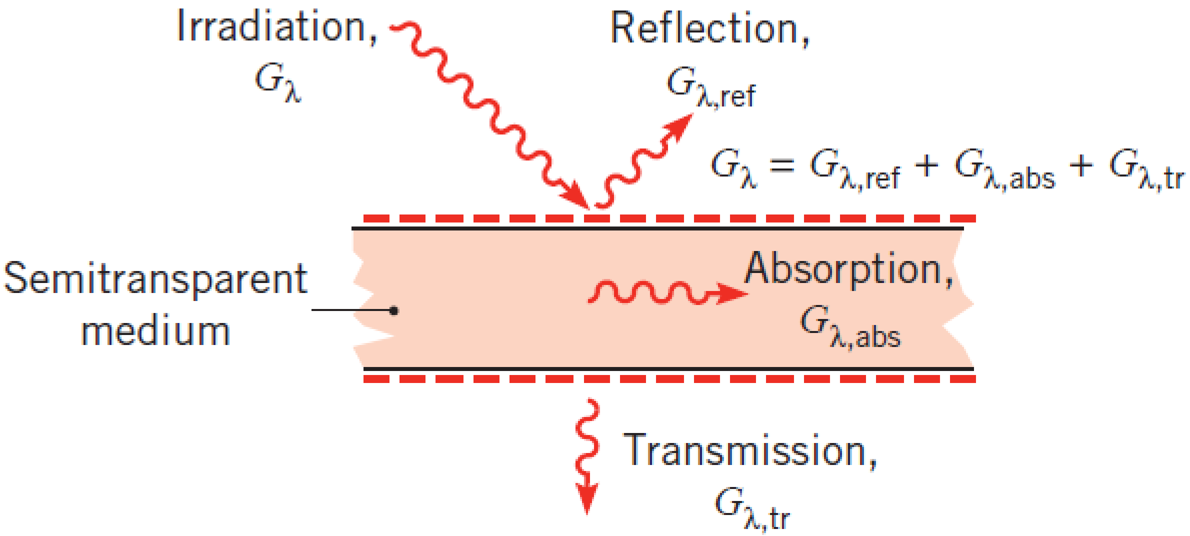
RADIAÇÃO E ENERGIA SOLAR

Miguel Centeno Brito

Absorção por superfícies reais

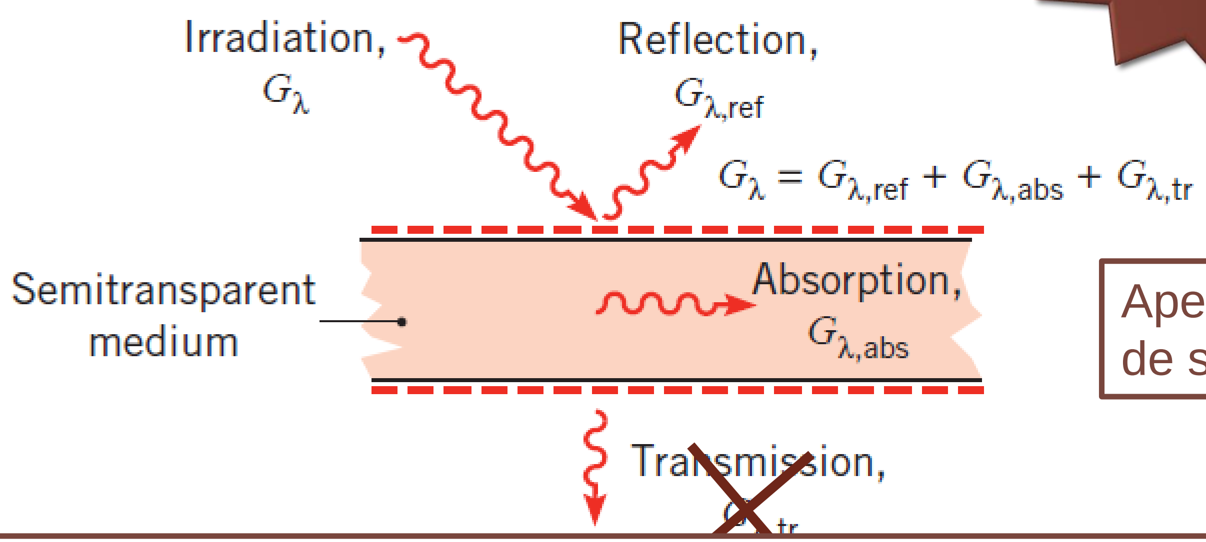
$$G_\lambda = G_{\lambda,\text{ref}} + G_{\lambda,\text{abs}} + G_{\lambda,\text{tr}}$$



Absorção por superfícies reais

$$G_\lambda = G_{\lambda,\mathrm{ref}} + G_{\lambda,\mathrm{abs}} + \cancel{G_{\lambda,\mathrm{tr}}}$$

Para materiais opacos



Apenas efeitos de superfície

Percepção de **cor** normalmente associada à **reflexão** e não emissão térmica (excepto para materiais incandescentes).

A cor não é pois uma boa medida da capacidade de absorção ou reflexão de um material (e.g. neve, que é *negra* no infravermelho),

Absorção por superfícies reais

Absortividade: determina a fracção da irradiação absorvida pela superfície

Também pode depender do comprimento de onda e da direcção. De um modo geral, podemos assumir que não depende significativamente da temperatura da superfície.

