

Transferência de Calor por Radiação

PME3398

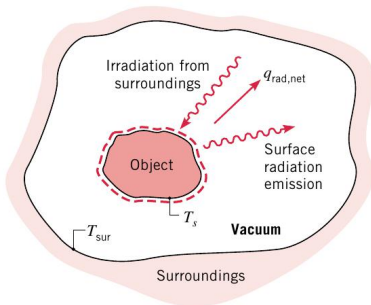
Prof. Antonio Luiz Pacífico

1º Semestre de 2019

Conteúdo da Aula

- 1 Conceitos Fundamentais
- 2 Grandezas da Radiação
- 3 Radiação de Corpo Negro
- 4 Propriedades Radiantes de Superfícies Reais
- 5 Exercícios

Conceitos Fundamentais

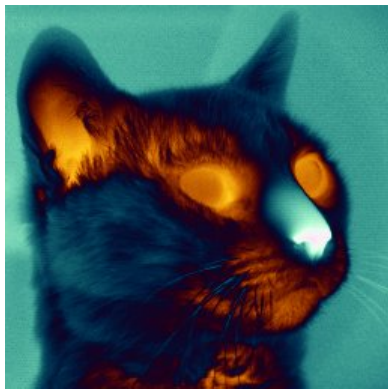


Inicialmente $T_s > T_{viz}$ num ambiente no qual há vácuo. Nestas condições a única forma de transferência de calor é por radiação térmica. Neste modo de transferência de calor \dot{q}'' ou \dot{Q} não aparecem devido à uma diferença de temperatura, mas simplesmente pelo fato do corpo possuir uma temperatura absoluta diferente de zero. Assim, o termo geral utilizado é **emissão** de radiação térmica. *Todo corpo com temperatura absoluta maior que zero emite radiação térmica.*

Figura: $T_{sur} \equiv T_{viz}$;

$q_{rad,liq} \equiv \dot{Q}_{rad,liq}$

Conceitos Fundamentais



No exemplo anterior tanto o sólido como a vizinhança emitirão radiação térmica. Mas, como $T_s > T_{viz}$, o fluxo (ou a taxa de transferência) de calor *líquido* será do sólido para a vizinhança. Deste modo, o sólido irá se resfriar e a vizinhança se aquecer, até que ambos atinjam o equilíbrio: $T_{viz} < T_{final} < T_s$. Se a vizinhança for muito muito maior que o sólido em termos de capacidade térmica, então, ao final $T_s = T_{viz}$.

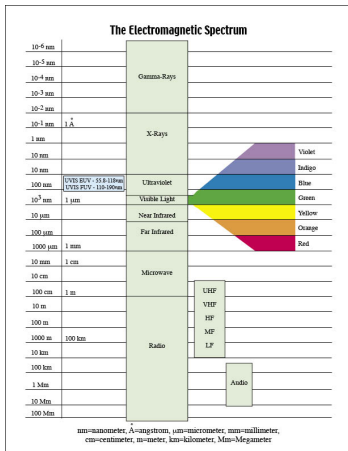
← **Importante:** Radiação térmica é, para sólidos e líquidos, um fenômeno de superfície, i. e., depende essencialmente das propriedades da superfície e da sua temperatura. Para gases a radiação térmica é um fenômeno volumétrico.

Conceitos Fundamentais

A radiação térmica apresenta propriedades típicas de ondas eletromagnéticas: frequência, ν ; comprimento de onda, λ ; e velocidade da luz no meio, c : $c = \lambda \cdot \nu$. Para o vácuo, $c_0 = 2,998 \times 10^8$ m/s. A unidade de λ é o metro, mas o micrômetro (μm : $1 \mu\text{m} = 10^{-6}$ m) é largamente utilizado em radiação térmica. A unidade de ν é o hertz, Hz.

