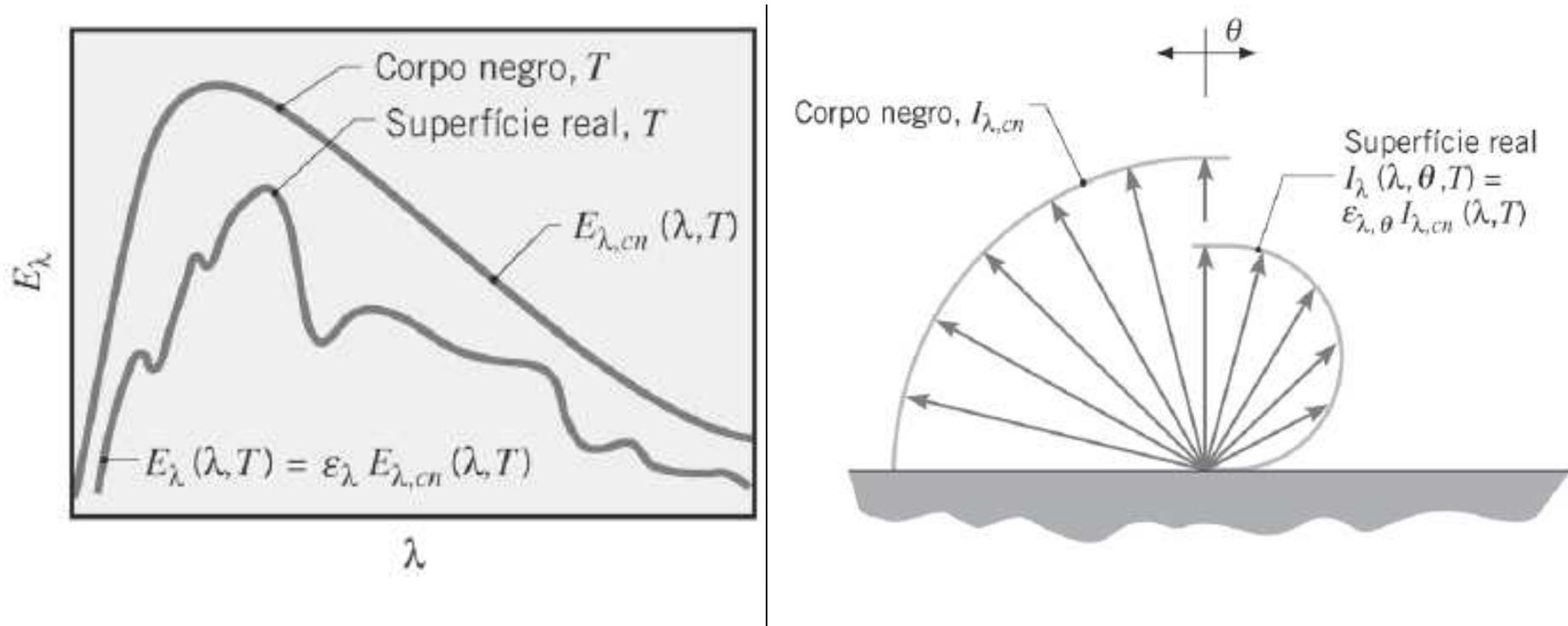


12.5-EMISSÃO DE SUPERFÍCIES REAIS

- 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 de descrever a emissão de uma superfície real.
- A razão entre a radiação emitida pela superfície 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 λ e na direção θ e ϕ , e a intensidade da radiação emitida por um corpo negro nos mesmos valores de T e λ . 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 λ e na direção θ e ϕ , 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 λ em todas as direções e a emissão da radiação por um corpo negro nos mesmos valores de T e λ . 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 θ e ϕ e que $\varepsilon_{\lambda, \theta}$ em geral independe de ϕ 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:

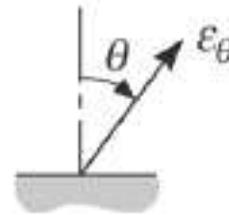
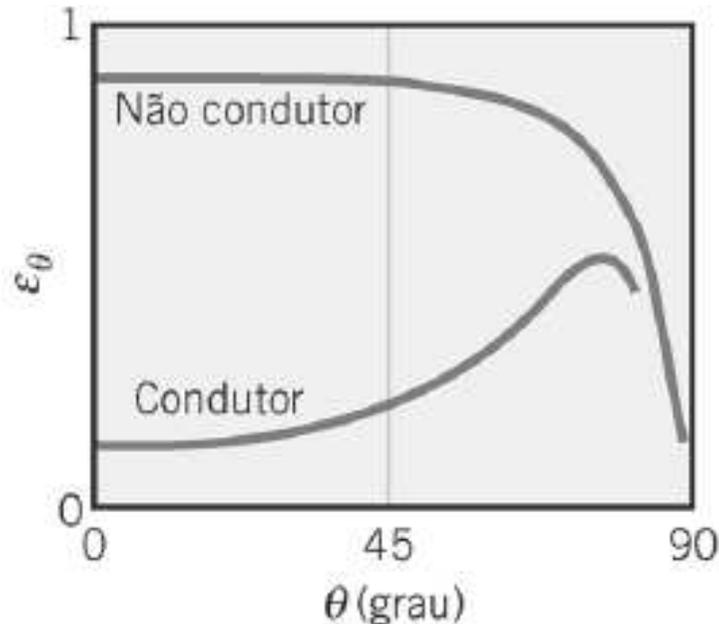
$$E_\lambda(\lambda, T) = \varepsilon_\lambda(\lambda, T)E_{\lambda, cn}(\lambda, T) = \frac{C_1 \varepsilon_\lambda(\lambda, T)}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}$$

- 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: ϵ_θ constante para $\theta \leq 40^\circ$, aumentando com θ e decaindo para zero.