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

Absorção por superfícies reais

Absortividade: determina a fracção da irradiação absorvida pela superfície

Também pode depender do comprimento de onda e da direcção. De um modo geral, podemos assumir que não depende significativamente da temperatura da su

Absortividade espectral hemisférica

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

Caso particular:
radiação incidente difusa e absortividade independente do azimute

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

Absorção por superfícies reais

Absortividade: determina a fracção da irradiação absorvida pela superfície

Também pode depender do <u>comprimento de onda</u> e da <u>direcção</u>. De um modo geral, podemos assumir que não depende significativamente da temperatura da su

Absortividade total hemisférica

$$\alpha \equiv \frac{G_{\text{abs}}}{G}$$

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

Representa a fracção de irradiação total absorvida pela superfície.

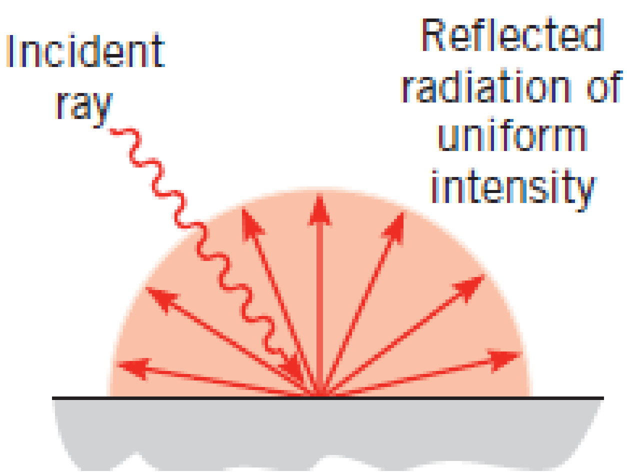
Absortividade total para a radiação solar

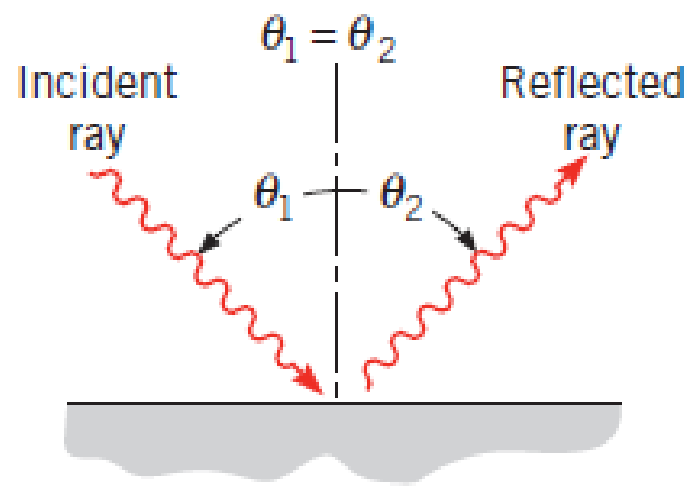
Notar que depende da distribuição espectral da radiação incidente.

$$\alpha_S \approx \frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda(\lambda) E_{\lambda,b}(\lambda, 5800\ \text{K})\, d\lambda}{\int_0^\infty E_{\lambda,b}(\lambda, 5800\ \text{K})\, d\lambda}$$

Reflexão por superfícies reais

Reflectividade: determina a fracção da irradiação reflectida pela superfície





A reflexão pode ser difusa ou especular.

