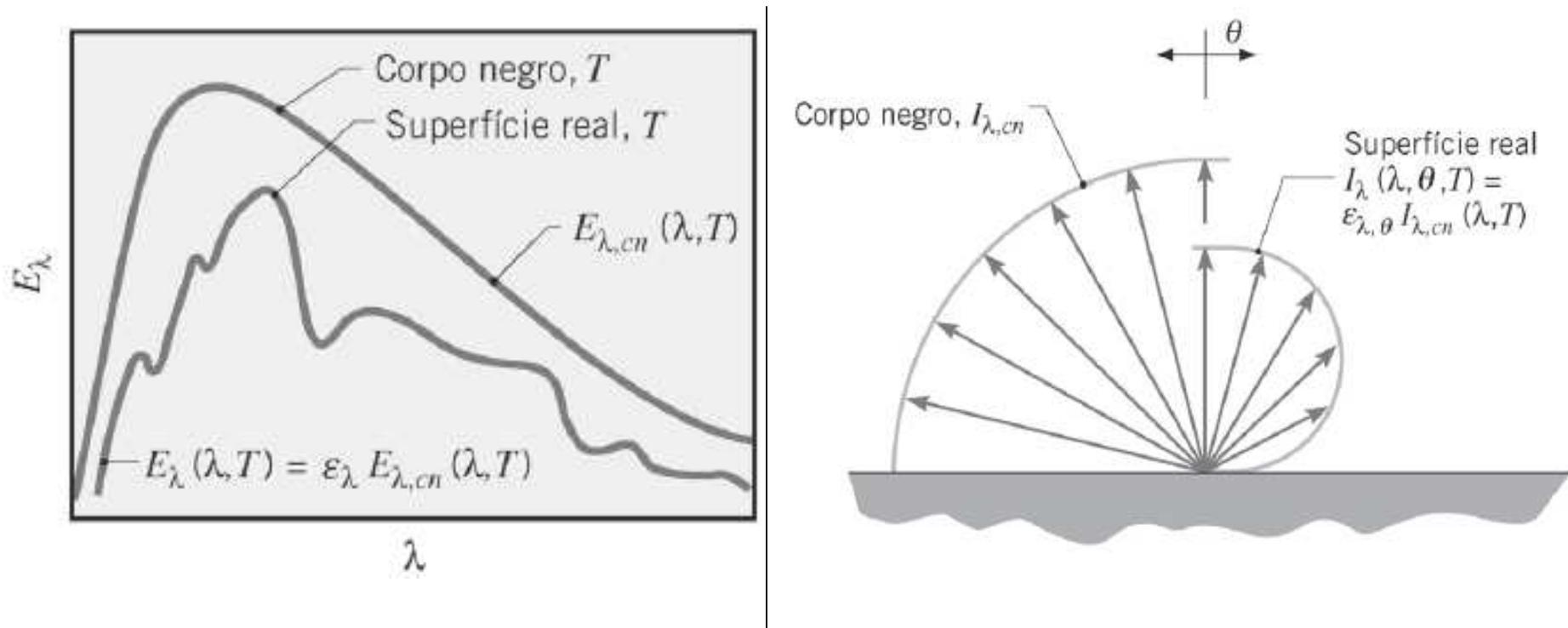


## 12.5-EMISSÃO DE SUPERFÍCIES REAIS

- O corpo negro é um **emissor ideal** no sentido de que nenhuma superfície pode emitir mais radiação do que um corpo negro à mesma temperatura.
- É conveniente escolher o corpo negro como **referência** ao se descrever a emissão de uma superfície real.
- A razão entre a radiação emitida por uma superfície real e a radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura é chamada **emissividade**.
- A radiação espectral emitida por uma superfície real **difere** daquela de Planck.

- A distribuição direcional também pode ser diferente da difusa.



COMPARAÇÃO DE EMISSÕES DE UM CORPO NEGRO E DE UMA SUPERFÍCIE REAL. DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL E DIRECIONAL.

- A emissividade **pode assumir diferentes valores** dependendo do fato de estarmos interessados na **emissão em um dado comprimento de onda** ou **em uma dada direção**, ou então em **médias integradas ao longo do comprimento de onda e direções**.

- **EMISSIVIDADE HEMISFÉRICA TOTAL**  $\varepsilon(T)$ : leva em conta a emissão em todos os comprimentos de onda e em todas as direções, sendo a razão entre o **poder emissivo total de um corpo real**,  $E(T)$ , e o **poder emissivo total de um corpo negro na mesma temperatura**,  $E_{cn}(T)$ , isto é:

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_{cn}(T)} = \frac{E(T)}{\sigma T^4}$$

- Apesar da simplicidade da expressão anterior,  $\varepsilon(T)$  **depende de características direcionais e espectrais** da superfície.