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

**EXISTEM DIREÇÕES
PREFERENCIAIS PARA
EMISSÃO**

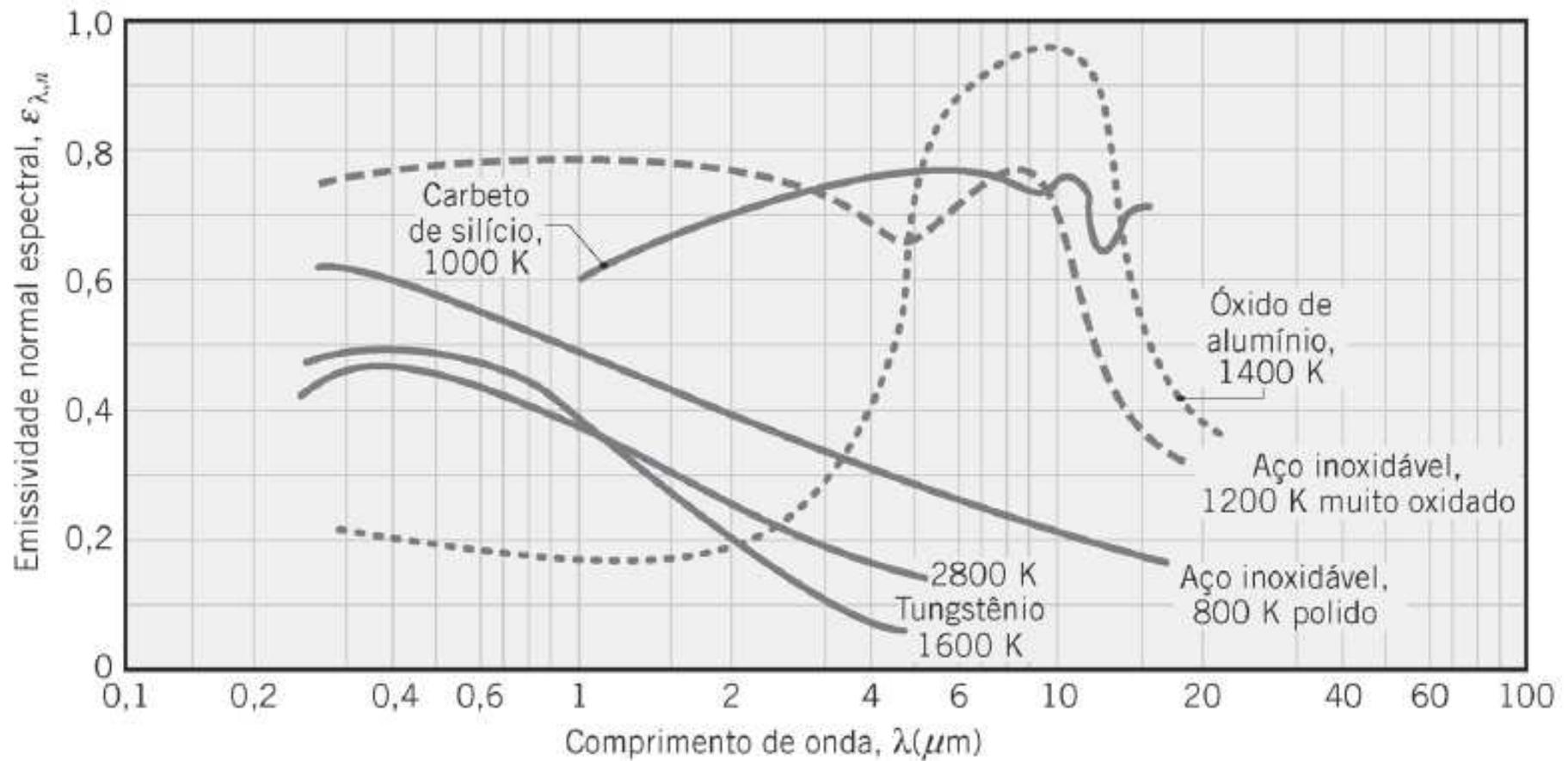
- Em geral, a **emissividade hemisférica total** ϵ e a **emissividade hemisférica espectral** ϵ_λ não diferem acentuadamente do valor da **emissividade hemisférica total normal** à superfície ϵ_n e a **emissividade hemisférica espectral normal** à superfície $\epsilon_{\lambda,n}$.