Reflexão por superfícies reais

Reflectividade: determina a fracção da irradiação reflectida pela superfície

Reflectividade espectral direccional

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

Reflectividade espectral hemisférica

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

Reflexão por superfícies reais

Reflectividade: determina a fracção da irradiação reflectida pela superfície

Reflectividade total hemisférica

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

Transmissão de radiação

Transmissividade: determina a fracção da irradiação transmitida pelo meio

Transmissividade espectral hemisférica

$$\tau_\lambda = \frac{G_{\lambda,\mathrm{tr}}(\lambda)}{G_\lambda(\lambda)}$$

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

Equações de balanço

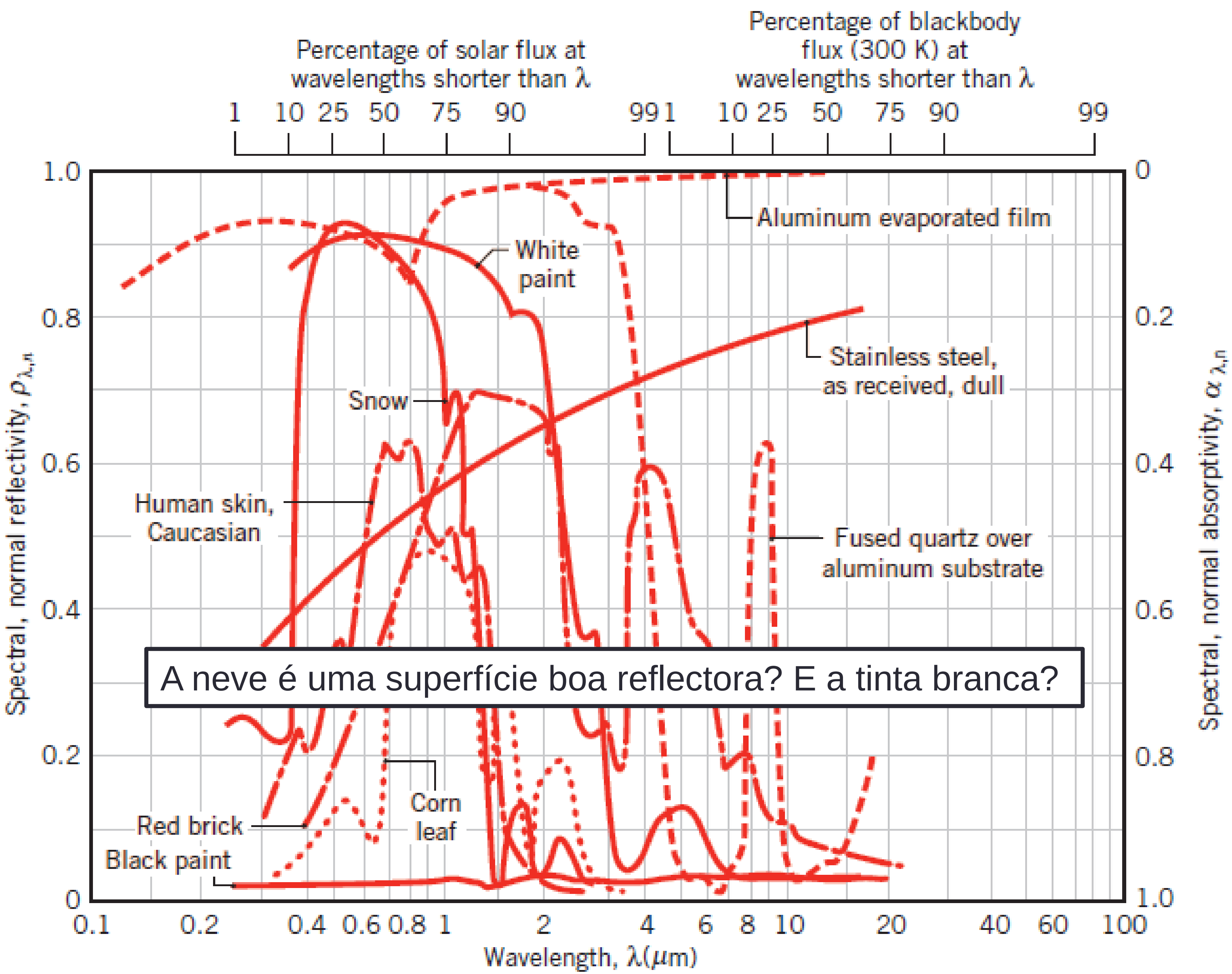
$$G_\lambda = G_{\lambda,\mathrm{ref}} + G_{\lambda,\mathrm{abs}} + G_{\lambda,\mathrm{tr}}$$

Para um meio semitransparente

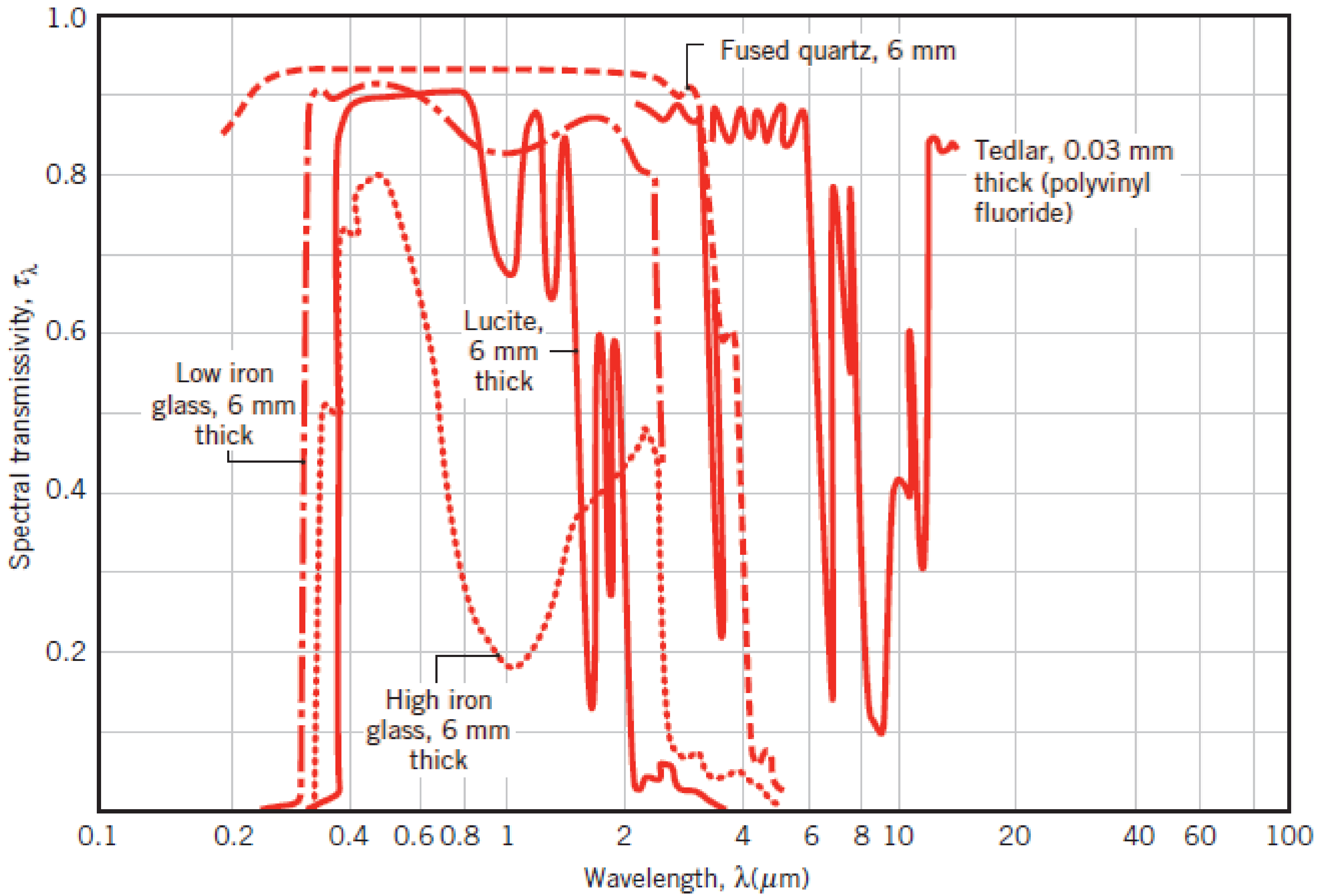
$$\rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda = 1$$