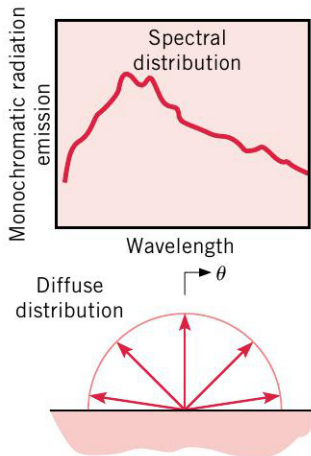
O índice de refração da luz num meio, n , é a razão entre a velocidade da luz no vácuo, c_0 , e a velocidade da luz no meio, c : $n = c_0/c$.

Conceitos Fundamentais



”A fração intermediária do espectro, que se estende aproximadamente de 0,1 a 100 μ m e que inclui uma fração da região ultravioleta (UV) e todo o espectro visível e infravermelho (IV), é denominada *radiação térmica* e é pertinente à transferência de calor.”[Moran *et al.* (2005)].

Conceitos Fundamentais



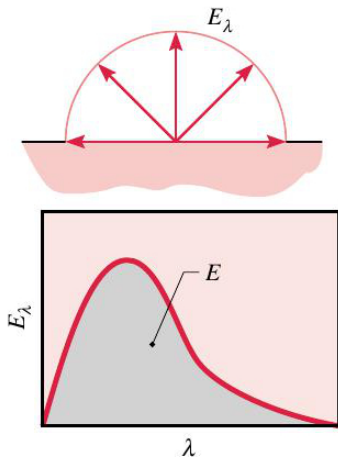
A intensidade da radiação varia em função do comprimento de onda e da direção da emissão. Portanto a emissão de radiação é *espectral* e *direcional*.

A emissão num dado comprimento de onda é chamada *monocromática*.

Quando a emissão é uniforme em todas as direções é chamada *difusa* e a superfície que a emite como *superfície emissora difusa*.

Neste capítulo trataremos apenas de emissões difusas, não importante, portanto, a direção (uniforme em todas as direções).

Poder Emissivo Hemisférico Total

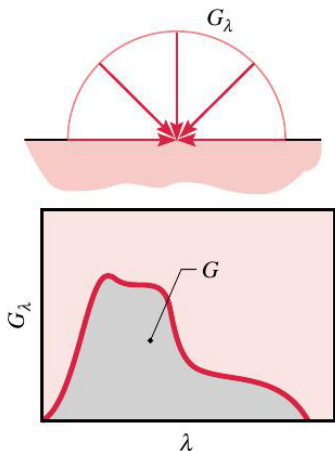


← O *Poder Emissivo Espectral*, E_λ [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$], é a taxa pela qual a radiação de comprimento de onda λ é emitida em todas as direções no espaço hemisférico de uma superfície, por unidade de área da superfície e por unidade de intervalo $d\lambda$ de comprimento de onda em torno de λ .

O *Poder Emissivo Hemisférico Total*, E [W/m^2], é a taxa pela qual a radiação é emitida por unidade de área em todas as direções possíveis e em todos os possíveis comprimentos de onda.

$$\leftarrow E = \int_0^{\infty} E_\lambda(\lambda) \cdot d\lambda$$

Irradiação Total

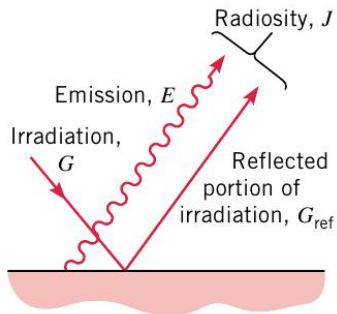


← A *Irradiação Espectral*, G_λ [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$], é a taxa pela qual a radiação de comprimento de onda λ é incidente sobre uma superfície, por unidade de área da superfície e por unidade de intervalo $d\lambda$ de comprimento de onda em torno de λ .

O *Irradiação Total*, G [W/m^2], é a taxa pela qual a radiação é incidente por unidade de área proveniente de todas as direções e em todos os comprimentos de onda.

$$\leftarrow G = \int_0^{\infty} G_\lambda(\lambda) \cdot d\lambda$$

Radiosidade Total



A *Radiosidade Espectral*, J_λ [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$], é a taxa pela qual a radiação de comprimento de onda λ deixa uma unidade de área da superfície, por unidade de intervalo $d\lambda$ de comprimento de onda em torno de λ .

