

# AULA 12 – RADIAÇÃO TÉRMICA

- IMPORTÂNCIA E CARACTERÍSTICAS
- EMISSORES DIFUSOS
- IRRADIAÇÃO
- RADIOSIDADE
- CORPO NEGRO
- LEI E DISTRIBUIÇÃO DE PLANCK
- A LEI DE STEFAN-BOLTZMANN



# IMPORTÂNCIA E PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA RADIAÇÃO TÉRMICA

# IMPORTÂNCIA DA RADIAÇÃO

- A transferência de calor por radiação é extremamente importante
  - Contrariamente ao que sucede na convecção e na condução, **a transferência de calor é proporcional a  $T^4$**  (muito importante em processos que envolvam temperaturas elevadas)
  - Calor é transferido por radiação em inúmeros processos (fornalhas, câmaras de combustão, aquecimento de fluidos em caldeiras, arrefecimento noturno de edifícios, aproveitamento da energia solar, etc.)
  - Ocorre sem que haja necessidade de intervenção de um sólido ou de um fluído de transporte



# CARACTERÍSTICAS DA RADIAÇÃO TÉRMICA: GENERALIDADES

- a emissão de energia térmica...
  - resulta da oscilação/transição dos eletrões que compõem os átomos que constituem a matéria.
    - Transporte de radiação por fotões (teoria de Planck)
    - Transporte de radiação por ondas eletromagnéticas (teoria de Maxwell)
  - é sustentada pela energia interna de um corpo, a qual é função da temperatura do corpo
  - é um fenómeno volumétrico – contudo em sólidos e líquidos uma parte significativa das emissões é absorvida pelas moléculas circundantes; do ponto de vista prático, a emissão de radiação térmica é vista como um fenómeno associado a uma superfície
- as ondas eletromagnéticas são caracterizadas por uma dada frequência,  $\nu$ , e por um dado comprimento de onda,  $\lambda$ , dado por  $\lambda = c/\nu$ , onde  $c$  é a velocidade da luz no seio onde a radiação se propaga (no vácuo,  $c_0 = 2,998 \times 10^8$  m/s)

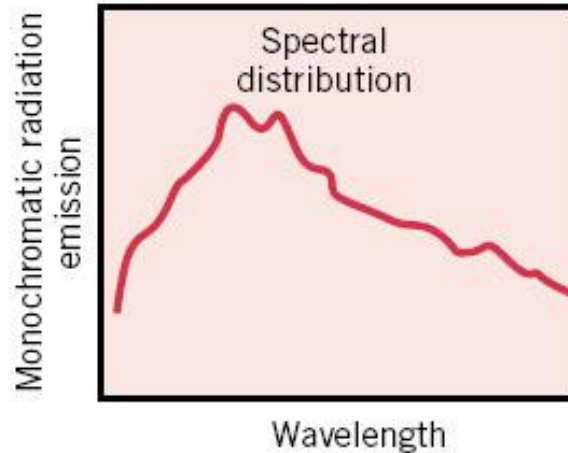


# PODER EMISSIVO

- O poder emissivo de um corpo,  $E$  ( $\text{W/m}^2$ ), traduz a capacidade de uma superfície emitir radiação térmica
- O poder emissivo de uma superfície real depende, entre outros, dos seguintes fatores:
  - Comprimento de onda  $\lambda$  ( $\mu\text{m}$ ) em que a radiação é emitida;
  - Temperatura  $T$  (K) a que a superfície se encontra;
  - Direção em que a radiação é emitida;
  - Estado de acabamento da superfície;
  - etc.



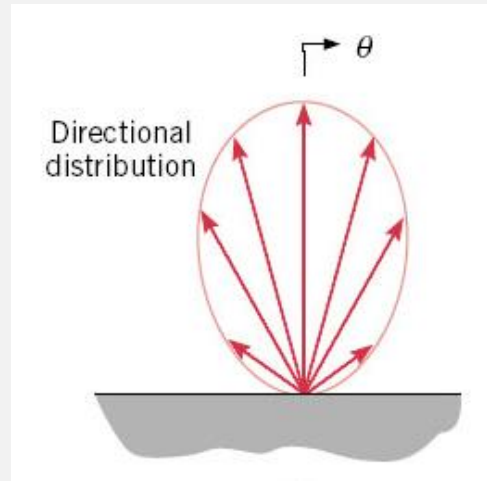
# CARACTERÍSTICAS DA RADIAÇÃO TÉRMICA: ESPETRO DE RADIAÇÃO



- A intensidade da radiação térmica emitida por uma superfície **distribui-se ao longo de vários comprimentos de onda** e não é uniforme – espectro de radiação



# CARACTERÍSTICAS DA RADIAÇÃO TÉRMICA: DIREÇÃO DA RADIAÇÃO EMITIDA



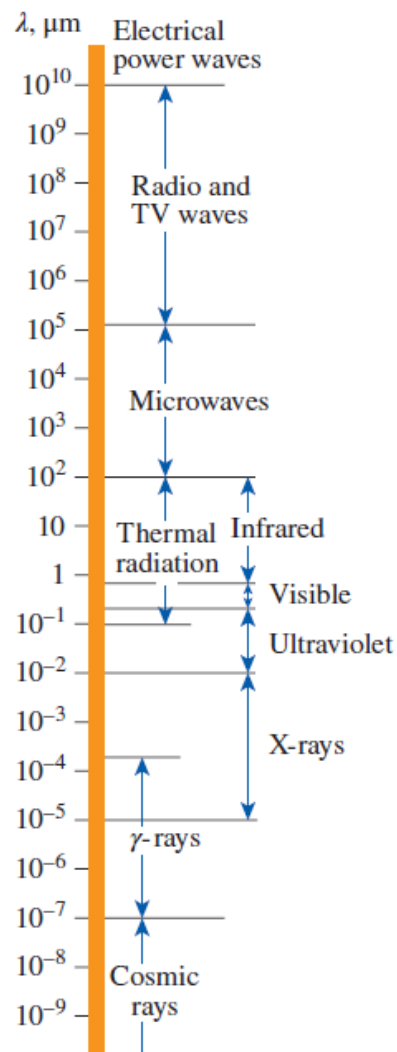
- Uma superfície pode emitir radiação preferencialmente ao longo de determinadas **direções**



# EMISSÃO ESPECTRAL DE RADIAÇÃO



# CARACTERÍSTICAS DA RADIAÇÃO TÉRMICA: EMISSÃO EM VÁRIOS COMPRIMENTOS DE ONDA

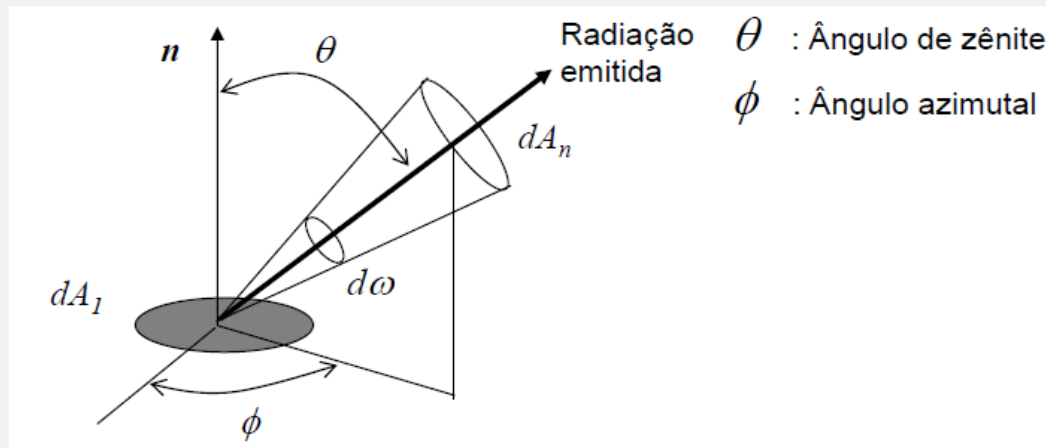


A radiação eletromagnética é emitida em vários comprimentos de onda



# DIREÇÃO DA RADIAÇÃO

# DIREÇÃO DA RADIAÇÃO EMITIDA POR UMA SUPERFÍCIE



- A radiação pode ser emitida em várias direções. A radiação emitida a partir de um elemento de área  $dA_1$  é definida direccionalmente em termos dos ângulos  $\theta$  (ângulo zenital) e  $\phi$  (ângulo azimutal)