Para um meio opaco

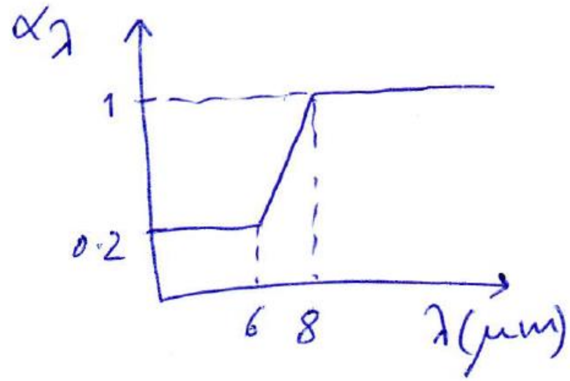
$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1$$

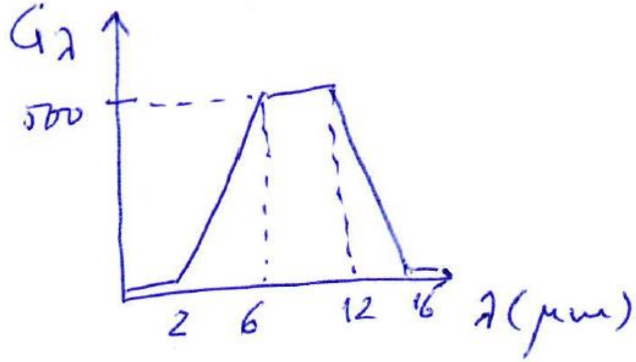


A neve é uma superfície boa reflectora? E a tinta branca?


Fused quartz, 6 mm
Tedlar, 0.03 mm thick (polyvinyl fluoride)
Lucite, 6 mm thick
Low iron glass, 6 mm thick
High iron glass, 6 mm thick
Spectral transmissivity, τ_λ
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.1
0.2
0.4
0.6
0.8
1
2
4
6
8
10
20
40
60
100
Wavelength, $\lambda(\mu m)$

A absorvidade espectral hemisférica de uma superfície opaca e a irradiação espectral nessa superfície são dadas pelas figuras seguintes.

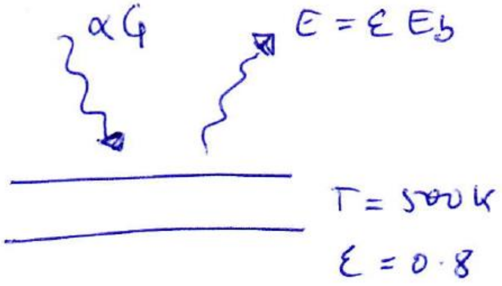




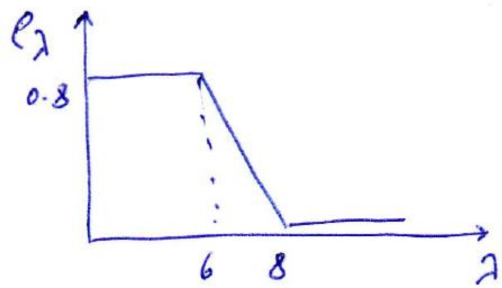
Como é que a reflectividade espectral hemisférica varia com o comprimento de onda?

Qual é a absorvidade total hemisférica?

Se a superfície está a 500K e tem uma emissividade total hemisférica de 0.8 como varia a sua temperatura com a irradiação?