- **EMISSIVIDADE DIRECIONAL ESPECTRAL**  $\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi,T)$ : para uma superfície na temperatura  $T$  é a razão entre a intensidade de radiação emitida no comprimento de onda  $\lambda$  e na direção  $\theta$  e  $\phi$ , e a intensidade da radiação emitida por um corpo negro nos mesmos valores de  $T$  e  $\lambda$ . Assim:

$$\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi,T) = \frac{I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\phi,T)}{I_{\lambda,cn}(\lambda,T)}$$

- **EMISSIVIDADE DIRECIONAL TOTAL**  $\varepsilon_{\theta}(\theta,\phi,T)$ : para uma superfície na temperatura  $T$  é a razão entre a intensidade de radiação emitida em todos os comprimentos de onda  $\lambda$  e na direção  $\theta$  e  $\phi$ , e a intensidade da radiação emitida por um corpo negro no mesmo valor de  $T$ . Assim:

$$\varepsilon_{\theta}(\theta,\phi,T) = \frac{I_e(\theta,\phi,T)}{I_{cn}(T)}$$

- **EMISSIVIDADE HEMISFÉRICA ESPECTRAL**  $\epsilon_{\lambda}(\lambda, T)$ : para uma superfície na temperatura  $T$  é a razão entre a emissão de radiação no comprimento de onda  $\lambda$  em todas as direções e a emissão da radiação por um corpo negro nos mesmos valores de  $T$  e  $\lambda$ . Assim:

$$\epsilon_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{E_{\lambda}(\lambda, T)}{E_{\lambda, cn}(\lambda, T)}$$

- Em resumo:

$$\underbrace{\epsilon_{\lambda, \theta}(\lambda, \theta, \phi, T)}_{\substack{\text{emissividade} \\ \text{direcional} \\ \text{espectral}}} \Rightarrow \begin{cases} \epsilon_{\theta}(\theta, \phi, T) & \text{emissividade direcional total} \\ \epsilon_{\lambda}(\lambda, T) & \text{emissividade hemisférica espectral} \\ \epsilon(T) & \text{emissividade hemisférica total} \end{cases}$$

- Uma relação entre  $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$  e  $\varepsilon_{\lambda, \theta}(\lambda, \theta, \phi, T)$  pode ser obtida substituindo

$$E_\lambda(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda, e}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \cdot \sin \theta d\theta d\phi \text{ na equação } \varepsilon_\lambda(\lambda, T) = \frac{E_\lambda(\lambda, T)}{E_{\lambda, cn}(\lambda, T)} :$$

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

- Substituindo  $\varepsilon_{\lambda, \theta}(\lambda, \theta, \phi, T) = \frac{I_{\lambda, e}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\lambda, cn}(\lambda, T)}$  na equação acima obtém-se:

$$\varepsilon_\lambda(\lambda, T) = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda, cn}(\lambda, T) \varepsilon_{\lambda, \theta}(\lambda, \theta, \phi, T) \cos \theta \cdot \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda, cn}(\lambda, T) \cos \theta \cdot \sin \theta d\theta d\phi}$$

- Como  $I_{\lambda, cn}(\lambda, T)$  não é função de  $\theta$  e  $\phi$  e que  $\varepsilon_{\lambda, \theta}$  em geral independe de  $\phi$  para a maioria das superfícies obtém-se:

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \varepsilon_{\lambda, \theta}(\lambda, \theta, \phi, T) \cos \theta \cdot \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos \theta \cdot \sin \theta d\theta d\phi} = 2 \int_0^{\pi/2} \varepsilon_{\lambda, \theta}(\lambda, \theta, T) \cos \theta \cdot \sin \theta d\theta$$

- Uma relação entre  $\varepsilon(T)$  e  $\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T)$  pode ser obtida **substituindo**  $E = \int_0^{\infty} E_{\lambda}(\lambda) d\lambda$  e

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{E_{\lambda}(\lambda, T)}{E_{\lambda, cn}(\lambda, T)} \text{ na equação } \varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_{cn}(T)} :$$

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

- Se  $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$  for conhecido o **poder emissivo espectral** em qualquer comprimento de onda e qualquer temperatura pode ser determinado:

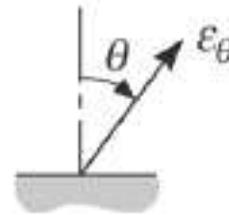
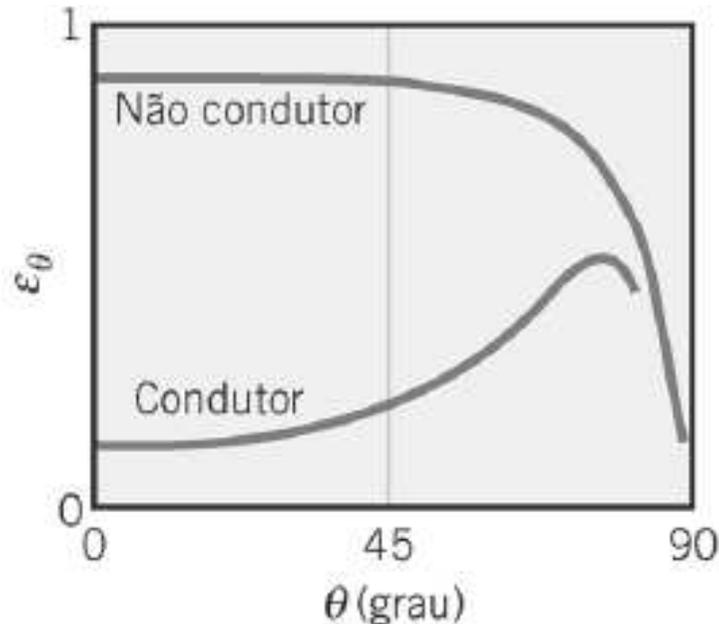
$$E_\lambda(\lambda, T) = \varepsilon_\lambda(\lambda, T)E_{\lambda, cn}(\lambda, T) = \frac{C_1 \varepsilon_\lambda(\lambda, T)}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}$$

- Se  $\varepsilon(T)$  for conhecido o **poder emissivo** da superfície pode ser determinado:

$$E(T) = \varepsilon(T)\sigma T^4$$

- Foram efetuadas medições para determinar a emissividade de muitos materiais e diversos revestimentos superficiais.

