,18
Bronze	109		
Alumínio	235	isopor	0,024
Cobre	401	lã de rocha	0,043
Prata	428	fibra de vidro	0,048
		Pinho branco	0,11
		Vidro de janela	1,0

Joaquim Carneiro

- Em relação à temperatura, para alguns materiais como o alumínio e o cobre, o ***k*** varia muito pouco com a temperatura, porém para outros, como alguns aços, o ***k*** varia significativamente com a temperatura. Nestes casos, adota-se como solução de engenharia um valor médio de ***k*** num intervalo de temperatura.

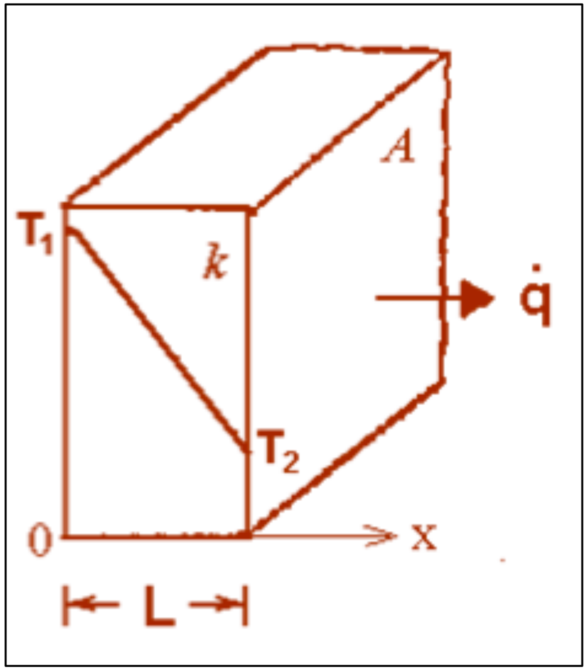


Joaquim Carneiro

- **CONDUÇÃO DE CALOR ATRAVÉS DUMA PAREDE PLANA**

✓ Consideremos a transferência de calor por condução através de uma **parede plana** sujeita a uma diferença de temperatura. Ou seja, sujeita a uma fonte de calor, a temperatura constante e conhecida, de um lado, e a um sorvedouro de calor do outro lado, também de temperatura constante e conhecida. Um bom exemplo desta situação corresponde à transferência de calor através da parede de um forno, como pode ser observado na figura seguinte, que tem espessura **L**, área transversal **A** e foi construído com um material de condutividade térmica **k**. Do lado de dentro, a fonte de calor mantém a temperatura na superfície interna da parede constante e igual a $\mathbf{T_1}$ e externamente, o sorvedouro de calor (meio ambiente ,) faz com que a superfície externa permaneça igual a $\mathbf{T_2}$.

ANÁLISE QUANTITATIVA



- Aplicado a equação de Fourier, obtém-se:

$$\boxed{\dot{q}\,dx = -k\,A\,dT}$$

- Na figura vemos que na face interna (x=0) a temperatura é T_1 e na face externa (x=L) a temperatura é T_2. Para a transferência em regime permanente, o calor transferido não varia com o tempo. Como a área transversal da parede é uniforme, a integração da equação permite escrever:

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

$$\dot{q}\,L = -k\,A\left(T_2 - T_1\right) \Leftrightarrow$$

$$\dot{q}\,L = k\,A\left(T_1 - T_2\right)$$

$$\boxed{\dot{q} = -\frac{k\,A}{L}\Delta T \quad \Leftrightarrow \quad \dot{q} = \frac{k\,A}{L}(T_1 - T_2)}$$

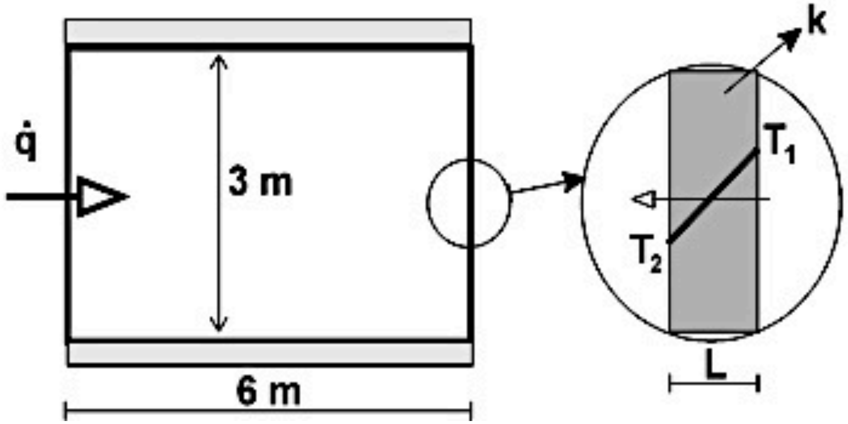
Fluxo de calor a que atravessa a parede plana por condução

- Para melhor se entender o significado da equação da transferência de calor, consideremos um exemplo prático. Suponhamos que o engenheiro responsável pela operação de um forno necessita reduzir as perdas térmicas (i.e. reduzir o fluxo de calor) através da parede de um forno, por razões económicas. O engenheiro tem, por exemplo, as opções listadas na tabela seguinte:

OBJETIVO	VARIÁVEL	AÇÃO
$\dot{q}\downarrow$	$k\downarrow$	trocar a parede por outra de menor condutividade térmica
	$A\downarrow$	reduzir a área superficial do forno
	$L\uparrow$	aumentar a espessura da parede
	$\Delta T\uparrow$	reduzir a temperatura interna do forno

- Aumentar a espessura da parede (i.e. trocar a parede) ou reduzir a temperatura interna são ações de difícil implementação; porém, a colocação de isolamento térmico sobre a parede cumpre ao mesmo tempo as ações de redução da condutividade térmica e aumento de espessura da parede.

- **Exercício 1:** Um equipamento de ar condicionado deve manter uma sala, de 15 m de comprimento, 6 m de largura e 3 m de altura a 22 ºC. As paredes da sala, de 25 cm de espessura, são constituídas por tijolos com condutividade térmica de 0,14 kcal/h.m.ºC e a área das janelas podem ser consideradas desprezáveis. A face externa das paredes pode estar até a 40 ºC num dia de verão. Desprezando a troca de calor pelo piso e pelo teto, que estão bem isolados, pretende-se calcular o calor a ser extraído da sala pelo aparelho de ar condicionado.



Joaquim Carneiro

- Para o cálculo da área de transferência de calor desprezamos as áreas do teto e piso, onde a transferência de calor não ocorre. Não considerando a influência das janelas, a área das paredes da sala é :

$$A = 2\times(6\times3)+2\times(15\times3) = 126\,m^2$$

- Aplicando a equação de transferência de calor obtém-se:

$$\dot{q} = \frac{k.A}{L}.(T_1 - T_2) = \frac{0{,}14\left(Kcal/h.m.^oC\right)\times126\,m^2}{0{,}25\,m}\times(40-22)\,^oC \approx 1270\,Kcal/h$$

$$\dot{q} = 1270\cdot\frac{4186{,}8\,J}{3600\,s} \approx 1477\,J/s = 1477\,W$$

- Portanto, a potência térmica requerida para que o aparelho de ar condicionado mantenha a sala refrigerada é de ≈ 1,48 kW.

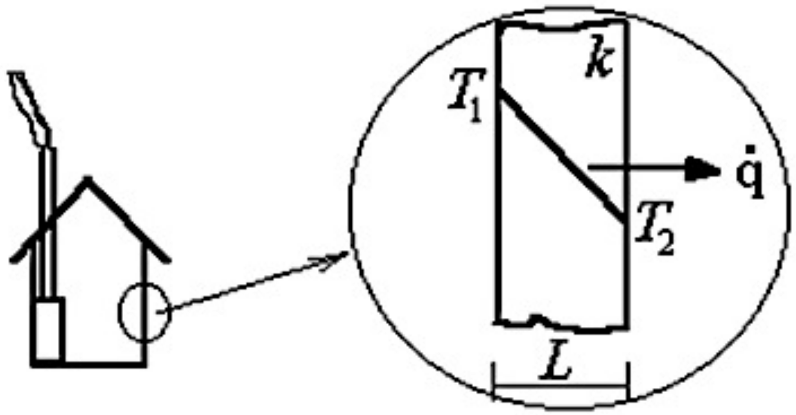
- **Exercício 2:** As superfícies internas de um grande edifício são mantidas a 20 ºC, enquanto que a temperatura na superfície externa é de -20 ºC. As paredes medem 25 cm de espessura, e foram construídas com tijolos de condutividade térmica de 0,6 kcal/h .m .ºC.

a) Calcule a perda de calor para cada metro quadrado de superfície por hora.

b) Sabendo-se que a área total do edifício é 1000 m^2 e que o calor latente do carvão é de 5500 kcal/kg, determine a quantidade de carvão a ser utilizada num sistema de aquecimento durante um período de 10 h. Suponha que o rendimento (η) do sistema de aquecimento é igual a 50%.

$T_1 = 20^oC \quad T_2 = -20^oC \quad k = 0,6\, kcal/h.m.^oC$

$L = 25cm = 0,25m$



Joaquim Carneiro

ANÁLISE QUANTITATIVA

a) Desprezando a condutividade térmica da argamassa entre os tijolos, aplica-se a equação de Fourier para paredes planas. Para $A = 1\ m^2$

$$\frac{\dot{q}}{A} = \frac{k}{L}\left(T_1 - T_2\right) \quad \rightarrow \quad \dot{q}/1m^2 = \frac{0,6\left(kcal/h.m.^oC\right)}{0,25m} \cdot \left[20 - \left(-20\right)\right]\ ^oC = 96\ kcal/h/m^2$$

b) Esta perda de calor deve ser reposta pelo sistema de aquecimento, de modo a manter o interior a 20 °C. A perda de calor através da área total do edifício é:

$$\boxed{A = 1000m^2 \quad \text{então,} \quad \dot{q}_t = 96 \times 1000 = 96000\ kcal/h}$$

- O tempo de utilização do sistema de aquecimento é 10 horas. Neste período, a energia perdida para o exterior é:

$$\dot{q}_t = \frac{Q}{t} \quad \Rightarrow \quad Q = \dot{q}_t\ t = 96000\ kcal/h \times 10h = 960000 kcal$$

- Como o rendimento do sistema é de 50%, a quantidade de calor (Q_f) a ser fornecida pelo carvão é :

$$Q_f = \frac{Q}{\eta} = \frac{960000}{0,5} = 192 \times 10^4\ kcal$$

- Cada quilo de carvão pode fornecer 5500 *kcal*, então a quantidade de carvão é:

$$m_{carvão} = \frac{192 \times 10^4\ kcal}{5500\ kcal/kg} = 349kg$$

Joaquim Carneiro

- **ANALOGIA ENTRE RESISTÊNCIA TÉRMICA E RESISTÊNCIA ELÉTRICA**

✓ Dois sistemas são análogos quando eles obedecem a equações semelhantes. Tal significa que a equação que descreve um sistema pode ser transformada numa equação para outro sistema pela simples troca dos símbolos das variáveis. Por exemplo, a equação que descreve o fluxo de calor através de uma parede plana pode ser colocada na seguinte forma :

$$\boxed{\dot{q} = \frac{k\,A}{L}(T_1 - T_2) \quad \Leftrightarrow \quad \dot{q} = \frac{(T_1 - T_2)}{\dfrac{L}{k\,A}}}$$

- O denominador e o numerador da equação anterior podem ser entendidos da seguinte maneira:

ANÁLISE QUANTITATIVA

- $(\Delta T = T_1 - T_2)$ é a diferença entre a temperatura da face quente (T_1) e da face fria (T_2), e representa o **potencial térmico** que provoca a transferência de calor.
- $(L \,/\, k.A)$ é equivalente a uma **resistência térmica** (***R***) que a parede oferece à transferência de calor.