1) $\rho_\lambda = 1 - \alpha_\lambda$



2) $$\alpha = \frac{G_{abs}}{G} = \frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda G_\lambda \, d\lambda}{\int_0^\infty G_\lambda \, d\lambda} = \frac{0.2 \int_2^6 G_\lambda d\lambda + 500 \int_6^8 \alpha_\lambda d\lambda + 1 \int_8^{16} G_\lambda d\lambda}{\int_2^6 G_\lambda d\lambda + \int_6^{12} G_\lambda d\lambda + \int_{12}^{16} G_\lambda d\lambda}$$

$$\alpha = \Big(0.2 \times \frac{1}{2} \times 500 \times (6-2) +$$

$$+ 500 \times \Big(0.2\,(8-6) + (1-0.2)\,\frac{1}{2}\,(8-6)\Big) +$$

$$+ 1 \times 500\,(12-8) + 1 \times \frac{1}{2} \times 500 \times (16-12)\Big) \div$$

$$\div \Big(\underbrace{\frac{1}{2} \times 500 \times (6-2) + 500 \times (12-6) + \frac{1}{2}\, 500\,(16-12)}_{5000 \ W/m^2}\Big)$$

$\alpha = 0.76$

3) $q'' = \alpha G - E = \alpha G - \varepsilon \sigma T^4$

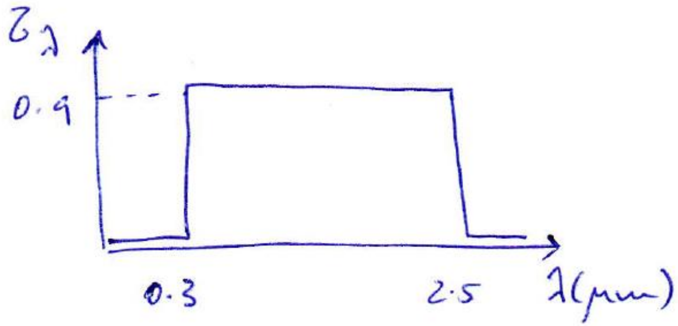
$= 0.76 \times 5000 - 0.8 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 500^4$

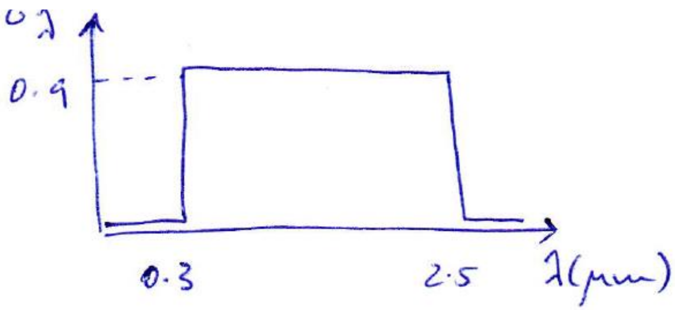
$= 3800 - 2835 = 965 \ W/m^2 > 0$

logo vai aumentar a temperatura.

nota: estamos a desprezar o efeito de perdas por convecção!

Um vidro de um colector solar, com baixa concentração de ferro, apresenta a seguinte transmissividade espectral. Qual é a transmissividade total do vidro para a radiação solar?





$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} \tau_\lambda G_\lambda \, d\lambda}{\int_0^{\infty} G_\lambda \, d\lambda} \simeq \frac{\int_0^{\infty} \tau_\lambda E_{\lambda b}(5800\,K)\, d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\lambda b}(5800\,K)\, d\lambda} = 0.9 \, \frac{\int_{0.3}^{2.5} E_{\lambda b}(5800\,K)\, d\lambda}{E_b(5800\,K)}$$

Da tabela

$$\lambda_1 T = 0.3 \times 5800 = 1740 \ \mu m\, K \longrightarrow F_{0 \to 0.3} = 0.0335$$

$$\lambda_2 T = 2.5 \times 5800 = 14\,500 \ \mu m\, K \longrightarrow F_{0 \to 2.5} = 0.9664$$

logo

$$\tau = 0.9 \left(F_{0 \to 2.5} - F_{0 \to 0.3} \right) = 0.9 \left(0.9664 - 0.0335 \right) = \underline{\underline{0.84}}$$

Lei de Kirchoff

$$G = E_b(T_s)$$

Equilíbrio térmico

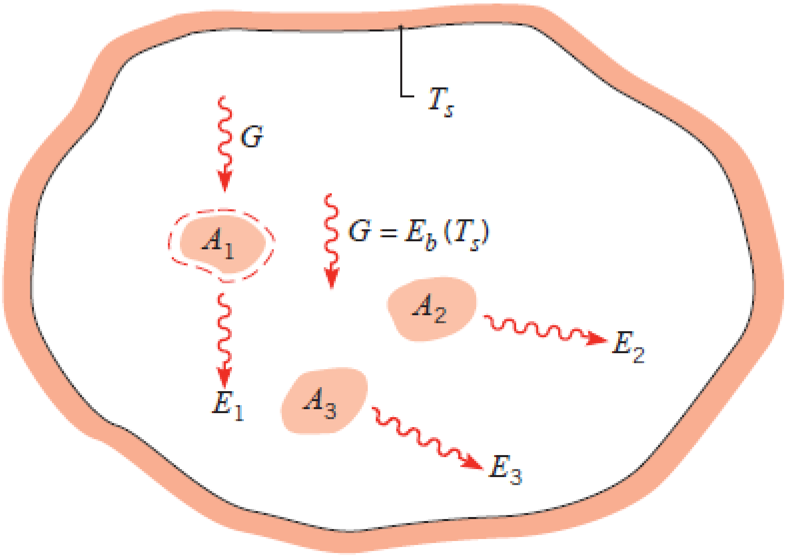
$$T_1 = T_2 = \cdots = T_s$$

Conservação de energia

$$\alpha_1 G A_1 - E_1(T_s) A_1 = 0$$

que se pode escrever

$$\frac{E_1(T_s)}{\alpha_1} = E_b(T_s)$$



Sendo isto verdade para todos as superfícies

$$\frac{E_1(T_s)}{\alpha_1} = \frac{E_2(T_s)}{\alpha_2} = \cdots = E_b(T_s)$$

$$\frac{\varepsilon_1}{\alpha_1} = \frac{\varepsilon_2}{\alpha_2} = \cdots = 1$$

$$\varepsilon = \alpha$$

Lei de Kirchoff

$$G = E_b(T_s)$$

Equilíbrio térmico

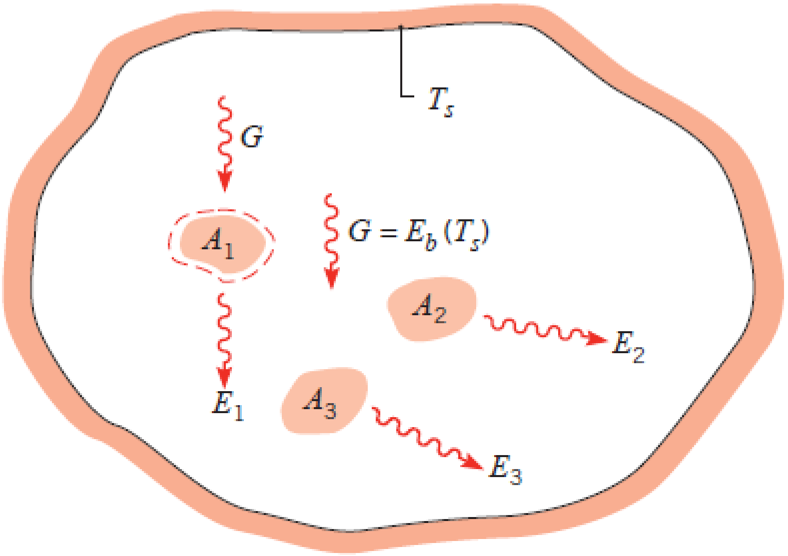
$$T_1 = T_2 = \cdots = T_s$$

Conservação de energia

$$\alpha_1 G A_1 - E_1(T_s) A_1 = 0$$

que se pode escrever

$$\frac{E_1(T_s)}{\alpha_1} = E_b(T_s)$$



Como α < 1 então E < E_b – confirma que nada emite tanto como um corpo negro!

$$\frac{E_1(T_s)}{\alpha_1} = \frac{E_2(}{\alpha}$$

Estamos a assumir que a Irradiação na superfície

é a do corpo negro à mesma temperatura

$$\varepsilon = \alpha$$

Lei de Kirchoff

$$G = E_b(T_s)$$

Equilíbrio térmico

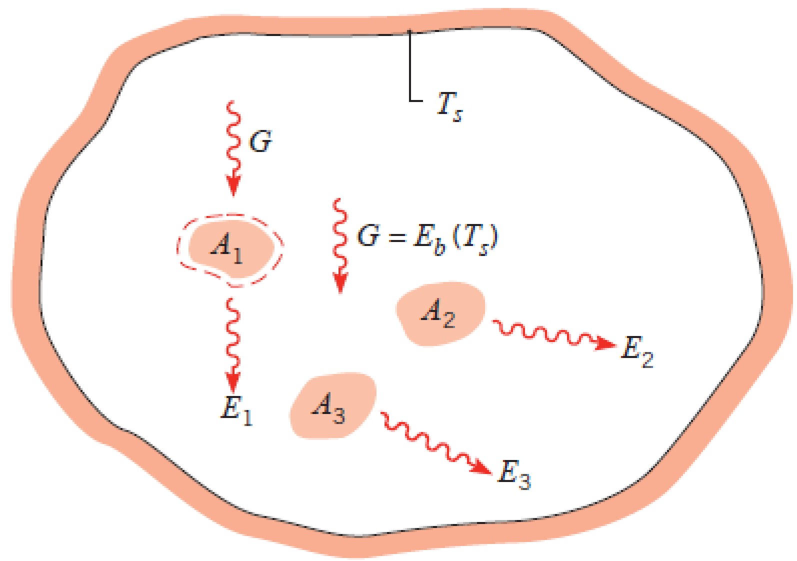
$$T_1 = T_2 = \cdots = T_s$$

Conservação de energia

$$\alpha_1 G A_1 - E_1(T_s) A_1 = 0$$

que se pode escrever

$$\frac{E_1(T_s)}{\alpha_1} = E_b(T_s)$$



Como $\alpha < 1$ então $E < E_b$ – confirma que nada emite tanto como um corpo negro!

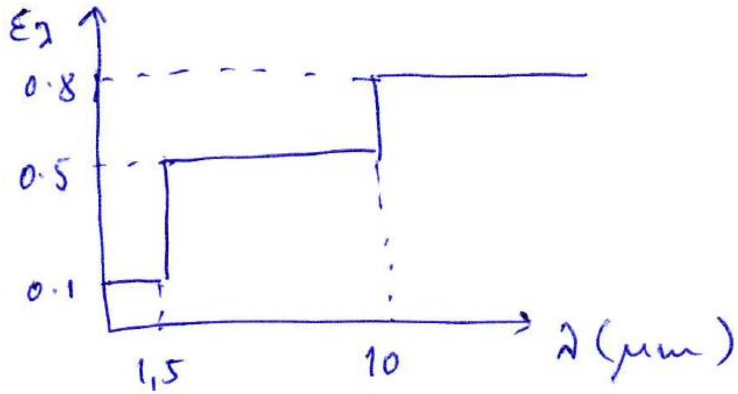
$$\frac{E_1(T_s)}{\alpha_1} = \frac{E_2(}{\alpha}$$

Estamos a assumir que a Irradiação na superfície é a do corpo negro à mesma temperatura

$$\varepsilon = \alpha$$

Exemplo

Uma parede de tijolo refractário a 500K tem a emissividade espectral da figura quando exposta à radiação do carvão incandescente a 2000K.



Determinar emissividade hemisférica total e a potência emitida pela parede.

Qual a absortividade total da parede para a irradiação recebida do carvão?

1) A emissividade hemisférica total é

$$\varepsilon(T_s) = \frac{\int_0^\infty \varepsilon_\lambda(\lambda)\, E_{\lambda b}(\lambda, T_s)\, d\lambda}{E_b(T_s)} \quad \text{em que } T_s = 500\ K$$

$$= \varepsilon_{\lambda_1} \frac{\int_0^{\lambda_1} E_{\lambda b}\, d\lambda}{E_b} + \varepsilon_{\lambda_2} \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda b}\, d\lambda}{E_b} + \varepsilon_{\lambda_3} \frac{\int_{\lambda_2}^{\infty} E_{\lambda b}\, d\lambda}{E_b}$$

$$\varepsilon(T_s) = \varepsilon_{\lambda_1} f_{0\to\lambda_1} + \varepsilon_{\lambda_2}\left(f_{0\to\lambda_2} - f_{0\to\lambda_1}\right) + \varepsilon_{\lambda_3}\left(1 - f_{0\to\lambda_2}\right)$$

Da tabela

$\lambda_1 T_s = 1{,}5 \times 500 = 750 \longrightarrow f_{0\to\lambda_1} = 0$

$\lambda_2 T_s = 10 \times 500 = 5000 \longrightarrow f_{0\to\lambda_2} = 0.634$

$$\varepsilon(T_s) = 0.1 \times 0 + 0.5 \times 0.634 + 0.8 \times (1 - 0.634) = \underline{\underline{0.610}}$$

2)

$$E(T_s) = \varepsilon(T_s)\,E_b(T_s) = \varepsilon(T_s)\,\sigma T^4$$

$$E = 0.61 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 500^4 = \underline{\underline{2162}}\ W/m^2$$

3)
$$\alpha = \frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda G_\lambda \, d\lambda}{\int_0^\infty G_\lambda \, d\lambda} \qquad T_c = 2000\,K!$$

Assumindo uma superfície difusa : $\alpha_\lambda(\lambda) = \varepsilon_\lambda(\lambda)$

$G_\lambda(\lambda) \simeq E_{\lambda b}(T_c)$ logo

$$\alpha = \frac{\int_0^\infty \varepsilon_\lambda E_{\lambda b} \, d\lambda}{\int_0^\infty E_{\lambda b} \, d\lambda} = \varepsilon_{\lambda_1} F_{0\to\lambda_1} + \varepsilon_{\lambda_2}\left(F_{0\to\lambda_2} - F_{0\to\lambda_1}\right) + \varepsilon_{\lambda_3}\left(1 - F_{0\to\lambda_2}\right.$$

Da tabela

$\lambda_1 T_c = 1{,}5 \times 2000 = 3000 \rightarrow F_{0\to\lambda_1} = 0.2733$

$\lambda_2 T_c = 10 \times 2000 = 20\,000 \rightarrow F_{0\to\lambda_2} = 0.986$

logo

$$\alpha = 0.1 \times 0.273 + 0.5\,(0.986 - 0.2733) + 0.8\,(1 - 0.986) = \underline{\underline{0.395}}$$

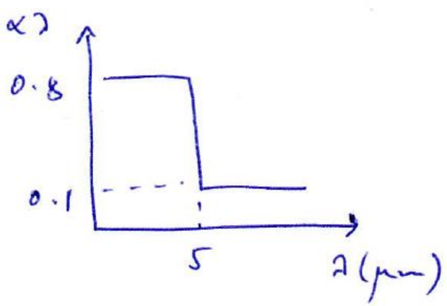
Uma pequena esfera metálica tem um revestimento difuso com $\alpha_\lambda = 0.8$ para $\lambda \leq 5\ \mu m$

0.1 para $\lambda > 5\ \mu m$

A esfera está inicialmente à temperatura ambiente (300 K) e é introduzida num forno cujas paredes se encontram a 1200 K.

Determinar a absorvidade hemisférica total e a emissividade hemisférica total do revestimento, nas duas condições.

Resposta



$$\alpha = \frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda G_\lambda \, d\lambda}{\int_0^\infty G_\lambda \, d\lambda} \qquad T_f = 1200\,K$$

usando $G_\lambda = E_{\lambda b}(T_f)$

$$\alpha = \frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda E_{\lambda b}(1200)\, d\lambda}{E_b(1200)} = \alpha_{\lambda_1} \frac{\int_0^{\lambda_1} E_{\lambda b}\, d\lambda}{E_b} + \alpha_{\lambda_2} \frac{\int_{\lambda_1}^{\infty} E_{\lambda b}\, d\lambda}{E_b}$$

$$= \alpha_{\lambda_1} f_{0\to\lambda_1} + \alpha_{\lambda_2}\left(1 - f_{0\to\lambda_1}\right)$$

Da tabela

$$\lambda_1 T_f = 5 \times 1200 = 6000 \longrightarrow f_{0\to\lambda_1} = 0.738$$

Logo

$$\alpha = 0.8 \times 0.738 + 0.1\,(1 - 0.738) = 0.62$$

Superfície cinzenta

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

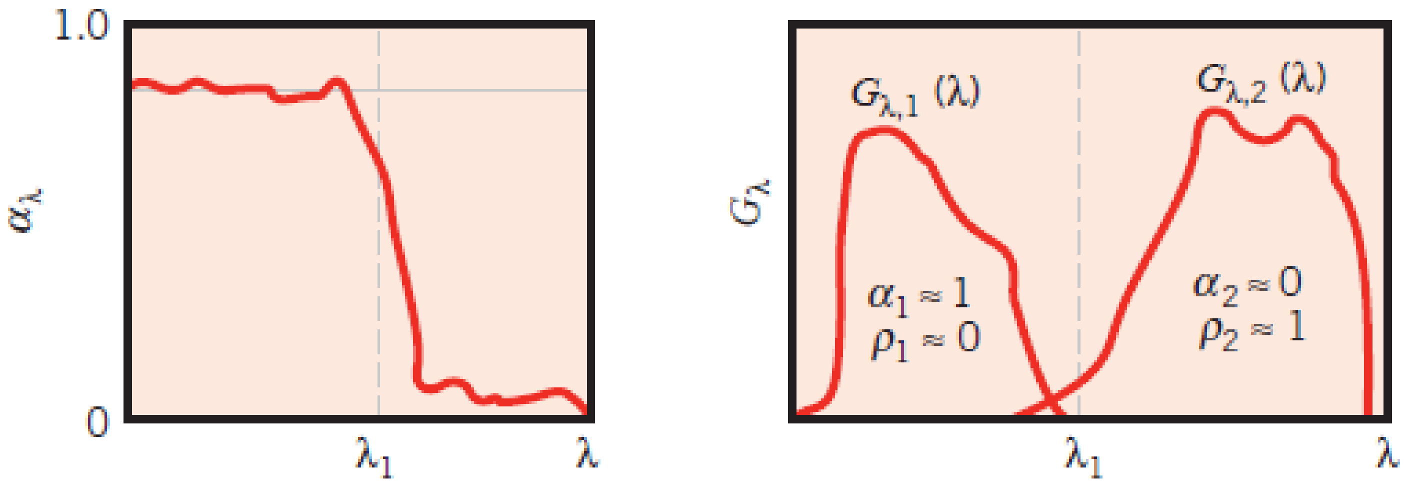
Como $\varepsilon_{\lambda\theta} = \alpha_{\lambda\theta}$ a equação acima é verdade se se verificar pelo menos uma das seguintes condições:

- A **irradiação** é **difusa** ($I_{\lambda i}$ é independente de θ e ϕ)
- A **superfície** é **difusa** ($\varepsilon_{\lambda\theta}$ e $\alpha_{\lambda\theta}$ são independentes de θ e ϕ)

Ambas as condições são comuns em problemas de engenharia, pelo menos em primeira aproximação.

Superfície cinzenta

A absorvidade depende da distribuição espectral da radiação incidente, pelo que não é de esperar que $\alpha = \varepsilon$ em todas as condições!!



Superfície cinzenta

$$\varepsilon = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_\lambda E_{\lambda,b}(\lambda, T)\, d\lambda}{E_b(T)} \overset{?}{=} \frac{\int_0^{\infty} \alpha_\lambda G_\lambda(\lambda)\, d\lambda}{G} = \alpha$$

Como $\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$ a equação acima é verdade se se verificar pelo menos uma das seguintes condições:

- A **irradiação** é a do corpo negro com uma temperatura igual **à temperatura da superfície** ($G_\lambda(\lambda) = E_{\lambda,b}(\lambda, T)$)
- A **superfície** é **cinzenta** (ε_λ e α_λ são independentes de λ)

Superfície cinzenta

Na prática, a superfície não precisa de ser cinzenta em todo o espectro mas apenas nas regiões espectrais da irradiação e da emissão da superfície.