# EMISSION DIFUSO

# EMISSOR DIFUSO

- Um **emissor difuso** não possui direções preferenciais de emissão de radiação

# IRRADIAÇÃO

# IRRADIAÇÃO: RADIAÇÃO INCIDENTE SOBRE UMA SUPERFÍCIE

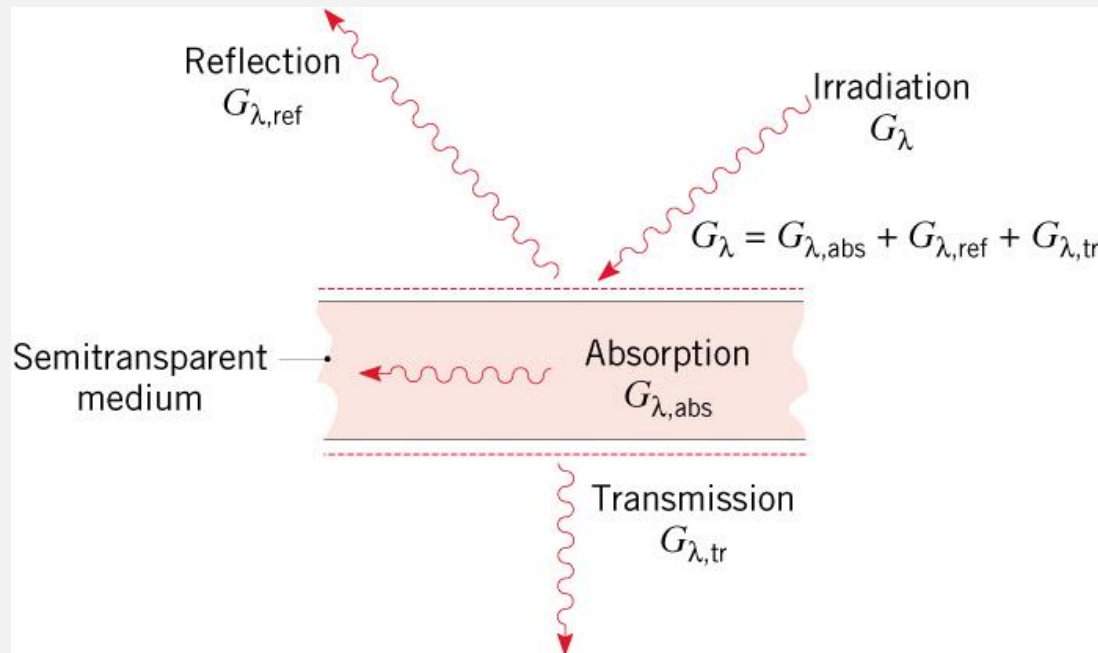
Irradiação,  $G$  (W/m<sup>2</sup>): taxa à qual a radiação incide sobre uma superfície

# ABSORTIVIDADE, REFLETIVIDADE E TRANSMISSIVIDADE



# ABSORÇÃO, REFLEXÃO E TRANSMISSÃO DE UMA SUPERFÍCIE

- Regra geral, a irradiação recebida por uma superfície pode ser refletida, absorvida ou transmitida



# ABSORTIVIDADE DE UMA SUPERFÍCIE

- A **absortividade**,  $\alpha$ , de uma superfície define a fração de irradiação que é absorvida por uma superfície,  $\alpha = G_{\text{ABS}}/G$ ;
- A absortividade depende do comprimento de onda da irradiação incidente, da direção da irradiação e da natureza da superfície,  $\alpha = \alpha(\lambda, \theta, \phi)$ ; a sua dependência relativamente à temperatura é, contudo, reduzida

# REFLETIVIDADE DE UMA SUPERFÍCIE

- A **refletividade**,  $\rho$ , de uma superfície define a fração de irradiação que é refletida por uma superfície,  $\rho = G_{\text{REF}}/G$ ;
- A refletividade depende do comprimento de onda da irradiação incidente, da sua direção, da natureza da superfície e ainda da direção tomada pela irradiação refletida

# TRANSMISSIVIDADE DE UMA SUPERFÍCIE

- A **transmissividade**,  $\tau$ , de uma superfície define a fração de irradiação que é transmitida por uma superfície,  $\tau = G_{\text{TRA}}/G$ ;



## RELAÇÕES ENTRE ABSORPTIVIDADE, REFLETIVIDADE E TRANSMISSIVIDADE

De  $G = G_{\text{ABS}} + G_{\text{REF}} + G_{\text{TRA}}$ ,

dividindo todos os termos por  $G$ , obtêm-se:

$$I = G_{\text{ABS}}/G + G_{\text{REF}}/G + G_{\text{TRA}}/G$$

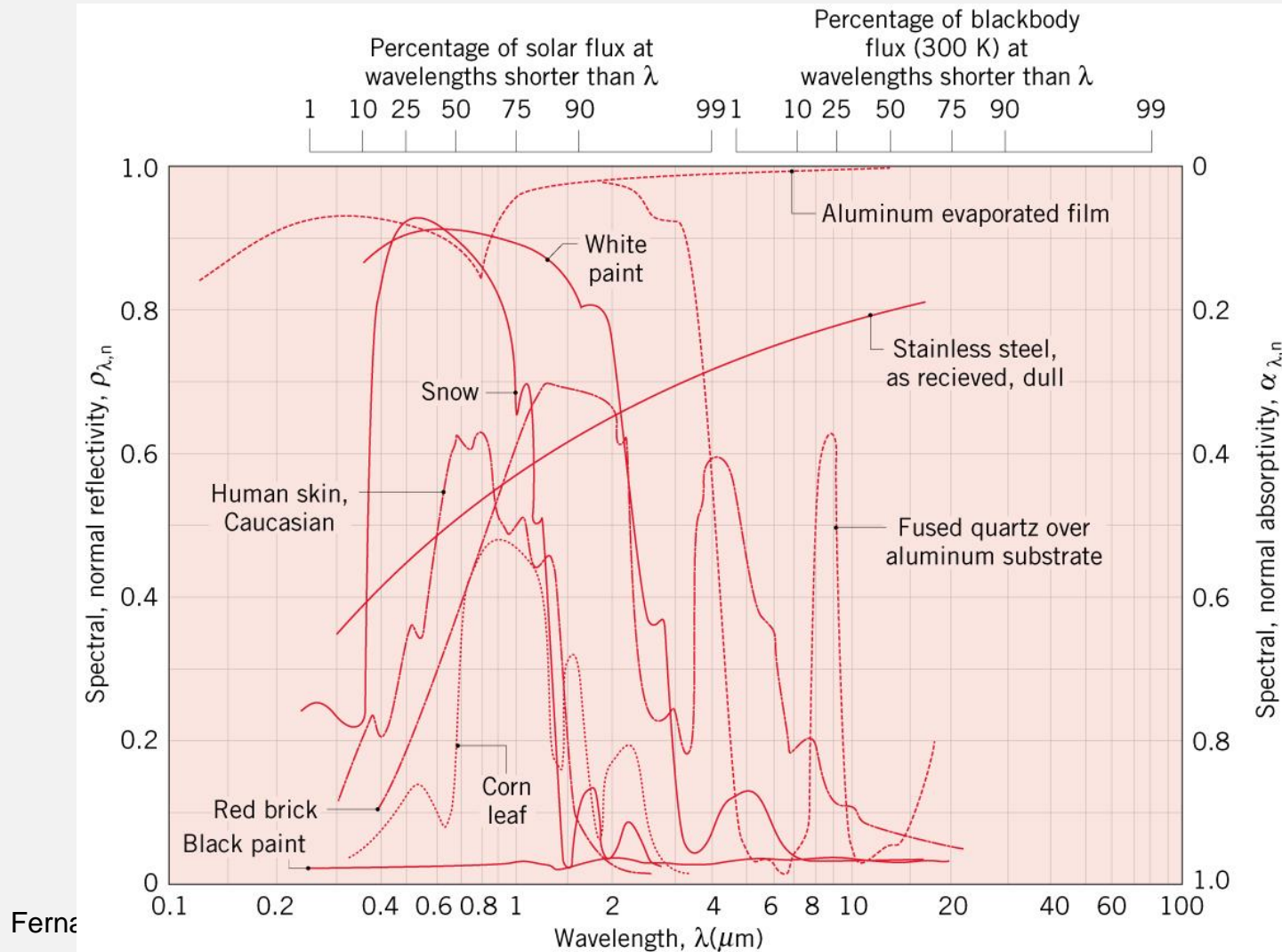
ou seja,

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

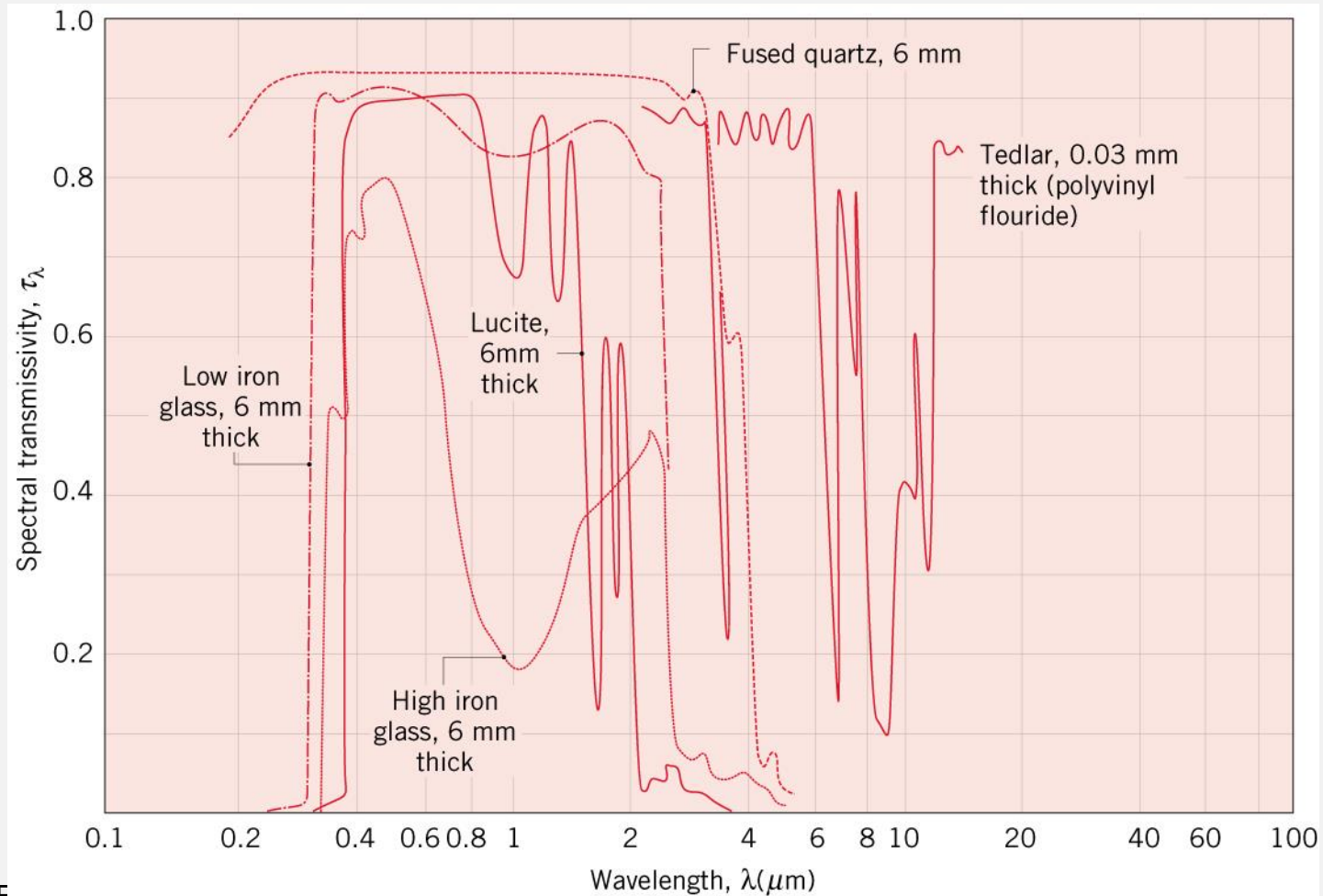
Para corpos opacos (não **transmitem** a radiação incidente) vem:

$$\alpha + \rho = 1$$

# ABSORTIVIDADE/REFLETIVIDADE NORMAL ESPETRAL DE SUPERFÍCIES OPACAS ( $\alpha + \rho = 1$ )



# TRANSMISSIVIDADE DE SUPERFÍCIES SEMI-TRANSPARENTES



# RADIOSIDADE



# RADIAÇÃO TOTAL QUE ABANDONA UMA SUPERFÍCIE

A radiosidade  $J$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) representa radiação total que abandona uma superfície e inclui:

- A radiação **emitida** por essa superfície;
- A irradiação **refletida** por essa superfície.

# CORPO NEGRO

# CORPO NEGRO

Um **corpo negro** é uma superfície **ideal**, com as seguintes características:

- Um corpo negro absorve toda a radiação incidente, independentemente do seu comprimento de onda e da sua direção
- Para uma dada temperatura  $T$  e para um dado comprimento de onda  $\lambda$ , nenhuma superfície emite mais radiação do que um corpo negro
- A radiação emitida por um corpo negro depende do comprimento de onda e da temperatura, mas não da direção; o corpo negro é um emissor difuso

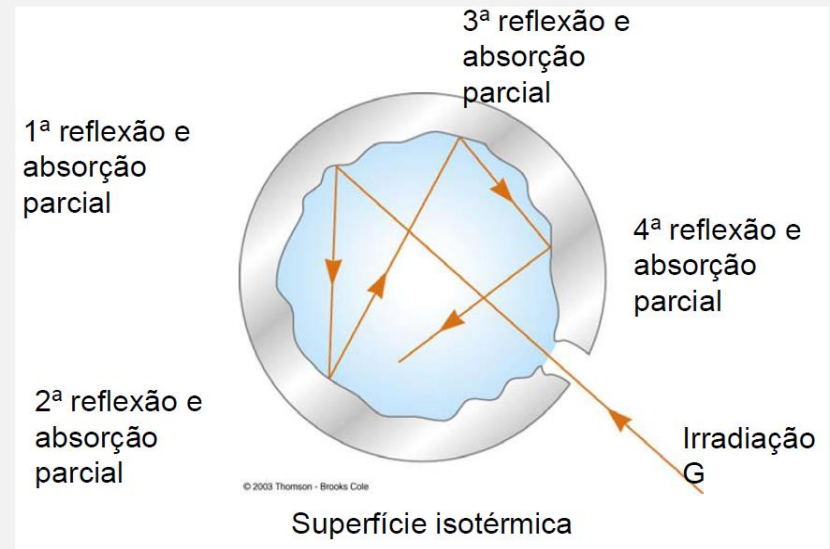
# EXISTEM CORPOS QUE SE COMPORTAM COMO UM CORPO NEGRO?

Nenhuma superfície real se comporta como um corpo negro, mas para uma cavidade cujas paredes interiores se mantêm a uma temperatura constante:

A radiação que entra por uma pequena abertura é refletida e absorvida várias vezes antes de emergir (ou seja, é absorvida pela cavidade quase na sua totalidade)

A radiação que abandona a cavidade não tem características direcionais

Logo, uma **cavidade** possui as características de um **corpo negro**



# A LEI E A DISTRIBUIÇÃO DE PLANCK

# LEI E DISTRIBUIÇÃO DE PLANCK

A emissão de radiação por um corpo negro em função do comprimento de onda  $\lambda$  e da temperatura  $T$  é governada pela distribuição de Planck:

$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]}$$

$$\begin{aligned} c_1 &= 3,742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2} \\ c_2 &= 1,439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K} \end{aligned}$$



# REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA DISTRIBUIÇÃO DE PLANCK

$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]}$$

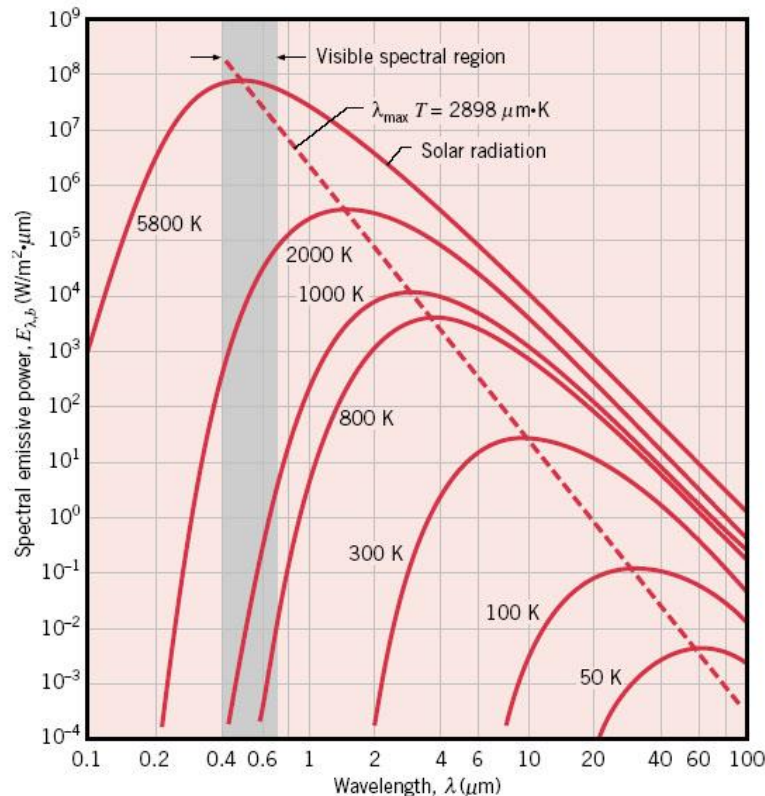


FIGURE 12.12 Spectral blackbody emissive power.

- A radiação emitida varia continuamente com o comprimento de onda;
- Para qualquer comprimento de onda, a radiação emitida aumenta com a temperatura
- À medida que a temperatura aumenta, a radiação emitida concentra-se em menores comprimentos de onda;
- A maior parte da radiação emitida abaixo dos 800 K não é detetável pelo olho humano
- O comprimento de onda no qual é emitido o valor máximo da radiação varia com T de acordo com a **lei de Wien**:  $\lambda_{\text{MAX}} \cdot T = 2897,8 \mu\text{m} \cdot \text{K}$

# A LEI DE STEFAN- BOLTZMANN



# LEI DE STEFAN-BOLTZMANN

O poder emissivo total de um corpo negro é obtido por integração, para todos os possíveis valores de  $\lambda$ , da distribuição de Planck.

$$E_b(T) = \int_0^{\infty} E_{\lambda,b}(\lambda, T) d\lambda$$

Como resultado obtêm-se a lei de Stefan-Boltzmann que traduz a radiação emitida por um corpo negro:

$$E_b = \sigma T^4$$

$\sigma$  – constante de Stefan-Boltzmann ( $5,670 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ )

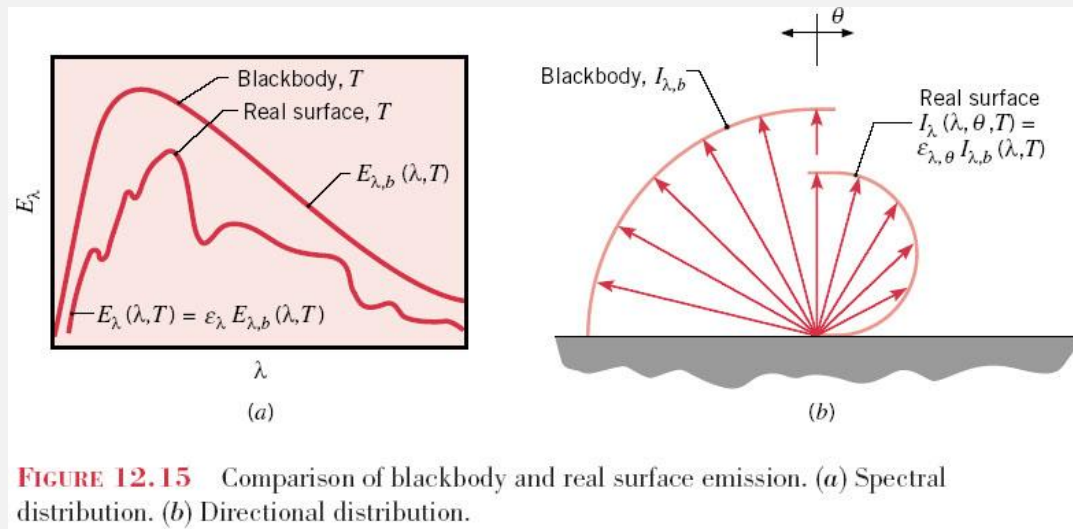
# CÁLCULO DA EMISSIVIDADE

# EMISSIVIDADE DE UMA SUPERFÍCIE REAL

- A **emissividade de uma superfície real**,  $\varepsilon$ , é definida como a relação entre a radiação emitida por uma superfície e a radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura.
- A emissividade de uma superfície real possui propriedades direcionais (varia com a direção considerada) e espectrais (varia com o comprimento de onda):

# CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DA EMISSIVIDADE DE UMA SUPERFÍCIE REAL

- A radiação espectral de uma superfície real...
  - ...tem um valor inferior à radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura
  - ... não se rege pela distribuição de Planck
  - ...não tem um carácter difuso



**FIGURE 12.15** Comparison of blackbody and real surface emission. (a) Spectral distribution. (b) Directional distribution.

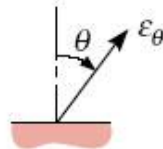
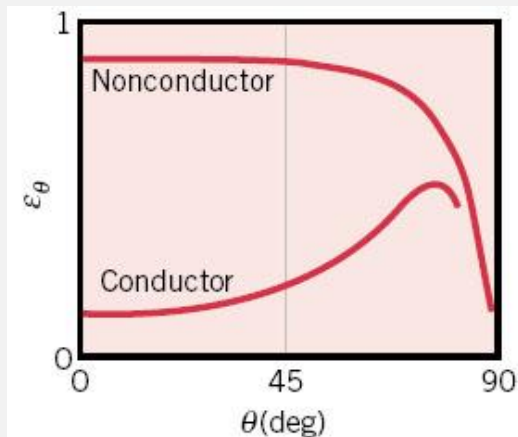
# EMISSIVIDADE ESPECTRAL DE UMA SUPERFÍCIE REAL

- A **emissividade direcional espectral** de uma superfície à temperatura  $T$  é a razão entre a intensidade de radiação emitida no comprimento de onda  $\lambda$  e nas direções  $\theta$  e  $\phi$  e a intensidade da radiação de um corpo negro à mesma temperatura  $T$  emitida no mesmo comprimento de onda

$$\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi,T) \equiv \frac{I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\phi,T)}{I_{\lambda,b}(\lambda,T)}$$

# EXEMPLOS DE VARIAÇÃO DA EMISSIVIDADE DIRECIONAL DE UMA SUPERFÍCIE REAL

- Com a direção...

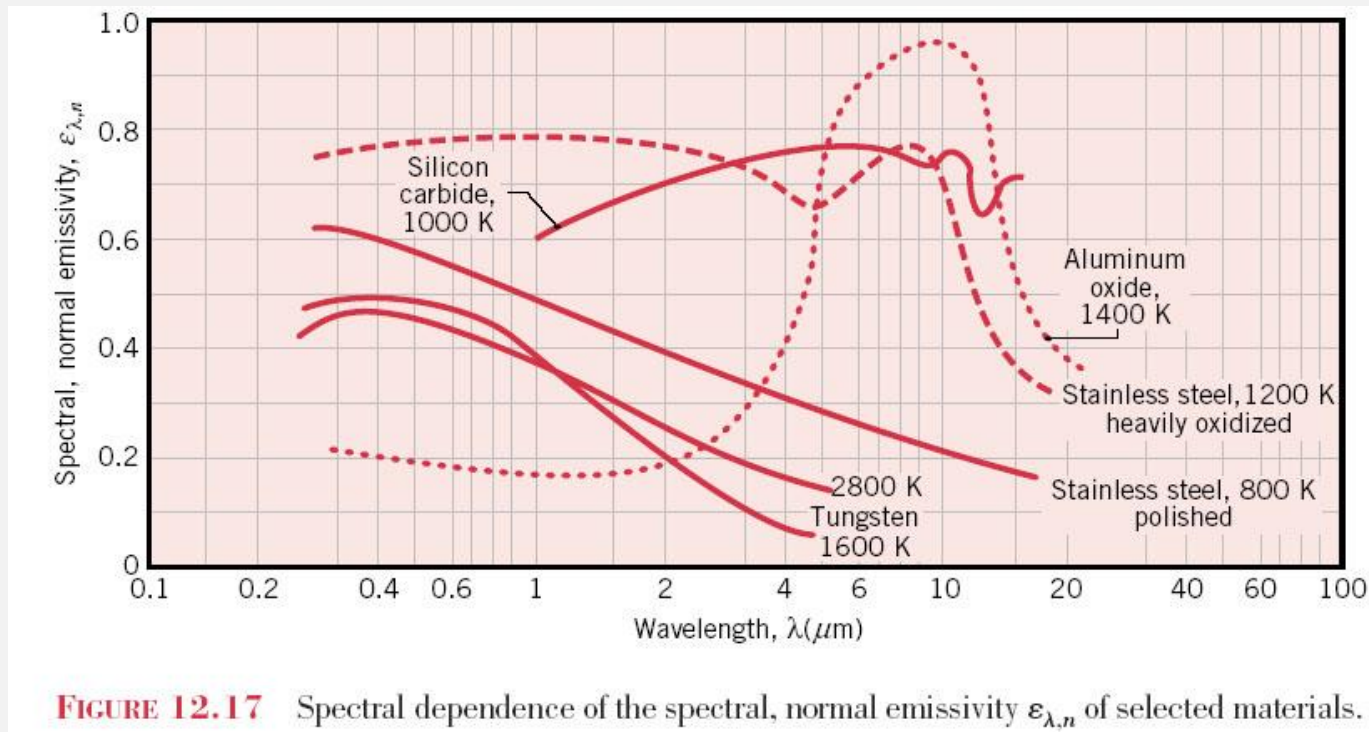


**FIGURE 12.16**

Representative directional distributions of the total, directional emissivity.

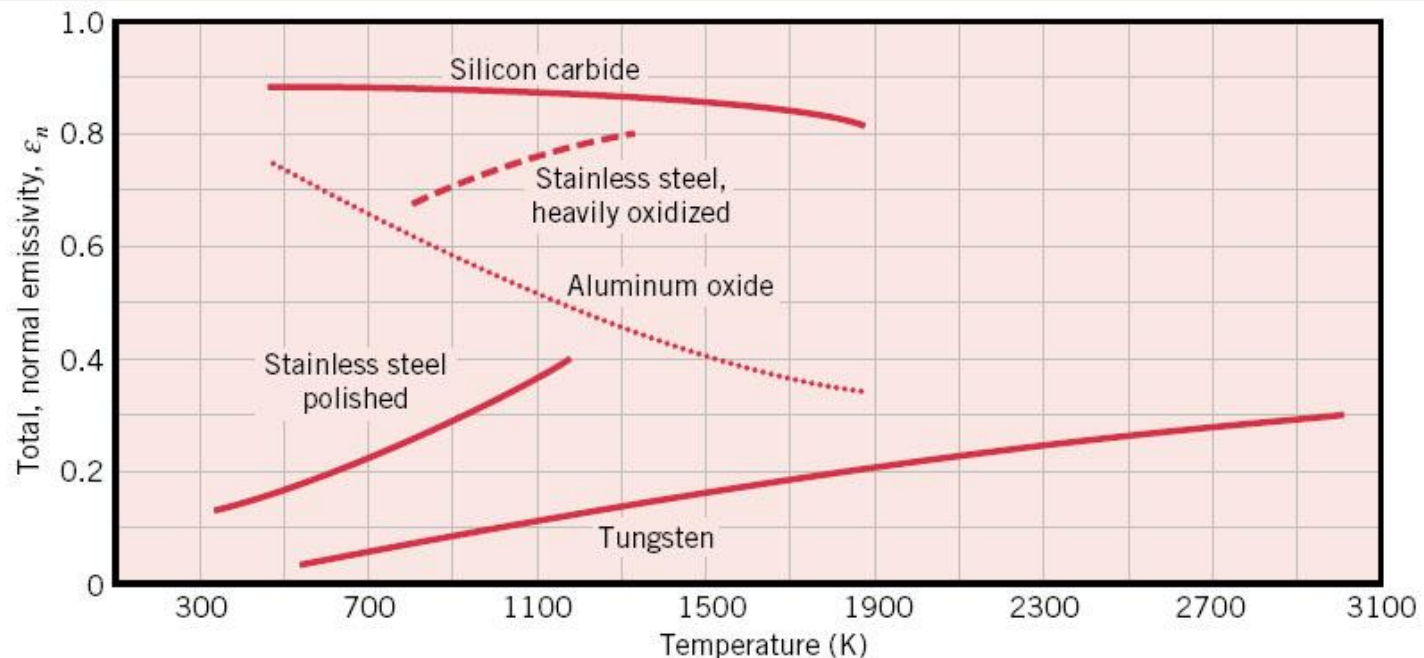
# EXEMPLOS DE VARIAÇÃO DA EMISSIVIDADE ESPECTRAL DE UMA SUPERFÍCIE REAL

- Com o comprimento de onda, vários tipos de materiais...



