Transmissão de calor

3º ano

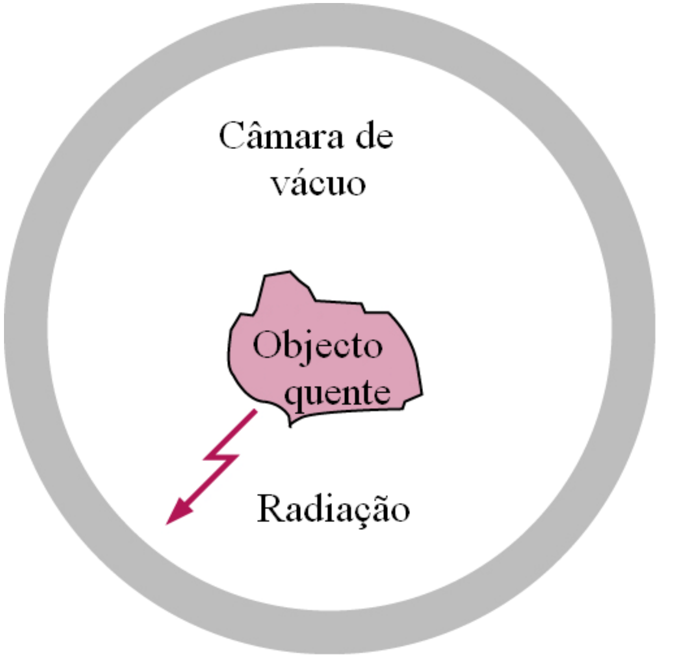
Aula 19 ▫ 10. Radiação

Tópicos:

- Introdução
- Radiação Térmica
- Radiação de Corpo Negro
- Lei de Stefan-Boltzmann
- Lei de Planck da distribuição
- Lei de deslocamento Wien
- Emissão em bandas

10.1 Introdução

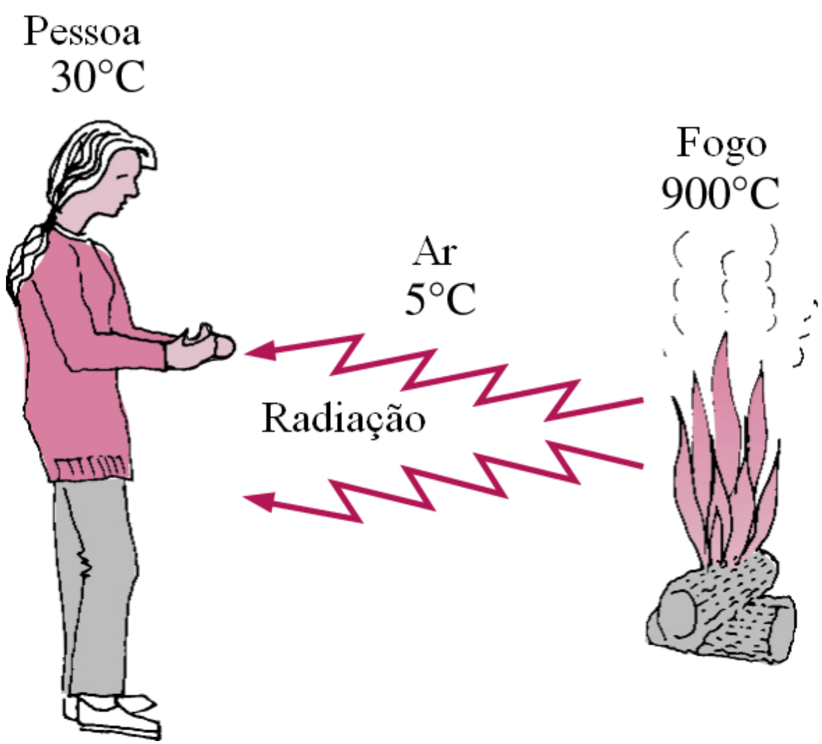
Considere-se um objecto quente suspenso numa câmara de vácuo cujas paredes se encontram a temperatura ambiente, o objecto quente vai arrefecer até atingir a temperatura de equilíbrio das paredes. O Calor transferido do objecto para as paredes não foi por condução nem por convecção!



10.1 Introdução

A radiação difere dos outros dois mecanismos de transferência de calor, pois ela não requer a presença de um meio material para ocorrer. A energia transferida por radiação faz-se de uma forma rápida a velocidade da luz. A transferência de calor por radiação ocorre em sólidos líquidos ou gases. Na maior parte das aplicações os três métodos de transferência de calor ocorrem em simultâneo.

10.1 Introdução



A condução e a convecção ocorrem de um meio a alta temperatura para um que se encontra a baixa temperatura. O interessante na radiação é que esta pode ocorrer entre duas superfícies separadas por um meio mais frio que ambas as superfícies.

10.1 Introdução

As ondas electromagnéticas transportam energia como as outras ondas e todas as ondas electromagnéticas movem-se à velocidade da luz no vácuo que é de $C_o = 2{,}9979 \times 10^8$ m/s. As ondas electromagnéticas são caracterizadas pela sua **frequência** e pelo seu **comprimento de onda.**

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \qquad \textbf{(10.1)}$$

Onde **c** é a velocidade de propagação da onda no meio. A velocidade de propagação num meio está relacionada com a velocidade da luz no vácuo do seguinte modo: $c = c_o/n$

10.1 Introdução

É usual considerar-se a radiação electromagnética como a propagação de uma colecção de pacotes discretos de energia chamados **fótons** ou **quanta.** Do ponto de vista de Max Planck (1900) cada fóton de frequência **ν** considera-se que tenha a energia:

$$e = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \qquad \textbf{(10.2)}$$

Onde **h** é a constante de Planck que tem o valor de 6,6256 x 10^{-34} J

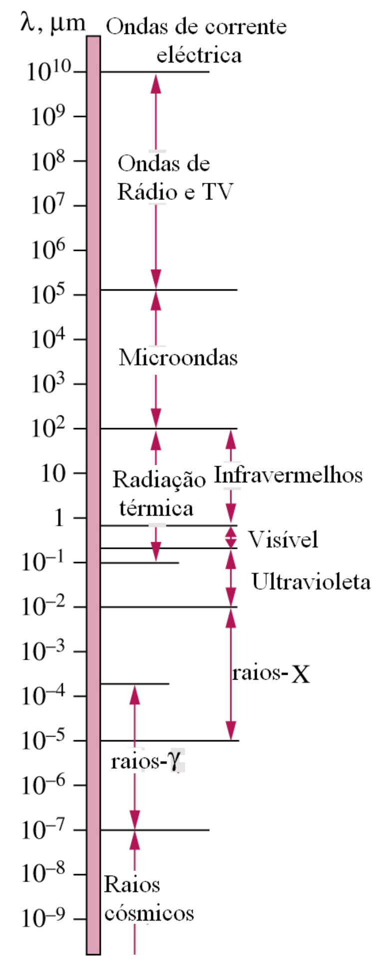
10.2 Radiação Térmica

Embora todas as ondas electromagnéticas tenham as mesmas características gerais, as ondas de comprimento diferente diferem significativamente no comportamento delas. A radiação electromagnética encontra-se na prática numa gama extensa de comprimentos de onda, variando de menos de 10^{-10} μm para raios cósmicos até mais de 10^{10} μm, para ondas de corrente eléctrica.

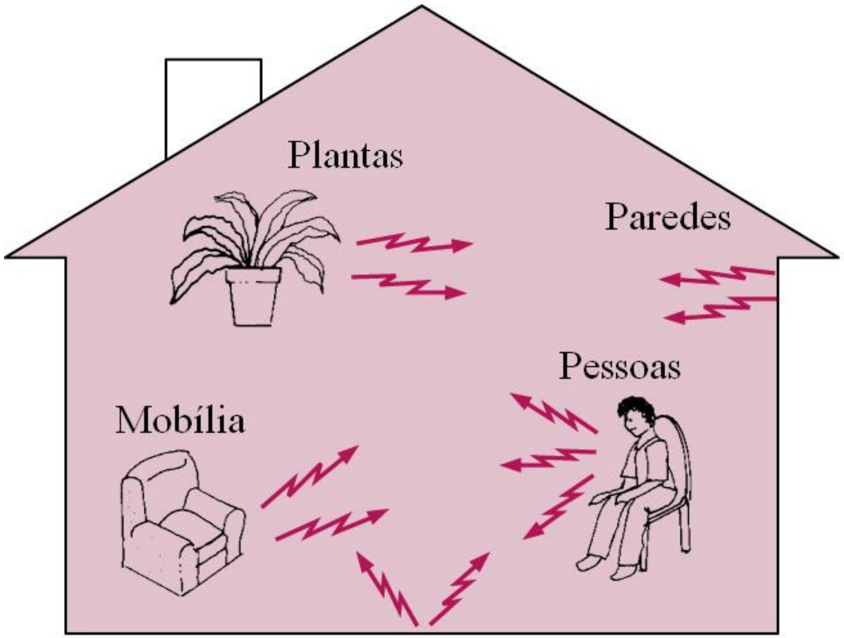
10.2 Radiação Térmica

O **espectro electromagnético** inclui raios gama, raios X, radiação ultravioleta, radiação visível, radiação infravermelha, radiação térmica, microondas e ondas de rádio.

Os diferentes tipos de radiação electromagnética são produzidos por vários mecanismos. Por exemplo, os raios gama são produzidos por reacções nucleares, os raios X pelo bombardeio de metais com electrões de alta energia, as microondas por tipos especiais de tubos de electrões e ondas de rádio pela excitação de alguns cristais, ou pelo fluxo de corrente alternada por condutores eléctricos.



10.2 Radiação Térmica



A radiação térmica é emitida continuamente por todo o objecto cuja temperatura está acima do zero absoluto. Tudo ao nosso redor, como as paredes, mobília mesmo os nossos amigos constantemente emitem (e absorvem) radiação. A radiação térmica também é definida como a parte do espectro electromagnético que se estende de aproximadamente 1 a 100 μm que é emitida por corpos devido à sua temperatura, então todos os corpos situam-se neste comprimento de onda. A radiação térmica inclui toda a radiação visível, a radiação infravermelha (IV), como também uma parte da radiação ultravioleta (UV).

10.2 Radiação Térmica

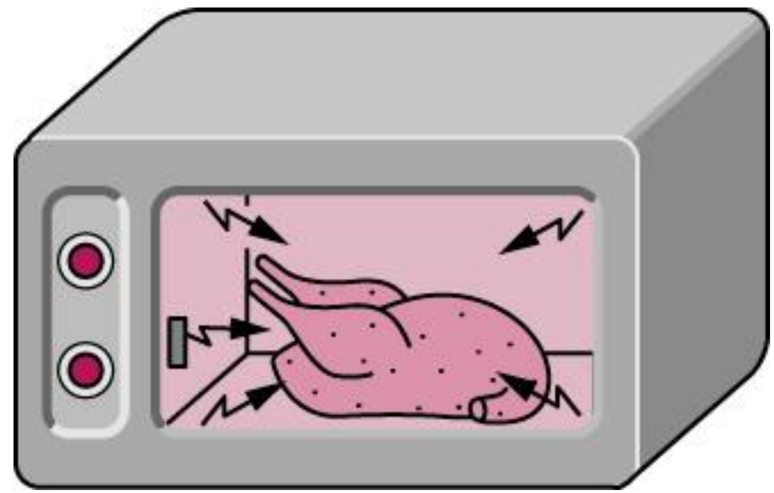
Côr	Comprimento de onda
Violeta	0,40 – 0,44 µm ,
Azul	0,44 – 0,49 µm
Verde	0,49 – 0,54 µm
Amarelo	0,54 – 0,60 µm
Laranja	0,60 – 0,67 µm
Vermelho	0,63 – 0,76 µm

O que comummente se chama luz é simplesmente a parte visível do espectro electromagnético que varia entre 0,40 e 0,76 µm. A luz caracteristicamente não é diferente de outra radiação electromagnética, a não ser pelo facto de ela activar a sensação de ver no olho humano. A luz ou o espectro visível consiste de faixas estreitas de cor violeta desde (0,40–0,44 µm) até o vermelho (0,63–0,76 µm).

10.2 Radiação Térmica

Os fornos de microondas utilizam radiação electromagnética na região do espectro de microondas geradas por tubos de microondas chamado magnetrons.

Microondas na gama de 10^2–10^5 μm são usadas para cozinhar como elas são reflectidas por metais, transmitidos por vidros e plásticos e absorvidas pelas moléculas de comida (especialmente a água).



Assim, a energia eléctrica convertida em radiação num forno de microondas torna-se parte da energia interna da comida. A maneira rápida e eficiente de cozinhar dos fornos de microondas os fez um dos electrodomésticos essenciais em cozinhas modernas.