✓ Portanto, o fluxo de calor através da parede pode ser expresso da seguinte forma :

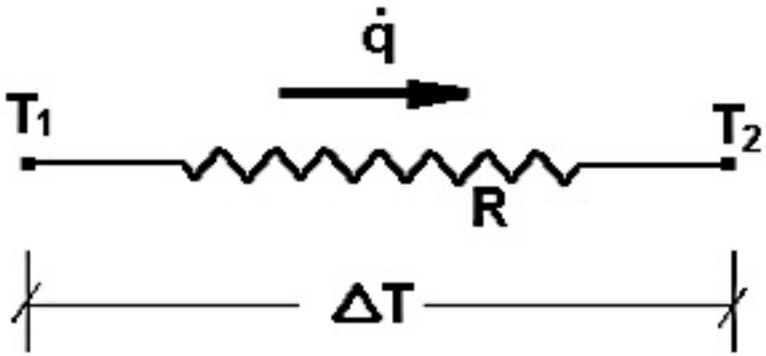
$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{R} \qquad \text{onde,} \quad \Delta T \text{ é o potencial térmico e}$$

$$R \text{ é a resistência térmica da parede}$$

✓ Se substituirmos na equação anterior o símbolo do potencial térmico ΔT pelo do potencial elétrico, isto é, a diferença de tensão eléctrica **ΔV**, e o símbolo da resistência térmica ***R*** pelo da resistência elétrica R_e, obtemos a lei de Ohm, sendo ***i*** a intensidade de corrente eléctrica :

$$\boxed{i = \frac{\Delta V}{R_e}}$$

- Usando esta analogia, é comum a utilização de uma notação semelhante à utilizada em circuitos eléctricos, quando representamos a resistência térmica de uma parede ou associações de paredes. Assim, uma parede de resistência térmica $\boldsymbol{R}$, sujeita a um potencial térmico $\boldsymbol{\Delta T}$ e atravessada por um fluxo de calor $\dot{q}$, pode ser representada da seguinte maneira:

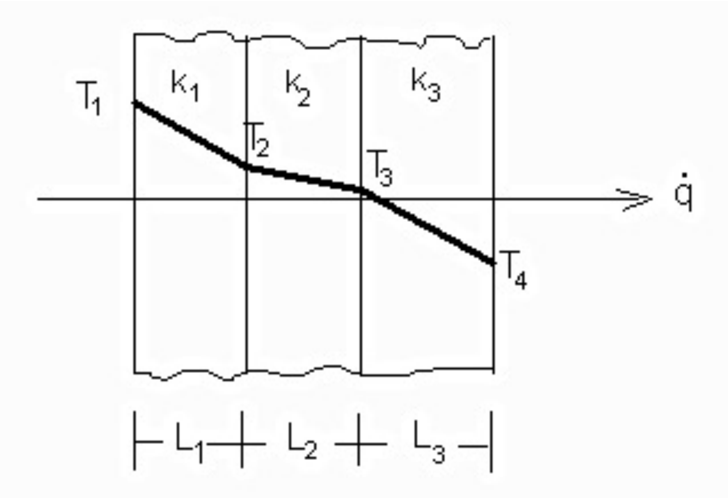


- **ASSOCIAÇÃO DE PAREDES PLANAS EM SÉRIE**

✓ Estudemos agora as diferentes formas de associar as paredes. Iniciamos o estudo pela associação em série.

ANÁLISE QUANTITATIVA

- Consideremos um sistema de paredes planas **associadas em série**, sujeitas a uma **fonte de calor**, de temperatura constante e conhecida, de um lado e a um **sorvedouro de calor** do outro lado, também de temperatura constante e conhecida. Assim, haverá a transferência de um fluxo de calor contínuo no regime permanente através da parede composta. Como exemplo, analisemos a transferência de calor através da parede de um forno, que pode ser composta por uma uma camada interna de material refratário (condutividade k_1 e espessura L_1), uma camada intermédia de isolante térmico (condutividade k_2 e espessura L_2) e uma camada externa de chapa de aço (condutividade k_3 e espessura L_3). A figura mostra o perfil de temperatura ao longo da espessura da parede composta :



ANÁLISE QUANTITATIVA

- O fluxo de calor que atravessa a parede composta pode ser obtido a partir do fluxo que atravessa cada uma das paredes planas (o mesmo, atendendo à analogia eléctrica). Assim, pode-se escrever:

$$\dot{q} = \frac{k_1 A_1}{L_1}(T_1 - T_2); \quad \dot{q} = \frac{k_2 A_2}{L_2}(T_2 - T_3); \quad \dot{q} = \frac{k_3 A_3}{L_3}(T_3 - T_4)$$

- Como as paredes estão em série (equivalente a resistências eléctricas em série), o potencial térmico total (equivalente à queda total do potencial eléctrico) é igual à soma dos potencias térmicos individuais (equivalente à soma das quedas de potencial eléctrico individuais):

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3$$

✓ Onde ΔV_1, ΔV_2 e ΔV_3 corresponderiam, respectivamente às quedas de potencial eléctrico através das resistências eléctricas R_1, R_2 e R_3.

ANÁLISE QUANTITATIVA

- Utilizando ainda a analogia eléctrica, é sabido que:

$$\Delta V_1 = i\,R_1 \quad ; \quad \Delta V_2 = i\,R_2 \quad ; \quad \Delta V_3 = i\,R_3$$

✓ Então:

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3$$

$$\Delta V = i\,R_1 + i\,R_2 + i\,R_3 \quad \Leftrightarrow \quad \Delta V = i\,(R_1 + R_2 + R_3) \Rightarrow i = \frac{\Delta V}{(R_1 + R_2 + R_3)}$$

- Para as paredes, pode-se escrever:

$$(T_1 - T_2) = \dot{q} \cdot \frac{L_1}{k_1.A_1} \mapsto \textit{ptencial térmico}\, 1$$

$$(T_2 - T_3) = \dot{q} \cdot \frac{L_2}{k_2.A_2} \mapsto \textit{ptencial térmico}\, 2$$

$$(T_3 - T_4) = \dot{q} \cdot \frac{L_3}{k_3.A_3} \mapsto \textit{ptencial térmico}\, 3$$

ANÁLISE QUANTITATIVA

- Somando os potenciais térmicos obtém-se:

$$(T_1 - T_2) = \dot{q} \cdot \frac{L_1}{k_1.A_1}$$

$$(T_2 - T_3) = \dot{q} \cdot \frac{L_2}{k_2.A_2}$$

$$(T_3 - T_4) = \dot{q} \cdot \frac{L_3}{k_3.A_3}$$

$$T_1 - T_2 + T_2 - T_3 + T_3 - T_4 = \dot{q} \cdot \left(\frac{L_1}{k_1.A_1} + \frac{L_2}{k_2.A_2} + \frac{L_3}{k_3.A_3} \right)$$

- Ou seja: $(T_1 - T_4) = \dot{q} \cdot \left(\frac{L_1}{k_1 A_1} + \frac{L_2}{k_2 A_2} + \frac{L_3}{k_3 A_3} \right) \Rightarrow \dot{q} = \dfrac{T_1 - T_4}{\left(\frac{L_1}{k_1 A_1} + \frac{L_2}{k_2 A_2} + \frac{L_3}{k_3 A_3} \right)}$

$$\boxed{R_1 = \frac{L_1}{k_1 A_1} \quad ; \quad R_2 = \frac{L_2}{k_2 A_2} \quad ; \quad R_3 = \frac{L_3}{k_3 A_3}}$$

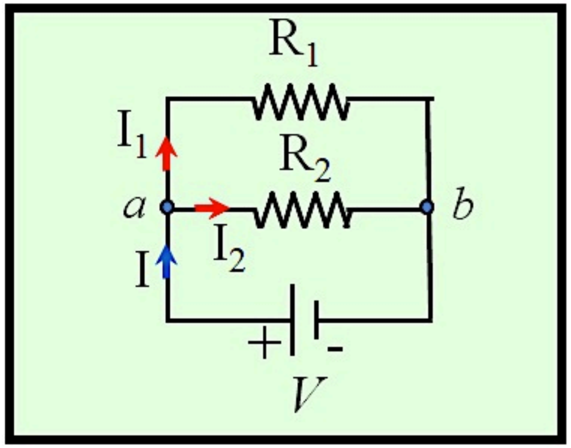
✓ Logo: $\boxed{\dot{q} = \dfrac{T_1 - T_4}{(R_1 + R_2 + R_3)}}$

- Portanto, para o caso geral em que temos uma associação de ***n*** paredes planas associadas em série, o fluxo de calor é dado por :

$$\boxed{\dot{q} = \frac{(\Delta T)_{total}}{R_t}, \qquad onde \quad R_t = \sum_{i=1}^{n} R_i = R_1 + R_2 + \cdots + R_n}$$

- **ASSOCIAÇÃO DE PAREDES PLANAS EM PARALELO.**

Analogia eléctrica



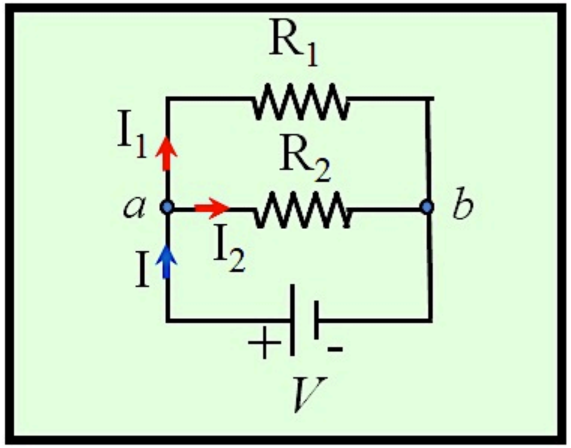
Resistências em Paralelo

- A diferença de potencial é a mesma em ambas as resistências;
- A soma das correntes que entram num nó é igual à soma das correntes que saem desse nó;
- $\mathbf{I = I_1 + I_2}$ (a corrente I que entra no nó "a" deve ser igual à corrente que sai deste nó, $I_1 + I_2$).

- **Leis de Kirchhoff (análise de circuitos eléctricos)**

1. A *soma das correntes que entram num nó é igual à soma das correntes que saem desse nó* (um nó é qualquer ponto do circuito onde é possível a divisão da corrente) ⇒ **Lei dos Nós**
2. A *soma algébrica das variações de potencial em todos os elementos duma malha fechada do circuito é nula* ⇒ **Lei das Malhas**

Resistências em Paralelo



$$I = I_1 + I_2 = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} = V\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) = \frac{V}{R_{eq}}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \rightarrow \quad R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

- **Para três ou mais resistências**

$$\boxed{\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

- **ASSOCIAÇÃO DE PAREDES PLANAS EM PARALELO**.

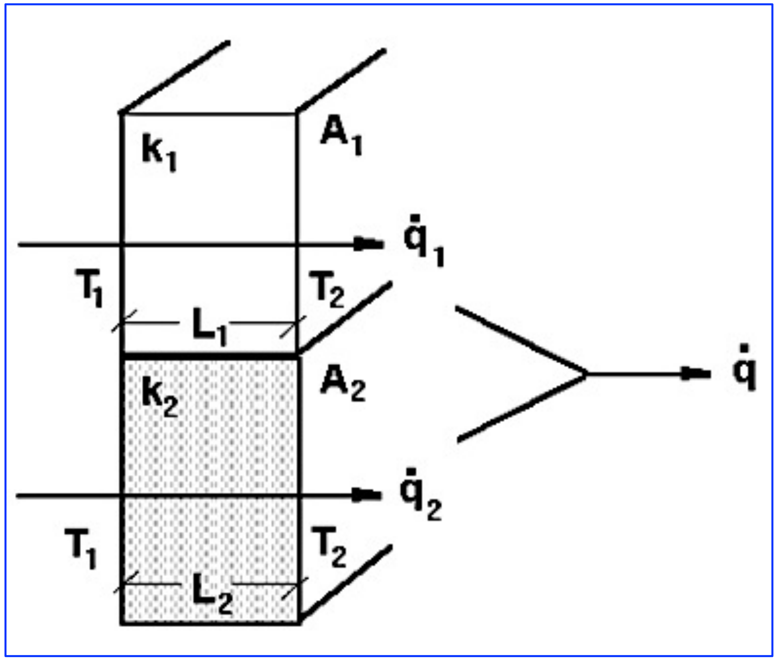
✓ Consideremos um sistema de paredes planas associadas em paralelo, sujeitas a uma fonte de calor , de temperatura constante e conhecida, de um lado e a um sorvedouro de calor do outro lado, também de temperatura constante e conhecida, do outro lado. Assim, haverá a transferência de um fluxo de calor contínuo no regime permanente através da parede composta. Como exemplo, analisemos a transferência de calor através da parede de um forno, que pode ser composta por uma metade inferior de material ***refratário especial*** (condutividade $\boldsymbol{k_2}$) e uma metade superior de refratário comum (condutividade $\boldsymbol{k_1}$), como mostra a figura. Faremos as seguintes considerações :

✧ Todas as paredes estão sujeitas à mesma diferença de temperatura;
✧ As paredes podem ser de materiais e/ou dimensões diferentes;
✧ O fluxo de calor total é igual à soma dos fluxos de cada parede individual.