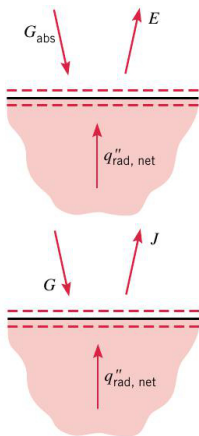
$$J_\lambda = E_\lambda + G_{\lambda,refl}$$

O *Radiosidade Total*, J [W/m^2], associada a todo espectro, é dada pela integral das grandezas espectrais e representa a taxa na qual a radiação deixa uma área unitária da superfície, em todas as direções e em todos comprimentos de onda.

$$J = \int_0^\infty J_\lambda(\lambda) \cdot d\lambda = \int_0^\infty (E_\lambda + G_{\lambda,refl}) \cdot d\lambda$$

$$J = E + G_{refl}$$

Balços de Energia em Superfícies



O fluxo de calor por radiação líquido deixando uma superfície, $\dot{q}''_{rad, liq}$, é dado pelo poder emissivo total da superfície, E , menos a parte absorvida da irradiação total, G_{abs} .

$$\dot{q}''_{rad, liq} = E - G_{abs}$$

Alternativamente, o fluxo de calor por radiação líquido deixando uma superfície é dado pela radiosidade total, J , menos a irradiação total, G .

$$\dot{q}''_{rad, liq} = J - G$$

Observe que, **para superfícies**,

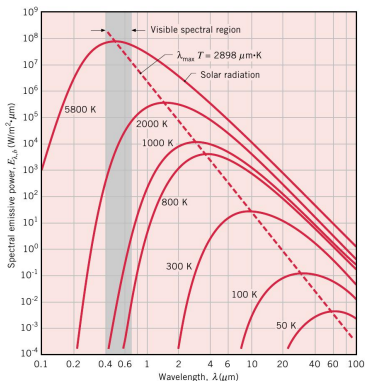
$G_{refl} = G - G_{abs}$. A parcela G_{tr} (relativa à transmissão), só tem significado para volumes de controle (meio volumétrico).

Corpo Negro

Uma superfície ideal tendo as seguintes propriedades é denominada de **corpo negro**:

- Um corpo negro absorve toda a radiação incidente, independente do comprimento de onda e da direção;
- Para uma temperatura e um comprimento de onda dados, nenhuma superfície pode emitir mais energia que um corpo negro;
- Embora a radiação emitida por um corpo negro seja função do comprimento de onda e da temperatura, ela é independente da direção, Isto é, o corpo negro é um emissor difuso.

Poder Emissivo de um Corpo Negro



Define-se o poder emissivo monocromático de um corpo negro, $E_{\lambda,b}$ [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$], emitido para todas as direções, como:

$$E_{\lambda,b} = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot [\exp(C_2/\lambda \cdot T) - 1]}$$

onde $C_1 = 3,742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$;

$C_2 = 1,439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$; e T é a temperatura da superfície em kelvin.

Exemplo: para um corpo negro a 1000 K, o pico de emissão ocorre a $2,9 \mu\text{m}$, aparecendo parte da radiação emitida na região visível como luz vermelha.

Figura: Distribuição espectral de Planck.

Lei de Stefan-Boltzmann

Uma vez que,

$$E_b = \int_0^{\infty} E_{\lambda,b} \cdot d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot [\exp(C_2/\lambda \cdot T) - 1]} \cdot d\lambda$$

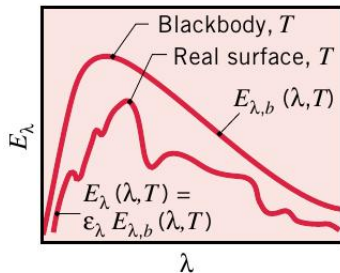
o resultado obtido desta integração é conhecido como **Lei de Stefan-Boltzmann**:

$$E_b = \sigma \cdot T^4$$

onde a constante de Stefan-Boltzmann, que depende de C_1 e C_2 vale:

$$\sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

Emissividade Total



A *emissividade espectral*, ϵ_λ , é a razão entre o poder emissivo espectral de uma superfície e o poder emissivo de um corpo negro na mesma temperatura e para o mesmo comprimento de onda,