# VARIAÇÃO DA EMISSIVIDADE DE UMA SUPERFÍCIE REAL COM A TEMPERATURA

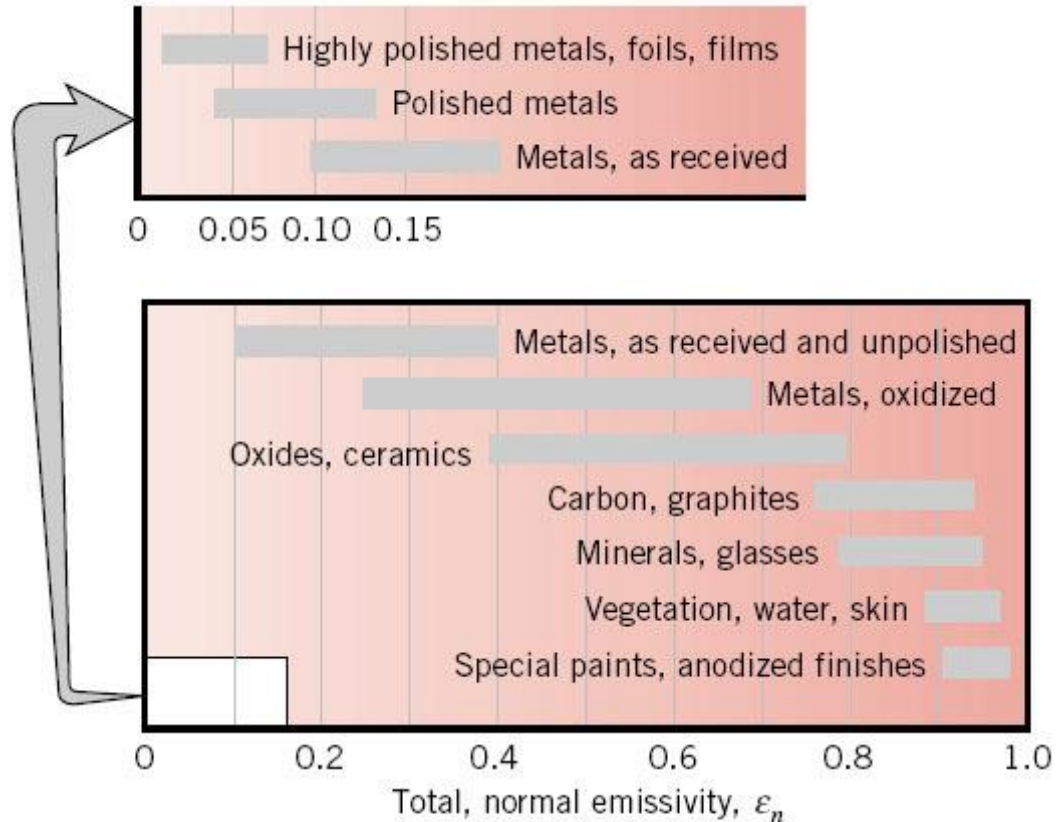
- Com a temperatura, vários tipos de materiais...



**FIGURE 12.18** Temperature dependence of the total, normal emissivity  $\epsilon_n$  of selected materials.



# EMISSIVIDADE DE SUPERFÍCIES REAIS



**FIGURE 12.19** Representative values of the total, normal emissivity  $\epsilon_n$ .

# DETERMINAÇÃO DA EMISSIVIDADE DE UMA SUPERFÍCIE REAL

- Em termos práticos, o valor relevante da emissividade é **um valor médio direcional**, pelo que a propriedade relevante é a emissividade hemisférica espectral definida como

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) \equiv \frac{E_{\lambda}(\lambda, T)}{E_{\lambda, b}(\lambda, T)} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda, e}(\lambda, \theta, \phi, T) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda, b}(\lambda, T) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi}$$

Se considerarmos uma média em todos os comprimentos de onda, então obteremos a emissividade hemisférica total, definida como:

$$\varepsilon(T) \equiv \frac{E(T)}{E_b(T)} = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) E_{\lambda, b}(\lambda, T) d\lambda}{E_b(T)}$$

TABLE A.11 Total, Normal (*n*) or Hemispherical (*h*) Emissivity of Selected Surfaces

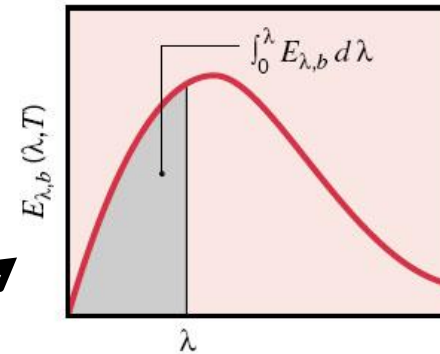
*Metallic Solids and Their Oxides<sup>a</sup>*

| Description/Composition |              | Emissivity, $\varepsilon_n$ or $\varepsilon_h$ , at Various Temperatures (K) |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------|--------------|--|------|------|------|------|------|------|
|                         |              | 100  | 200  | 300  | 400  | 600  | 800  | 1000 |
| Aluminum                |              |  |      |      |      |      |      |      |
| Highly polished, film   | ( <i>h</i> ) | 0.02   | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |      |
| Foil, bright            | ( <i>h</i> ) | 0.06   | 0.06 | 0.07 |      |      |      |      |
| Anodized                | ( <i>h</i> ) |  |      | 0.82 | 0.76 |      |      |      |
| Chromium                |              |  |      |      |      |      |      |      |
| Polished or plated      | ( <i>n</i> ) | 0.05   | 0.07 | 0.10 | 0.12 | 0.14 |      |      |
| Copper                  |              |  |      |      |      |      |      |      |
| Highly polished         | ( <i>h</i> ) |  |      | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| Stably oxidized         | ( <i>h</i> ) |  |      |      |      | 0.50 | 0.58 | 0.80 |
| Gold                    |              |  |      |      |      |      |      |      |
| Highly polished or film | ( <i>h</i> ) | 0.01   | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |
| Foil, bright            | ( <i>h</i> ) | 0.06   | 0.07 | 0.07 |      |      |      |      |

# EMISSÃO DE RADIAÇÃO EM BANDAS DE COMPRIMENTO DE ONDA

# EMIÇÃO NUMA BANDA DE COMPRIMENTO DE ONDA

- Importa amiúde quantificar a fração da emissão total de um corpo negro num dado intervalo de comprimentos de onda.
- Conhecendo-se a dependência do poder emissivo espectral relativamente ao comprimento de onda, é possível determinar a fração de radiação que é emitida entre os comprimentos de onda 0 e  $\lambda$ .
- Graficamente essa fração é representada pela razão entre a área sombreada e a área total compreendida debaixo da curva.
- De forma analítica, através da equação à direita.



**FIGURE 12.13** Radiation emission from a blackbody in the spectral band 0 to  $\lambda$ .

$$F_{(0-\lambda)} = \frac{\int_0^\lambda E_{\lambda,b} d\lambda}{\sigma T^4} = f(\lambda T)$$

# EMIÇÃO NUMA BANDA DE COMPRIMENTO DE ONDA

- Esta fração também pode ser calculada a partir do conhecimento do produto  $\lambda \cdot T$  com recurso à tabela ao lado.
- Caso se pretenda quantificar a emissão de um corpo negro num dado intervalo de comprimentos de onda, basta atender a que

$$F_{(\lambda_1 - \lambda_2)} = F_{(0 - \lambda_2)} - F_{(0 - \lambda_1)} = \frac{\int_0^{\lambda_2} E_{\lambda,b} d\lambda - \int_0^{\lambda_1} E_{\lambda,b} d\lambda}{\sigma T^4}$$

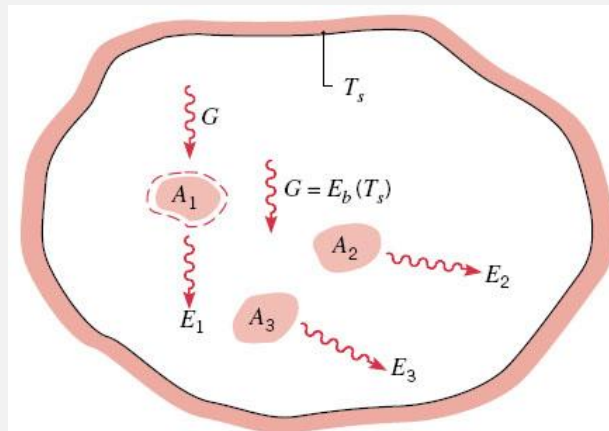
**TABLE 12.1** Blackbody Radiation Functions<sup>a</sup>