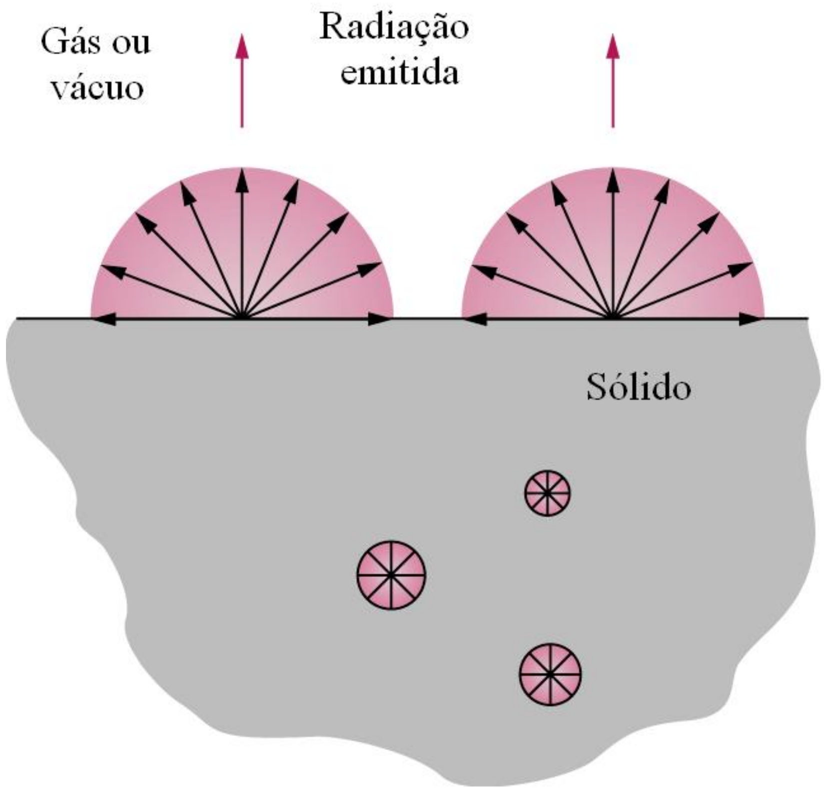
Os radares e telefones sem fio também usam radiação electromagnética na faixa dos microondas. O comprimento das ondas electromagnéticas usadas em rádio e televisão, normalmente variam entre 1 e 1000 μm.

10.3 Corpo negro

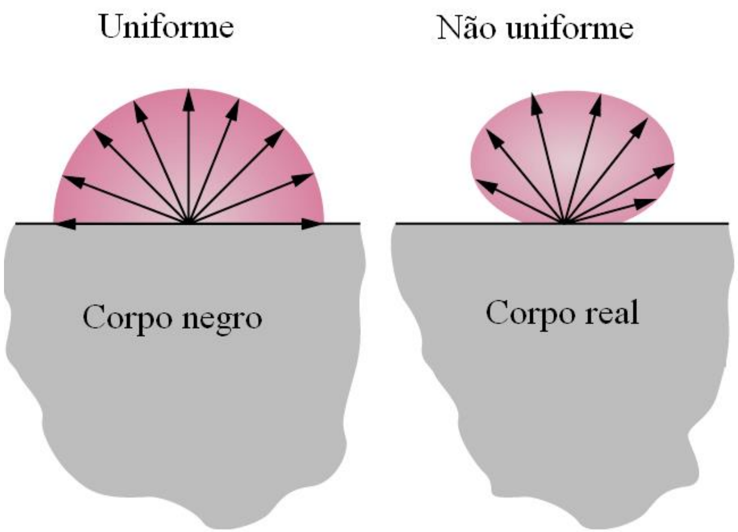
Um corpo a uma temperatura acima do zero absoluto emite radiação em todas as direcções, numa gama extensa de comprimentos de onda. A quantidade de energia de radiação emitida de uma superfície a um determinado comprimento de onda, depende do material do corpo, da condição da sua superfície, como também da temperatura da superfície. Corpos diferentes, podem emitir quantidades diferentes de radiação por unidade de área de superfície, até mesmo quando eles estão à mesma temperatura. Assim é natural que seja uma curiosidade conhecer a quantidade máxima de radiação que pode ser emitida por uma superfície a uma determinada temperatura. Satisfazer esta curiosidade requer a definição de um corpo idealizado chamado **corpo negro,** que serve como padrão e em relação ao qual podem ser comparadas as propriedades de superfícies reais.

10.3 Corpo negro

A radiação em sólidos opacos é considerada um fenómeno de superfície porque só considera a radiação emitida pelas moléculas à superfície que podem escapar do sólido.



10.3 Corpo negro



Um corpo negro é definido como um emissor e absorvedor perfeito de radiação. A uma temperatura especifica e comprimento de onda, nenhuma superfície pode emitir mais energia que um corpo negro. Um corpo negro absorve toda a radiação incidente independentemente do comprimento de onda e direcção. Também um corpo negro emite energia de radiação uniformemente em todas as direcções, por unidade de área normal à direcção de emissão. Quer dizer, um corpo negro é um emissor difuso. O termo difuso quer dizer independente da direcção.

10.3 Corpo negro

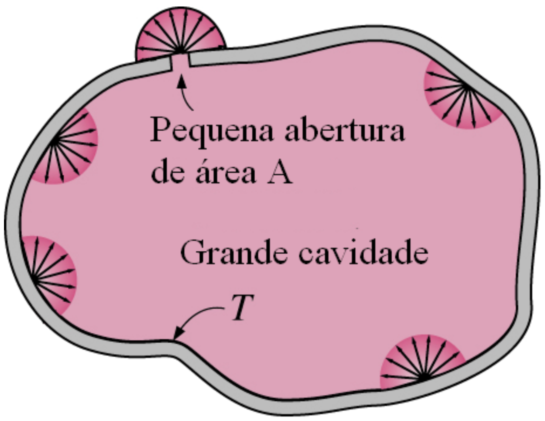
A energia de radiação emitida por um corpo negro, por unidade de tempo e por unidade área de superfície foi experimentalmente determinada por Joseph Stefan em 1879 e é expressa como:

$$E_b(T) = \sigma T^4 \qquad \textbf{(10.3)}$$

Onde σ = 5,67 x 10^{-8} $W/m^2 \cdot K^4$ é a constante de Stefan-Boltzman e T é a temperatura absoluta da superfície em K. Esta equação é conhecida como a **lei de Stefan-Boltzman e E_b** e é chamado **emissividade do corpo negro.**

10.3 Corpo negro

Um corpo que de perto se assemelha a um corpo negro é uma cavidade grande com uma abertura pequena. A radiação que entra pela abertura de área A, sofre reflexos múltiplos e assim tem várias chances de ser absorvida pelas superfícies interiores da cavidade antes de qualquer parte dela poder escapar. Também se a superfície da cavidade for isotérmica, mantida a temperatura **T,** a radiação emitida pelas superfícies interiores fluirá pela abertura depois de sofrer reflexos múltiplos e assim terá uma natureza difusa. Então a cavidade agirá como um absorvente perfeito e emissor perfeito e a abertura se assemelhará a um corpo negro de área de superfície **A,** a temperatura **T,** apesar das propriedades radiantes reais da cavidade.



10.3 Corpo negro

A lei de Stefan-Boltzman apresenta a emissividade total do corpo negro e também o poder emissivo total $\mathbf{E_b}$ que é a soma da radiação emitida em todos os comprimentos de onda.

As vezes precisa-se de conhecer a emissividade espectral do corpo negro que é a quantidade de energia de radiação emitida por um corpo negro a uma temperatura absoluta **T**, por unidade de tempo, unidade de área da superfície e unidade de comprimento de onda, no comprimento de onda **λ**. Por exemplo, está-se mais interessado na quantidade de radiação que uma lâmpada incandescente emite no espectro de comprimento de onda visível, do que no total emitido.

10.3 Corpo negro

A relação entre a emissividade espectral do corpo negro e o poder emissivo total E_b foi desenvolvida por Max Planck em 1901, junto com a famosa teoria de quantum. Esta relação é conhecida como **lei de Planck** e é expressa por:

$$E_{b\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T} \right) - 1 \right]} \qquad \left[\mathrm{W/m^2} \cdot \mu m \right] \qquad \textbf{(10.4)}$$

onde:

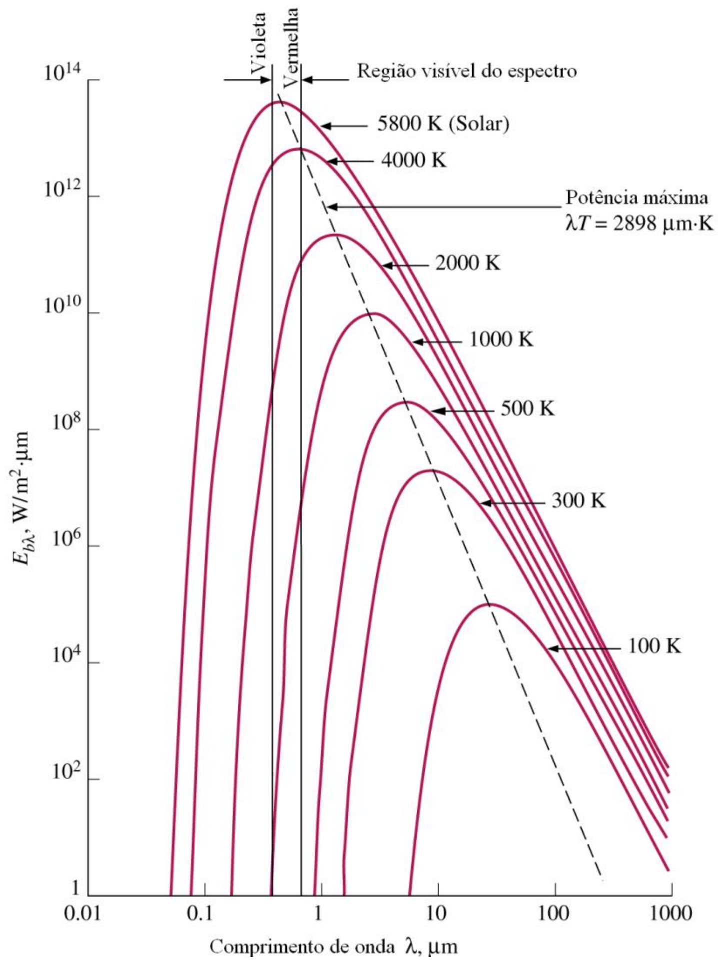
$C_1 = 3{,}74 \times 10^8\ \mathrm{W{\cdot}\mu m^4/m^2}$

$C_2 = 1{,}439 \times 10^4\ \mathrm{\mu m{\cdot}K}$

T – temperatura absoluta da superfície (em Kelvin)

λ – comprimento de onda da radiação emitida

10.3 Corpo negro



Na figura apresenta-se a variação da emissividade espectral do corpo negro, em função do comprimento de onda, para algumas temperaturas seleccionadas. Podem ser feitas várias observações desta figura:

10.3 Corpo negro

1. A radiação emitida é uma **função contínua do comprimento de onda**. A qualquer temperatura específica aumenta com o comprimento de onda e alcança um máximo e então diminui com o crescimento do comprimento de onda;
2. A qualquer comprimento de onda a **quantidade de radiação emitida aumenta com o aumento da temperatura**;
3. Com o aumento da temperatura as curvas mudam da região à esquerda para a de comprimento de onda mais curta. Por conseguinte **uma fracção maior da radiação é emitida a comprimentos de onda mais curtos** a temperaturas mais altas;
4. A **radiação emitida pelo sol**, que é considerado um corpo negro a 5780 K (ou aproximadamente a 5800 K), **alcança seu máximo na região visível do espectro**. Então o sol é afinado pelos nossos olhos. Por outro lado superfícies a $T \leq 800$ K emitem quase completamente na região infravermelha e assim não é visível ao olho nu a menos que eles reflictam de outras fontes.