ANÁLISE QUANTITATIVA

- ✓ O fluxo de calor que atravessa a parede composta pode ser obtido através do fluxo relativo a cada uma das paredes planas individualmente :

$$\dot{q}_1 = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{L_1}{k_1 A_1}} \quad ; \quad \dot{q}_2 = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{L_2}{k_2 A_2}}$$



- ✓ O fluxo de calor total é igual a soma dos fluxos (**lei dos nós**)

$$\dot{q} = \dot{q}_1 + \dot{q}_2 = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{L_1}{k_1 A_1}} + \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{L_2}{k_2 A_2}} = \left[\frac{k_1 A_1}{L_1} + \frac{k_2 A_2}{L_2}\right](T_1 - T_2)$$

$$\boxed{R = \frac{L}{k\,A} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{R} = \frac{k\,A}{L}}$$

A partir da definição de ***resistência térmica*** para uma parede plana

$$\dot{q} = \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right](T_1 - T_2) = \frac{(T_1 - T_2)}{R_t} \qquad \text{onde,} \quad \frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

ANÁLISE QUANTITATIVA

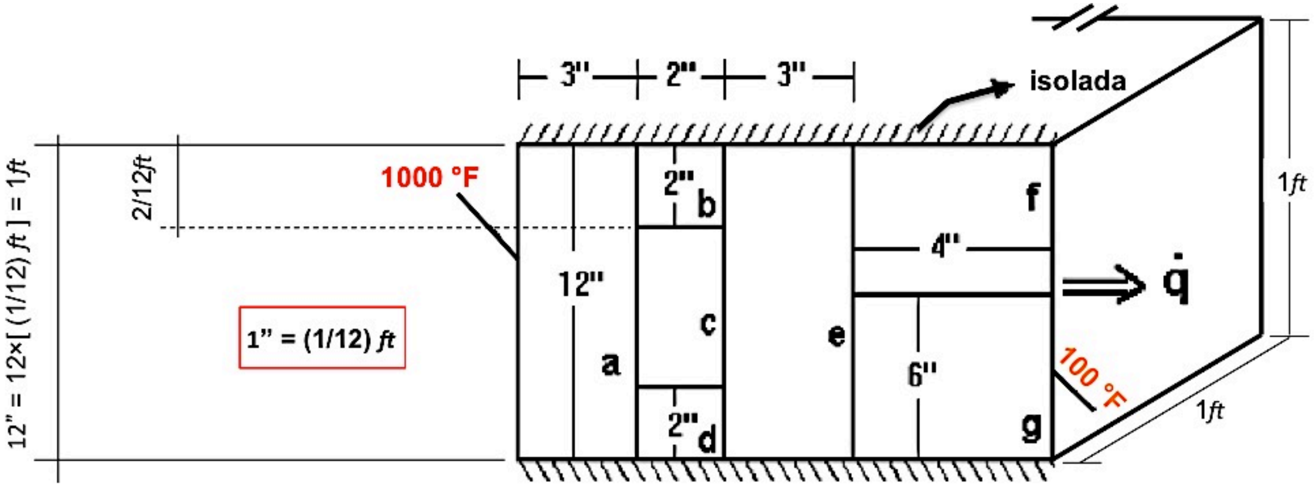
✓ Portanto, para o caso geral em que temos uma associação de ***n*** paredes planas associadas em paralelo, o fluxo de calor é dado por :

$$\dot{q} = \frac{(\Delta T)_{total}}{R_t}, \quad onde \quad \frac{1}{R_t} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}$$

- **Exercício:** Calcular o fluxo de calor através da parede composta representada na figura seguinte. Calcule ainda a temperatura do lado direito da parede **"b"**.

✓ onde:

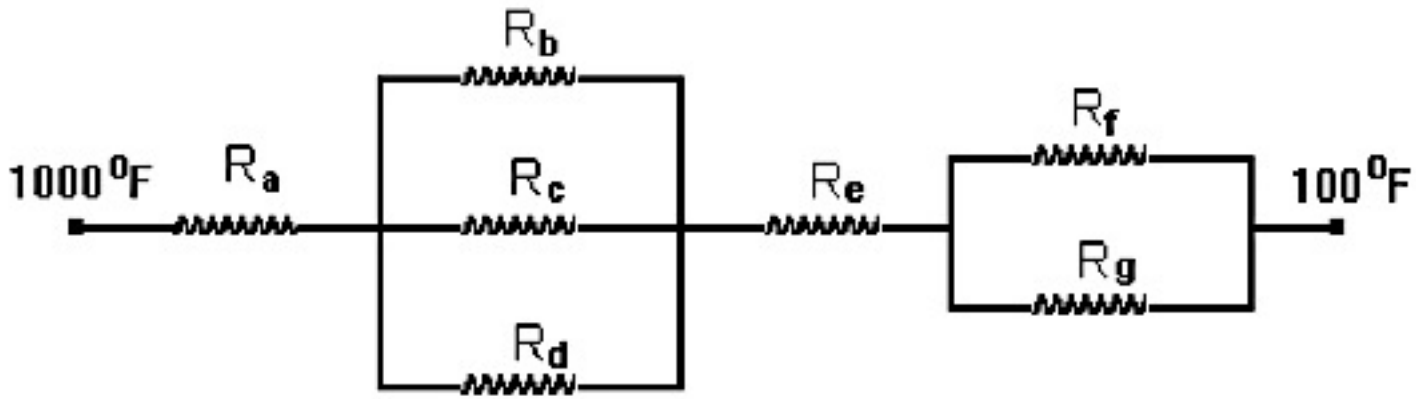
material	a	b	c	d	e	f	g
k (Btu/h.ft.°F)	100	40	10	60	30	40	20



quim Carneiro

ANÁLISE QUANTITATIVA

- ✓ Sabe-se que 1" = 1/12 *ft*. Usando a analogia elétrica, o circuito equivalente à parede composta é :



- ✓ Para uma área unitária de transferência de calor, as resistências térmicas de cada parede individual são calculadas da seguinte maneira:

$$R_a = \frac{3/12\,(ft)}{100\left(\frac{Btu}{h.ft.^oF}\right)\times 1\left(ft^2\right)} = 1/400\; h.^oF/Btu \quad ; \quad R_b = \frac{2/12}{40\times 2/12} = 1/40\; h.^oF/Btu$$

ANÁLISE QUANTITATIVA

- As resistências térmicas para as outras paredes são:

$$R_c = \frac{2/12}{10 \times 8/12} = 1/40 \; h.^oF/Btu \quad ; \quad R_d = \frac{2/12}{60 \times 2/12} = 1/60 \; h.^oF/Btu$$

$$R_e = \frac{3/12}{30 \times 1} = 1/120 \; h.^oF/Btu \quad ; \quad R_f = \frac{4/12}{40 \times 6/12} = 1/60 \; h.^oF/Btu \quad ; \quad R_g = \frac{4/12}{20 \times 6/12} = 1/30 \; h.^oF/Btu$$

- Para os circuitos paralelos:

$$\frac{1}{R_{bcd}} = \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_d} = 40 + 40 + 60 = 140 \quad \Rightarrow \quad R_{bcd} = 1/140 \; h.^oF/Btu$$

$$\frac{1}{R_{fg}} = \frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_g} = 60 + 30 = 90 \quad \Rightarrow \quad R_{fg} = 1/90 \; h.^oF/Btu$$

ANÁLISE QUANTITATIVA

- ✓ Para os circuitos em série:

$$R_t = R_a + R_{bcd} + R_e + R_{fg} = 1/400 + 1/140 + 1/120 + 1/90 = 733/25200 = 0{,}02909\, h.^oF/Btu$$

- ✓ Portanto, o fluxo de calor é:

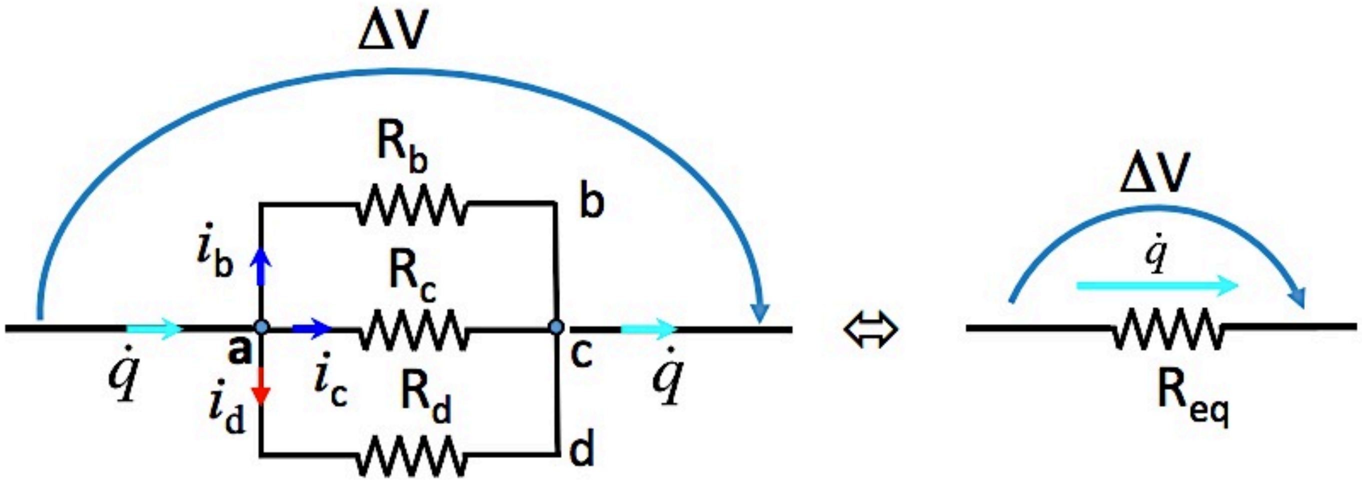
$$\dot{q} = \frac{(\Delta T)_{total}}{R_t} = \frac{(1000-100)\,^oF}{0{,}02909\, h.^oF/Btu} \approx 30938{,}5\ Btu/h$$

- ✓ A temperatura do lado direito da parede **"a"** é :

$$\Delta T\big|_{parede-a} = \dot{q} \times R_a \quad \Leftrightarrow \quad (1000 - T_a) = (30938{,}5)\cdot(1/400)$$

$$T_a = [1000 - (30938{,}5 \times 1/400)] = 922{,}65\,^\circ F$$

✓ Para calcular a temperatura do lado direito da parede "b" utilizamos a analogia dos circuitos eléctricos :



$$\Delta T\Big|_{parede-b} = \dot{q} \times R_{bcd} \quad \Leftrightarrow \quad (T_a - T_b) = (30938{,}5)\cdot(1/140)$$

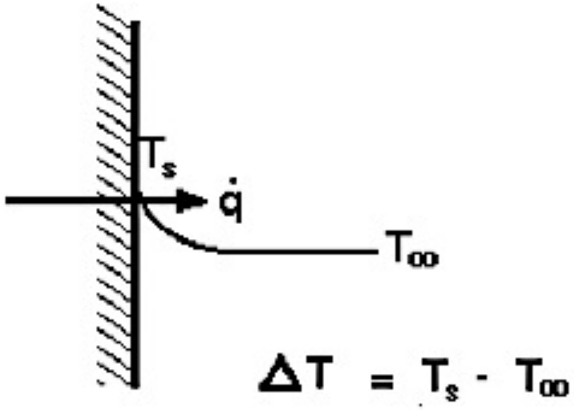
$$T_b = [922{,}65 - (30938{,}5 \times 1/140)] = 701{,}66\,^{\circ}F$$

ANÁLISE QUANTITATIVA

- **LEI BÁSICA PARA CONVECÇÃO :**

- O calor transferido por convecção, na unidade de tempo, **entre uma superfície e um fluido**, pode ser calculado através da relação proposta por Isaac Newton :

$$\boxed{\dot{q} = h\,A\,\Delta T}$$



$\dot{q}$ = fluxo de calor transferido por convecção (kcal/h);

A = área de transferência de calor (m^2);

ΔT = diferença de temperatura entre a superfície (Ts) e a temperatura do fluido num local bastante afastado da superfície (T_∞). A figura mostra o perfil de temperatura para o caso de um fluido que escoa sobre uma superfície aquecida;

h = **coeficiente de transferência de calor por convecção** ou coeficiente de película ($W/m^2.°C$).