- A emissividade direcional de um emissor difuso é independente da direção, o que é um **aproximação razoável**.



**CONDUTOR:**  $\epsilon_\theta$  constante para  $\theta \leq 40^\circ$ , aumentando com  $\theta$  e decaindo para zero.

**NÃO-CONDUTOR:**  $\epsilon_\theta$  constante para  $\theta \leq 70^\circ$ , diminuindo com  $\theta$  e decaindo para zero.

**EXISTEM DIREÇÕES  
PREFERENCIAIS PARA  
EMISSÃO**

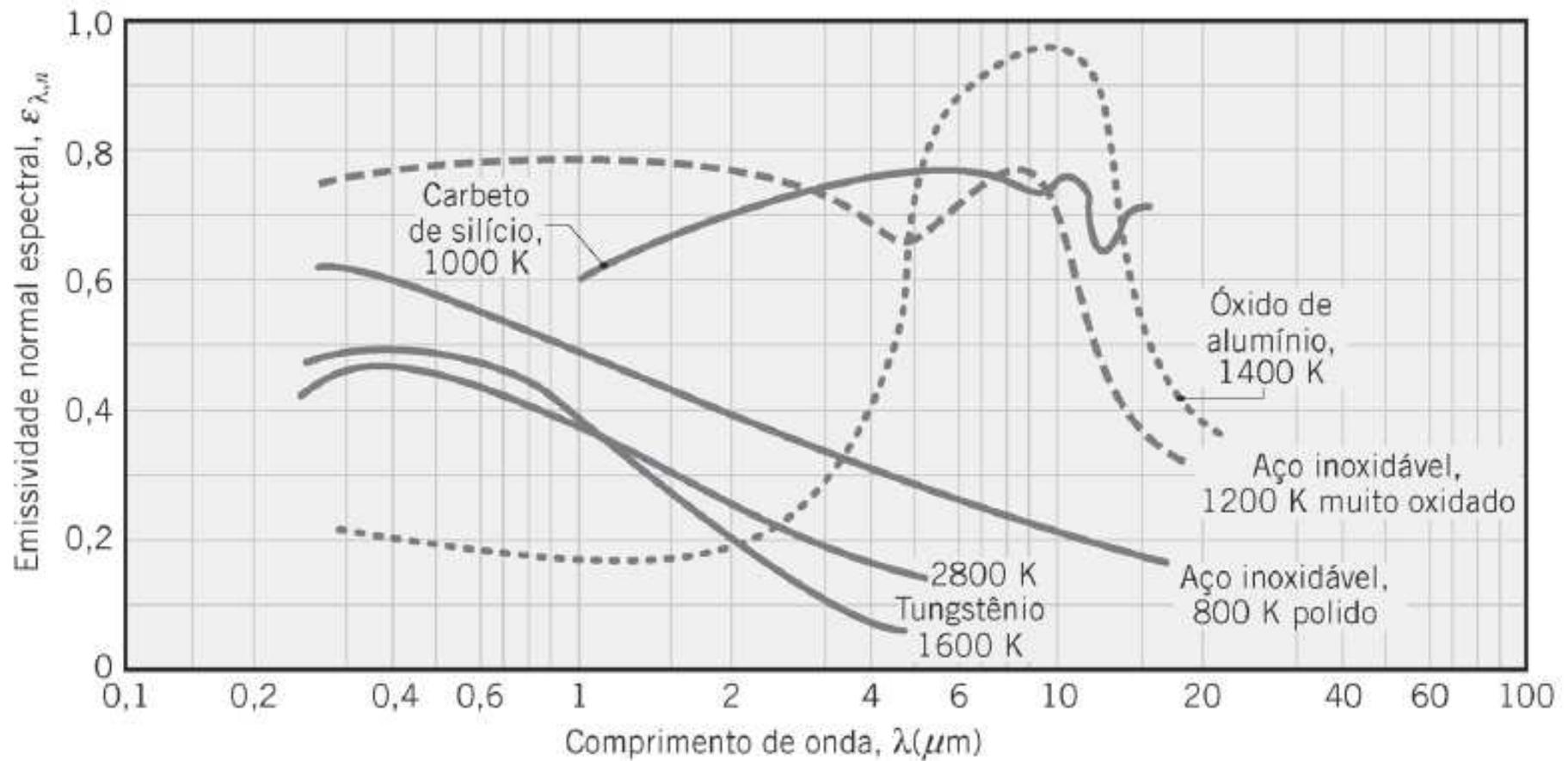
- Em geral, a **emissividade hemisférica total**  $\epsilon$  e a **emissividade hemisférica espectral**  $\epsilon_\lambda$  não diferem acentuadamente do valor da **emissividade hemisférica total normal** à superfície  $\epsilon_n$  e a **emissividade hemisférica espectral normal** à superfície  $\epsilon_{\lambda,n}$ .