| $\lambda T$<br>( $\mu\text{m} \cdot \text{K}$ ) | $F_{(0 \rightarrow \lambda)}$ | $I_{\lambda,b}(\lambda, T)/\sigma T^5$<br>( $\mu\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{sr}$ ) <sup>-1</sup> | $\frac{I_{\lambda,b}(\lambda, T)}{I_{\lambda,b}(\lambda_{\text{max}}, T)}$ |
|---|-------------------------------|--|--|
| 200   | 0.000000                      | $0.375034 \times 10^{-27}$   | 0.000000   |
| 400   | 0.000000                      | $0.490335 \times 10^{-13}$   | 0.000000   |
| 600   | 0.000000                      | $0.104046 \times 10^{-8}$  | 0.000014   |
| 800   | 0.000016                      | $0.991126 \times 10^{-7}$  | 0.001372   |
| 1,000   | 0.000321                      | $0.118505 \times 10^{-5}$  | 0.016406   |
| 1,200   | 0.002134                      | $0.523927 \times 10^{-5}$  | 0.072534   |
| 1,400   | 0.007790                      | $0.134411 \times 10^{-4}$  | 0.186082   |
| 1,600   | 0.019718                      | 0.249130   | 0.344904   |
| 1,800   | 0.039341                      | 0.375568   | 0.519949   |
| 2,000   | 0.066728                      | 0.493432   | 0.683123   |
| 2,200   | 0.100888                      | $0.589649 \times 10^{-4}$  | 0.816329   |
| 2,400   | 0.140256                      | 0.658866   | 0.912155   |
| 2,600   | 0.183120                      | 0.701292   | 0.970891   |
| 2,800   | 0.227897                      | 0.720239   | 0.997123   |
| 2,898   | 0.250108                      | $0.722318 \times 10^{-4}$  | 1.000000   |
| 3,000   | 0.273232                      | $0.720254 \times 10^{-4}$  | 0.997143   |
| 3,200   | 0.318102                      | 0.705974   | 0.977373   |
| 3,400   | 0.361735                      | 0.681544   | 0.943551   |
| 3,600   | 0.403607                      | 0.650396   | 0.900429   |
| 3,800   | 0.443382                      | $0.615225 \times 10^{-4}$  | 0.851737   |
| 4,000   | 0.480877                      | 0.578064   | 0.800291   |

# A LEI DE KIRCHOFF

# A LEI DE KIRCHOFF

- Considere-se uma cavidade cujas paredes se encontram a uma temperatura uniforme  $T_s$ . Considere-se um conjunto de corpos no seu interior. A irradiação  $G$  recebida por qualquer um desses corpos será dada por  $G=E_B$ . Em regime estacionário todos os corpos deverão estar em equilíbrio térmico pelo que  $T_1=T_2=\dots=T_s$ .
- Um balanço energético efetuado em torno do corpo 1, com uma área  $A_1$ , em regime estacionário revelará que  $\alpha_1.G.A_1-E_1.A_1=0$ . Como  $G=E_B$ , então  $E_1/\alpha_1=E_B$ .
- Realizando um balanço energético para cada um dos corpos que se encontram na cavidade, é possível mostrar que  $E_1/\alpha_1=E_2/\alpha_2=\dots=E_B$



**FIGURE 12.24**

Radiative exchange in an isothermal enclosure.

# A LEI DE KIRCHOFF

A relação  $\frac{E_1}{\alpha_1} = \frac{E_2}{\alpha_2} = \dots = E_B$

1

é designada por **Lei de Kirchhoff**



# CONSEQUÊNCIAS DA LEI DE KIRCHOFF

$$\frac{E_1}{\alpha_1} = \frac{E_2}{\alpha_2} = \dots = E_B$$

Uma vez que  $\alpha < 1$ , então  $E < E_B$ ; nenhuma superfície real pode ter um poder emissivo idêntico ou superior ao de um corpo negro à mesma temperatura

Atendendo a que  $E_1 = \epsilon_1 E_B$ , substituindo acima os valores de  $E_1, E_2$ , etc. e dividindo por  $E_B$ , obtém-se uma definição alternativa para a Lei de Kirchhoff:

$$\frac{\epsilon_1}{\alpha_1} = \frac{\epsilon_2}{\alpha_2} = \dots = 1$$

ou, o que é equivalente,  $\epsilon = \alpha$

A expressão  $\epsilon = \alpha$  traduz o facto de que, para qualquer superfície no interior da cavidade, a emissividade hemisférica total da superfície é igual à sua absorptividade hemisférica total. Esta igualdade, desde que aplicável, simplifica em muito o cálculo da troca de calor por radiação entre diferentes superfícies.

# SUPERFÍCIES CINZENTAS DIFUSAS

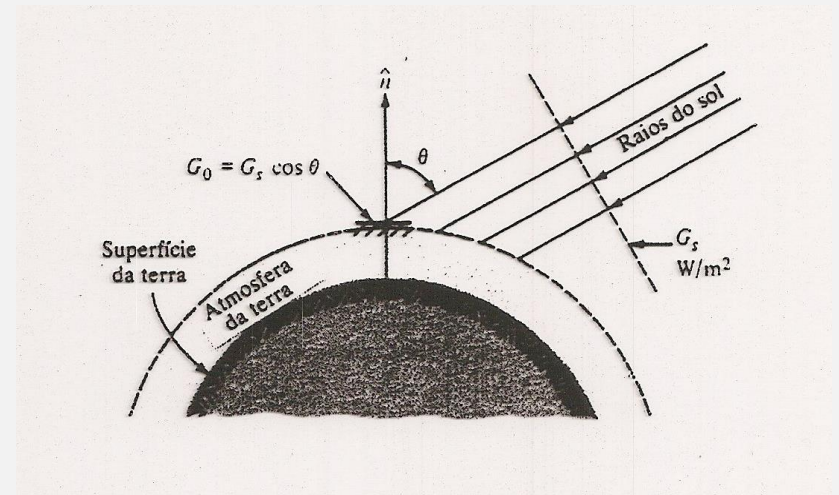
# SUPERFÍCIES CINZENTAS DIFUSAS

- A igualdade  $\varepsilon=\alpha$  obtida como consequência da lei de Kirchoff foi deduzida para condições muito particulares: a irradiação recebida correspondia à radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura da superfície
- É contudo possível estender a igualdade anterior a uma superfície que satisfaça os seguintes requisitos:
  - Que a irradiação recebida tenha um carácter difuso (aplicável na maior parte dos problemas);
  - Que a superfície possa ser classificada como difusa (aproximação razoável para muitas superfícies, particularmente para materiais não condutores)
  - Que a irradiação recebida corresponda à emissão de um corpo negro ou que a superfície seja classificada como cinzenta ( $\alpha_\lambda$  e  $\varepsilon_\lambda$  são independentes do valor de  $\lambda$ )
- Uma superfície com estas características é designada por **superfície cinzenta difusa**
- Para esta superfície, é válida a igualdade  $\varepsilon=\alpha$

# NOTAS SOBRE RADIAÇÃO SOLAR

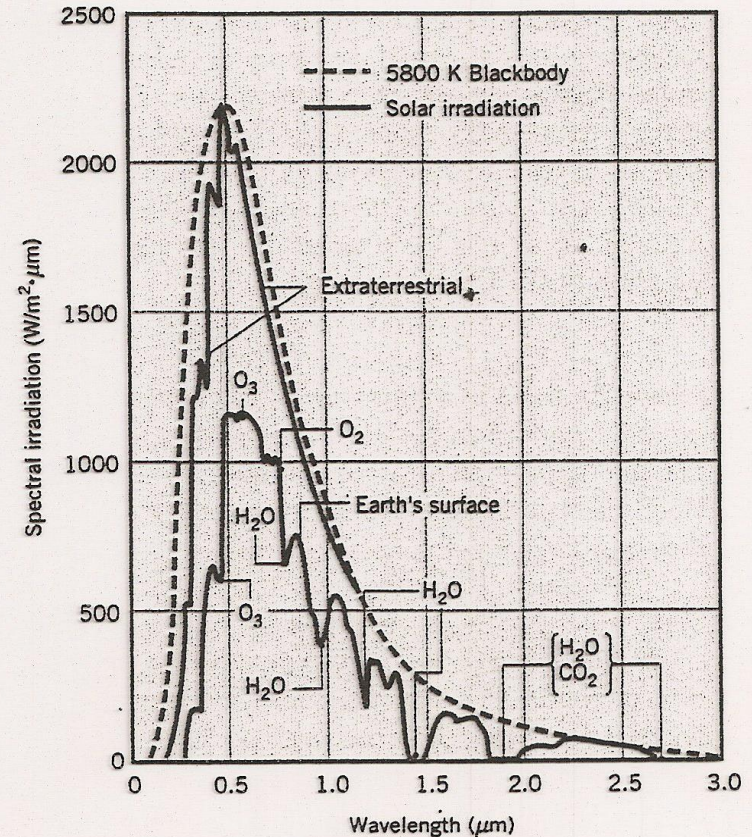
# RADIAÇÃO SOLAR

- A intensidade da radiação solar que incide sobre a camada superior da atmosfera foi determinada experimentalmente como sendo igual a  $G_s = 1353 \text{ W.m}^{-2}$  que é a chamada **constante solar**
- No entanto, a radiação que atinge na direção normal uma dada área na atmosfera será  $G_0 = G_s \cdot \cos \theta$