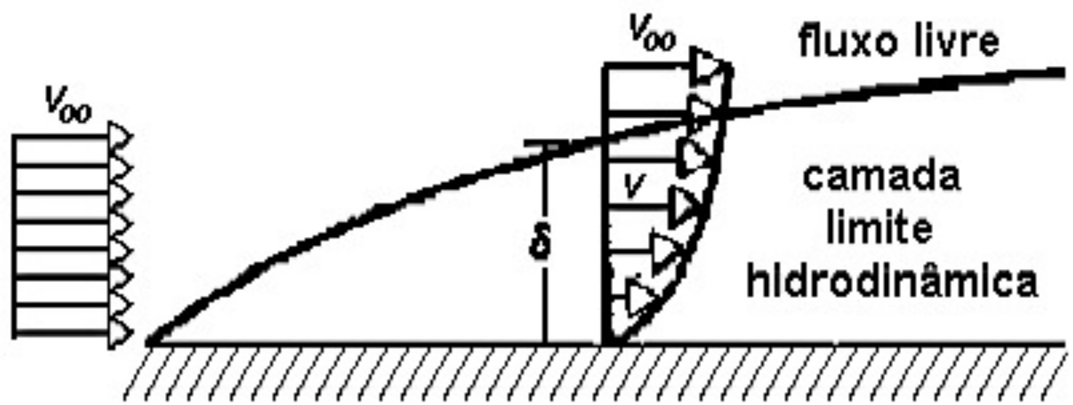
ANÁLISE QUANTITATIVA

- A simplicidade da equação de Newton é aparente, pois ela não explícita as dificuldades envolvidas no estudo da convecção, servindo apenas como uma definição do coeficiente de película (***h***). O coeficiente de película é, na realidade, uma função complexa do escoamento do fluido, das propriedades físicas do meio fluido e da geometria do sistema. O seu valor numérico não é, em geral, uniforme sobre a superfície. Por isso, utiliza-se um valor médio para a superfície.
- A tabela mostra, para diversos meios, as ordens de grandeza do coeficiente de película ***h***:

Meio	kcal/h.m^2.^{o}C
Ar, convecção natural	5-25
Vapor, convecção forçada	25-250
Óleo, convecção forçada	50-1500
Água, convecção forçada	250-10000
Água convecção em ebulição	2500-50000
Vapor, em condensação	5000-100000

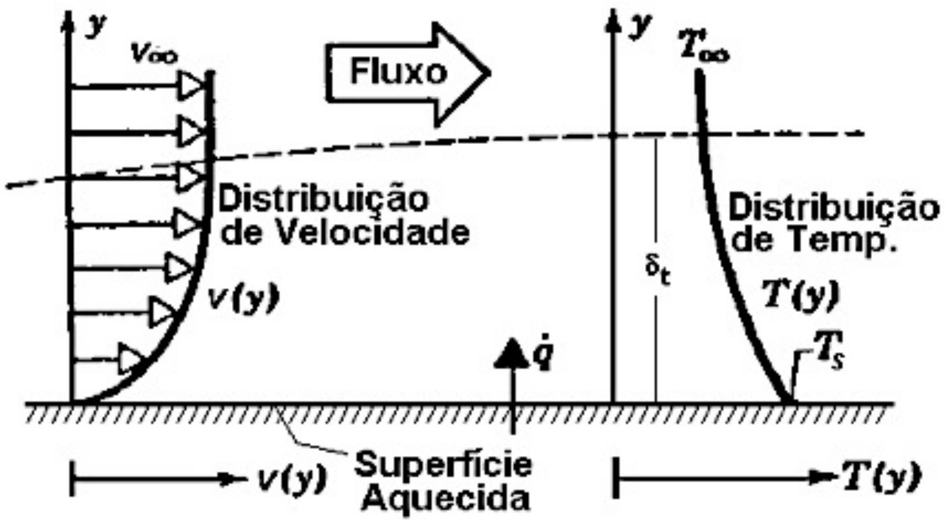
- **CAMADA LIMITE**

✓ Quando um fluido escoa ao longo de uma superfície (seja o escoamento efetuado em regime laminar ou turbulento), as partículas na vizinhança da superfície são desaceleradas em virtude das forças de amortecimento viscoso. A porção de fluido contida na região de variação significativa de velocidade, ilustrada na figura, é denominada por camada limite hidrodinâmica.



ANÁLISE QUANTITATIVA

- Consideremos agora o escoamento de um fluido ao longo de uma superfície quando existe uma diferença de temperatura entre o fluido e a superfície. Neste caso, a região que contém o fluido que sofre uma variação substancial de temperatura é designada por **camada limite térmica**. Por exemplo, analisemos a transferência de calor para o caso de um fluido que escoa sobre uma superfície aquecida, como mostra a figura. Para que ocorra a transferência de calor por convecção através do fluido, é necessário a existência de gradiente de temperatura (camada limite térmica) numa região de baixa velocidade (camada limite hidrodinâmica).



ANÁLISE QUANTITATIVA

- O mecanismo da convecção pode então ser entendido como **a ação combinada** de condução de calor na região de baixa velocidade onde existe um gradiente de temperatura e movimento de mistura na região de alta velocidade. Portanto :

✧ Região de baixa velocidade ➔ a condução é mais importante
✧ Região de alta velocidade ➔ a mistura entre o fluido mais quente e o mais frio contribui substancialmente para a transferência de calor

✓ Na camada limite térmica tem-se portanto elevados gradientes de temperatura e pode-se dizer que o estudo do fenómeno da convecção reduz-se ao estudo da condução através da mesma. Deste modo, considerando a camada limite térmica como uma "**parede**" hipotética de espessura $\boldsymbol{\delta_t}$ e condutividade térmica $\mathbf{k_t}$, obtém-se:

$$\boxed{\dot{q} = \frac{k_t\, A}{\delta_t}\left(T_s - T_\infty\right) \quad \rightarrow \text{fluxo de calor por condução na camada limite térmica}}$$

ANÁLISE QUANTITATIVA

- Pela equação de Newton tem-se :

$$\dot{q} = h\ A\left(T_S - T_\infty\right) \rightarrow \text{fluxo de calor por convecção}$$

✓ Igualando a equação de Newton à equação do fluxo de calor por condução na camada limite térmica, obtém-se:

$$\dot{q} = \frac{k_t\ A}{\delta_t}\left(T_s - T_\infty\right) = h\ A\left(T_s - T_\infty\right) \rightarrow h = \frac{k_t}{\delta_t}$$

- Esta equação mostra que o ***coeficiente de película*** (coeficiente de transferência de calor por convecção) é inversamente proporcional à espessura da camada limite térmica. Por isso, a acção de um ventilador pode perfeitamente ser entendida. O aumento da velocidade do fluido, causado pela rotação das pás, origina um aumento da velocidade de escoamento do ar. Por consequência, ocorre uma redução da camada limite térmica sobre a nossa pele. A equação mostra que esta acção provoca um aumento do coeficiente de película. O aumento de ***h*** é responsável pelo aumento da transferência de calor por convecção e pela consequente sensação de alívio do calor.

- **DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PELÍCULA (h)**

✓ O coeficiente **h** é uma função complexa de uma série de variáveis que estão relacionadas com as seguintes características:

1. Dimensão Característica (L)

   L: é a dimensão que domina o fenómeno da convecção. Ex. diâmetro de um tubo, comprimento de uma placa, etc.

2. Propriedades Físicas do Fluido (μ, ρ, c_p, k, δ)

   μ : viscosidade dinâmica do fluido;
   ρ : densidade do fluido;
   c_p : calor específico do fluido;
   k : condutividade térmica do fluido;
   δ : coeficiente de expansão volumétrica

3. Estado de Movimento do Fluido (V, g, ΔT), onde V, g, ΔT são respectivamente a velocidade do fluido, a aceleração gravítica e a dif. de temp. entre a sup. e o fluido.

✓ Logo, h é uma função do tipo :

$$\boxed{h = f\left(L, \mu, \rho, c_p, k, \delta, V, g, \Delta T\right)}$$

✓ Uma fórmula que levasse em consideração todos estes parâmetros seria extremamente complexa. O problema é, então, contornado dividindo-se o estudo em casos particulares.

✓ Para cada caso particular são obtidas equações empíricas através da técnica de análise dimensional combinada com experiências, onde os coeficientes de película são calculados a partir de equações empíricas obtidas correlacionando-se os dados experimentais com o auxílio da análise dimensional. O desenvolvimento desta técnica sai do âmbito desta unidade curricular. Entretanto, podemos dizer que os resultados são obtidos na forma de equações dimensionais como mostrado no exemplo seguinte, referente à **convecção natural**:

- **Convecção Natural**

✓ Fluido frio entra em contato com uma parede plana a temperatura mais elevada.

➢ Devido à diferença de temperatura, o fluido recebe calor;

➢ Ao se aquecer, o fluido dilata (aumenta o volume específico, fica mais leve);

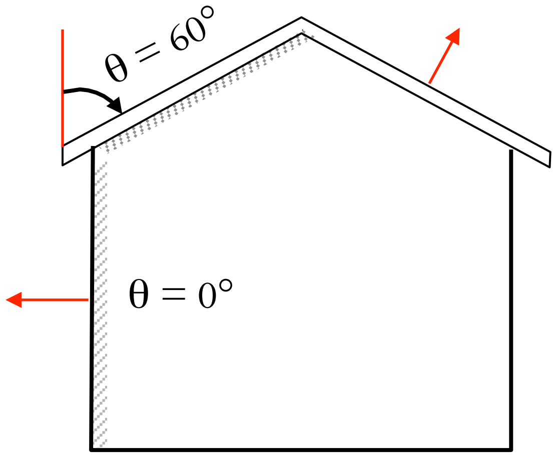
➢ O fluido é aquecido.

✓ A equação empírica que descreve o fenómeno de convecção natural é a seguinte:

$$\boxed{Nu = B\left(G_r \cdot P_r \cdot \cos\theta\right)^m}$$

✓ Onde ***Nu***, $\boldsymbol{G_r}$ e $\boldsymbol{P_r}$ são respectivamente os números de ***Nusselt***, ***Prandtl*** e ***Grashof***. As constantes ***B*** e ***m*** são obtidas através de ensaios experimentais, enquanto que θ representa o ângulo formado entre a direcção vertical e a direcção da superfície plana.

ANÁLISE QUANTITATIVA



- O número de ***Nusselt*** (***Nu***), representa a relação entre a dimensão característica ***L*** e a espessura da camada limite térmica (**δ_t**).

$$Nu = \frac{L}{\delta_t} = \frac{L}{k/h} = \frac{h\,L}{k}$$

- O número de ***Prandtl*** (***Pr***), relaciona as espessuras relativas das camadas limite hidrodinâmica e térmica .

$$P_r = \frac{c_p\,\mu}{k}$$

- O número de ***Grashof*** (***Gr***) representa a relação entre as forças de ascensão e as forças de atrito viscoso na convecção natural.

$$G_r = \frac{L^3 \delta\, g\, \Delta T}{\mu^2}$$

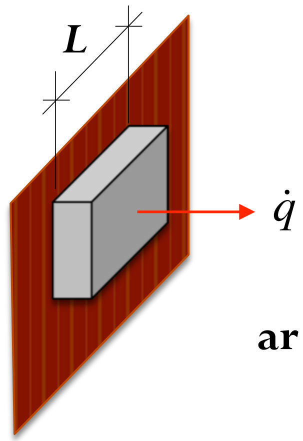
ANÁLISE QUANTITATIVA

✓ Para paredes planas verticais, $B = 0{,}56$, $m = ¼$ e $\theta = 0°$. Deste modo, o número de ***Nusselt*** (***Nu***) escreve-se da seguinte maneira:

$$\boxed{Nu = 0{,}56 \times \left(G_r \cdot P_r\right)^{1/4}}$$

- **Exercício:** A placa plana (mostrada na figura) de 150 × 100 mm, é eletricamente aquecida de forma a que a temperatura da sua superfície esteja a 135 °C. Para este caso específico o número de ***Grashof*** é $2{,}2 \times 10^7$ e o número de ***Prandt*** é 0,7. Calcule o fluxo de calor transferido por convecção, da superfície da placa para o ar atmosférico à temperatura de 25 °C (k_{ar} = 0,026 kcal/h.m.°C).

- A dimensão característica (L) é comprimento da placa : $L = 0{,}15$ m.
- O de coeficiente de película do ar (***h***) em torno da placa é calculado a partir da equação :



$$\boxed{Nu = \frac{h\,L}{k_{ar}} = 0{,}56 \times \left(G_r \cdot P_r\right)^{1/4}}$$

Joaquim Carneiro

ANÁLISE QUANTITATIVA

- ou seja: $\dfrac{h \times 0{,}15}{0{,}026} = 0{,}56 \times \left(2{,}2 \times 10^{7}\right)^{1/4} \times \left(0{,}7\right)^{1/4} \quad \Rightarrow \quad h = 6{,}08\, kcal/h \cdot m^{2} \cdot {}^{o}C$
- O fluxo de calor por convecção é dado pela equação de Newton :

$$\dot{q} = h\,A\,\Delta T = 6{,}08 \times \left[\left(0{,}10 \times 0{,}15\right)\right] \times \left(135 - 25\right) = 10{,}03\, kcal\,/\,h$$

✓ **RESISTÊNCIA TÉRMICA NA CONVECÇÃO**

- O fluxo de calor transferido por convecção é dado pela equação de Newton :

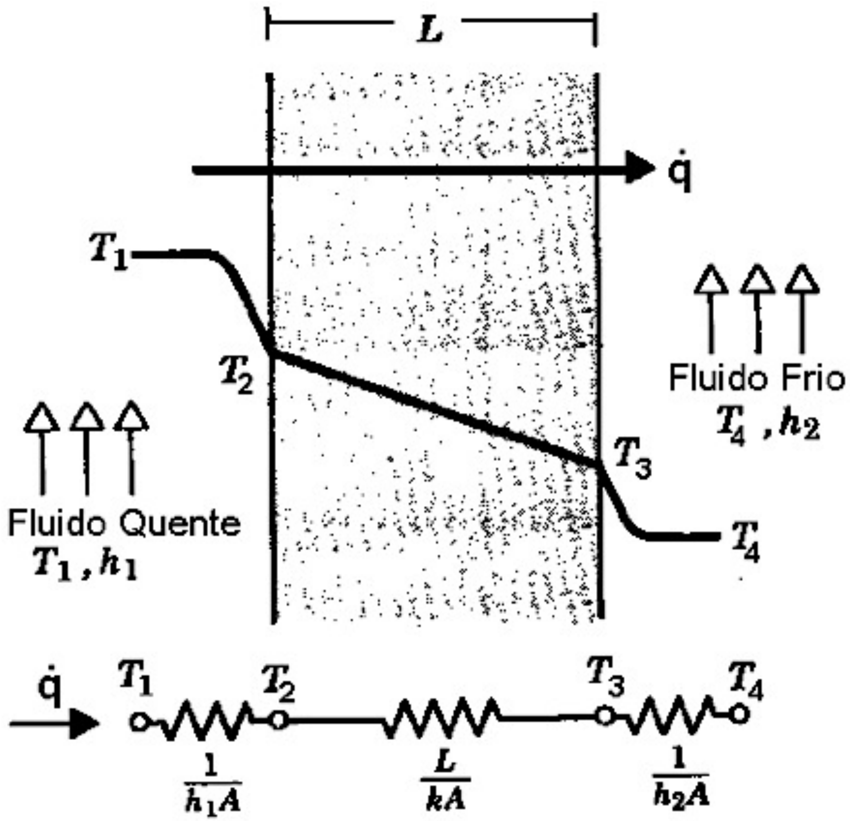
$$\dot{q} = h\,A\,\Delta T$$

- Por analogia eléctrica verificou-se que o fluxo de calor é igual à razão entre um potencial térmico (ΔT) e uma resistência térmica:

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{R} = h\,A\,\Delta T \quad \Rightarrow \quad R = \frac{1}{h\,A}$$

- **MECANISMOS COMBINADOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR (CONDUÇÃO E CONVECÇÃO)**

✓ Consideremos uma parede plana situada entre dois fluidos a diferentes temperaturas. Se as temperaturas T_1 e T_4 dos fluidos são constantes, será estabelecido um fluxo de calor único e constante através da parede (regime permanente ou **estacionário**). Um bom exemplo desta situação refere-se ao fluxo de calor gerado pela combustão dentro de um forno, que atravessa a parede por condução e se dissipa (por convecção) no ar atmosférico.