- Em geral,  $1,0 \leq (\epsilon/\epsilon_n) \leq 1,3$  e  $1,0 \leq (\epsilon_\lambda/\epsilon_{\lambda,n}) \leq 1,3$  para **materiais condutores** e  $0,95 \leq (\epsilon/\epsilon_n) \leq 1,0$  e  $0,95 \leq (\epsilon_\lambda/\epsilon_{\lambda,n}) \leq 1,0$  para **materiais não-condutores**. Assim:

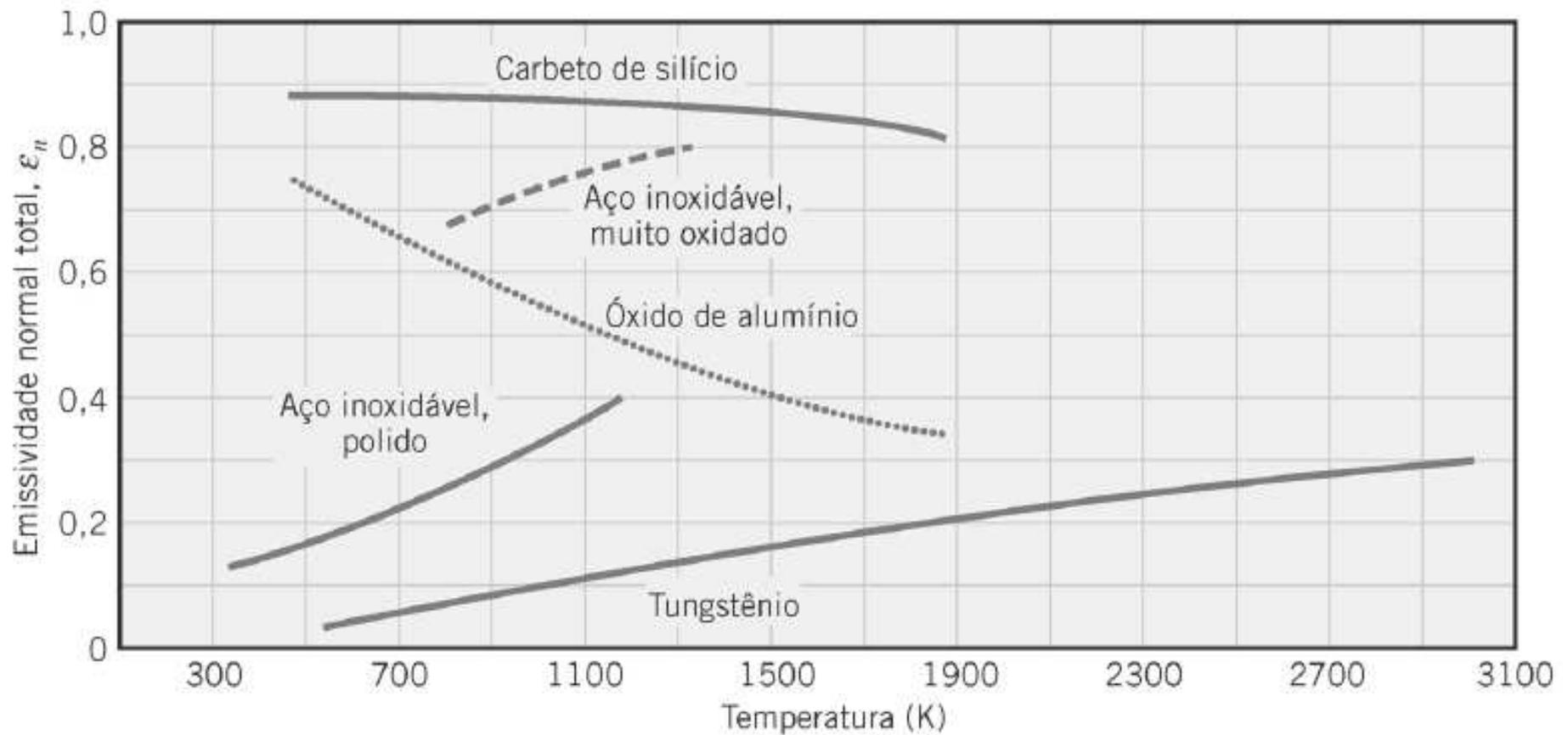
$$\epsilon \approx \epsilon_n \text{ e } \epsilon_\lambda \approx \epsilon_{\lambda,n}$$

- Como a distribuição espectral da emissão de superfícies reais se **afasta** da distribuição de Planck, o valor da emissividade espectral  $\epsilon_\lambda$  **não é independente** de  $\lambda$ .