# RADIAÇÃO SOLAR

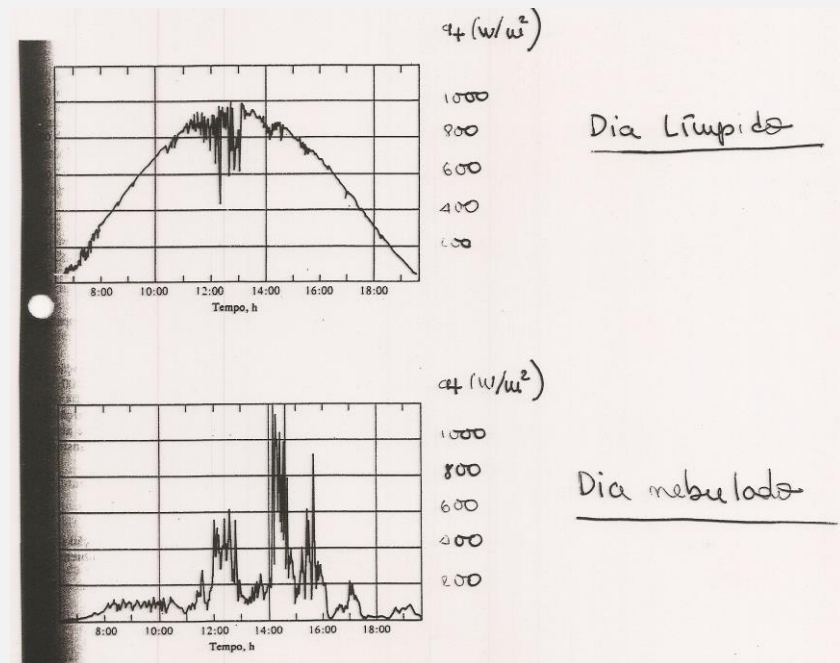
- O que acontece à radiação solar enquanto atravessa a atmosfera:
  - Parte é espalhada (refletida)
  - Parte é absorvida
  - Parte é transmitida
- O ozono absorve a radiação solar em comprimentos de onda compreendidos entre 0,2 e 0,29  $\mu\text{m}$  e entre 0,29 e 0,34  $\mu\text{m}$
- O oxigénio absorve a radiação solar em comprimentos de onda em torno de 0,76  $\mu\text{m}$
- O vapor de água absorve radiação nas faixas compreendidas entre 0,7 e 2,2  $\mu\text{m}$  e para comprimentos de onda superiores a 2,2  $\mu\text{m}$



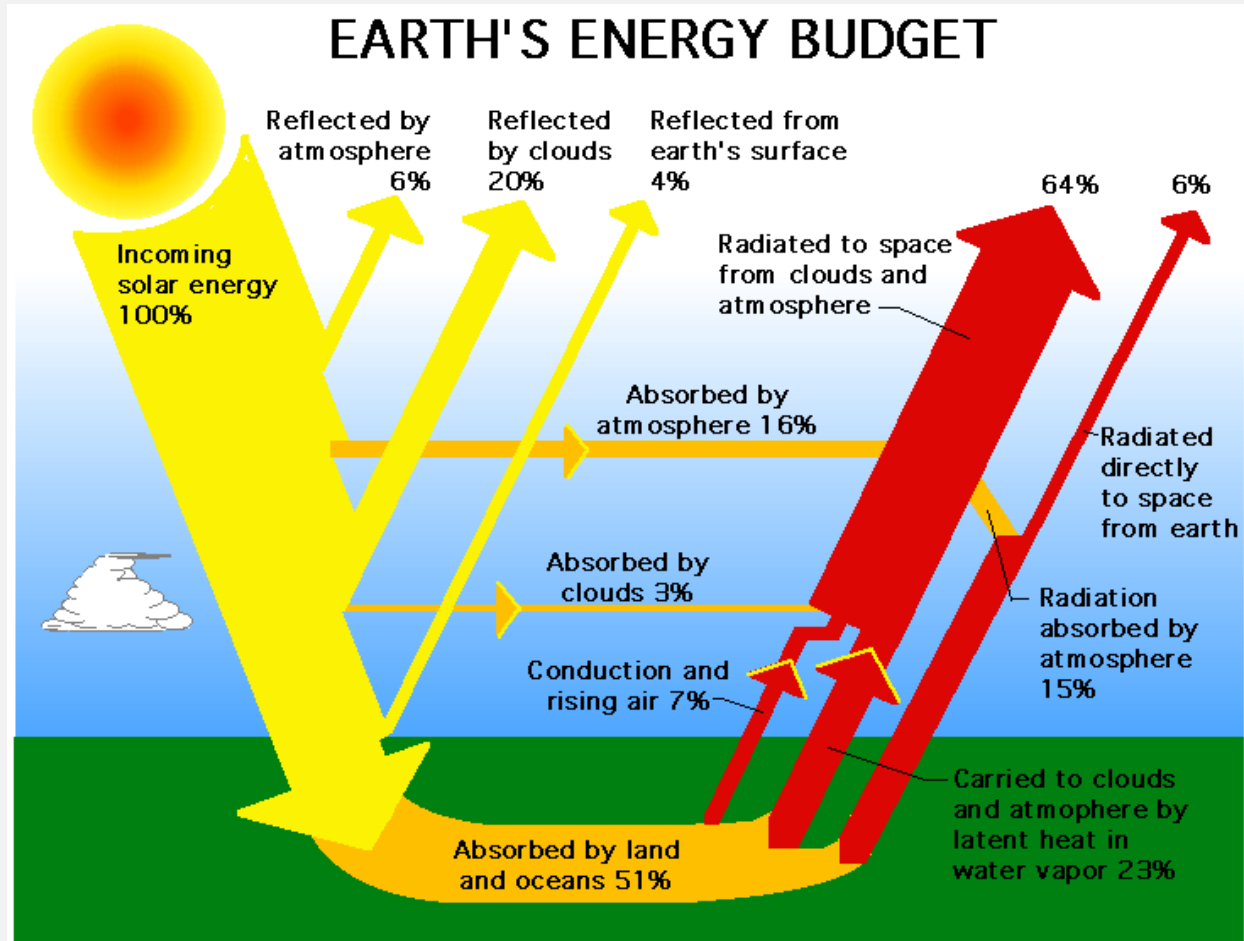
# RADIAÇÃO SOLAR: RADIAÇÃO DIRETA E RADIAÇÃO DIFUSA

- A componente de radiação solar que não é nem espalhada nem absorvida pela atmosfera é designada por radiação direta
- A componente de radiação que é espalhada mas que chega à superfície da Terra é designada por radiação difusa
- Assim, o fluxo total de calor recebido pela superfície é dado por:

$$q_T = q_{DIR} \cdot \cos\theta + q_{DIF}$$



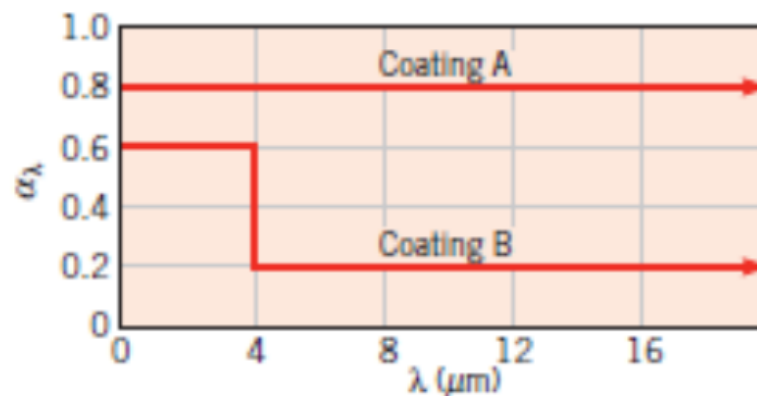
# RADIAÇÃO SOLAR: BALANÇO

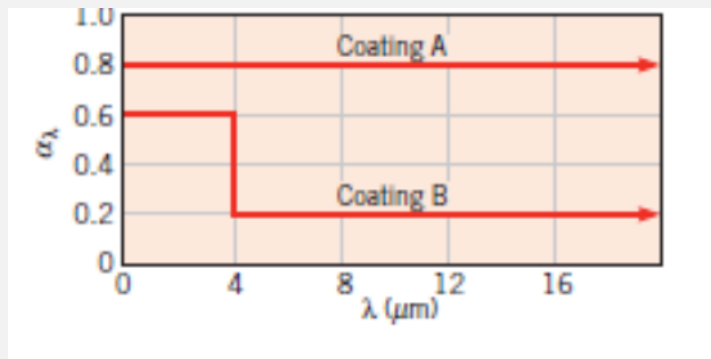




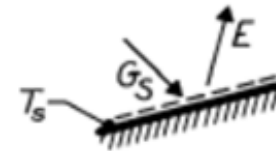
# APLICAÇÕES

**12.114** A contractor must select a roof covering material from the two diffuse, opaque coatings with  $\alpha_\lambda(\lambda)$  as shown. Which of the two coatings would result in a lower roof temperature? Which is preferred for summer use? For winter use? Sketch the spectral distribution of  $\alpha_\lambda$  that would be ideal for summer use. For winter use.





SCHEMATIC:



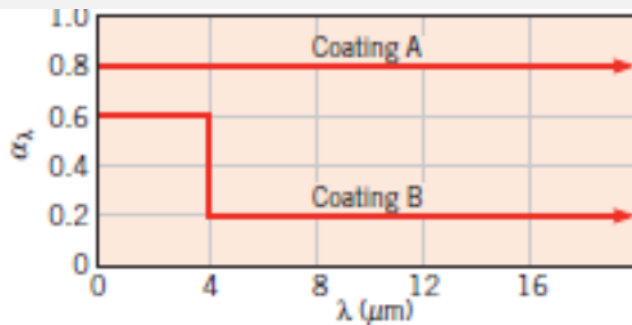
Pressupostos:

1. Ambas as coberturas são opacas e difusas;
2. Efeitos convectivos desprezáveis e face inferior completamente isolada;
3. Outros efeitos radiativos que não a radiação solar desprezáveis.