10.3 Corpo negro

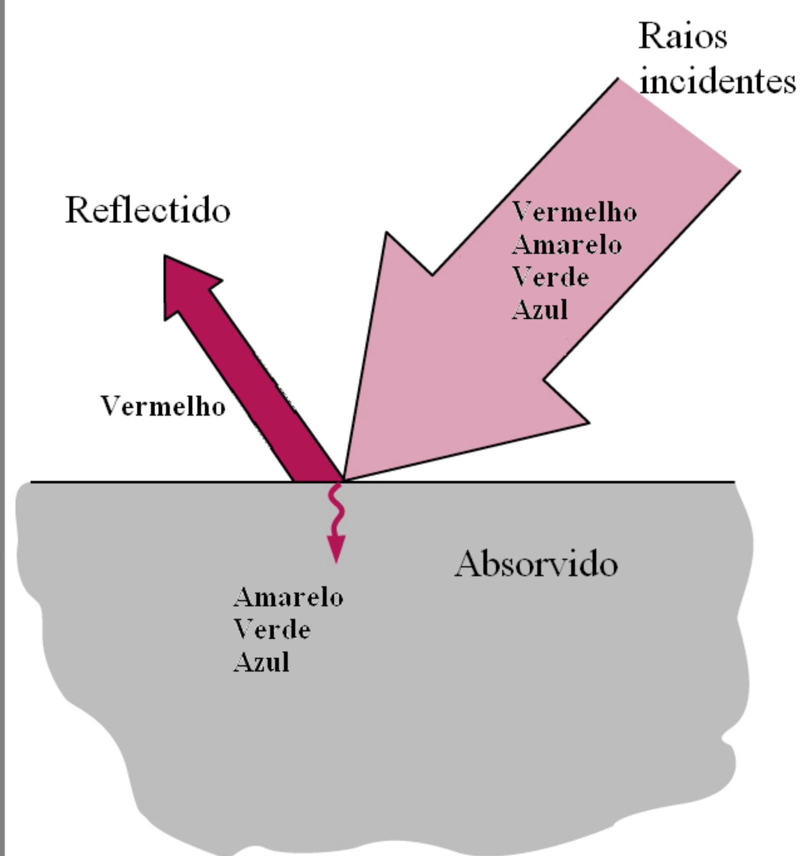
O comprimento de onda ao qual o máximo do poder emissivo total ocorre, para uma temperatura especificada, é determinado pela **lei de deslocamento de Wien** como:

$$(\lambda, T)_{\max} = 2897{,}8 \qquad \mu m \cdot K \qquad \textbf{(10.5)}$$

Esta relação foi desenvolvida originalmente por Willy Wien em 1894, usando a termodinâmica clássica, mas também pode ser obtida diferenciando a Equação 10.4 em função de **λ** mantendo **T** constante e igualando o resultado a zero.

10.3 Corpo negro

A cor de uma superfície depende das características de absorção e de reflexão da superfície e é devido à absorção selectiva e reflexão da radiação visível incidente que vem de uma fonte luminosa como o sol ou uma lâmpada incandescente. Um pedaço de roupa que contem um pigmento que reflecte vermelho enquanto absorve as partes restantes da luz incidente aparecerá "vermelho" para o olho. As folhas que aparecem "verdes" é porque as células delas contêm pigmentos de clorofila que reflectem fortemente o verde enquanto absorvem as outras cores.



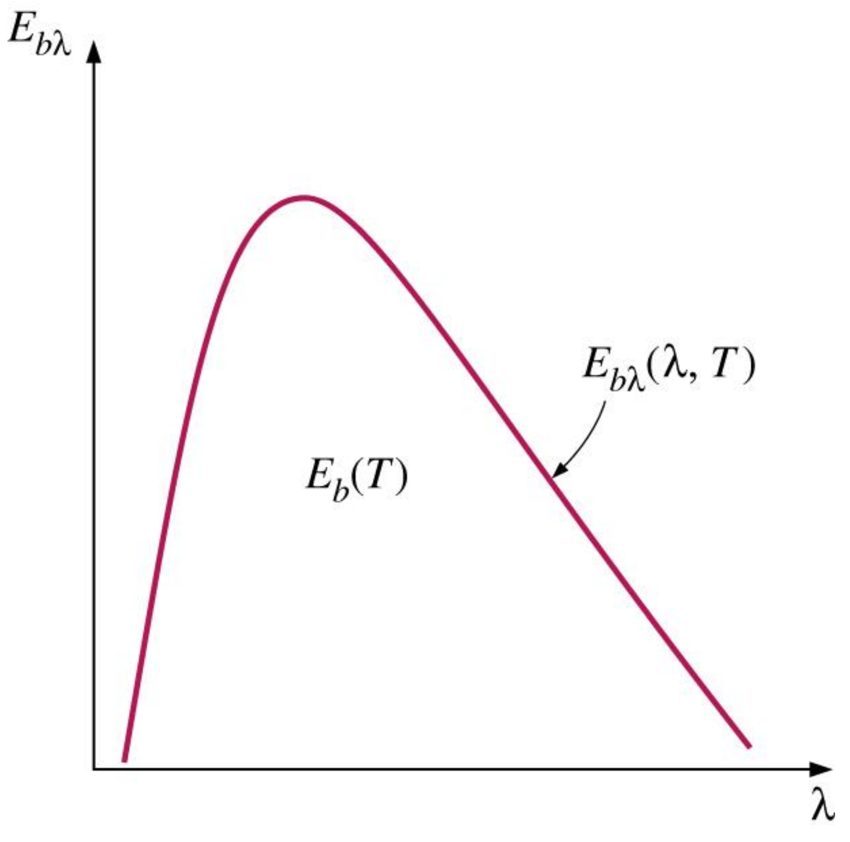
10.3 Corpo negro

A **integração do poder emissivo total** do corpo negro $E_{b\lambda}$ ao longo de todo o espectro de comprimento de onda, dá a **emissividade total do corpo negro E_b**:

$$E_b(T) = \int_0^\infty E_{b\lambda}(\lambda, T)\, d\lambda = \sigma T^4 \qquad \left(\mathrm{W/m^2}\right) \quad \textbf{(10.6)}$$

Então obtém-se a lei de Stefan-Boltzman integrando a lei de Planck em todo o comprimento de onda.

10.3 Corpo negro



Em um gráfico de emissividade total do corpo negro $E_{b\lambda}$ - λ a área por baixo de uma curva para uma determinada temperatura representa a energia de radiação total emitida por um corpo negro àquela temperatura.

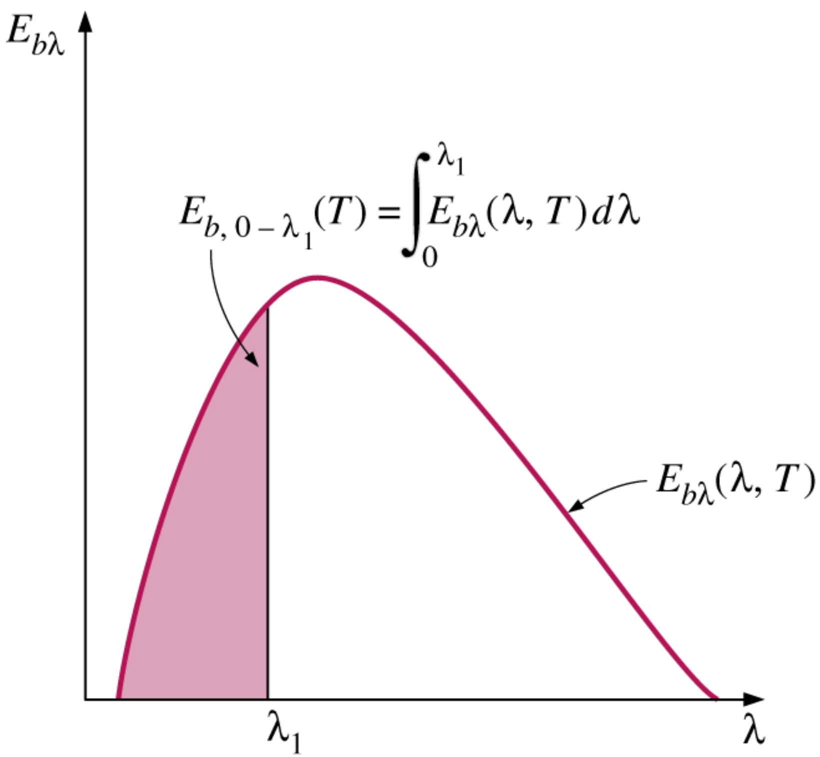
10.3 Corpo negro

A energia de radiação emitida por um corpo negro por unidade de área num comprimento de onda na banda de $\lambda = 0$ até λ é determinado de:

$$E_{b,0-\lambda}(T) = \int_0^{\lambda} E_{b\lambda}(\lambda, T)\, d\lambda \qquad \left(\mathrm{W/m^2}\right) \qquad \textbf{(10.7)}$$

Então pode-se determinar $E_{b0-\lambda}$ substituindo a relação de $E_{b\lambda}$ na Equação 10.4 e executando esta integração. Mas se mostra que esta integração não tem uma solução de forma simples e executar uma integração numérica cada vez que se precise de um valor de $E_{b0-\lambda}$ não se mostra prático.

10.3 Corpo negro



Num gráfico de $E_{b\lambda}$ - λ a área debaixo da curva à esquerda da linha $\lambda=\lambda_1$ representa a energia de radiação emitida por um corpo negro no intervalo de comprimento de onda $0 - \lambda_1$ para determinada temperatura.

Tabela 10.1 Função de radiação f_λ do corpo negro

$\lambda T \mu m \cdot K$	f_λ	$\lambda T \mu m \cdot K$	f_λ	$\lambda T \mu m \cdot K$	f_λ	$\lambda T \mu m \cdot K$	f_λ
200	0,000000	3200	0,318102	6200	0,754140	11000	0,931890
400	0,000000	3400	0,361735	6400	0,769234	11500	0,939959
600	0,000000	3600	0,403607	6600	0,783199	12000	0,945098
800	0,000016	3800	0,443382	6800	0,796129	13000	0,955139
1000	0,000321	4000	0,480877	7000	0,808109	14000	0,962898
1200	0,002134	4200	0,516014	7200	0,819217	15000	0,969981
1400	0,007790	4400	0,548796	7400	0,829527	16000	0,973814
1600	0,019718	4600	0,579280	7600	0,839102	18000	0,980860
1800	0,039341	4800	0,607559	7800	0,848005	20000	0,985602
2000	0,066728	5000	0,633747	8000	0,856288	25000	0,992215
2200	0,100888	5200	0,658970	8500	0,874608	30000	0,995340
2400	0,140256	5400	0,680360	9000	0,890029	40000	0,997967
2600	0,183120	5600	0,701046	9500	0,903085	50000	0,998953
2800	0,227897	5800	0,720158	10000	0,914199	75000	0,999713
3000	0,273232	6000	0,737818	10500	0,923710	100000	0,999905

10.3 Corpo negro

Então define-se uma **f_λ,** de grandeza dimensional, chamada **função de radiação do corpo negro** como:

$$f_\lambda(T) = \frac{\int_0^\lambda E_{b\lambda}(\lambda,T)\,d\lambda}{\sigma T^4} \qquad \textbf{(10.8)}$$

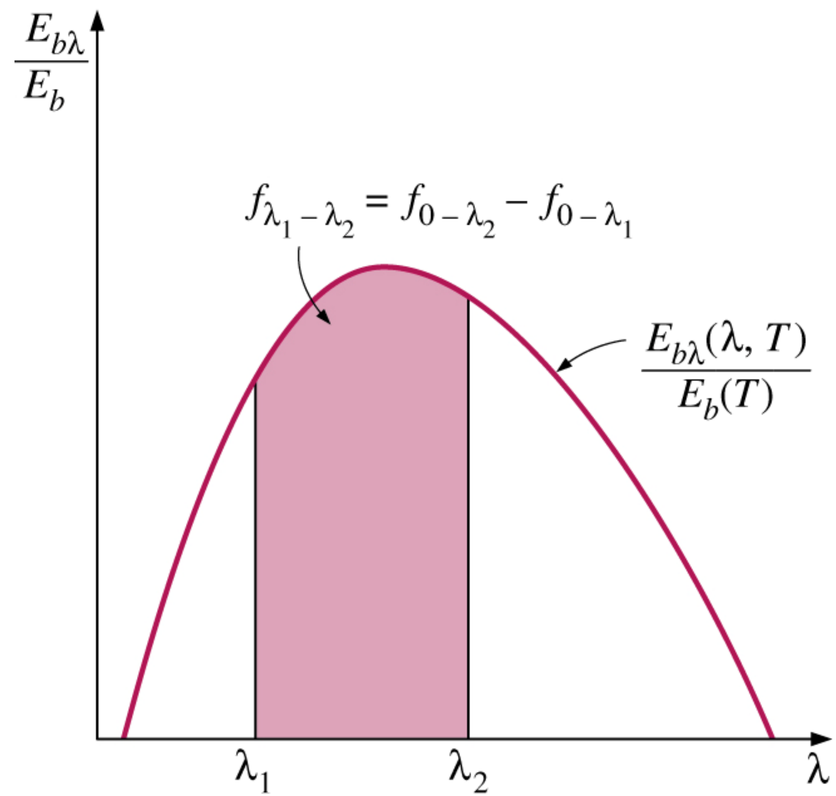
A função f_λ representa a fracção da radiação emitida por um corpo negro a temperatura T num comprimento de banda $\lambda = 0$ até λ.
A fracção da energia radiante emitida por um corpo negro a temperatura T, num comprimento de banda finito entre $\lambda = \lambda_1$ e $\lambda = \lambda_2$ é dado por:

$$f_{\lambda_1-\lambda_2} = f\lambda_2(T) - f\lambda_1(T) \qquad \textbf{(10.9)}$$

Onde $f_{\lambda 1}(T)$ e $f_{\lambda 2}(T)$ são a função de radiação do corpo negro correspondente a $\lambda_1 T$ e $\lambda_2 T$, respectivamente