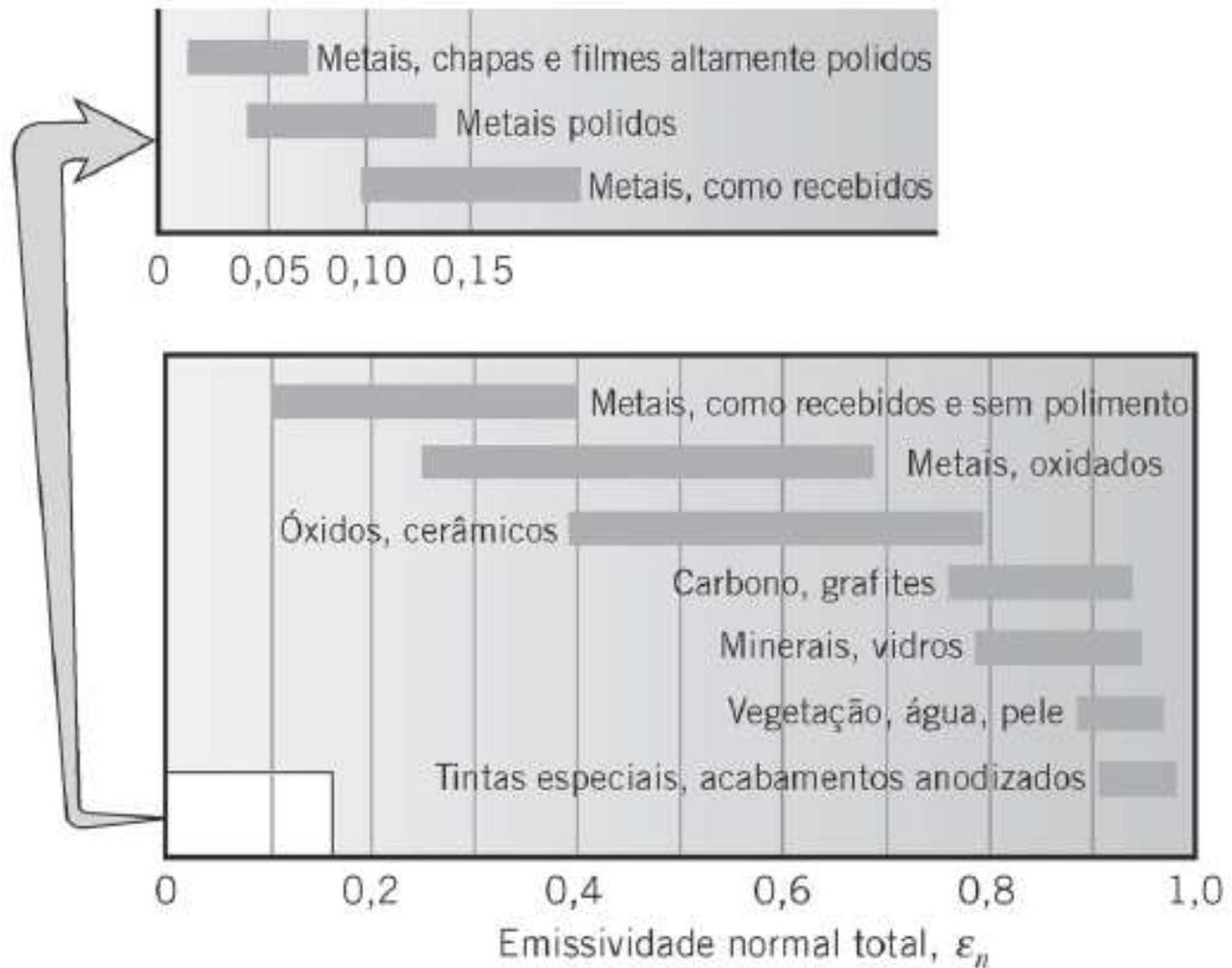
- A forma como  $\epsilon_\lambda$  varia com  $\lambda$  depende se o sólido for condutor ou não-condutor, assim como da natureza do revestimento da superfície, conforme a figura abaixo:



DEPENDÊNCIA ESPECTRAL DA EMISSIVIDADE NORMAL ESPECTRAL  $\epsilon_{\lambda,n}$   
 DE MATERIAIS SELECIONADOS.



DEPENDÊNCIA COM A TEMPERATURA DA EMISSIVIDADE NORMAL TOTAL  $\epsilon_n$  DE MATERIAIS SELECIONADOS.



VALORES REPRESENTATIVOS DA EMISSIVIDADE NORMAL  $\epsilon_n$ .

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

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

| Description/Composition   |         | Emissivity, $\epsilon_n$ or $\epsilon_h$ , at Various Temperatures (K) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------|---------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                           |         | 100  | 200  | 300  | 400  | 600  | 800  | 1000 | 1200 | 1500 | 2000 | 2500 |
| <b>Aluminum</b>           |         |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Highly polished, film     | ( $h$ ) | 0.02   | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |      |      |      |      |      |
| Foil, bright              | ( $h$ ) | 0.06   | 0.06 | 0.07 |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Anodized                  | ( $h$ ) |  |      | 0.82 | 0.76 |      |      |      |      |      |      |      |
| <b>Chromium</b>           |         |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Polished or plated        | ( $n$ ) | 0.05   | 0.07 | 0.10 | 0.12 | 0.14 |      |      |      |      |      |      |
| <b>Copper</b>             |         |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Highly polished           | ( $h$ ) |  |      | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |      |      |      |      |
| Stably oxidized           | ( $h$ ) |  |      |      |      | 0.50 | 0.58 | 0.80 |      |      |      |      |
| <b>Gold</b>               |         |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Highly polished or film   | ( $h$ ) | 0.01   | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |      |      |      |
| Foil, bright              | ( $h$ ) | 0.06   | 0.07 | 0.07 |      |      |      |      |      |      |      |      |
| <b>Molybdenum</b>         |         |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Polished                  | ( $h$ ) |  |      |      |      | 0.06 | 0.08 | 0.10 | 0.12 | 0.15 | 0.21 | 0.26 |
| Shot-blasted, rough       | ( $h$ ) |  |      |      |      | 0.25 | 0.28 | 0.31 | 0.35 | 0.42 |      |      |
| Stably oxidized           | ( $h$ ) |  |      |      |      | 0.80 | 0.82 |      |      |      |      |      |
| <b>Nickel</b>             |         |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Polished                  | ( $h$ ) |  |      |      |      | 0.09 | 0.11 | 0.14 | 0.17 |      |      |      |
| Stably oxidized           | ( $h$ ) |  |      |      |      | 0.40 | 0.49 | 0.57 |      |      |      |      |
| <b>Platinum</b>           |         |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Polished                  | ( $h$ ) |  |      |      |      |      | 0.10 | 0.13 | 0.15 | 0.18 |      |      |
| <b>Silver</b>             |         |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Polished                  | ( $h$ ) |  |      | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.05 | 0.08 |      |      |      |      |
| <b>Stainless steels</b>   |         |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Typical, polished         | ( $n$ ) |  |      | 0.17 | 0.17 | 0.19 | 0.23 | 0.30 |      |      |      |      |
| Typical, cleaned          | ( $n$ ) |  |      | 0.22 | 0.22 | 0.24 | 0.28 | 0.35 |      |      |      |      |
| Typical, lightly oxidized | ( $n$ ) |  |      |      |      |      | 0.33 | 0.40 |      |      |      |      |
| Typical, highly oxidized  | ( $n$ ) |  |      |      |      |      | 0.67 | 0.70 | 0.76 |      |      |      |
| AISI 347, stably oxidized | ( $n$ ) |  |      |      |      | 0.87 | 0.88 | 0.89 | 0.90 |      |      |      |
| <b>Tantalum</b>           |         |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Polished                  | ( $h$ ) |  |      |      |      |      |      |      | 0.11 | 0.17 | 0.23 | 0.28 |
| <b>Tungsten</b>           |         |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Polished                  | ( $h$ ) |  |      |      |      |      |      | 0.10 | 0.13 | 0.18 | 0.25 | 0.29 |