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

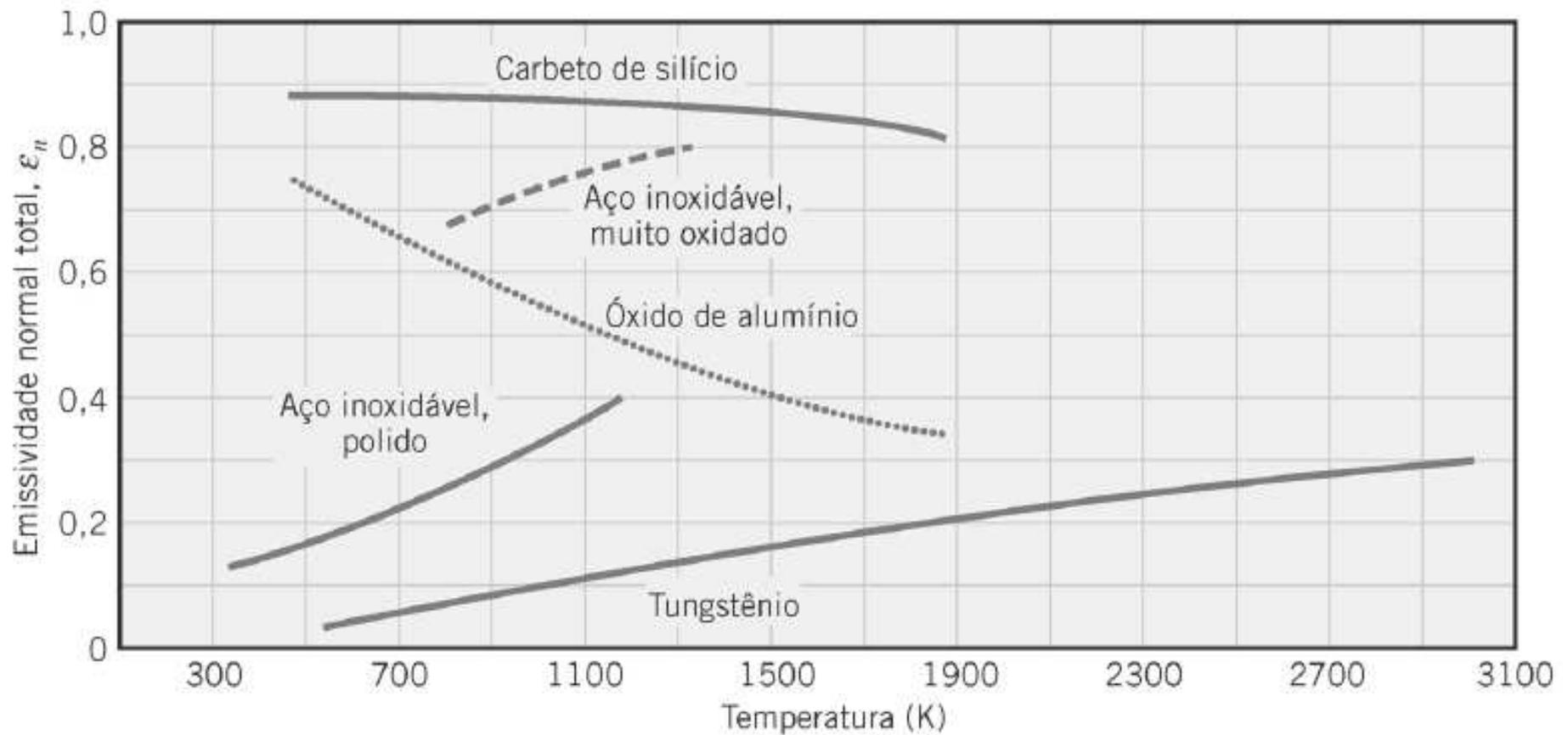
$$\varepsilon \approx \varepsilon_n \text{ e } \varepsilon_\lambda \approx \varepsilon_{\lambda,n}$$

- Como a distribuição espectral da emissão de superfícies reais se **afasta** da distribuição de Planck, o valor da emissividade espectral ε_λ **não é independente** de λ .

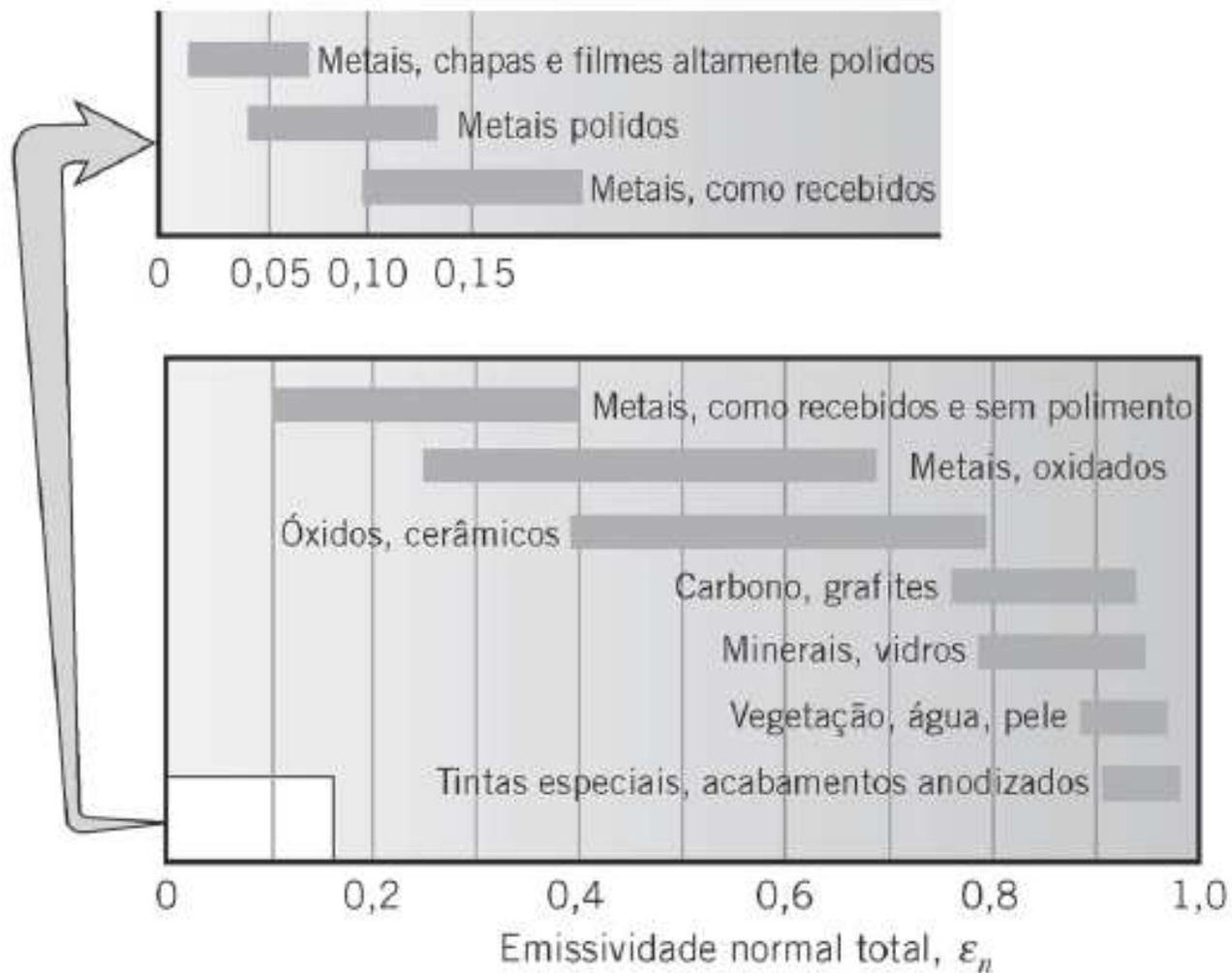
- A forma como ε_λ varia com λ depende se o sólido for condutor ou não-condutor, assim como da natureza do revestimento da superfície, conforme a figura abaixo:



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



DEPENDÊNCIA COM A TEMPERATURA DA EMISSIVIDADE NORMAL TOTAL ϵ_n DE MATERIAIS SELECIONADOS.



VALORES REPRESENTATIVOS DA EMISSIVIDADE NORMAL ϵ_n .

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

Metallic Solids and Their Oxides^a

Description/Composition		Emissivity, ϵ_n or ϵ_h , at Various Temperatures (K)										
		100	200	300	400	600	800	1000	1200	1500	2000	2500
Aluminum												
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							
Chromium												
Polished or plated	(n)	0.05	0.07	0.10	0.12	0.14						
Copper												
Highly polished	(h)			0.03	0.03	0.04	0.04	0.04				
Stably oxidized	(h)					0.50	0.58	0.80				
Gold												
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								
Molybdenum												
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					
Nickel												
Polished	(h)					0.09	0.11	0.14	0.17			
Stably oxidized	(h)					0.40	0.49	0.57				
Platinum												
Polished	(h)						0.10	0.13	0.15	0.18		
Silver												
Polished	(h)			0.02	0.02	0.03	0.05	0.08				
Stainless steels												
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			
Tantalum												
Polished	(h)							0.11	0.17	0.23	0.28	
Tungsten												
Polished	(h)						0.10	0.13	0.18	0.25	0.29	

TABLE A.11 *Continued*

Nonmetallic Substances^b

Description/Composition		Temperature (K)	Emissivity ϵ
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^b

Description/Composition		Temperature (K)	Emissivity ϵ
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 pequena**, 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.