ANÁLISE QUANTITATIVA

- Utilizando a equação de Newton (convecção) e a equação para o fluxo de calor em uma parede plana (condução), podemos obter as seguintes equações para o fluxo de calor transferido pelo forno :

$$\dot{q} = h_1 A \left(T_1 - T_2\right) \qquad \textit{região dentro do forno}$$

$$\dot{q} = \frac{k\,A}{L}\left(T_2 - T_3\right) \qquad \textit{parede}$$

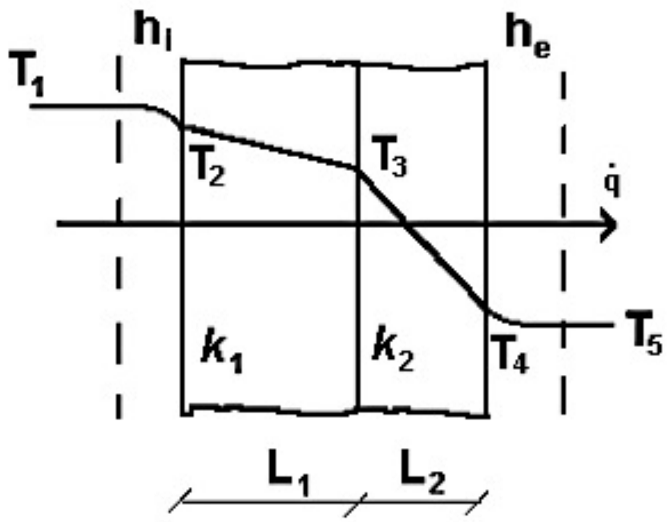
$$\dot{q} = h_2 A \left(T_3 - T_4\right) \qquad \textit{região fora do forno}$$

- As resistências térmicas estão associadas em série. Adoptando a analogia eléctrica, o potencial térmico total é igual à soma dos potencias térmicos. Por isso, pode-se escrever:

$$\left(T_1 - T_4\right) = \dot{q}\left(\frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{k\,A} + \frac{1}{h_2 A}\right) \quad \rightarrow \quad \dot{q} = \frac{\left(T_1 - T_4\right)}{\dfrac{1}{h_1 A} + \dfrac{L}{k\,A} + \dfrac{1}{h_2 A}}$$

$$\dot{q} = \frac{\left(T_1 - T_4\right)}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{(\Delta T)_{total}}{R_t}$$

- **Exercício** : A parede de um forno é constituída por duas camadas : ***tijolo refratário*** com espessura L_1 = 0,20 m (k_1 =1,2 kcal/h.m.ºC) e de ***tijolo isolante*** com espessura L_2 = 0,13 m (k_2 = 0,15 kcal/h.m.ºC). A temperatura dos gases dentro do forno é T_1 = 1700 ºC e o coeficiente de película na parede interna é h_i = 58 kcal/h.m^2.ºC. A temperatura ambiente é T_5 = 27 ºC e o coeficiente de película na parede externa é h_e = 12,5 kcal/h.m^2.ºC. Desprezando a resistência térmica das juntas de argamassa, calcule :



a) O fluxo de calor por m^2 de parede;

b) A temperatura nas superfícies interna e externa da parede.

$$
\begin{aligned}
&\textit{Parede de tijolo refratário}:\\
&L_1 = 0{,}20\ m \quad ; \quad k_1 = 1{,}2\ kcal/h.m.^oC\\
&\textit{Parede de tijolo isolante}:\\
&L_2 = 0{,}13\ m \qquad k_2 = 0{,}15\ kcal/h.m.^oC\\
&h_i = 58\ kcal/h.m^2.^oC \qquad h_e = 12{,}5\ kcal/h.m^2.^oC\\
&T_1 = 1700\ ^oC \qquad T_5 = 27\ ^oC
\end{aligned}
$$

ANÁLISE QUANTITATIVA

a) Considerando uma área unitária da parede (A = A_1 = A_2 = 1 m^2), pode-se escrever:

$$\textit{Associação em série}:$$

$$\dot{q} = \frac{(\Delta T)_{total}}{R_t} = \frac{T_1 - T_5}{R_i + R_{ref} + R_{iso} + R_e} = \frac{T_1 - T_5}{\frac{1}{h_i A} + \frac{L_1}{k_1 A} + \frac{L_2}{k_2 A} + \frac{1}{h_e A}} = \frac{1700 - 27}{\frac{1}{58 \times 1} + \frac{0,20}{1,2 \times 1} + \frac{0,13}{0,15 \times 1} + \frac{1}{12,5 \times 1}}$$

$$\boxed{\dot{q} = 1480,6\ kcal/h \quad (por/\ m^2\ de\ \ parede)}$$

b) O fluxo de calor também pode ser calculado através de cada resistência individual. Na superfície da parede interna (T_2) , tem-se:

$$(T_1 - T_2) = \dot{q} \times R_i \quad \Rightarrow \quad T_2 = T_1 - \dot{q} \times R_i \quad \Rightarrow \quad T_2 = T_1 - \dot{q} \times \frac{1}{h_i A}$$

$$T_2 = 1700 - 1480,6 \times \frac{1}{58 \times 1} \approx 1675\ {}^oC$$

b) Analogamente, na superfície da parede externa (T_4) , tem-se:

$$(T_4 - T_5) = \dot{q} \times R_e \quad \Rightarrow \quad T_4 = T_5 + \dot{q} \times R_e \quad \Rightarrow \quad T_4 = T_5 + \dot{q} \times \frac{1}{h_e A}$$

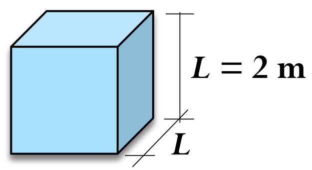
$$T_4 = 27 + 1480,6 \times \frac{1}{12,5 \times 1} \approx 145\ ^oC$$

- **Exercício** : Um reator de paredes planas foi construído em aço inox e tem geometria cúbica com 2 m de lado. A temperatura no interior do reator é T_i = 600 °C e o coeficiente de película interno é h_i = 45 kcal/h.m^2.°C. Atendendo ao elevado fluxo de calor, deseja-se isolá-lo com **lã de rocha** (k_{iso} = 0,05 kcal/h.m.°C) de modo a reduzir a transferência de calor. Considerando desprezável a resistência térmica da parede de aço inox e que o ar ambiente está a T_{ar} =20 °C com coeficiente de película h_{Ar} = 5 kcal/h.m^2.°C, calcular :

a) O fluxo de calor antes da aplicação do isolamento;

b) A espessura do isolamento a ser usado, sabendo-se que a temperatura (T_s) do isolamento na face externa deve ser igual a 62 °C;

c) A redução (em percentagem) do fluxo de calor após a aplicação do isolamento.



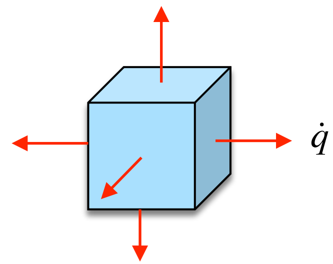
ANÁLISE QUANTITATIVA

a) Desprezando a resistência térmica (elevada condutividade térmica) do aço inox, o fluxo antes do isolamento ocorre por convecção, do volume interior para a superfície interna do aço inox e da superfície exterior do aço para o volume exterior.

$h_{ar} = 5\ kcal/h.m^2.^oC \quad h_i = 45\ kcal/h.m^2.^oC$

$k_{iso} = 0{,}05\ kcal/h.m.^oC \quad A = [6\times(2\times 2)] = 24\ m^2$

$T_i = 600\ ^oC \quad T_{ar} = 20\ ^oC \quad T_s = 62\ ^oC$

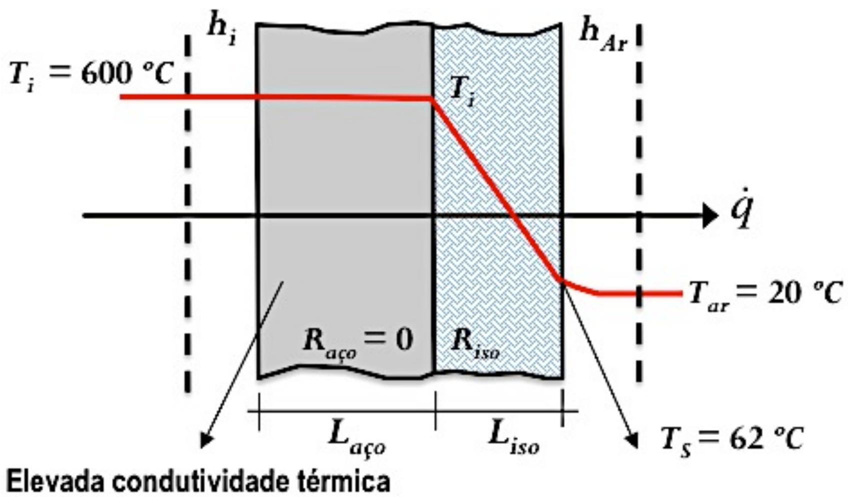


$$\dot{q}_{antes} = \frac{(\Delta T)_{total}}{R_t} = \frac{T_i - T_{ar}}{\frac{1}{h_i A} + \frac{1}{h_{ar} A}} = \frac{600-20}{\frac{1}{45\times 24} + \frac{1}{5\times 24}} = 62640{,}4\ kcal/h$$

b) Depois de se aplicar o revestimento isolante (lã de rocha) o fluxo (da superfície externa do revestimento para o volume exterior) ocorre por convecção e pode ser calculado na camada limite externa. Admite-se que não há variação da área devido à espessura do isolante.

$$\dot{q}_{depois} = \frac{T_s - T_{ar}}{\frac{1}{h_{ar} A}} = \frac{62-20}{\frac{1}{5\times 24}} = 5040\ kcal/h$$

ANÁLISE QUANTITATIVA



- A espessura do isolamento pode ser calculada levando em consideração as resistências térmicas da película interna e do isolante :

$$\dot{q}_{depois} = \frac{T_i - T_s}{\dfrac{1}{h_i\,A} + \dfrac{L}{k_{iso}\,A}} \Rightarrow 5040 = \frac{600 - 62}{\dfrac{1}{45 \times 24} + \dfrac{L_{iso}}{0,05 \times 24}}$$

$$L_{iso} = \left[\frac{(T_i - T_s)}{\dot{q}_{depois}} - \frac{1}{h_i\,A}\right] \times k_{iso}\,A \approx 0,127\ m = 12,7\ cm$$

Nota: As roupas para o frio são um exemplo de um isolante térmico; o ar que fica retido entre as suas fibras dificulta a condução do calor. Os pelos dos animais e o serrim também são bons isolantes térmicos porque retêm o ar.

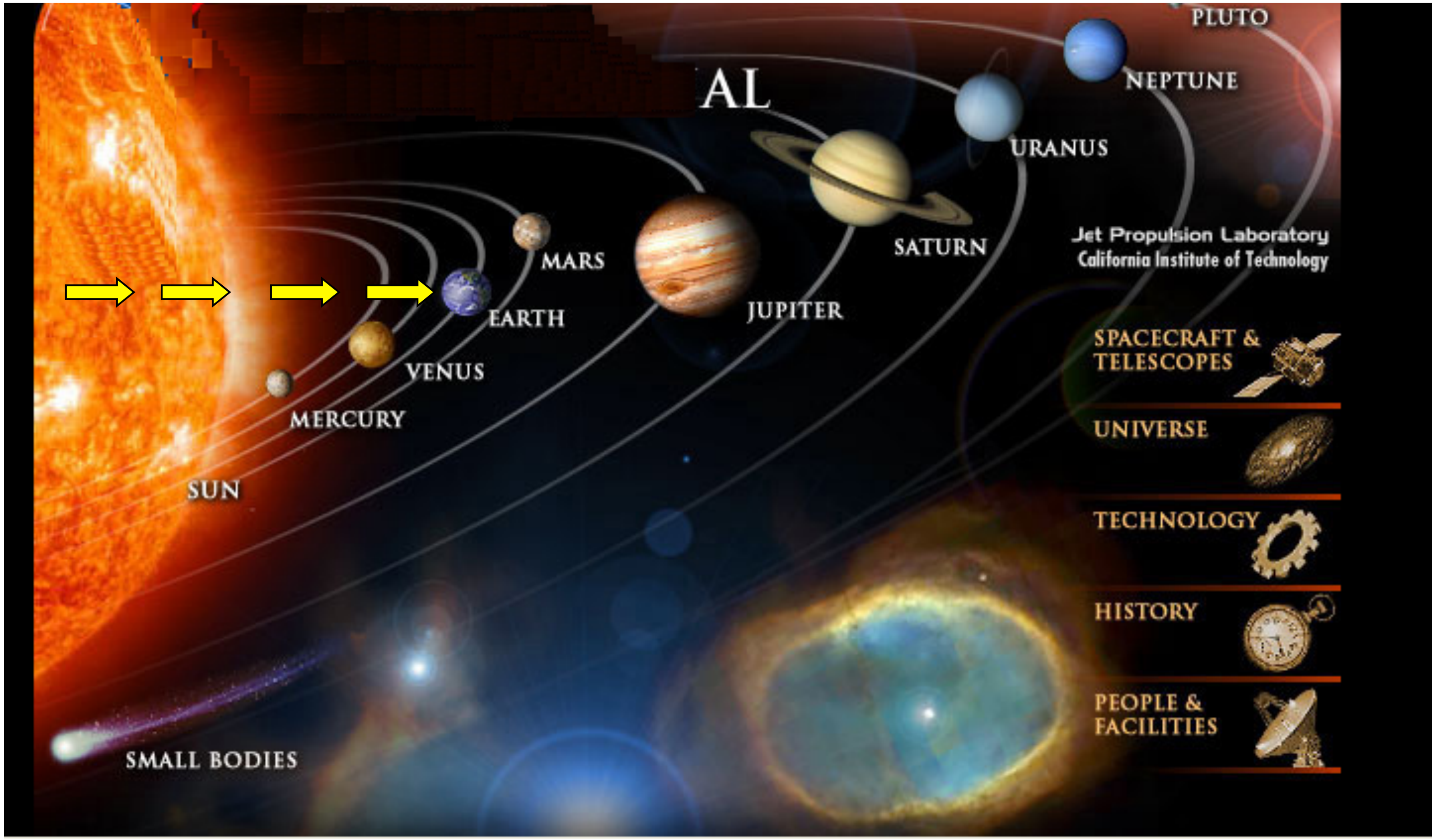
c) Redução (em percentagem) do fluxo de calor após a aplicação do isolamento:

$$\%\text{Redução} = \frac{\dot{q}_{antes} - \dot{q}_{depois}}{\dot{q}_{antes}} \times 100 = \frac{62640,4 - 5040}{62640,4} \times 100$$

$$\%\text{Redução} = 91,95\%$$

ANÁLISE QUANTITATIVA

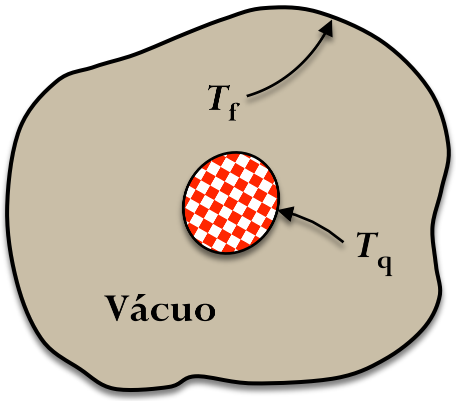
✓ **Radiação Térmica**: É a propagação do calor através de ondas eletromagnéticas, principalmente os raios infravermelhos (designados por ondas de calor).



✓ **NATUREZA DA RADIAÇÃO TÉRMICA**

- É a propagação do calor através de ondas eletromagnéticas, principalmente os raios infravermelhos (designados por ondas de calor).

✓ A radiação térmica é a energia radiante emitida pelos corpos em virtude das suas temperaturas. Todos os corpos, a uma temperatura acima do zero absoluto, emitem radiação térmica. Considere, por exemplo, um corpo **"quente"** à temperatura T_q colocado numa câmara de vácuo cujas paredes estão **"frias"**, à temperatura T_f, como está ilustrado na figura. Atendendo a que o corpo quente está separado das paredes frias pelo vácuo, não é possível a transferência de calor por condução ou convecção. O corpo quente arrefece em virtude da troca de calor pela radiação térmica.



ANÁLISE QUANTITATIVA

✓ RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO

- Um corpo, a qualquer temperatura acima do zero absoluto, emite radiação em todos os comprimentos de onda, em todas as direcções possíveis no espaço. O conceito de **corpo negro** é uma idealização que serve para comparar as características da emissão e da absorção dos corpos reais. Um **corpo negro** absorve toda a radiação incidente oriunda de todas as direcções, em todos os comprimentos de onda, sem que o corpo a reflita, transmita ou espalhe a radiação. A uma dada temperatura, num determinado comprimento de onda, nenhum outro corpo, à mesma temperatura pode emitir mais radiação do que um corpo negro.
- O termo **negro** deve ser distinguido da sua utilização convencional que se refere à cor preta de uma superfície sob observação visual. O olho humano pode detectar a cor preta apenas na região visível do espectro.
- Por exemplo, um material como o gelo é brilhante ao olho humano mas é **quase negro** para a radiação térmica de elevado comprimento de onda. Na verdade, um corpo negro é completamente negro à radiação térmica, para todos os comprimentos de onda desde $\lambda = 0$ até $\lambda = \infty$.

ANÁLISE QUANTITATIVA

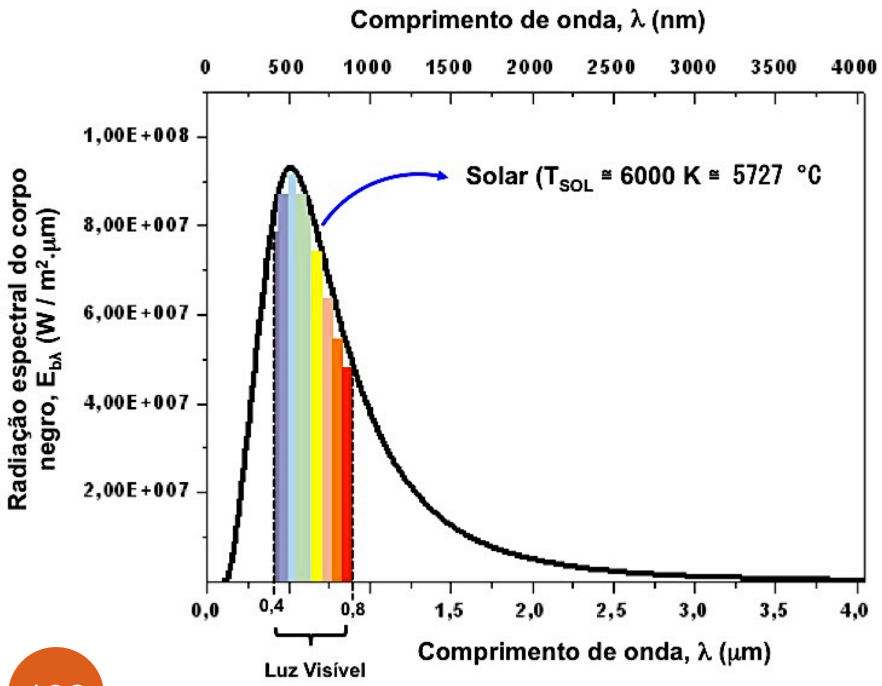
- Um corpo emite a radiação em todas as direcções do espaço. A quantidade fundamental que especifica a grandeza da energia da radiação emitida por um **corpo negro**, a uma temperatura absoluta ***T*** (em grau Kelvin), por unidade de área, por unidade de tempo, por unidade de comprimento de onda em torno de λ, em todas as direcções do espaço hemisférico é definida pela equação de **Planck**. Com efeito, representa o fluxo de radiação espectral do corpo negro, $E_{b\lambda}$ (T). O índice **b** refere-se ao corpo negro (do inglês '***black***').
-

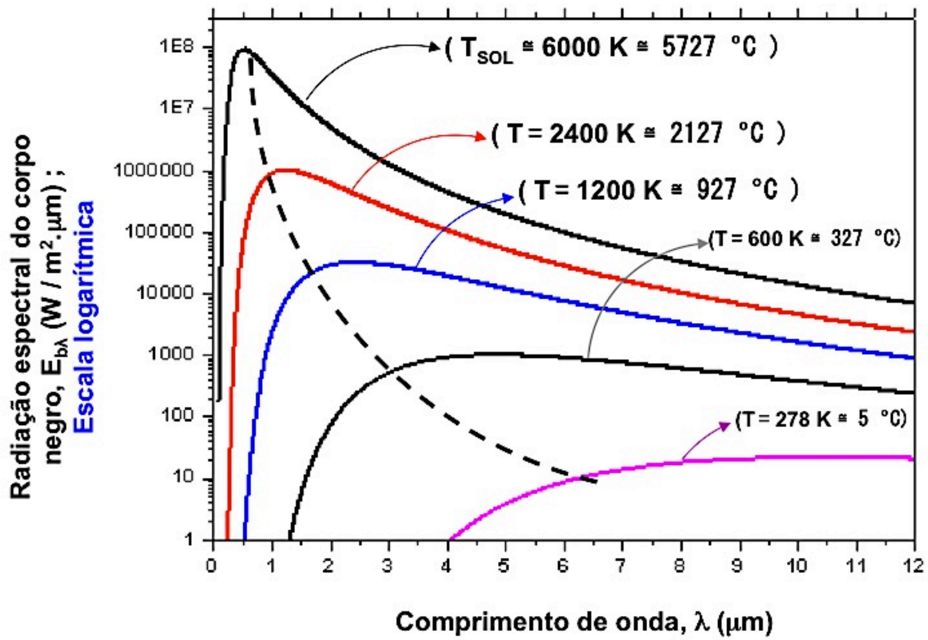
$$\boxed{E_{b\lambda}(T) = \frac{c_1}{\lambda^5\left\{\exp[c_2/(\lambda T)]-1\right\}} \quad (W/m^2 \cdot \mu m)}$$

$$\begin{aligned}
onde \quad & c_1 = 2\pi h c^2 = 3,743\times 10^8 \ (W\cdot \mu m^4/m^2) \\
& c_2 = (hc/k) = 1,4387\times 10^4 \ (\mu m \cdot K) \\
& h = 6,63\times 10^{-34} J\cdot s \ (Const.\ de\ Planck) \\
& k = 1,38\times 10^{-23} J\cdot K \ (Const.\ de\ Boltzmann) \\
& c = 2,598\times 10^8 m/s \ (Velocidade\ da\ luz) \\
& T = Temperatura\ absoluta,\ K \\
& \lambda = Comprimento\ de\ onda,\ \mu m
\end{aligned}$$

ANÁLISE QUANTITATIVA

- A equação de **Planck** pode ser usada para calcular $E_{b\lambda}$ (T) para quaisquer λ e *T*. A figura seguinte mostra o gráfico de $E_{b\lambda}$ (T) em função de λ a várias *T*. A partir da figura, observa-se que, a um dado comprimento de onda, a radiação emitida cresce com a elevação de temperatura, e, para uma dada temperatura, a radiação emitida varia com o comprimento de onda e apresenta um máximo. Esses máximos tendem a deslocar-se para os comprimentos de onda maiores à medida que a temperatura diminui.





- **Lei de Stefan-Boltzmann :**

✓ A energia radiante emitida por um corpo negro, a uma dada temperatura absoluta *T*, em todos os comprimentos de onda, por unidade de tempo, por unidade de área, é determinada pela integração da equação de Planck desde $\lambda = 0$ até $\lambda = \infty$. Ou seja representa a área abaixo da curva de Planck:

$$E_b(T) = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} \frac{c_1}{\lambda^5 \left\{ \exp[c_2/(\lambda T)] - 1 \right\}} d\lambda$$

✓ Modificando a variável de integração de λ para $\lambda\, T$ ➔ x

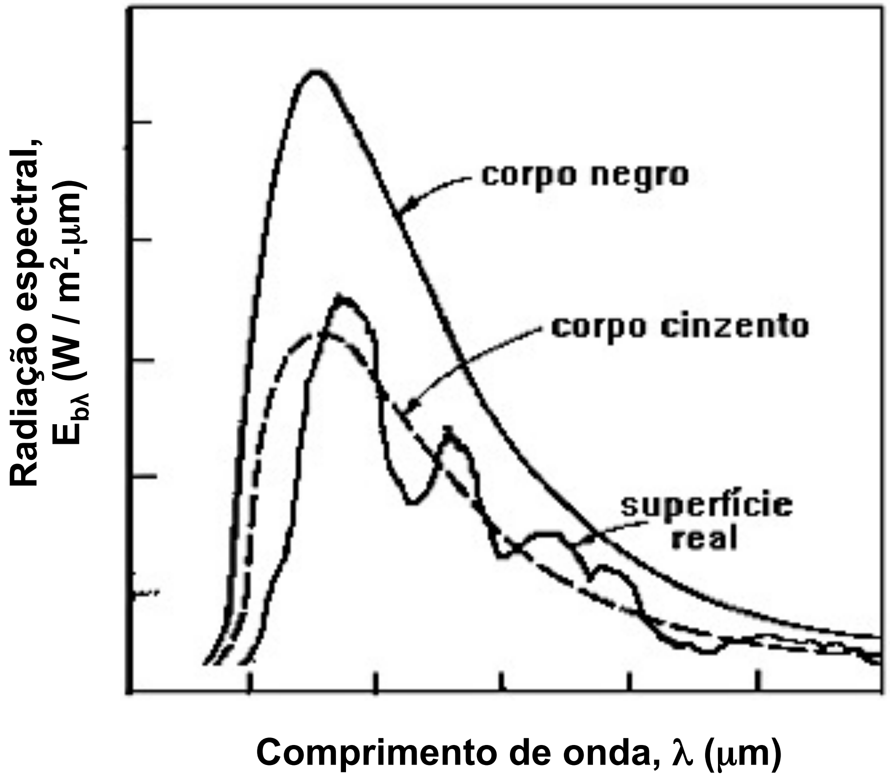
$$x = \lambda T \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{x}{T} \quad \Rightarrow \quad d\lambda = \frac{dx}{T}$$

$$E_b(T) = T^4 \int_{x=0}^{\infty} \frac{c_1}{x^5 \left\{ \exp[c_2/(x)] - 1 \right\}} dx \quad \Rightarrow \quad \boxed{E_b(T) = \sigma T^4 \;\; (W/m^2)}$$

- onde *T* é expresso em kelvins e σ é a constante de ***Stefan-Boltzmann***, cujo valor numérico é: $\boxed{\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8} \;\; (W/m^2 \cdot K^4)}$

- **CORPO CINZENTO:**

✓ É o corpo cuja energia emitida ou absorvida corresponde a uma fração da energia emitida ou absorvida por um corpo negro. As características de radiação dos corpos cinzentos aproximam-se das características dos **corpos reais**, como mostra esquematicamente a figura.



ANÁLISE QUANTITATIVA

- **PROPRIEDADES RADIANTES DAS SUPERFÍCIES :**

✓ A radiação emitida por um corpo real a uma determinada temperatura T, é sempre menor do que a do corpo negro. Deste modo, a **emissão** do corpo negro é escolhida como referência, e por isso define-se uma grandeza, **a emissividade** da superfície $\boldsymbol{\varepsilon}$, como a razão entre a energia emitida ($\boldsymbol{E_c}$) por uma superfície real e a energia emitida pelo corpo negro ($\boldsymbol{E_b}$), à ***mesma temperatura***; o valor da emissividade varia de $0 < \boldsymbol{\varepsilon} < 1$.

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

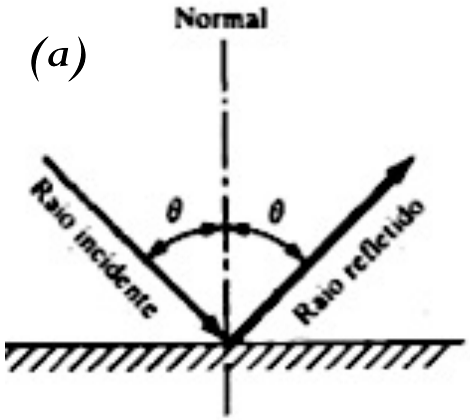
✓ Define-se a grandeza, **absortividade** de uma superfície $\boldsymbol{\alpha}$, como correspondendo à razão entre a energia absorvida ($\boldsymbol{E_a}$) por uma superfície real e a energia emitida pelo corpo negro ($\boldsymbol{E_b}$), à ***mesma temperatura***.

✓ Para corpos reais (ou corpo cinzento) o valor da absortividade é igual ao valor da emissividade; $\boldsymbol{\alpha = \varepsilon}$.

ANÁLISE QUANTITATIVA

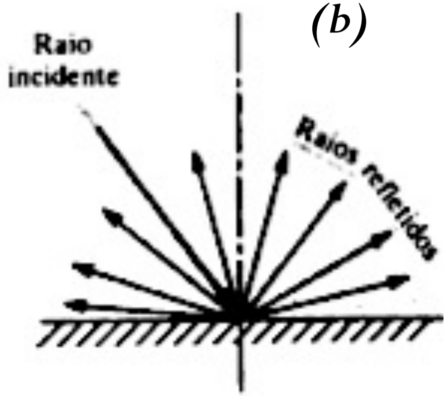
- Por outro lado, quando a radiação incide numa superfície real (ou corpo cinzento), uma fração é refletida pela superfície. Se a superfície for perfeitamente plana, isto é, se a rugosidade da superfície for muito menor do que o comprimento de onda da radiação, os raios incidente e refletido serão simétricos em relação à normal no ponto de incidência, como está ilustrado na **Figura (a)**. Esta reflexão, como a dos espelhos, é denominada por ***reflexão especular***. Se a superfície tiver rugosidade, a radiação incidente será ***espalhada*** em todas as direcções e denomina-se por ***reflexão difusa***, conforme mostrado na Figura (b).

(a)



Especular

(b)



Difusa

- Define-se a grandeza, **reflectividade** de uma superfície $\boldsymbol{\rho}$, como a razão entre a energia reflectida (E_r) por uma superfície real e a energia emitida pelo corpo negro (E_b), à ***mesma temperatura***.

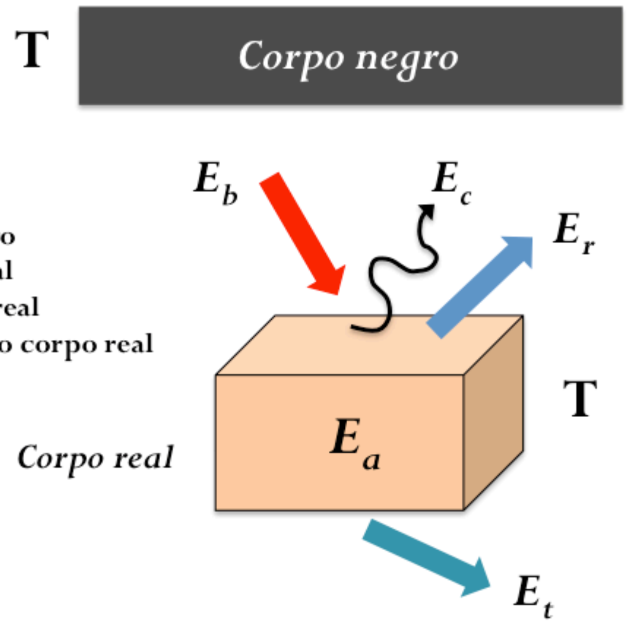
ANÁLISE QUANTITATIVA

- Se o corpo for opaco à radiação, a soma da refletividade e da absortividade do corpo é igual à unidade. $\boxed{\alpha + \rho = 1}$

- Se o corpo for semitransparente à radiação, a soma da absortividade e da refletividade é menor do que a unidade, e a diferença é designada por transmissividade do corpo $\boldsymbol{\tau}$. Corresponde à razão entre a energia transmitida ($\boldsymbol{E_t}$) por uma superfície real e a energia emitida pelo corpo negro ($\boldsymbol{E_b}$), à ***mesma temperatura.***

$$\boxed{\alpha + \rho + \tau = 1}$$

E_b = energia emitida pelo corpo negro
E_r = energia reflectida pelo corpo real
E_b = energia transmitida pelo corpo real
E_b = energia (absorvida/emitida) pelo corpo real



Joaquim Carneiro

Modelos adotados na radiação térmica

Reflexão

- O **refletor perfeito (espelho ideal),** $\rho = 1$

Absorção

- Um **corpo negro (absorvedor e emissor perfeito),** $\alpha = \varepsilon = 1$
- Um **corpo cinzento,** $\alpha = \varepsilon < 1$

Transmissão

- Um **corpo transparente,** $\tau \neq 0$
- Um **corpo opaco,** $\tau = 0$

Lei dos Intercâmbios: Todo o bom absorvedor é um bom emissor de radiação térmica e todo bom refletor é um mau emissor de radiação térmica.

⇨ **Corpo negro é também o emissor ideal de radiação térmica (radiador ideal) !!!!**

Corpos Escuros: bons absorvedores e emissores de radiação térmica. Ex.: fuligem ($\alpha = \varepsilon = 0{,}94$).

Corpos claros e polidos: maus absorvedores e emissores de radiação térmica. Ex.: prata polida ($\alpha = \varepsilon = 0{,}02$).


Efeito de estufa
B - Alguma da radiação solar é reflectida pela Terra e atmosfera, de volta ao espaço
C - Parte da radiação infravermelha (calor) é reflectida pela superfície da terra, mas não regressa ao espaço, pois é reflectida de novo e absorvida pela camada de gases de estufa que envolve o planeta. O efeito é o aquecimento da superfície terrestre e da atmosfera.
C
B
A
A - A radiação solar atravessa a atmosfera. A maior parte da radiação é absorvida pela superfície terrestre e aquece-a
ATMOSFERA

Fluxo de calor na Radiação

Emissão

$$\boxed{E_b \text{ (corpo negro)} = \left(\frac{\dot{q}_{b,rad}}{A}\right) = \sigma T^4}$$

- A taxa $\dot{q}_{emissão}$ (fluxo de radiação) relativamente à qual um corpo real **emite** energia (via radiação electromagnética) depende da sua temperatura (*T* em Kelvin) e da sua área ***A*** superficial:

$$\boxed{\varepsilon = \frac{E_c}{E_b} \text{ (corpo real)} \quad \rightarrow \quad \dot{q}_{emissão} = \varepsilon A \sigma T^4}$$

Joaquim Carneiro

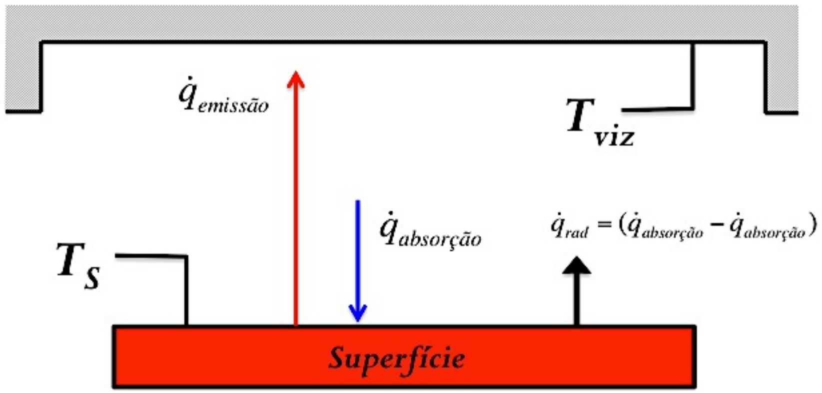
Absorção

✓ A taxa $\dot{q}_{absorção}$ (fluxo de radiação) relativamente à qual um corpo real **absorve** energia, proveniente de uma vizinhança à temperatura T_{Viz} (em Kelvin), é dado por:

$$\boxed{\alpha = \frac{E_a}{E_{Viz}} \text{ (corpo real)} \quad \rightarrow \quad \dot{q}_{absorção} = \alpha\, A\, \sigma\, T_{Viz}^4}$$

✓ Como para um corpo real (corpo cinzento) $\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\alpha}$, o fluxo líquido ($\dot{q}_{rad}$) de transferência de calor (por radiação) é calculado pela **"Lei de Stefan-Boltzmann"**:

$$\boxed{\dot{q}_{rad} = (\dot{q}_{emissão} - \dot{q}_{absorção}) = \varepsilon\, A\, \sigma\,(T_S^4 - T_{Viz}^4)}$$

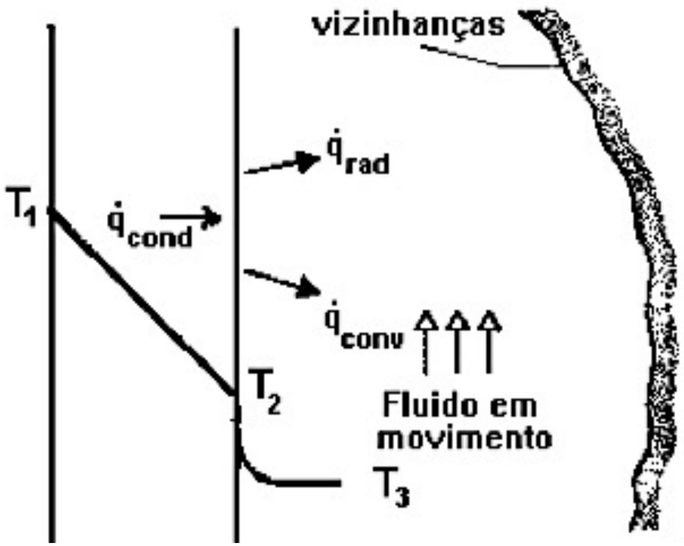


➢ onde T_S é a temperatura da superfície do corpo.

✓ **EFEITO COMBINADO CONDUÇÃO - CONVECÇÃO – RADIAÇÃO**

- Suponhamos, como exemplo, uma parede plana qualquer sujeita a uma diferença de temperatura. Na face interna a temperatura é T_1 e na face externa tem-se uma temperatura T_2 maior que a temperatura do ar ambiente T_3, como mostra a figura. 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. Porém, existe também uma parcela de transferência de calor por radiação da superfície para a vizinhança. Portanto, a transferência global é a soma das duas parcelas :

$$\boxed{\dot{q}_{cond} = \dot{q}_{conv} + \dot{q}_{rad}}$$



Joaquim Carneiro

ANÁLISE QUANTITATIVA

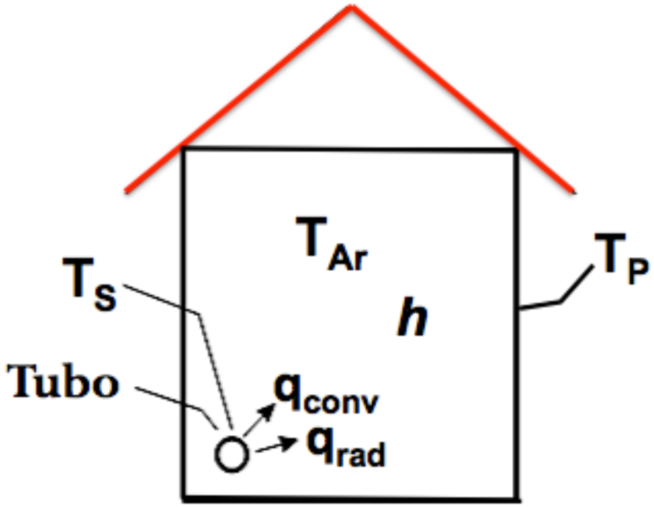
✓ **Exercício:** Um tubo de ar quente, com diâmetro externo D = 22 cm e temperatura superficial T_S = 93ºC, está localizado no interior de um grande compartimento cujas paredes estão a T_P = 21ºC. O ar no compartimento está a T_{ar} = 27ºC e o coeficiente de película é h = 5 kcal/h.m^2.ºC. Determine a quantidade de calor transferida por unidade de tempo, por metro linear de tubo, se :

a) o tubo é de estanho ($\varepsilon = 0{,}1$);

b) o tubo é pintado com laca branca ($\varepsilon = 0{,}9$).

$$\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8} \ (W / m^2 \cdot K^4)$$

$$\sigma = 4{,}89 \times 10^{-8} \ (kcal / h \cdot m^2 \cdot K^4)$$



$$T_S = 93\,^oC = 366\,K$$
$$T_{ar} = 27\,^oC$$
$$T_P = 21\,^oC = 294\,K$$
$$h = 5\,kcal/h \cdot m^2 \cdot {}^oC$$
$$D = 22\,cm = 0{,}22\,m \ \Rightarrow \ r = 0{,}11\,m$$

$$1W = \frac{1J}{s} \approx \frac{2{,}4 \times 10^{-4}\,kcal}{1/3600\,h} \approx 0{,}864\,kcal/h$$

Joaquim Carneiro

ANÁLISE QUANTITATIVA

a) Para um tubo de estanho (sem pintura) de comprimento unitário temos :

$$L = 1\,m \quad ; \quad \varepsilon = 0{,}1$$

- O fluxo de calor é composto de duas parcelas (convecção e radiação) :

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

$$\dot{q}_{conv} = h\,A \cdot \left(T_S - T_{ar}\right) = h\,\left(2\,\pi\,r\,L\right) \cdot \left(T_S - T_{ar}\right) = 5 \times \left(2 \times \pi \times 0{,}11 \times 1\right) \times \left[93 - 27\right] = 228{,}1\,kcal/h$$

$$\dot{q}_{rad} = \varepsilon\sigma A \cdot \left(T_S^4 - T_p^4\right) = \sigma\left(2\pi rL\right)\varepsilon \cdot \left(T_S^4 - T_p^4\right) = 4{,}89 \times 10^{-8} \times 0{,}1 \times \left(2 \times \pi \times 0{,}11 \times 1\right) \times \left[\left(366\right)^4 - \left(294\right)^4\right] \approx 35{,}4\,kcal/h$$

$$\dot{q} = (228{,}1 + 35{,}4) = 263{,}5\ kcal\,/\,h$$

b) Quando o tubo é pintado com laca branca ($\varepsilon = 0{,}9$) apenas a transferência de calor por radiação é afetada :

$$\boxed{\dot{q}' = \dot{q}_{conv} + \dot{q}'_{rad}}$$

ANÁLISE QUANTITATIVA

- Para um tubo de estanho (com pintura), obtém-se :

$$\dot{q}'_{rad} = \varepsilon' \sigma A \cdot \left(T_S^4 - T_p^4\right) = \sigma\left(2\pi r L\right) \cdot \varepsilon' \cdot \left(T_S^4 - T_p^4\right) = 4{,}89 \times 10^{-8} \times 0{,}9 \times \left(2 \times \pi \times 0{,}11 \times 1\right) \times \left[\left(366\right)^4 - \left(294\right)^4\right] \approx 318{,}6\, Kcal/h$$

$$\dot{q}' = (228{,}1 + 318{,}6) = 546{,}7\ kcal/h$$

✓ O fluxo de calor antes da pintura corresponde apenas a cerca de **48%** do fluxo após pintura.

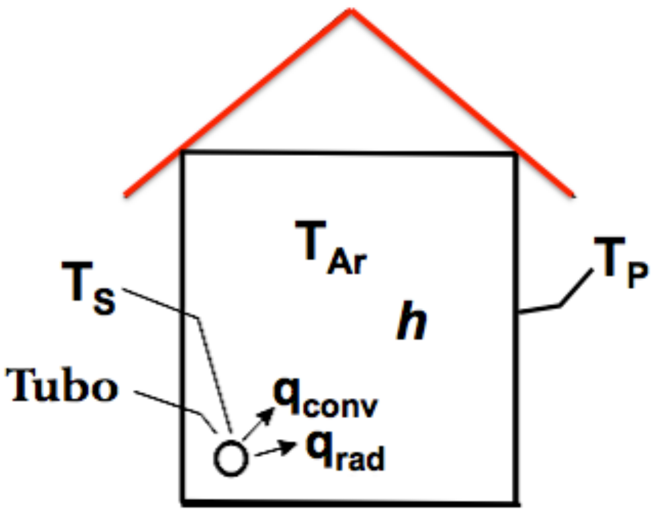
✓ **Exercício:** Numa indústria, vapor de água saturado à pressão de 4 MPa e à temperatura de 255ºC escoa por um tubo de parede fina com diâmetro externo igual a 20 cm. O tubo tem 10m de comprimento e está localizado no interior de um amplo recinto cujas paredes estão à mesma temperatura 25ºC (igual à do ar ambiente, h_{ar}= 5 kcal/h.m^2.ºC). Deseja-se pintar a superfície externa do tubo de maneira que quando é colocado fora do recinto, o vapor no interior do tubo corresponda apenas a 5% da sua massa não condensada. Na indústria dispõe-se de 3 tintas cujas emissividades são : **tinta A** – ε_α = 1; **tinta B** – ε_b = 0,86 e **tinta C** – ε_c = 0,65. Sabendo que o calor latente de vaporização nestas condições é de 404 kcal/kg, determinar :

ANÁLISE QUANTITATIVA

a) A tinta com a qual se deve pintar o tubo, sabendo-se que a variação mássica de vapor é $\dot{m} = 55,2\ kg/h$;

b) A parcela da quantidade de calor emitido por radiação, após a aplicação da pintura;

c) A variação mássica de vapor se for utilizada a tinta do tipo – A.



$$Tubo \rightarrow L = 10\,m \;\; ; \;\; r = D/2 = 10\,cm = 0,1\,m$$

$$T_S = 255\,^oC \qquad T_{Ar} = T_P = 25\,^oC$$

$$h_{Ar} = 5\,kcal/h \cdot m^2 \cdot {}^oC$$

$$L_v = 404\,kcal/kg$$

$$Nota: \quad \dot{m} = \frac{dm}{dt} = 55,2\ kg/h$$

a) A área superficial do tubo dentro do recinto é :

$$A = 2\pi r L = 2 \times \pi \times 0{,}1 \times 10 = 6{,}28\, m^2$$

- Na página 14 verificou-se que a quantidade de calor (Q) que é libertado no processo de condensação de *m* quilogramas de vapor é:

$$\boxed{Q = m\, L_v}$$

✓ Então: $\dfrac{dQ}{dt} = \dot{q} = \dfrac{dm}{dt} L_v \quad \Leftrightarrow \quad \dot{q} = \dot{m}\, L_v$

- **Colocação do tubo fora do recinto**: grande parte da massa de vapor condensa (sofre uma mudança de fase). Considerando que apenas 5% da massa permanece na fase de vapor, a quantidade de calor/unidade de tempo – (fluxo) libertada na condensação é igual ao produto da variação mássica de vapor (condensado) pelo calor latente de vaporização :

$$\dot{q} = [(1 - 0{,}05) \times \dot{m}] \cdot L_v = \left[0{,}95 \times 55{,}2\left(kg/h\right)\right] \times 404\left(kcal/kg\right) = 21186\, kcal/h$$

ANÁLISE QUANTITATIVA

- Este fluxo de calor será transferido para o ambiente pelo efeito combinado de **convecção** e **radiação** :

$$\dot{q} = \dot{q}_{rad} + \dot{q}_{conv}$$

$$\dot{q} = \varepsilon A\sigma \cdot \left(T_S^4 - T_{Ar}^4\right) + h_{ar} A \cdot \left(T_S - T_{Ar}\right)$$

$$21186 = 4{,}89 \times 10^{-8} \times 6{,}28 \times \varepsilon \times \left[\left(255+273\right)^4 - \left(25+273\right)^4\right] + 5 \times 6{,}28 \times \left(255-25\right)$$

- Resolvendo a equação acima, obtemos o valor da emissividade necessária para o tubo, e podemos comparar com as tintas existentes na indústria:

$$21186 = 21445{,}6\ \varepsilon + 7222 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon = 0{,}65 \quad \rightarrow \quad \textbf{Usar a Tinta – C}$$

b) A parcela da quantidade de calor emitido por radiação, após a aplicação da pintura é:

$$\dot{q}_{rad} = \varepsilon_c\, A\sigma \cdot \left(T_S^4 - T_{Ar}^4\right)$$

$$\dot{q}_{rad} = 4{,}89 \times 10^{-8} \times 6{,}28 \times 0{,}65 \times \left[\left(255+273\right)^4 - \left(25+273\right)^4\right] \approx 13940\ kcal/h$$

ANÁLISE QUANTITATIVA

c) Utilizando a tinta de maior emissividade (Tinta A – $\boldsymbol{\varepsilon_a} = 1$), aumenta-se a transferência de calor por radiação. Por imposição, a percentagem de vapor condensado deve ser mantida. Afim de se manter a mesma percentagem de condensação, então a variação mássica de vapor (i.e. A velocidade com que uma determinada quantidade de massa de vapor se transforma em água) deve aumentar : $\dot{m} \rightarrow \dot{m}'$.

- Quando o tubo é pintado com **Tinta A** ($\boldsymbol{\varepsilon_a} = 1$) apenas a transferência de calor por radiação é afetada :

$$\boxed{\dot{q} = \dot{q}'_{rad} + \dot{q}_{conv}}$$

$$\left[\dot{m}' \times 0,95\right] L_v = \varepsilon_a A \sigma \cdot \left(T_S^4 - T_{Ar}^4\right) + h_{ar} A \cdot \left(T_S - T_{Ar}\right)$$

$$\left[\dot{m}' \times 0,95\right] \times 404 = 4,89 \times 10^{-8} \times 6,28 \times 1 \times \left[(255+273)^4 - (25+273)^4\right] + 5 \times 6,28 \times (255-25)$$

$$\boxed{\dot{m}' = 74,7\ kg/h}$$