**TABLE A.11** *Continued*

*Nonmetallic Substances<sup>b</sup>*

| Description/Composition |     | Temperature (K) | Emissivity $\epsilon$ |
|-------------------------|-----|-----------------|-----------------------|
| Aluminum oxide          | (a) | 600             | 0.69                  |
|                         |     | 1000            | 0.55                  |
|                         |     | 1500            | 0.41                  |
| Asphalt pavement        | (a) | 300             | 0.85–0.93             |
| Building materials      |     |                 |                       |
| Asbestos sheet          | (a) | 300             | 0.93–0.96             |
| Brick, red              | (a) | 300             | 0.93–0.96             |
| Gypsum or plaster board | (a) | 300             | 0.90–0.92             |
| Wood                    | (a) | 300             | 0.82–0.92             |
| Cloth                   | (a) | 300             | 0.75–0.90             |
| Concrete                | (a) | 300             | 0.88–0.93             |
| Glass, window           | (a) | 300             | 0.90–0.95             |
| Ice                     | (a) | 273             | 0.95–0.98             |
| Paints                  |     |                 |                       |
| Black (Parsons)         | (a) | 300             | 0.98                  |
| White, acrylic          | (a) | 300             | 0.90                  |
| White, zinc oxide       | (a) | 300             | 0.92                  |
| Paper, white            | (a) | 300             | 0.92–0.97             |
| Pyrex                   | (a) | 300             | 0.82                  |
|                         |     | 600             | 0.80                  |
|                         |     | 1000            | 0.71                  |
|                         |     | 1200            | 0.62                  |

|                               |     |      |           |
|-------------------------------|-----|------|-----------|
| Pyroceram                     | (a) | 300  | 0.83      |
|                               |     | 600  | 0.78      |
|                               |     | 1000 | 0.69      |
|                               |     | 1500 | 0.57      |
| Refractories (furnace liners) |     |      |           |
| Alumina brick                 | (a) | 800  | 0.40      |
|                               |     | 1000 | 0.33      |
|                               |     | 1400 | 0.28      |
|                               |     | 1600 | 0.33      |
| Magnesia brick                | (a) | 800  | 0.43      |
|                               |     | 1000 | 0.36      |
|                               |     | 1400 | 0.31      |
|                               |     | 1600 | 0.40      |
| Kaolin insulating brick       | (a) | 800  | 0.70      |
|                               |     | 1200 | 0.57      |
|                               |     | 1400 | 0.47      |
|                               |     | 1600 | 0.53      |
| Sand                          | (a) | 300  | 0.90      |
| Silicon carbide               | (a) | 600  | 0.87      |
|                               |     | 1000 | 0.87      |
|                               |     | 1500 | 0.85      |
| Skin                          | (a) | 300  | 0.95      |
| Snow                          | (a) | 273  | 0.82–0.90 |