10.3 Corpo negro

Representação gráfica da fracção de radiação emitida num comprimento de onda de λ_1 a λ_2

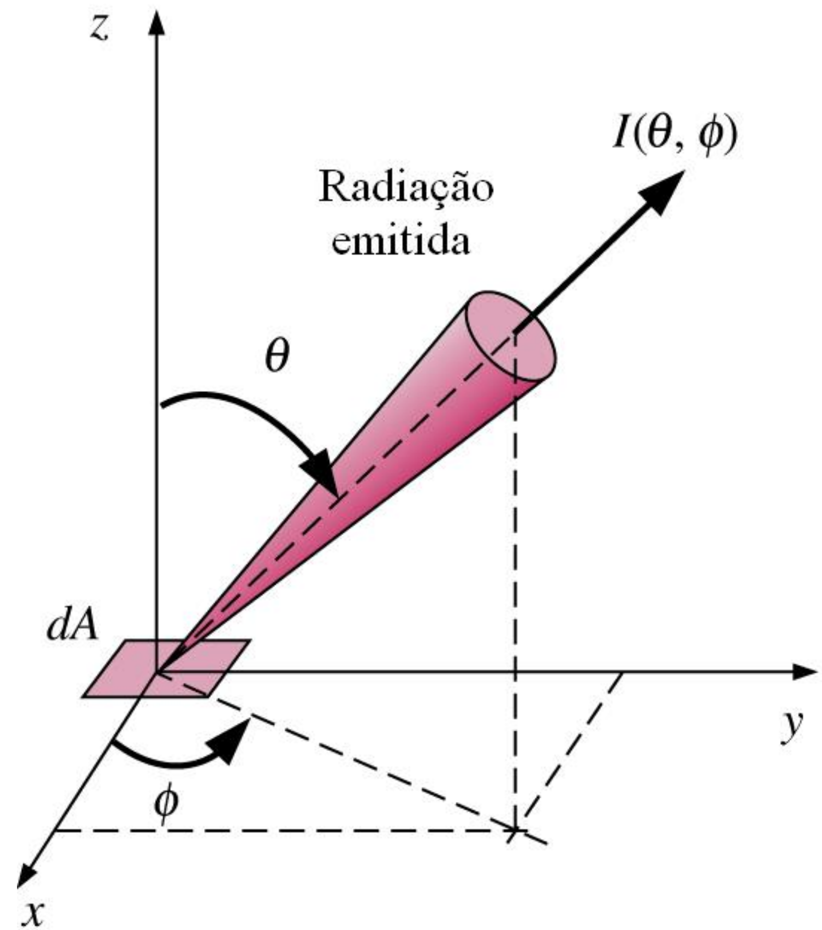


10.4 Intensidade da Radiação

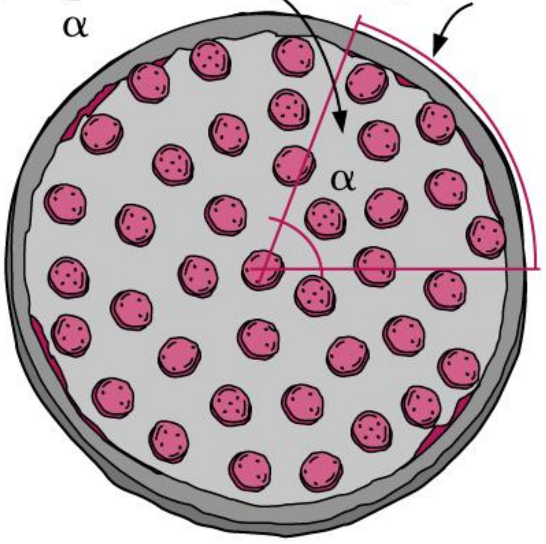
A radiação é emitida por todas as partes de uma superfície plana em todas as direcções no hemisfério sobre a superfície e a distribuição direccional da radiação normalmente emitida (ou incidente) não é uniforme. Então, torna-se necessária uma grandeza que descreva a magnitude da radiação emitida (ou incidente) numa direcção especificada no espaço. Esta grandeza é a **intensidade da radiação** denotada por **I**. Antes de se descrever uma grandeza direccional, é preciso especificar a direcção no espaço. A direcção da radiação que atravessa um ponto é descrita melhor em coordenadas esféricas, em termos do ângulo **zênite θ** e do ângulo **azimute Φ**. A intensidade de radiação é usada para descrever como a radiação emitida varia com os ângulos zênite e azimute.

10.4 Intensidade da Radiação

Se todas as superfícies emitissem radiação uniformemente em todas as direcções, o poder emissivo seria suficiente para quantificar radiação e não seria preciso lidar com intensidade. A radiação emitida por um corpo negro por unidade área normal é a mesma em todas as direcções e assim não há nenhuma dependência direccional. Mas este não é o caso para superfícies reais. Antes de definir-se a intensidade é preciso quantificar o tamanho de uma abertura em um espaço.



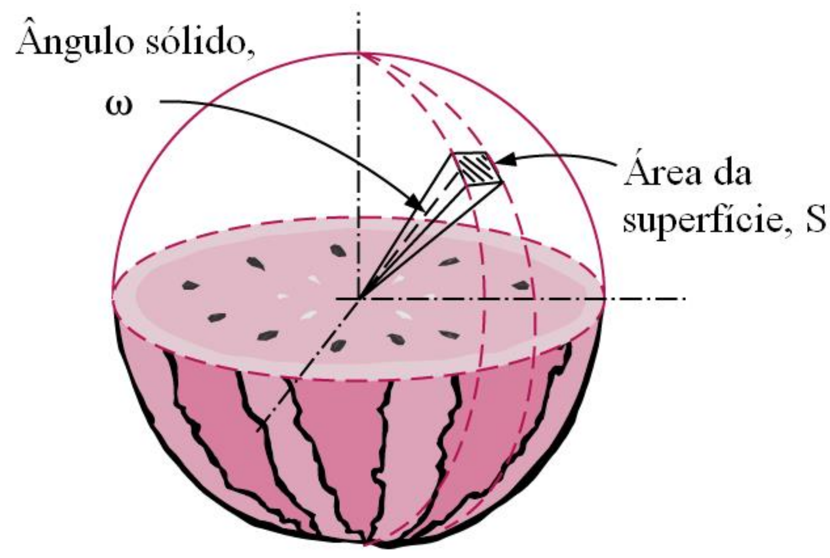
10.4.1 Ângulo Sólido



Um dos modos para definir o tamanho de uma fatia de pizza é especificar o comprimento do arco da extremidade exterior da fatia e formar a fatia conectando os pontos finais do arco ao centro. Uma aproximação mais geral é especificar o ângulo da fatia no centro, como se mostra

10.4.1 Ângulo Sólido

Considere-se agora uma melancia e tente-se quantificar o tamanho de uma fatia. Novamente pode-se fazer isto especificando a área da superfície exterior da fatia (a parte verde), ou trabalhando com ângulos para a generalidade. Conectando todos os pontos das extremidades da fatia ao centro, neste caso formarão um corpo tridimensional (como um cone cujo vértice está no centro) e assim o ângulo no centro é chamado o **ângulo sólido**.

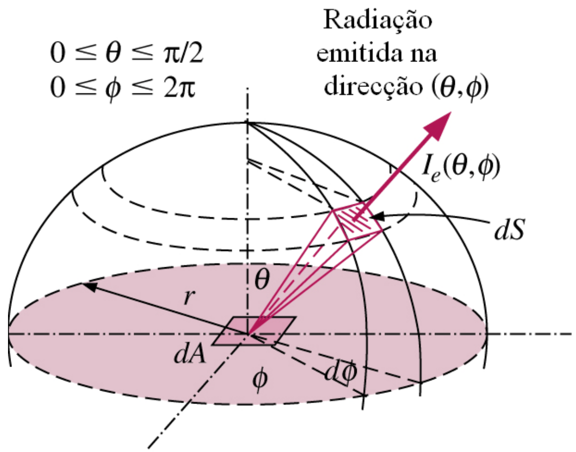


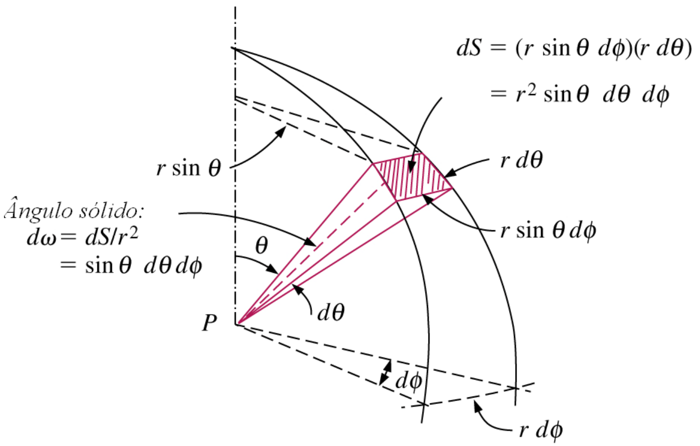
10.4.1 Ângulo Sólido

O ângulo sólido é denotado por ω. Em analogia, para aplanar o ângulo, pode-se dizer que a área de uma superfície em uma esfera de raio unitário é equivalente em magnitude ao ângulo sólido que subentende (4π para uma esfera de raio r = 1).
Isto pode ser facilmente demonstrado considerando uma área diferencial de superfície de uma esfera $dS = r^2 \text{sen}\theta d\theta$ e integrando de $\theta = 0$ até $\theta = \pi$ e de $\Phi = 0$ até $\Phi = 2\pi$

$$s = \int dS = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} r^2 \sin\theta d\theta\phi = 2\pi r^2 \int_{\theta=0}^{\pi} \sin\theta d\theta = 4\pi r \qquad \textbf{(10.10)}$$

10.4.1 Ângulo Sólido





Ângulo sólido para um hemisfério

$$\omega = \int_{Hemisfério} d\omega = \int_{0=\theta}^{\pi/2} \int_{0=\phi}^{2\pi} \sin\theta\ d\theta\ d\phi = 2\pi$$

10.4.1 Ângulo Sólido

O diferencial do ângulo sólido subentendido pela área diferencial dS numa esfera de raio r pode ser expresso por:

$$d\omega = \frac{dS}{r^2} = \sin\theta d\theta d\phi \qquad (10.11)$$

É de notar que a área **dS** é normal à direcção da vista desde que **dS** seja visto do centro da esfera. Em geral, o diferencial **dω** do ângulo sólido subentendido por um diferencial superfície área **dA** quando visto de um ponto há uma distância r de **dA** é expresso como:

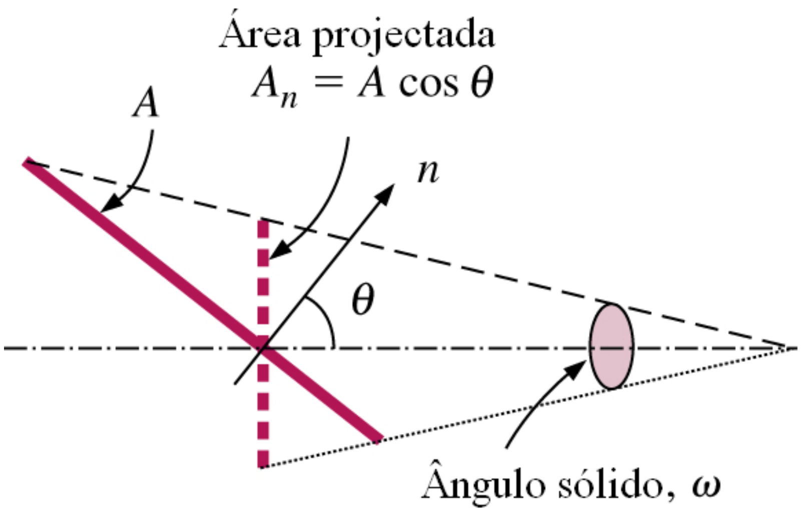
$$d\omega = \frac{dA_n}{r^2} = \frac{dA\cos\alpha}{r^2} \qquad (10.12)$$

Onde α é o ângulo entre a normal a superfície e a direcção da vista e $\mathbf{dA_n = dAcos\ \alpha}$ é a área normal ou projectada à direcção da vista.

10.4.2 Intensidade da Radiação Emitida

Considere-se a emissão da radiação por um elemento de área diferencial **dA** de uma superfície. A radiação é emitida em todas as direcções no hemisfério, e a radiação que emite a área de superfície **dS** é proporcional à do ângulo sólido **dω** subentendido por **dS**. Também é proporcional a área radiante dA vista por um observador em **dS** que varia de um máximo **dA** quando dS está no topo directamente sobre dA ($\theta = 0°$) até um um mínimo zero quando **dS** está no fundo ($\theta = 90°$). Então, a área efectiva de **dA** para a emissão na direcção da projecção de **dA** numa normal ao plano é **dA cos dA**. A intensidade da radiação numa determinada direcção é baseada numa área unitária normal aquela direcção que provê uma base comum para a comparação da radiação emitida em diferentes direcções.