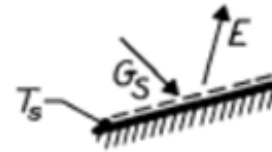
Balanço energético:

$$\varepsilon \sigma T_s^4 = \alpha_S G_S.$$

$$T_s = \left( \frac{\alpha_S G_S}{\varepsilon \sigma} \right)^{1/4}.$$



SCHEMATIC:



$$T_s = \left( \frac{\alpha_s G_s}{\varepsilon \sigma} \right)^{1/4}.$$

A radiação solar está concentrada em comprimentos de onda inferiores a 4  $\mu\text{m}$ ; no entanto, a emissividade da superfície (que está a uma temperatura mais baixa) está distribuída acima de 4  $\mu\text{m}$  (distribuição de Planck).

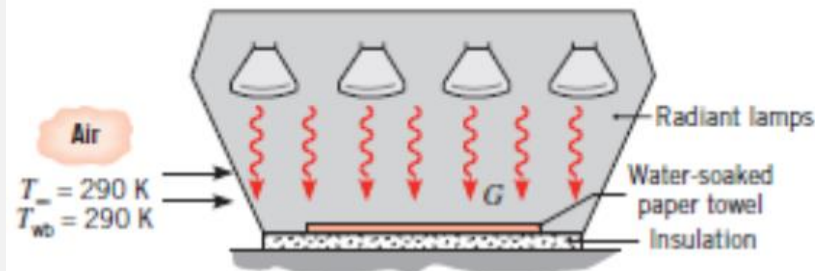
Assim para a cobertura A:  $\alpha_s=0,8$  e  $\varepsilon=\alpha=0,8$

Para a cobertura B:  $\alpha_s=0,6$  e  $\varepsilon=\alpha=0,2$

Logo  $\alpha_s/\varepsilon = 1$  para a cobertura A e  $\alpha_s/\varepsilon = 3$  para a cobertura B.

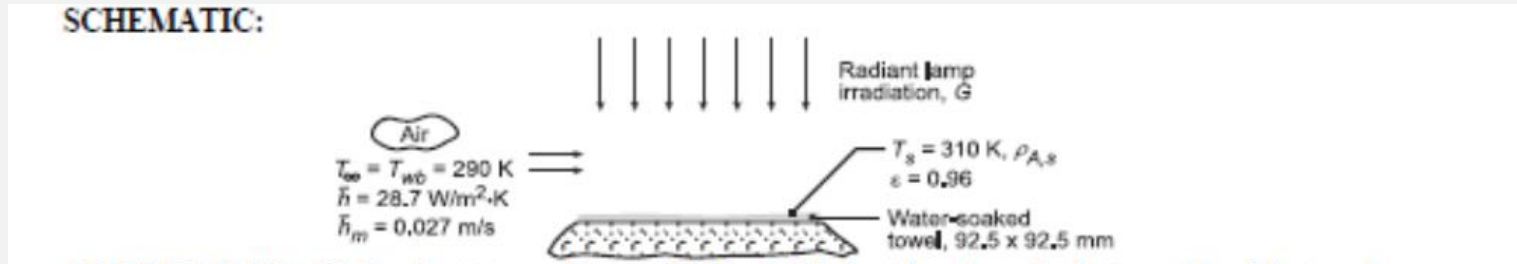
A temperatura alcançada pela cobertura será maior para a cobertura B do que para a cobertura A.

**12.146** Our students perform a laboratory experiment to determine mass transfer from a wet paper towel experiencing forced convection and irradiation from radiant lamps. For the values of  $T_\infty$  and  $T_{wb}$  prescribed on the sketch, the towel temperature was found to be  $T_s = 310$  K. In addition, flat-plate correlations yielded average heat and mass transfer convection coefficients of  $\bar{h} = 28.7$  W/m<sup>2</sup>·K and  $\bar{h}_m = 0.027$  m/s, respectively. The towel has dimensions of 92.5 mm × 92.5 mm and is diffuse and gray with an emissivity of 0.96.



- From the foregoing results, determine the vapor densities,  $\rho_{A,s}$  and  $\rho_{A,\infty}$ , the evaporation rate,  $n_A$  (kg/s), and the net rate of radiation transfer to the towel,  $q_{rad}$  (W).
- Using results from part (a) and assuming that the irradiation  $G$  is uniform over the towel, determine the emissive power  $E$ , the irradiation  $G$ , and the radiosity  $J$ .

### SCHEMATIC:



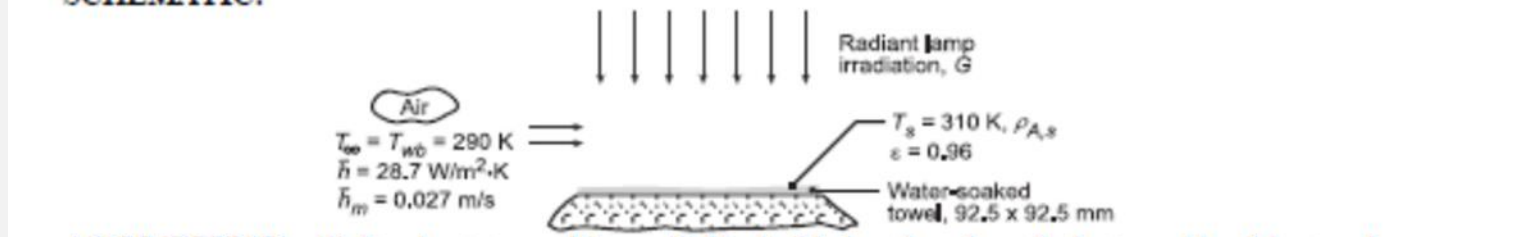
Pressupostos:

1. Regime estacionário;
2. Perdas de calor negligenciáveis na superfície inferior da toalha;
3. Irradiação uniforme;
4. A superfície líquida comporta-se como uma superfície cinzenta e difusa

Uma vez que a temperatura ambiente é igual à temperatura de saturação, e que podemos considerar o ar como saturado na superfície da toalha, as massas específicas de vapor de água no escoamento e na superfície são, respetivamente:

| T (K)            | $v_g$ (m <sup>3</sup> /kg) | $\rho_g$ (kg/m <sup>3</sup> )            |
|------------------|----------------------------|--|
| $T_\infty = 290$ | 69.7                       | $\rho_{A,\infty} = 1.435 \times 10^{-2}$ |
| $T_s = 310$      | 22.93                      | $\rho_{A,s} = 4.361 \times 10^{-2}$      |

**SCHEMATIC:**



Utilizando o coeficiente de transferência de massa, a taxa de evaporação pode ser calculada como:

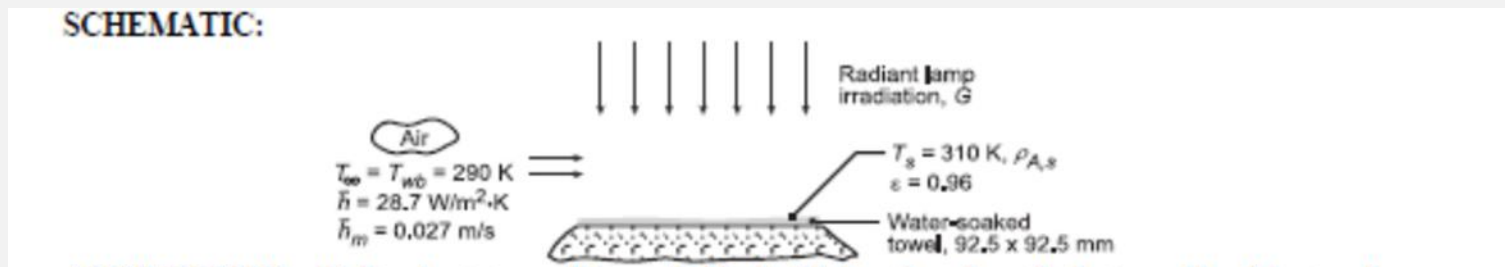
$$n_A = \bar{h}_m A_s (\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty}) = 0.027 \text{ m/s} (0.0925 \text{ m})^2 (4.361 - 1.435) \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3 = 6.76 \times 10^{-6} \text{ kg/s} <$$

Um balanço energético na superfície, permite deduzir que:

$$q_{\text{rad}} = q_{\text{cv}} + q_{\text{evap}} = \bar{h}_s A_s (T_s - T_{\infty}) + n_A h_{fg}$$

$$q_{\text{rad}} = 28.7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} (0.0925 \text{ m})^2 (310 - 290) \text{ K} + 6.76 \times 10^{-6} \text{ kg/s} \times 2414 \times 10^3 \text{ J/kg}$$

$$q_{\text{rad}} = (4.91 + 16.32) \text{ W} = 21.2 \text{ W}$$



O poder emissivo é:

$$E = \epsilon E_b(T_s) = \epsilon \sigma T_s^4 = 0.96 \times 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 (310 \text{ K})^4 = 502.7 \text{ W/m}^2$$

A irradiação é:

$$q_{\text{rad}} = (\alpha G - E) A_s \quad 21.2 \text{ W} = (0.96G - 502.7) \text{ W/m}^2 \times (0.0925 \text{ m})^2 \quad G = 3105 \text{ W/m}^2$$

A radiosidade é (uma vez que para uma superfície cinzenta, a emissividade e a absortividade são idênticas):

$$J = E + \rho G = [502.7 + (1 - 0.96) \times 3105] \text{ W/m}^2 = 626.9 \text{ W/m}^2$$