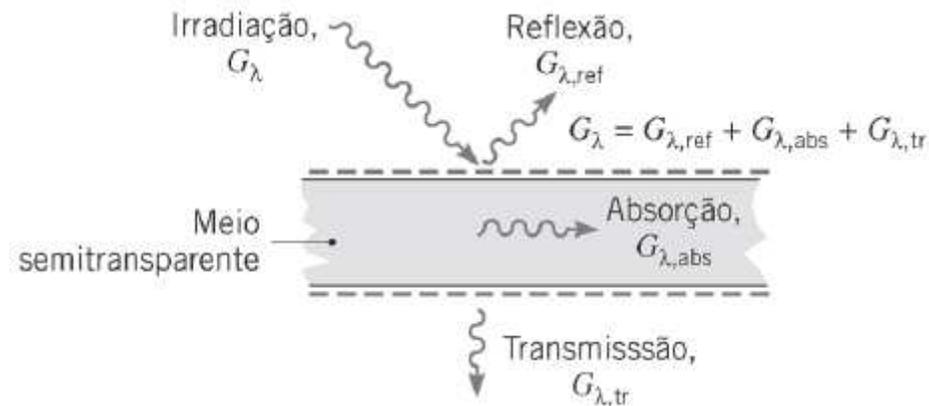
**TABLE A.11** *Continued*

*Nonmetallic Substances<sup>b</sup>*

| Description/Composition |     | Temperature (K) | Emissivity $\epsilon$ |
|-------------------------|-----|-----------------|-----------------------|
| Soil                    | (a) | 300             | 0.93–0.96             |
| Rocks                   | (a) | 300             | 0.88–0.95             |
| Teflon                  | (a) | 300             | 0.85                  |
|                         |     | 400             | 0.87                  |
|                         |     | 500             | 0.92                  |
| Vegetation              | (a) | 300             | 0.92–0.96             |
| Water                   | (a) | 300             | 0.96                  |

1. A **emissividade de superfícies metálicas é baixa**, atingindo valores de 0,02 para superfícies polidas de ouro e prata.
2. A presença de **camadas de óxidos pode aumentar a emissividade de superfícies metálicas**. Verificar figura de aço inoxidável polido ou muito oxidado a 900 K.
3. A emissividade de materiais não-condutores é **comparativamente maior**, sendo em geral maior que 0,6.
4. A emissividade de condutores **aumenta com o aumento da temperatura**.
5. A emissividade de não-condutores pode **aumentar ou diminuir com o aumento da temperatura**.
6. A emissividade depende **fortemente da natureza da superfície**, podendo ser influenciada pelo método de fabricação, seu ciclo térmico e reações químicas com o ambiente.

## 12.6-ABSORÇÃO, REFLEXÃO E TRANSMISSÃO EM SUPERFÍCIES REAIS



- Um **balanço de energia** no meio fornece que  $G_\lambda = G_{\lambda,ref} + G_{\lambda,abs} + G_{\lambda,tr}$
- A determinação das componentes é complexa, dependendo das **condições nas superfícies** superior e inferior, do **comprimento de onda da radiação**, da **composição** e da **espessura** do meio.

- Em um caso mais simples, comum em engenharia, o meio é **opaco à radiação incidente**, ou seja,  $G_{\lambda, tr} = 0$ .
- Assim, **fenômenos volumétricos são desprezados** e a absorção e reflexão são tratados como **fenômenos de superfície**.
- Então,  $G_{\lambda, abs}$  e  $G_{\lambda, ref}$  dependem de  $\lambda$  e da **natureza do material da superfície**.
- Não há **efeito líquido do processo de reflexão** no meio.
- A absorção tem o efeito de **aumentar a energia térmica** interna do meio.

- A absorção e a reflexão na superfície são responsáveis pela nossa **percepção de cor**, e **não a emissão** (que se encontra na região do infravermelho, sendo imperceptível).
- A cor de deve à **reflexão e à absorção seletivas da porção visível da irradiação** oriunda do Sol ou de uma fonte de luz artificial.
- Uma superfície aparece “preta” quando **absorve toda a radiação** visível incidente.
- Uma superfície aparece “branca” quando **reflete toda a radiação** visível incidente.
- As propriedades superficiais **dependem**: do material da superfície, do acabamento, da temperatura superficial, do comprimento de onda e da direção da radiação incidente.

## 12.6.1-ABSORTIVIDADE

- É a fração da irradiação que é absorvida por uma superfície, tendo dependência direcional e espectral.

- **ABSORTIVIDADE DIRECIONAL ESPECTRAL**  $\alpha_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi)$ : é a fração da intensidade espectral incidente na direção  $\theta$  e  $\phi$  que é absorvida pela superfície.

$$\alpha_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi) = \frac{I_{\lambda,i,abs}(\lambda,\theta,\phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi)}$$

- A dependência de  $\alpha_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi)$  com a temperatura foi desprezada por ser pequena.

- Na expressão anterior está implícito que as superfícies podem exibir uma **absorção seletiva em relação ao comprimento de onda e à direção da radiação incidente**.
- Em engenharia é comum trabalhar com médias direcionais.
- Define-se uma **ABSORTIVIDADE HEMISFÉRICA ESPECTRAL**  $\alpha_\lambda(\lambda)$  como:

$$\alpha_\lambda(\lambda) = \frac{G_{\lambda,abs}(\lambda)}{G_\lambda(\lambda)} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,i,abs}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi}$$

$$\alpha_\lambda(\lambda) = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \alpha_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi) I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi}$$

- Para uma **superfície difusa** e se  $\alpha_{\lambda,\theta}$  for **independente** de  $\phi$ ,  $I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi) = I_{\lambda,i}(\lambda)$  de forma que:

$$\alpha_{\lambda}(\lambda) = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \alpha_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi} = 2 \int_0^{\pi/2} \alpha_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta) \cos \theta \sin \theta d\theta$$

- A **ABSORTIVIDADE HEMISFÉRICA TOTAL** representa uma média integrada em relação à direção e ao comprimento de onda, sendo a **fração da irradiação total que é absorvida por uma superfície**:

$$\alpha = \frac{G_{abs}}{G} = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda}(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}$$

- Deve ser notado que  $\alpha$  é aproximadamente independente da temperatura, enquanto  $\varepsilon$  tem forte dependência com a temperatura.