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

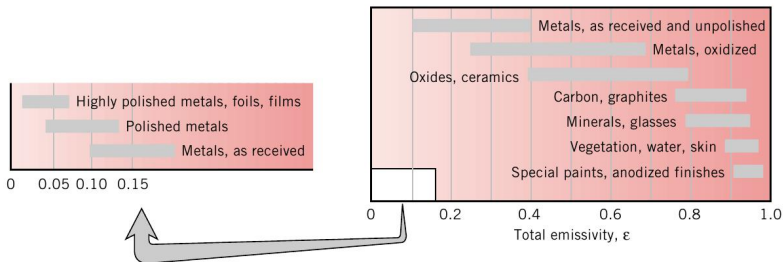
A *emissividade total*, ϵ , é a razão entre o poder emissivo total de uma superfície e o poder emissivo de um corpo negro na mesma temperatura,

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{E(T)}{E_b(T)}$$

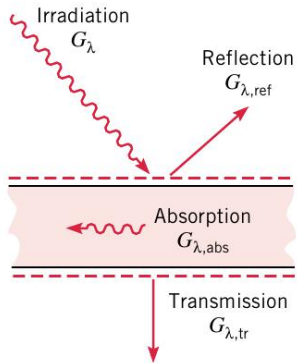
Consequentemente, $\epsilon(T) = [\int_0^\infty \epsilon_\lambda(\lambda, T) \cdot E_{\lambda,b}(\lambda, T) \cdot d\lambda] / E_b(T)$.

Emissividade Total

Valores típicos de emissividades totais são mostrados na figura abaixo.



Absortividade, Refletividade e Transmissividade



A figura ao lado ilustra a interceptação de irradiação espectral por um meio semitransparente.

O termo *semitransparente* se refere a um meio no qual a radiação não refletida é absorvida e/ou transmitida.

As partes da irradiação espectral podem ser refletidas (*refl*), absorvidas (*abs*) e transmitidas (*tr*).

O balanço de radiação num meio semitransparente é dado por,

$$G_\lambda = G_{\lambda,refl} + G_{\lambda,abs} + G_{\lambda,tr}$$

Diz-se que um meio é *opaco* quando $G_{\lambda,tr} = 0$.

OBS: Na figura, $G_{\lambda,ref} = G_{\lambda,refl}$.

Absortividade

A **absortividade** é a fração da irradiação incidente que é absorvida por um meio. As superfícies podem apresentar absortividade seletiva (em relação ao λ incidente). Assim, a *absortividade espectral*, α_λ , é dada por,

$$\alpha_\lambda(\lambda) = \frac{G_{\lambda,abs}(\lambda)}{G_\lambda(\lambda)}$$

A *absortividade total*, α , é o resultado da integração sobre todos os comprimentos de onda e é definida por,

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

Refletividade

A **refletividade** é a fração da irradiação incidente que é refletida por uma superfície. A *refletividade espectral*, ρ_λ , é dada por,

$$\rho_\lambda(\lambda) = \frac{G_{\lambda,refl}(\lambda)}{G_\lambda(\lambda)}$$

A *refletividade total*, ρ , é o resultado da integração sobre todos os comprimentos de onda e é definida por,

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

A reflexão de uma superfície pode ser *difusa* (uniforme em todas as direções - superfícies rugosas), ou *especular* (em uma única direção - superfícies polidas).

Transmissividade

A **transmissividade** é a fração da irradiação incidente que é transmitida através de um meio material semitransparente. A *transmissividade espectral*, τ_λ , é dada por,

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

A *transmissividade total*, τ , é o resultado da integração sobre todos os comprimentos de onda e é definida por,

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

Relações das Propriedades da Radiação

Do exposto anteriormente, segue-se que, para propriedades espectrais:

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

Para propriedades totais:

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

Para meios opacos, $\tau_{\lambda} = \tau = 0$:

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

Para uma superfície que emite e reflete uniformemente, denominada *superfície difusa*, a emissividade e a absorptividade espectrais são iguais:

$$\epsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda}$$

Relações das Propriedades da Radiação

A mesma condição para superfícies difusas pode ser aplicada à emissividade e absorvidade totais:

$$\varepsilon = \alpha$$

Tal igualdade é conhecida como **Lei de Kirchoff** e maiores detalhes desta equivalência estão fora do contexto deste curso. A Lei de Kirchoff é válida quando pelo menos uma das duas condições a seguir for satisfeita:

- A irradiação corresponde à emissão de um corpo negro na temperatura superficial T , para a qual $G_\lambda(\lambda) = E_{\lambda,b}(\lambda, T)$ e $G = E_b(T)$;
- A superfície for **cinza**, i. e., α_λ e ε_λ são independentes de λ .

Utilização no Contexto deste Curso

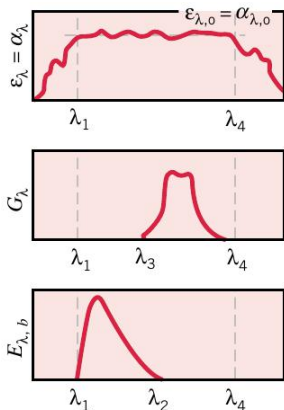


Figura: Superfície cinza.

- $\alpha_\lambda = \epsilon_\lambda$: válida para condições difusas. Neste curso trataremos somente de condições difusas;
- $\alpha \neq \epsilon$ é válida para superfícies espectralmente seletivas e não serão abordadas neste curso;
- $\alpha = \epsilon$: se aplica quando qualquer tipo de superfície está em equilíbrio térmico com sua vizinhança;
- $\alpha = \epsilon$: se aplica quando a superfície não tem caráter espectral na região de importância do comprimento de onda tal que $\alpha_\lambda = \epsilon_\lambda = \alpha = \epsilon = \text{constante}$. Esta superfície é chamada de superfície difusa cinza.

Exercício de Aula 1

Enunciado: A superfície escura do topo de um fogão de cerâmica pode ser aproximada por um corpo negro. Os “queimadores”, que estão integrados ao topo do fogão, são aquecidos por baixo por aquecedores de resistência elétrica. Considere um queimador com diâmetro $D = 200$ mm operando com uma temperatura de superfície uniforme de $T_s = 250$ °C em ar ambiente a $T_\infty = 20$ °C. Sem um pote ou panela sobre o queimador, quais são as taxas de perda térmica por radiação e por convecção no queimador? Sendo a eficiência associada à transferência de energia dos aquecedores para os queimadores de 90%, qual é a exigência de potência elétrica?

Exercício de Aula 2

Enunciado: Duas superfícies pequenas, A e B , estão localizadas no interior de um recipiente isotérmico a uma temperatura uniforme. O recipiente proporciona uma irradiação de 6300 W/m^2 em cada uma das superfícies, e as superfícies A e B absorvem a radiação incidente nas taxas de 5600 W/m^2 e 630 W/m^2 , respectivamente. Considere condições após o transcorrer de um longo período de tempo.

- Quais são os fluxos térmicos líquidos para cada superfície? Quais são as suas temperaturas?
- Determine a absorvidade de cada superfície.
- Quais são os poderes emissivos de cada superfície?
- Determine a emissividade de cada superfície.

Exercício de Aula 3

Enunciado: Um termopar cuja superfície é difusa e cinza, possuindo uma emissividade de 0,6, indica uma temperatura de $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ quando é utilizado para medir a temperatura de um gás que escoa através de um grande duto cujas paredes possuem uma emissividade de 0,5 e uma temperatura uniforme de $450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se o coeficiente de transferência de calor por convecção entre o termopar e a corrente de gás for de $\bar{h} = 125\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ e as perdas por condução pelo termopar forem desprezíveis, determine a temperatura do gás.