10.4.2 Intensidade da Radiação Emitida



A intensidade da radiação é baseada na área projectada e daí o cálculo da emissão de radiação de uma superfície envolver a projecção dessa superfície.

10.4.2 Intensidade da Radiação Emitida

A intensidade de radiação para uma radiação emitida $I_e(\theta,\Phi)$ é definida como a taxa a qual a energia de radiação dQ_e é emitida na direcção (θ,Φ) por unidade de área normal a esta direcção e pela unidade de ângulo sólido nesta direcção que é dada por:

$$I_e(\theta,\phi) = \frac{dQ_e}{dA\cos\theta \cdot d\omega} = \frac{dQ_e}{dA\cos\theta\sin\theta d\theta d\phi} \quad (\mathrm{W}/m^2 \cdot sr) \qquad \textbf{(10.13)}$$

O fluxo radiante para uma radiação emitida é o **poder emissivo E** que é a taxa a qual a energia da radiação é emitida por unidade de área da superfície emissora que pode ser expressa na forma diferencial do seguinte modo:

$$dE = \frac{dQ_e}{dA} = I_e(\theta,\phi)\cos\theta\sin\theta d\theta d\phi \qquad \textbf{(10.14)}$$

10.4.2 Intensidade da Radiação Emitida

É de notar que o hemisfério sobre a superfície intercepta todos os raios de radiação emitidos pela superfície, o poder emissivo da superfície para o hemisfério na vizinhança pode ser determinado por integração:

$$E = \int_{hemisfério} dE = \int_{\phi=0}^{2\pi}\int_{\theta=0}^{\pi/2} I_e(\theta,\phi)\cos\theta\sin\theta d\theta d\phi \quad (\mathrm{W/m^2}) \qquad \textbf{(10.15)}$$

A intensidade da radiação emitida pela superfície, varia em função da direcção, mas muitas superfícies na prática podem ser aproximadas a superfícies difusas. A quantidade da radiação emitida independe da direcção e daí I_e é constante

Superfície difusa emissora

$$E = \pi I_e \quad (W/m^2) \qquad \textbf{(10.16)}$$

10.4.2 Intensidade da Radiação Emitida

Para um corpo negro que é uma superfície emissora difusa pode-se escrever:

Corpo negro

$$E_b = \pi I_b \quad (W/m^2) \qquad \textbf{(10.17)}$$

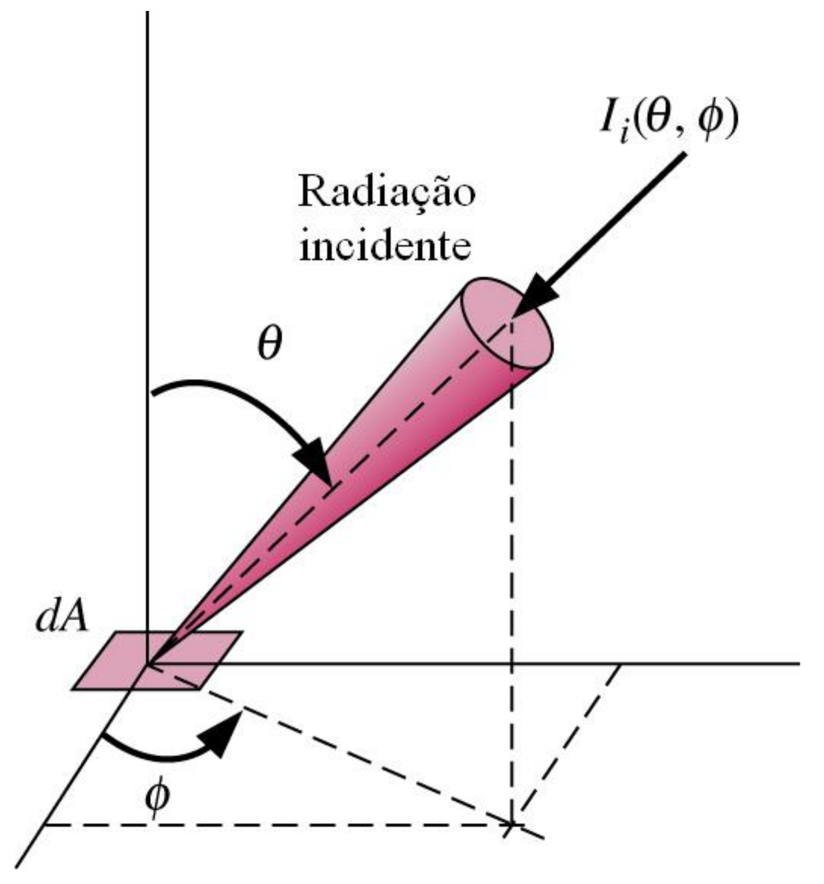
Onde $E_b = \sigma\, T^4$ é o poder emissivo do corpo negro. Daí a intensidade da radiação emitida por um corpo negro a temperatura absoluta T é:

Corpo negro

$$I_b(T) = \frac{E_b(T)}{\pi} = \frac{\sigma T^4}{\pi} \quad (W/m^2 \cdot sr) \qquad \textbf{(10.18)}$$

10.4.3 Radiação Incidente

Todas as superfícies emitem mas também recebem radiação emitida ou reflectida de outras superfícies. A intensidade de radiação incidente I_i (θ,Φ) é definida como a taxa à qual dG de energia de radiação é incidente na direcção (θ,Φ) por unidade de área da superfície receptora, normal a esta direcção e por unidade do ângulo sólido nesta direcção. θ é o ângulo entre a direcção de radiação incidente e a normal à superfície.



10.4.3 Radiação Incidente

O fluxo de radiação incidente de em uma superfície em todas as direcções é chamado **irradiação G**, e é expresso como

$$G = \int_{hemisférico} dG = \int_{\phi=0}^{2\pi}\int_{\theta=0}^{\pi/2} I_i(\theta,\phi)\cos\theta\sin\theta d\theta d\phi \quad (W/m^2) \qquad \textbf{(10.19)}$$

Dai a radiação representa a taxa a qual a energia da radiação é incidente na superfície por unidade de área dessa superfície. Quando a radiação incidente é difusa e dai I_i = constante, a equação reduz-se a:

Emissão incidente difusa

$$G = \pi I_i \quad (W/m^2) \qquad \textbf{(10.20)}$$

É preciso notar que a radiação baseia-se na área da superfície real onde a intensidade da radiação incidente é baseada na área de projecto.

10.4.4 Radiosidade

As superfícies não só emitem radiação como também a reflectem, assim a radiação que deixa uma superfície consiste dos componentes emitidos e reflectidos. O cálculo de transferência de calor por radiação entre superfícies envolve a energia de radiação total que flui de uma superfície, sem ter em consideração a sua origem. Assim, é preciso definir uma grandeza que representa a taxa à qual energia de radiação deixa uma área unitária de uma superfície em todas as direcções. Esta grandeza é chamada o **Radiosidade J**, e é expressa por:

$$J = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} I_{e+r}(\theta,\phi) \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi \quad (W/m^2) \qquad \textbf{(10.21)}$$

10.4.4 Radiosidade

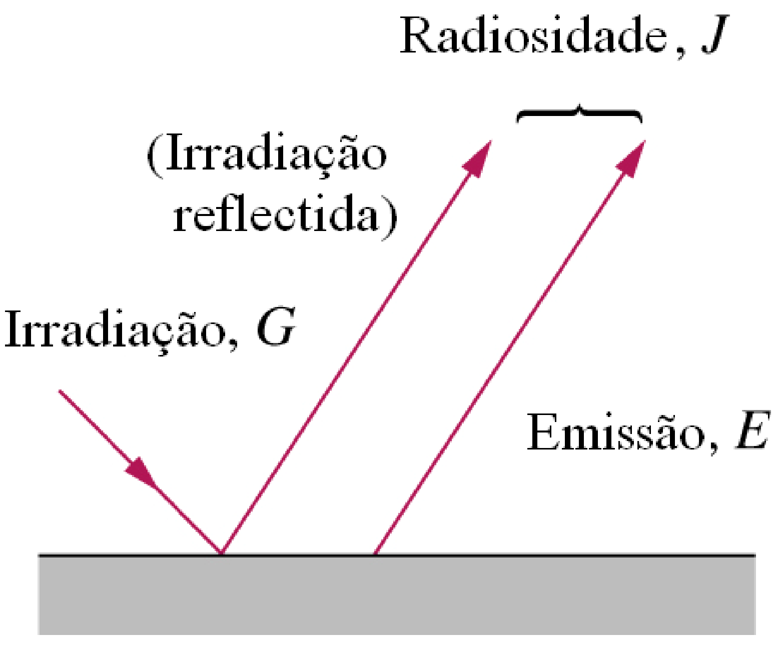
onde I_{e+r} é a soma das intensidades emitidas e reflectidas. Para uma superfície que é um emissor difuso e um reflector difuso, I_{e+r} é constante e a relação de radiosidade reduz-se a:

Emissor e reflector difuso

$$J = \pi I_{e+r} \quad (W/m^2) \qquad \textbf{(10.22)}$$

Para um corpo negro a radiosidade J é equivalente ao poder emissivo E_b, pois um corpo negro absorve a totalidade da radiação incidente e não há nenhum componente reflectido em radiosidade.

10.4.4 Radiosidade



Os três tipos de fluxo de radiação (em W/m^2) poder emissivo, irradiação e radiosidade.

10.4.5 Grandezas espectrais

Foram consideradas grandezas de radiação totais (grandezas que existem em todos os comprimentos de onda), e não se fez nenhuma referência a dependência com o comprimento de onda. Esta aproximação é adequada para muitos problemas de radiação encontrados na prática. Mas as vezes é necessário considerar não só a variação da radiação com o comprimento de onda, como também com a direcção e expressar as grandezas num certo comprimento de onda λ ou por unidade de intervalo de comprimento de onda λ. Tais grandezas são chamadas **grandezas espectrais** por tomarem em conta a dependência do comprimento de onda. O termo "espectral" é usado para se referir "a um determinado comprimento de onda."

10.4.5 Grandezas espectrais

A intensidade de radiação espectral $I_\lambda(\lambda,\theta,\Phi)$, por exemplo, é simplesmente a intensidade de radiação total $I(\theta,\Phi)$, por unidade de intervalo de comprimento de onda λ. A intensidade espectral para a radiação emitida $I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\Phi)$, pode ser definida como a taxa a qual a energia de radiação dQ é emitida ao longo do comprimento de onda λ, na direcção (θ,Φ), por unidade de área normal a esta direcção e por unidade de ângulo sólido sobre esta mesma direcção. Ela pode ser expressa como:

$$I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\phi)=\frac{d\dot{Q}_e}{dA\cos\theta\cdot d\omega\cdot d\lambda}\quad (\mathrm{W}/m^2\cdot sr\cdot \mu m)\quad \textbf{(10.23)}$$

10.4.5 Grandezas espectrais

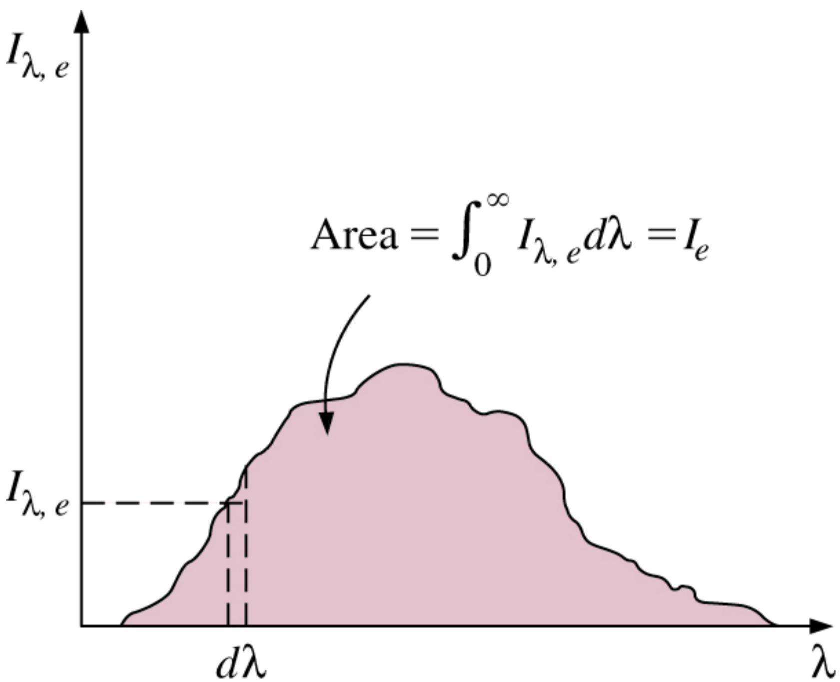
Dai o poder emissivo espectral torna-se:

$$E_\lambda = \int_{\phi=0}^{2\pi}\int_{\theta=0}^{\pi/2} I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\phi)\cos\theta\sin\theta d\theta d\phi \quad (W/m^2) \qquad \textbf{(10.24)}$$

quando a variação da intensidade da radiação espectral com o comprimento de onda é conhecida. A intensidade total da radiação I, emitida, incidente e radiação emitida + reflectida, podem ser determinadas por integração ao longo de todo o espectro de comprimento de onda por:

$$I_e = \int_0^\infty I_{\lambda,e} d\lambda, \quad I_i = \int_0^\infty I_{\lambda,i} d\lambda, \quad \text{e} \quad J = \int_0^\infty J_\lambda d\lambda \qquad \textbf{(10.25)}$$

10.4.5 Grandezas espectrais



Quando a variação da Intensidade espectral I_λ em relação ao comprimento do ângulo λ é conhecida, a intensidade total da radiação I, emitida, incidente e radiação emitida mais a reflectida, podem ser determinadas por integração ao longo de todo o espectro de comprimento de onda.

10.4.5 Grandezas espectrais

Similarmente, quando as variações dos fluxos de radiação espectrais E_λ, G_λ, e J_λ com o comprimento de onda são conhecidas, os fluxos de radiação totais podem ser determinados por integração ao longo de todo o espectro de comprimento de onda como:

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda, \quad G = \int_0^\infty G_\lambda d\lambda \quad \text{e} \quad J = \int_0^\infty J_\lambda d\lambda \qquad \textbf{(10.26)}$$

Quando as superfícies e a radiação incidente são difusas, os fluxos de radiação espectral são relacionados com a intensidade espectral por:

$$E_\lambda = \pi I_{\lambda,e}, \quad G_\lambda = \pi I_{\lambda,i}, \quad \text{e} \quad J_\lambda = \pi I_{\lambda,e+r} \qquad \textbf{(10.27)}$$

10.4.5 Grandezas espectrais

É de notar que as relações para as grandezas de radiação espectrais e totais têm a mesma forma.
A intensidade espectral de radiação emitida por um corpo negro a uma temperatura absoluta T e um comprimento de onda, foi determinado por Max Planck como:

$$I_{b\lambda}(\lambda,T) = \frac{2\lambda c_0^2}{\lambda^5[\exp(hc_0/\lambda kT)-1]} \quad (W/\mathrm{m}^2 \cdot sr \cdot \mu m) \qquad \textbf{(10.28)}$$

onde h= $6{,}6256\mathrm{x}10^{-34}$ J·s é a constante de Planck, k = $1{,}38065\ \mathrm{x}10^{-23}$, J/K é a constante de Boltzmann, e $c_o = 2{,}9979\mathrm{x}10^8$ m/s é a velocidade da luz no vácuo. Então o poder emissivo espectral de um corpo negro é:

$$E_{b\lambda}(\lambda,T) = \pi I_{b\lambda}(\lambda,T) \qquad \textbf{(10.29)}$$

10.5 Propriedades Radioactivas

A maioria dos materiais, tais como metais, madeira e tijolos, são opacos à radiação térmica e para eles é considerado que radiação é um fenómeno de superfície. Quer dizer, a radiação térmica é emitida ou é absorvida nos primeiros mícron da superfície, sendo assim, deve tratar-se das propriedades radiantes das superfícies quando se trata de materiais opacos.

Alguns outros materiais, como vidro e água, permitem que a radiação visível penetre até profundidades consideráveis, antes que tenha lugar alguma absorção significante.

Definiu-se um corpo negro como um perfeito emissor e absorvedor de radiação e disse-se que nenhum corpo pode emitir mais radiação que um corpo negro à mesma temperatura. Então, um corpo negro pode servir como referência conveniente na descrição da emissividade e da absorvidade reais das superfícies.

10.5.1 Emissividade

A emissividade de uma superfície representa a relação entre a radiação emitida por uma superfície a uma determinada temperatura e a emitida por um corpo negro à mesma temperatura. A emissividade de uma superfície é representada por ε, e varia entre zero e um, $0 \leq \varepsilon \leq 1$. A emissividade é uma medida de como uma superfície se aproxima a um corpo negro para qual $\varepsilon=1$.

A emissividade de uma superfície real não é uma constante, varia bastante com a temperatura da superfície, como também com o comprimento de onda e direção da radiação emitida. Então, podem ser definidas emissividades diferentes para uma mesma superfície, dependendo dos efeitos considerados.

10.5.1 Emissividade

A emissividade mais elementar de uma superfície a uma determinada temperatura é a emissividade direcional espectral que é definida como a relação entre a intensidade de radiação emitida pela superfície a um comprimento de onda especificado numa direção especificada e a emitida por um corpo negro à mesma temperatura e no mesmo comprimento de onda. Isto é:

$$\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi,T)=\frac{I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\phi,T)}{I_{b\lambda}(\lambda,T)} \qquad \textbf{(10.30)}$$

10.5.1 Emissividade

onde os subscritos são usados para designar as grandezas espectral e direccional, respectivamente. É de notar que a intensidade de radiação de um corpo negro é independente da direcção, e assim não é usada nenhuma dependência funcional entre θ e Φ. A emissividade direccional total é definida de igual modo usando as intensidades totais (intensidades que integraram todo o comprimento de onda) como:

$$\varepsilon_\theta(\theta,\phi,T)=\frac{I_e(\theta,\phi,T)}{I_b(T)} \qquad \textbf{(10.31)}$$

10.5.1 Emissividade

Na prática, é normalmente mais conveniente trabalhar com propriedades de radiação médias ao longo de todas as direcções, chamadas propriedades hemisféricas. É de notar que a taxa integral de energia de radiação emitida num comprimento de onda especificado, por unidade de área de superfície ao longo de todo o hemisfério é o **poder emissivo espectral** e ele pode ser expresso como:

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda,T) = \frac{E_{\lambda}(\lambda,T)}{E_{b\lambda}(\lambda,T)} \qquad \textbf{(10.32)}$$

É de assinalar que a emissividade de uma superfície a um determinado comprimento de onda pode ser diferente a diferentes temperaturas, com a distribuição espectral de radiação emitida, assim a quantidade de radiação emitida a um determinado comprimento de onda varia com a temperatura.

10.5.1 Emissividade

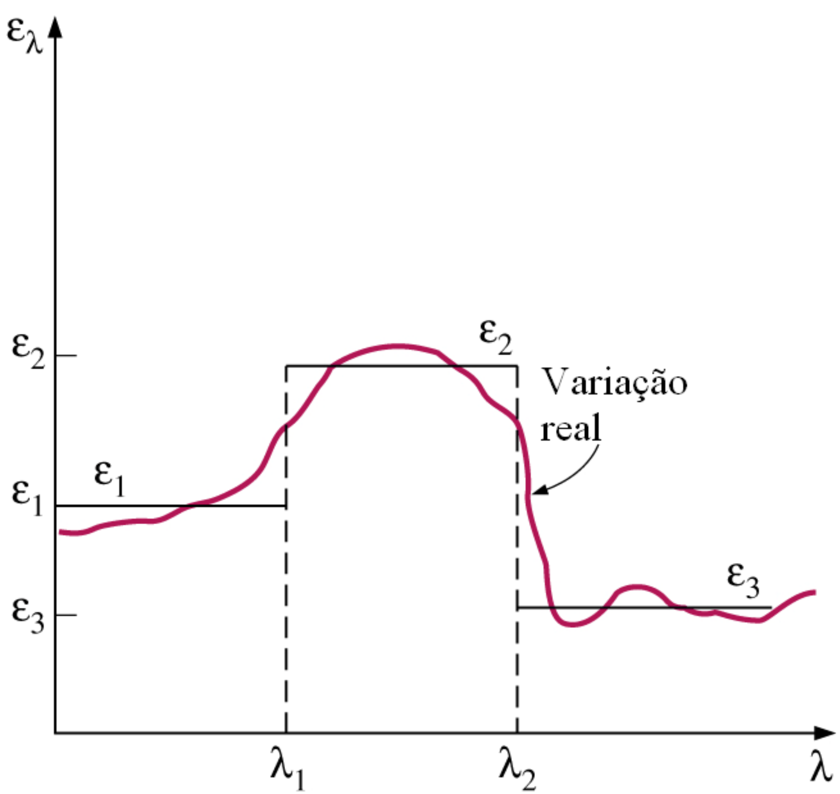
A emissividade hemisférica total (ou simplesmente a "emissividade comum") de uma superfície a uma determinada temperatura representa a relação entre a energia de radiação total emitida pela superfície e a radiação emitida por um corpo negro com a mesma área de superfície e à mesma temperatura. A emissividade hemisférica total pode ser expressa por:

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} \qquad \textbf{(10.33)}$$

Como exemplo, considere-se a função de emissividade representada na figura . Como se vê esta função pode ser aproximada razoavelmente bem por uma função discreta da forma:

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} = \frac{\int_0^\infty \varepsilon\lambda(\lambda,T)E_{b\lambda}(\lambda,T)d\lambda}{\sigma T^4} \qquad \textbf{(10.34)}$$

10.5.1 Emissividade



Da figura pode-se constatar que a função pode ser razoavelmente aproximada por uma função discreta da seguinte forma:

$$\varepsilon_\lambda = \begin{cases} \varepsilon_1 = \text{constante}, & 0 \leq \lambda < \lambda_1 \\ \varepsilon_2 = \text{constante}, & \lambda_1 \leq \lambda < \lambda_2 \\ \varepsilon_3 = \text{constante}, & \lambda_2 \leq \lambda < \lambda_\infty \end{cases} \quad \textbf{(10.35)}$$

10.5.1 Emissividade

Então a emissividade média pode ser determinada da Equação 10.35 dividindo a integral em três partes e utilizando a definição da radiação do corpo negro como:

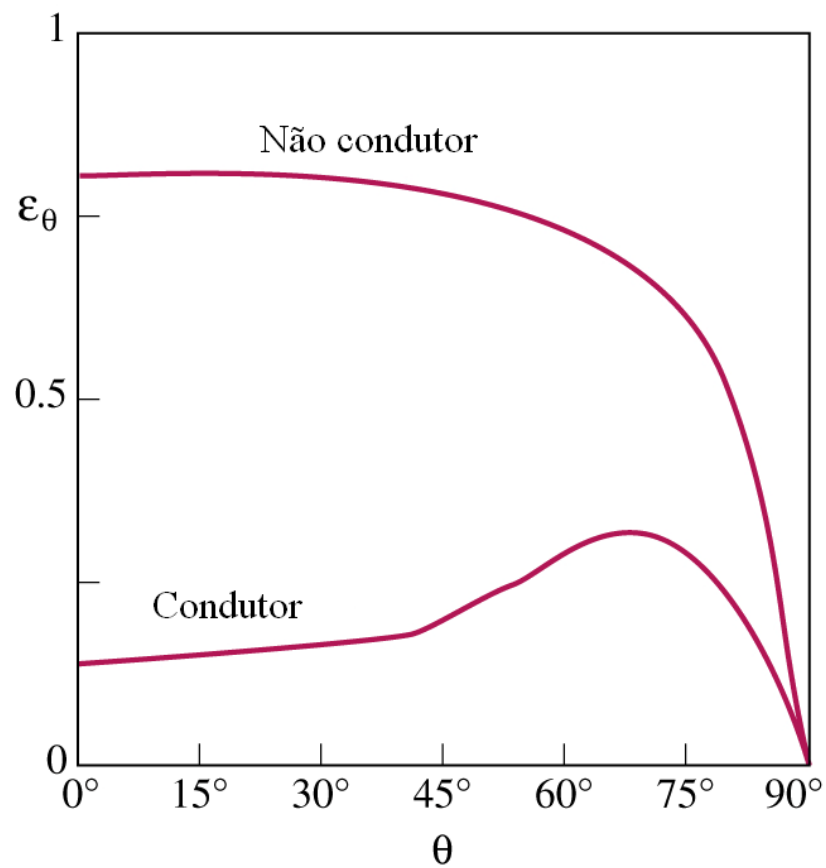
$$\varepsilon(T) = \frac{\varepsilon_1 \int_0^{\lambda_1} E_{b\lambda} d\lambda}{E_b} + \frac{\varepsilon_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{b\lambda} d\lambda}{E_b} + \frac{\varepsilon_3 \int_{\lambda 2}^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda}{E_b} \qquad \textbf{(10.36)}$$

$$= \varepsilon_1 f_{0-\lambda_1}(T) + \varepsilon_2 f_{\lambda_1-\lambda_2}(T) + \varepsilon_3 f_{\lambda_2-\infty}(T)$$

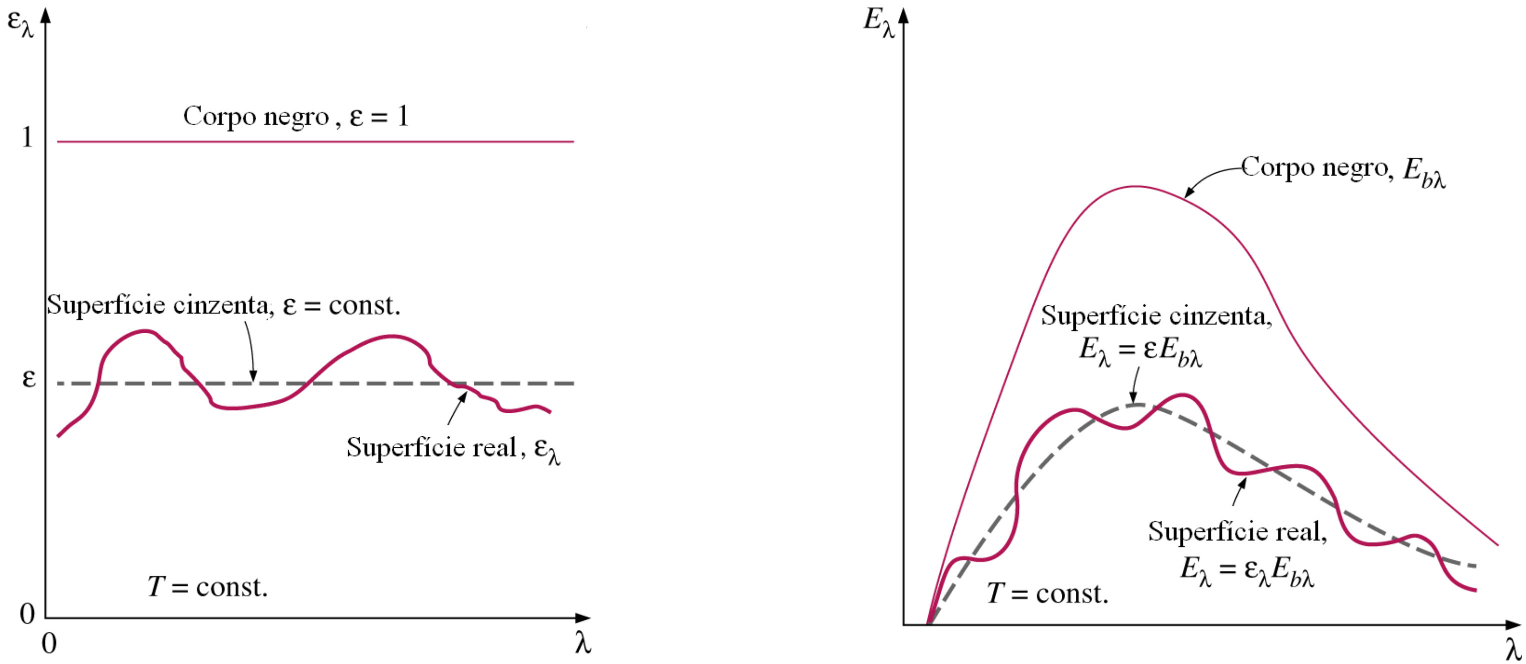
A radiação é um fenómeno complexo, a consideração do comprimento de onda e dependência da direcção das propriedades, assumindo dados suficientes existentes, faz com que ela seja muito mais complicada.

10.5.1 Emissividade

Embora as superfícies reais não emitam radiação de uma maneira perfeitamente difusa como um corpo negro faz, elas são geralmente ligadas. A variação da emissividade em função da direcção para condutores e não condutores eléctricos apresentam-se na figura.

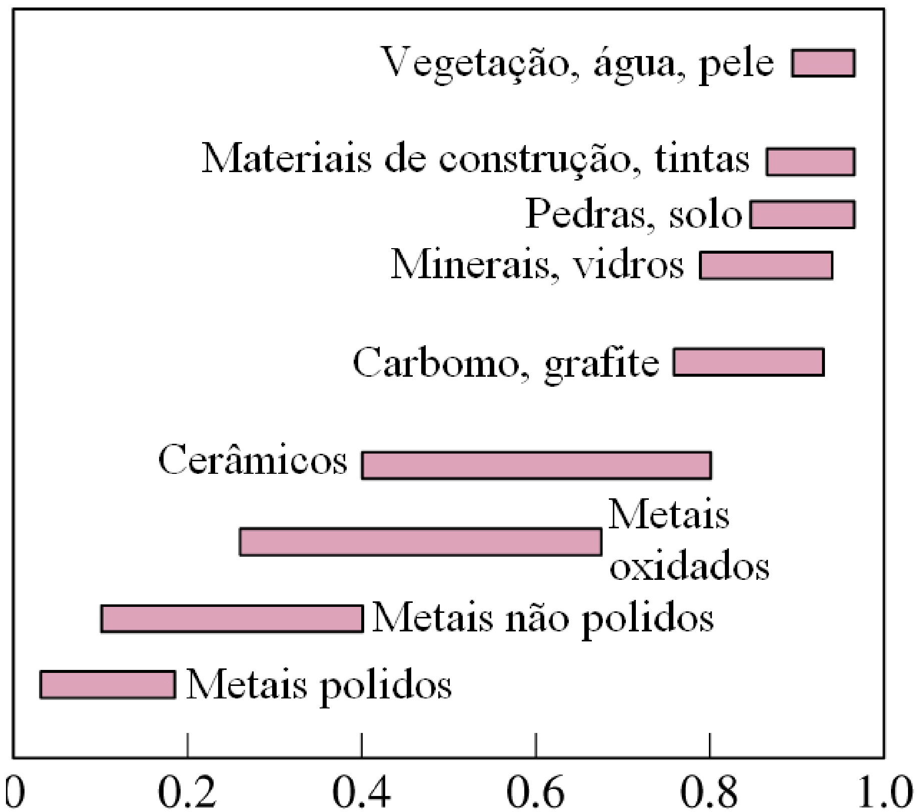


10.5.1 Emissividade



Comparação entre a emissividade (a) e o poder emissivo (b) de uma superfície real e de um corpo negro à mesma temperatura

10.5.1 Emissividade



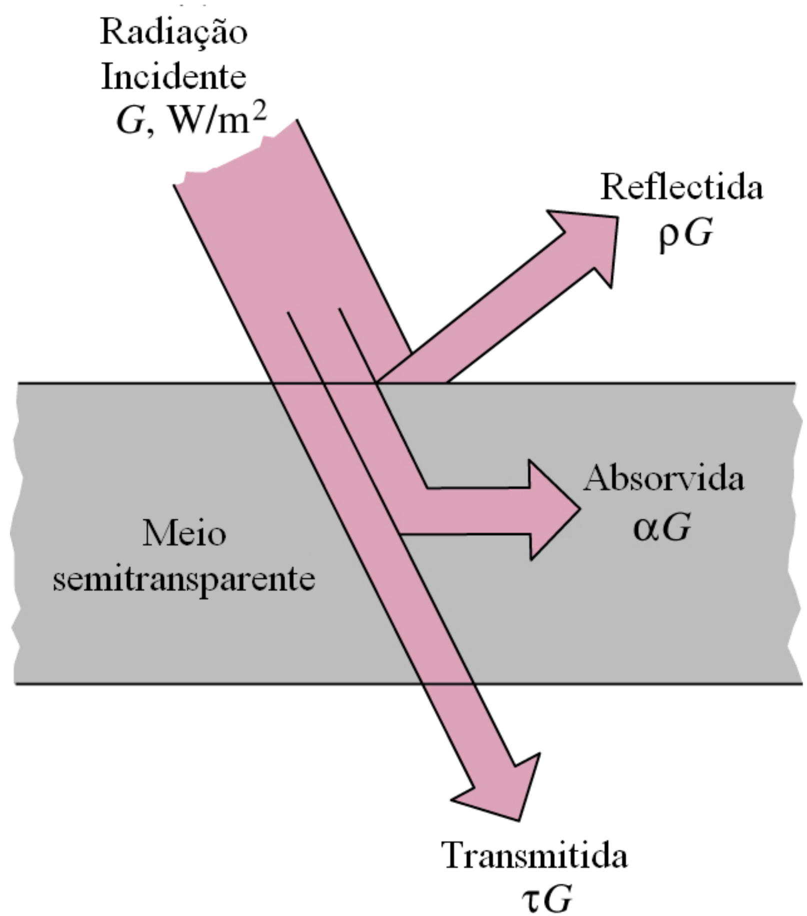
- Intervalo de emissividade para vários materiais

10. 5.2 Absortividade, Reflectividade e Transmissividade

Tudo ao nosso redor emite constantemente radiação e a emissividade representa as características de emissão desses corpos. Isto significa que todo o corpo, incluindo o nosso próprio, é constantemente bombardeado por radiação que vem de todas as direcções ao longo de uma gama de comprimentos de onda. Relembrando, um fluxo de radiação incidente numa superfície é chamado **irradiação** e é denotado por **G**.

10. 5.2 Absortividade, Reflectividade e Transmissividade

Quando a radiação atinge uma superfície, parte dela é absorvida, parte é reflectida e a parte restante, se restar, é transmitida, como o ilustrado na figura



10. 5.2 Absortividade, Reflectividade e Transmissividade

A fracção de irradiação absorvida pela superfície é chamada absorvidade, a fracção reflectida pela superfície é chamada reflectividade, e a fracção transmitida é chamada o transmissividade. Quer dizer:

$$\text{Absorvidade:} \quad \alpha = \frac{\text{Radiação absorvida}}{\text{Radiação incidente}} = \frac{G_{abs}}{G} \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \qquad \textbf{(10.37)}$$

$$\text{Reflectividade:} \quad \rho = \frac{\text{Radiação reflectida}}{\text{Radiação incidente}} = \frac{G_{ref}}{G}, \quad 0 \leq \rho \leq 1 \qquad \textbf{(10.38)}$$

$$\text{Transmissividade} \quad \tau = \frac{\text{Radiação transmitida}}{\text{Radiação incidente}} = \frac{G_{tr}}{G}, \quad 0 \leq \tau \leq 1 \qquad \textbf{(10.39)}$$

onde G é a energia de radiação incidente na superfície, e G_{abs}, G_{ref}, e G_{tr} são as fracções absorvidas, reflectidas, e transmitidas respectivamente. A primeira lei da termodinâmica requer que a soma da energia de radiação absorvida, reflectida e transmitida seja igual à radiação incidente. Quer dizer:

10.5.2 Absortividade, Reflectividade e Transmissividade

$$G_{abs} + G_{ref} + G_{tr} = G \qquad \textbf{(10.40)}$$

Dividindo todos os termos por G obtém-se:

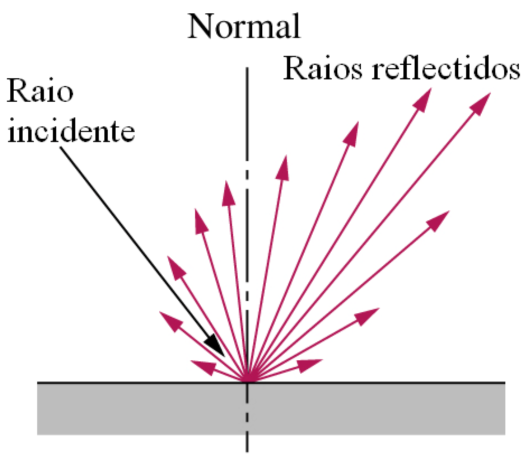
$$\alpha + \rho + \tau = 1 \qquad \textbf{(10.41)}$$

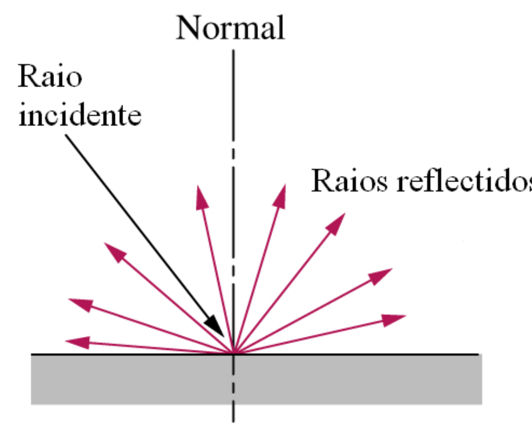
Para superfícies opacas $\tau = 0$, então:

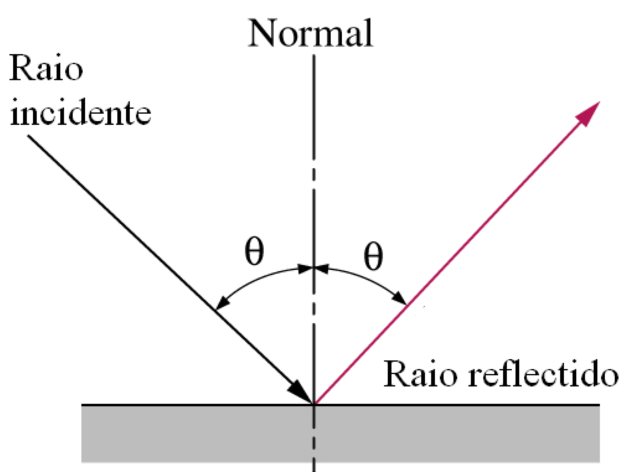
$$\alpha + \rho = 1 \qquad \textbf{(10.42)}$$

Esta é uma relação de propriedade importante, já que permite determinar tanto a absorvidade como a reflectividade de uma superfície opaca, conhecendo qualquer uma destas propriedades.

10.5.2 Absortividade, Reflectividade e Transmissividade







Diferentes tipos de reflexão de uma superfície (a) real ou irregular, (b) difusa (c) especular ou de espelho.

10.5.2 Absortividade, Reflectividade e Transmissividade

A absorvidade direccional espectral e reflectividade direccional espectral de uma superfície são definidas respectivamente, como as fracções absorvidas e reflectidas da intensidade incidente de radiação a um comprimento de onda especificado em uma direcção especificada como:

$$\alpha_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi)=\frac{I_{\lambda,abs}(\lambda,\theta,\phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi)}= \quad \text{e} \quad \rho_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi)=\frac{I_{\lambda,ref}(\lambda,\theta,\phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi)} \qquad \textbf{(10.43)}$$

Igualmente, a absorvidade hemisférica espectral e a reflectividade hemisférica espectral de uma superfície são definidos como:

$$\alpha_{\lambda}(\lambda)=\frac{G_{\lambda,abs}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)} \quad \text{e} \quad \rho_{\lambda}(\lambda)=\frac{G_{\lambda,ref}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)} \qquad \textbf{(10.44)}$$

10.5.2 Absortividade, Reflectividade e Transmissividade

onde G é a irradiação espectral (em W/m^2 ·μm) incidente na superfície, e G_{abs} e G_{ref} são as fracções reflectidas e absorvidas dela, respectivamente. Podem ser definidas grandezas semelhantes para a transmissividade de materiais semitransparentes. Por exemplo, a transmissividade hemisferical espectral de um meio pode ser expressa como:

$$\tau_\lambda(\lambda) = \frac{G_{\lambda,tr}(\lambda)}{G_\lambda(\lambda)} \qquad \textbf{(10.45)}$$

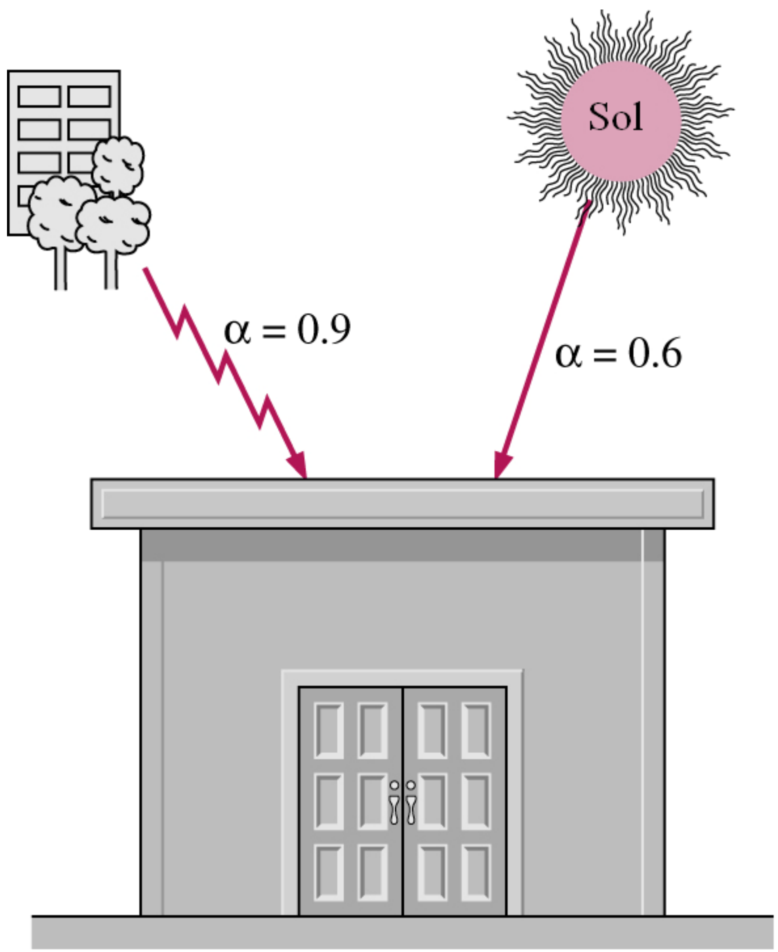
A absorvidade, reflectivdade, e transmissividade médias de uma superfície também podem ser definidas em termos das suas contrapartes espectrais como:

$$\alpha = \frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda G_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty G_\lambda d\lambda}, \quad \rho = \frac{\int_0^\infty \rho_\lambda G_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty G_\lambda d\lambda}, \quad \tau = \frac{\int_0^\infty \tau_\lambda G_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty G_\lambda d\lambda} \qquad \textbf{(10.46)}$$

10.5.2 Absortividade, Reflectividade e Transmissividade

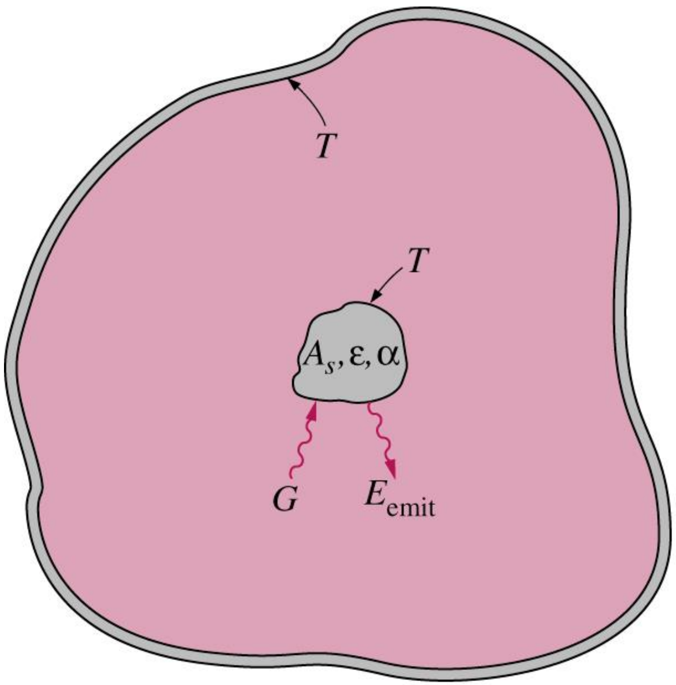
A reflectividade difere um pouco das outras propriedades ela é por natureza bidirecional. Quer dizer, o valor da reflectividade de uma superfície não depende só da direcção da radiação incidente mas também a direcção da reflexão.

10. 5.2 Absortividade, Reflectividade e Transmissividade



A absorvidade de um material pode ser um pouco diferente para a radiação originada por fontes há diferentes temperaturas. Por exemplo, a absorvidade de um tecto de cimento armado é de cerca de 0,6 para a radiação solar (temperatura da fonte: 5780 K) e 0,9 para a radiação originada pelas arvores e casas vizinhas (temperatura da fonte: 300 K).

10.5.3 Lei de Kirchhoff



Considere-se um corpo pequeno de área de superfície As, emissividade ε, e absorvidade α, a temperatura T, contido numa grande cavidade isotérmica à mesma temperatura, como mostrado na figura. Recordando que uma grande cavidade isotérmica apresenta-se como um corpo negro e acredita-se que as propriedades de radiação da cavidade e do corpo no interior da mesma sejam muito pequenas para interferir com a natureza da cavidade de corpo negro.

10.5.3 Lei de Kirchhoff

A radiação incidente em qualquer parte da superfície do corpo pequeno é igual à radiação emitida por um corpo negro a temperatura T. Que é, $G=E_b(T)= T^4$, e a radiação absorvida pelo pequeno corpo por unidade de sua área de superfície é:

$$G_{abs} = \alpha G = \alpha\sigma T^4$$

A radiação emitida pelo pequeno corpo é:

$$E_{emit} = \varepsilon\sigma T^4$$

Considerando que o corpo pequeno está em equilíbrio térmico com a cavidade, a taxa líquida de transferência de calor para o corpo deve ser zero. Então, a radiação emitida pelo corpo deve ser igual à radiação absorvida por isso:

$$A_s\varepsilon\sigma T^4 = A_s\alpha\sigma T^4 \qquad \textbf{(10.47)}$$

10.5.3 Lei de Kirchhoff

Dai concluí-se que:

$$\varepsilon(T) = \alpha(T)$$

Quer dizer, a emissividade hemisférica total de uma superfície a temperatura T é igual à sua absorvidade hemisférica total por radiação que vem de um corpo negro à mesma temperatura. Esta relação que simplifica em grande a análise da radiação, foi desenvolvida primeiro por Gustav Kirchhoff em 1860 e é agora conhecida como **lei de Kirchhoff.**

A derivação acima, também pode ser repetida para radiação a um comprimento de onda especificado e assim obter-se a forma espectral da lei de Kirchhoff:

$$\varepsilon_\lambda(T) = \alpha_\lambda(T) \qquad \textbf{(10.48)}$$

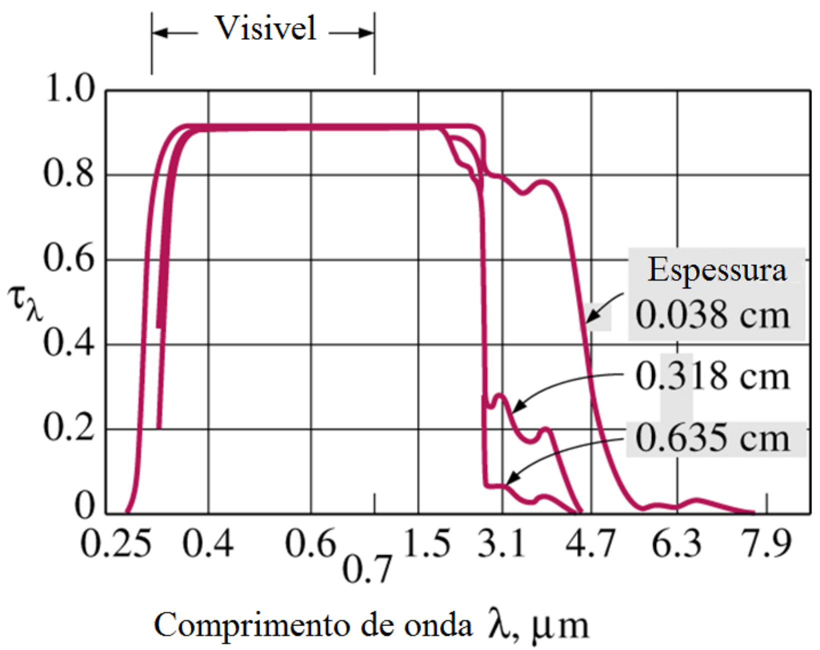
10.5.3 Lei de Kirchhoff

Esta relação é válida quando a irradiação ou a radiação emitida é independente da direcção. A forma da lei de Kirchhoff que não envolve nenhuma restrição é a forma direccional espectral expressa como, $\varepsilon_{\lambda,\theta}(T)$,= $\alpha_{\lambda,\theta}(T)$. Quer dizer, a emissividade de uma superfície a um comprimento de onda, direcção e temperatura especificados é sempre igual a sua absorvidade no mesmo comprimento de onda, direcção e temperatura.

10.6 Efeito de Estufa

Observa-se a partir da figura que o vidro nas espessuras encontradas na prática, transmite mais de 90 por cento da radiação na faixa visível e é praticamente opaco (não transparente) à radiação nas regiões de comprimento de onda maior do espectro eletromagnético isto é infravermelho (aproximadamente $\lambda > 3\ \mu m$). Portanto, o vidro de uma janela é transparente no intervalo de comprimento de onda de $0{,}3\ \mu m<\lambda< 3\ \mu m$ em que mais de 90 por cento da radiação solar é emitida.

10.6 Efeito de Estufa



Transmissividade espectral do vidro de baixo teor de ferro a temperatura ambiente para diferentes espessuras.

10.6 Efeito de Estufa

O efeito estufa experimentado a uma grande escala na terra. A superfície da Terra, que aquece durante o dia, como resultado da absorção da energia solar, esfria durante a noite, irradiando sua energia no espaço como radiação infravermelha. Os gases de combustão, como CO_2 e vapor de água na atmosfera transmitem a maior parte da radiação solar mas absorvem a radiação infravermelha emitida pela superfície da terra. Assim, há preocupação de que a energia aprisionada na Terra acabe por causar o aquecimento global e, portanto, alterações drásticas nos padrões climáticos

10.6 Efeito de Estufa

Uma estufa de energia, permite que a radiação solar entre mas não permite que a radiação infravermelha saia.