- Como a distribuição espectral da radiação solar é praticamente proporcional à da emissão de um corpo negro a 5800 K, a absorvidade total para a radiação solar  $\alpha_s$  pode ser aproximada por:

$$\alpha_s = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda}(\lambda) E_{\lambda, cn}(\lambda, 5800 \text{ K}) d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\lambda, cn}(\lambda, 5800 \text{ K}) d\lambda}$$

- As integrais que aparecem na expressão acima podem ser calculadas utilizando-se a função de radiação de corpo negro,  $F_{(0 \rightarrow \lambda)}$ .

## 12.6.2-REFLETIVIDADE

- Fração da radiação incidente que é **refletida** por uma superfície.
- Tem característica **bidirecional**, ou seja, além de depender da **direção da radiação incidente**, ela também depende da **direção da radiação refletida**.
- Essa complicação será evitada considerando uma **radiação refletida média integrada em um hemisfério**.
- **REFLETIVIDADE DIRECIONAL ESPECTRAL**  $\rho_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi)$ : é a fração da intensidade espectral incidente na direção  $\theta$  e  $\phi$  que é refletida pela superfície.

$$\rho_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{I_{\lambda,i,ref}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi)}$$

- Em engenharia é comum trabalhar com médias direcionais.

- Define-se uma **REFLETIVIDADE HEMISFÉRICA ESPECTRAL**  $\rho_{\lambda}(\lambda)$  como:

$$\rho_{\lambda}(\lambda) = \frac{G_{\lambda,ref}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,i,ref}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi}$$

$$\rho_{\lambda}(\lambda) = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \rho_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi) I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi}$$

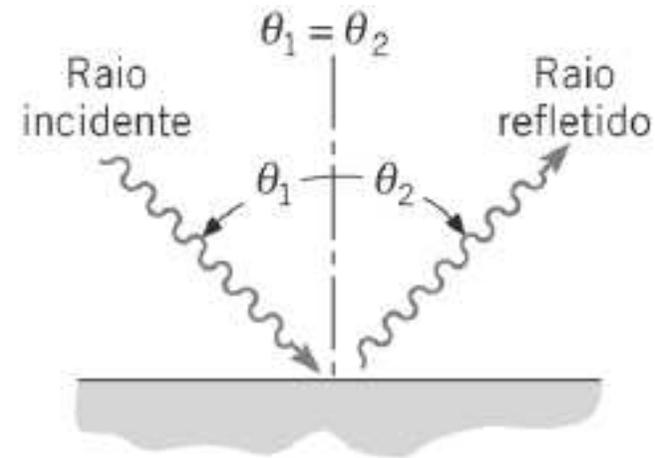
- A **REFLETIVIDADE HEMISFÉRICA TOTAL** representa uma média integrada em relação à direção e ao comprimento de onda, sendo a **fração da irradiação total que é refletida por uma superfície**:

$$\rho = \frac{G_{ref}}{G} = \frac{\int_0^{\infty} \rho_{\lambda}(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}$$

- Superfície podem ser classificadas como **difusas** ou **especulares**, de acordo com a **forma como refletem radiação**.

- **REFLEXÃO DIFUSA** ocorre quando a **intensidade da radiação refletida independe do ângulo e reflexão** (aproximado por superfícies rugosas e razoável para engenharia).

- REFLEXÃO ESPECULAR ocorre quando a **reflexão for na direção de  $\theta_2$** , que é igual ao **ângulo de incidência  $\theta_1$** . (aproximada por superfícies polidas, que parecem espelhos).



### 12.6.3-TRANSMISSIVIDADE

- O tratamento é complexo devido a interação volumétrica.
- Resultados razoáveis podem ser obtidos através das **TRANSMISSIVIDADES HEMISFÉRICAS**  $\tau_\lambda$  e  $\tau$  definidas como:

$$\tau_\lambda = \frac{G_{\lambda,tr}(\lambda)}{G_\lambda(\lambda)} \quad \text{e} \quad \tau = \frac{G_{tr}}{G}$$

- A relação entre  $\tau_\lambda$  e  $\tau$  pode ser calculada como:

$$\tau = \frac{\int_0^\infty G_{\lambda,tr}(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty G_\lambda(\lambda) d\lambda} = \frac{\int_0^\infty \tau_\lambda(\lambda) G_\lambda(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty G_\lambda(\lambda) d\lambda}$$

- Verificar semelhanças:

$$\varepsilon(T) = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) E_{\lambda, cn}(\lambda, T) d\lambda}{E_{cn}(T)}$$

$$\alpha = \frac{G_{abs}}{G} = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda}(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}$$

$$\rho = \frac{G_{ref}}{G} = \frac{\int_0^{\infty} \rho_{\lambda}(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}$$

$$\tau = \frac{G_{tr}}{G} = \frac{\int_0^{\infty} \tau_{\lambda}(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}$$

## 12.6.4-CONSIDERAÇÕES ESPECIAIS

- A partir de um **balanço de energia** em um **meio semitransparente** tem-se que:

$$\rho_{\lambda} + \alpha_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1 \text{ e } \rho + \alpha + \tau = 1$$

- Para um **meio opaco** ( $\tau_{\lambda} = 0$  e  $\tau = 0$ ) tem-se que:

$$\rho_{\lambda} + \alpha_{\lambda} = 1 \text{ e } \rho + \alpha = 1$$

- Distribuições espectrais da refletividade e da absortividade normais de algumas superfícies opacas podem ser vistas na figura abaixo:

