

Transferência de Calor por Radiação Térmica

Transporte de Calor e Massa

Professor: Adriano Possebon Rosa

Departamento de Engenharia Mecânica
Faculdade de Tecnologia
Universidade de Brasília

Sumário

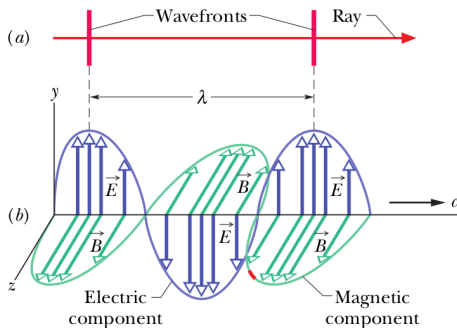
- 1 Introdução
- 2 Radiação Térmica
- 3 Radiação de Corpo Negro
- 4 Propriedades Radioativas
- 5 Radiação Solar
- 6 Efeito Estufa
- 7 Cálculo da Transferência de Calor entre Duas Superfícies

Condução e convecção precisam de um meio condutor.

Mas um objeto pode trocar calor com outro mesmo no vácuo, por meio da **radiação**.

Cargas elétricas em movimento ou variações de correntes elétricas criam campos elétricos e magnéticos.

Esses campos em movimento rápido são chamados de **ondas eletromagnéticas** ou **radiação eletromagnética**.



A transferência de energia por radiação é mais rápida (na velocidade da luz) e não sofre atenuação no vácuo.

Ocorre em líquidos, sólidos e gases.

Velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo (velocidade da luz):

$$c_o = 2,9979 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (1)$$

Velocidade da luz em um dado meio:

$$c = \frac{c_o}{n} \quad (2)$$

Em que n é sempre maior que 1 e é chamado de **índice de refração**.
Para o ar $n \approx 1$, para a água $n = 1,33$ e para o vidro $n = 1,5$.

As ondas eletromagnéticas são caracterizadas por sua **frequência** (número de oscilações por segundo) f ou pelo seu **comprimento de onda** λ .

A relação entre essas grandezas é dada por

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3)$$

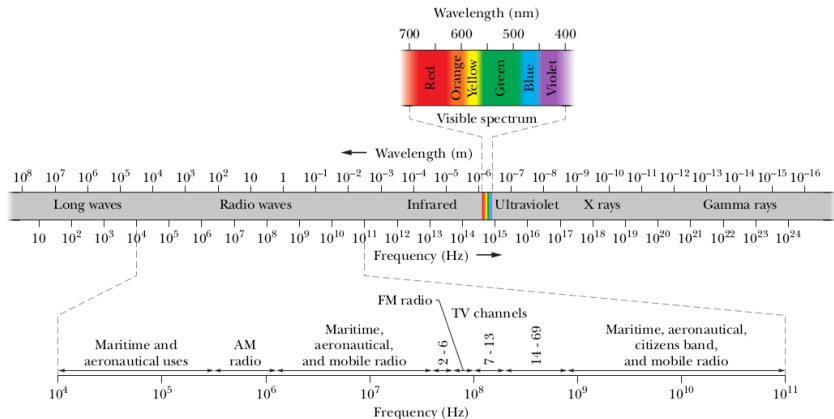
A frequência depende da fonte apenas, e não muda. A velocidade c e o comprimento λ mudam de acordo com o meio de propagação.

As ondas eletromagnéticas são produzidas de diferentes maneiras e têm diferentes comportamentos, dependendo do seu **comprimento de onda**.

Temos $10^{-10} \mu m < \lambda < 10^{10} \mu m$.

Raios gama, raios X, radiação ultravioleta, luz visível, radiação infravermelha, radiação térmica, micro-ondas e ondas de rádio.

O espectro eletromagnético.



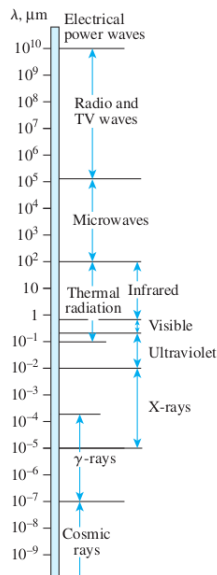
Sumário

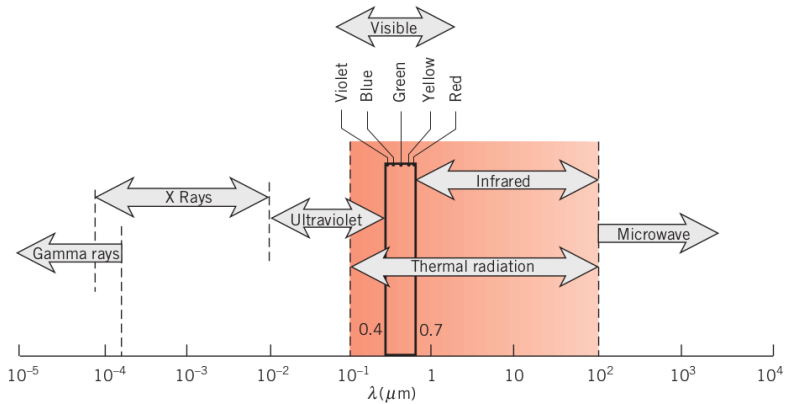
- 1 Introdução
- 2 Radiação Térmica**
- 3 Radiação de Corpo Negro
- 4 Propriedades Radioativas
- 5 Radiação Solar
- 6 Efeito Estufa
- 7 Cálculo da Transferência de Calor entre Duas Superfícies

O tipo de radiação eletromagnética pertinente à transferência de calor é a **radiação térmica**, emitida pela matéria como resultado das mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas.

A emissão de radiação térmica depende da temperatura: **quanto maior a temperatura, maior a emissão.**

Radiação térmica é **continuamente emitida** por todas as matérias cuja temperatura é superior a zero absoluto, ou seja, tudo o que nos rodeia, como paredes, móveis e pessoas, constantemente emite (e absorve) radiação.



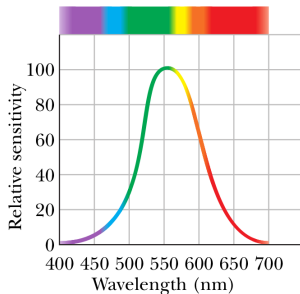


Radiação térmica é a parte do espectro eletromagnético que se estende de $0,1\mu m$ até $100\mu m$.

A **radiação térmica** inclui a luz visível, radiação infravermelha e parte da radiação ultravioleta.

O que chamamos de **luz visível** é simplesmente a parte visível (a parte que aciona o nosso sentido) do espectro eletromagnético, e vai de $0,40\mu m$ até $0,76\mu m$.

Violeta	$0,40 - 0,44\mu m$
Azul	$0,44 - 0,49\mu m$
Verde	$0,49 - 0,54\mu m$
Amarelo	$0,54 - 0,60\mu m$
Laranja	$0,60 - 0,67\mu m$
Vermelho	$0,63 - 0,76\mu m$



A radiação eletromagnética emitida pelo Sol é conhecida como **radiação solar**.

O Sol é a nossa principal fonte de energia.

Quase toda a radiação solar se encontra na faixa de comprimento de onda entre $0,3\mu m$ e $3\mu m$.

Quase metade da radiação solar é **luz**, ou seja, está na faixa visível, sendo o restante ultravioleta (12%) e infravermelha.

A radiação emitida pelos corpos na temperatura ambiente está na região infravermelha do espectro. **Os corpos começam a emitir luz visível perceptível acima de $800K$** . Filamento de tungstênio na lâmpada: $2000K$.

Todo o corpo emite e absorve radiação.

No entanto, para sólidos opacos a radiação emitida no interior do corpo é absorvida por átomos e moléculas do próprio corpo.

Além disso, a radiação incidente sobre esses corpos é absorvida em uma camada de poucos micrômetros.

Assim, com relação à transferência de calor, a radiação é considerada um **fenômeno de superfície**.

As características de radiação das superfícies podem mudar completamente por meio da aplicação de revestimento ou pela mudança da cor da tinta.

Sumário

- 1 Introdução
- 2 Radiação Térmica
- 3 Radiação de Corpo Negro
- 4 Propriedades Radioativas
- 5 Radiação Solar
- 6 Efeito Estufa
- 7 Cálculo da Transferência de Calor entre Duas Superfícies

Um corpo em uma dada temperatura emite radiação em todas as direções e em uma vasta faixa de comprimentos de onda.

Essa emissão depende da temperatura e das características do corpo.

Em uma dada temperatura, qual é a quantidade máxima possível de radiação que pode ser emitida?

Corpo negro: perfeito emissor e absorvedor de radiação. Em uma determinada temperatura e comprimento de onda, nenhuma superfície pode emitir mais energia do que o corpo negro.

O corpo negro absorve toda a radiação incidente.

Trata-se de uma idealização teórica.

Proposta de Max Planck (mecânica quântica): a radiação eletromagnética se dá por meio da propagação de uma coleção de **pacotes discretos de energia**, chamados de **fótons** ou **quanta**. Cada fóton de frequência f tem energia de

$$e = hf = \frac{hc}{\lambda}, \quad (4)$$

em que $h = 6,626069 \times 10^{-34} J.s$ é a constante de Planck.

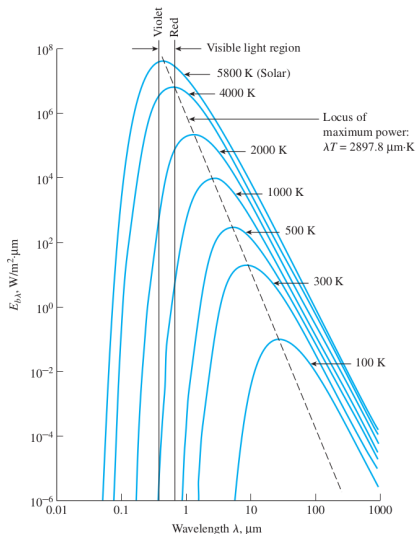
A potência emissiva espectral do corpo negro é dada pela **Lei de Planck** (1901):

$$E_{b\lambda}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc_o^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc_o}{k\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (5)$$

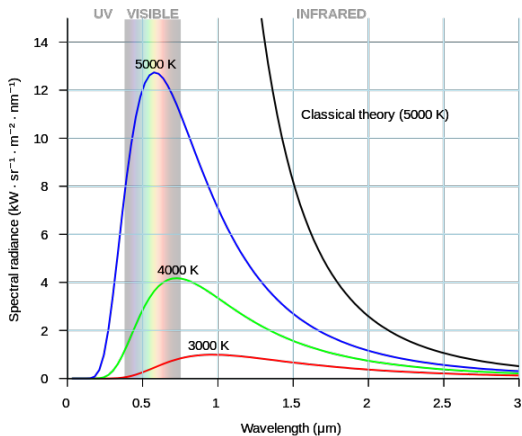
$k = 1,38065 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ é a constante de Boltzmann.

Observações:

- 1 a radiação emitida é uma função contínua do comprimento de onda;
- 2 para qualquer comprimento de onda, a quantidade de radiação emitida aumenta com a elevação da temperatura;
- 3 à medida que a temperatura aumenta, as curvas deslocam-se para a esquerda, para a região de ondas mais curtas (com maior frequência e mais energia).



A cor de um objeto na temperatura ambiente é devido à reflexão, e não à emissão própria.



Pesquisar catástrofe ultravioleta.

A integração da **potência emissiva espectral** $E_{b\lambda}$ do corpo negro (equação 5) sobre todo o espectro de comprimento de onda dá a **potência emissiva total** do corpo negro E_b :

$$E_b(T) = \int_0^{\infty} E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (6)$$

Com $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K}^4)$.

Essa é a lei de Stefan-Boltzmann.

Ou seja, a lei de Stefan-Boltzmann é obtida a partir de uma integração da lei de Planck.

Note que a energia E_b tem unidade de energia por unidade de área e por unidade de tempo (W/m^2 no SI).

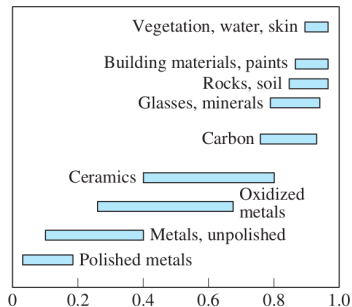
Sumário

- 1 Introdução
- 2 Radiação Térmica
- 3 Radiação de Corpo Negro
- 4 Propriedades Radioativas**
- 5 Radiação Solar
- 6 Efeito Estufa
- 7 Cálculo da Transferência de Calor entre Duas Superfícies

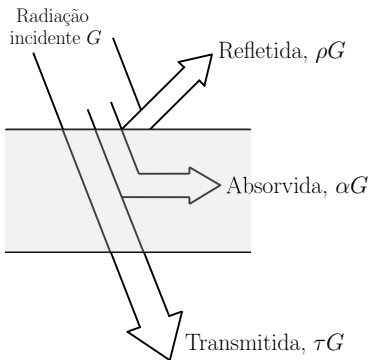
Emissividade: representa a razão entre a radiação emitida pela superfície em uma determinada temperatura e a radiação emitida por um corpo negro na mesma temperatura.

$$\epsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (7)$$

O valor da emissividade está sempre entre 0 e 1. A emissividade pode depender ainda do comprimento de onda e da direção.



Irradiação: é o fluxo de radiação incidente sobre uma superfície. Vamos representar por G .



A radiação pode ser refletida, absorvida ou transmitida.

Absortividade:

$$\alpha = \frac{\text{Radiação absorvida}}{\text{Radiação incidente}} = \frac{G_{abs}}{G} \quad (8)$$

Reflexividade:

$$\rho = \frac{\text{Radiação refletida}}{\text{Radiação incidente}} = \frac{G_{ref}}{G} \quad (9)$$

Transmissividade:

$$\tau = \frac{\text{Radiação transmitida}}{\text{Radiação incidente}} = \frac{G_{tr}}{G} \quad (10)$$

Pela definição:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (11)$$

Casos particulares:

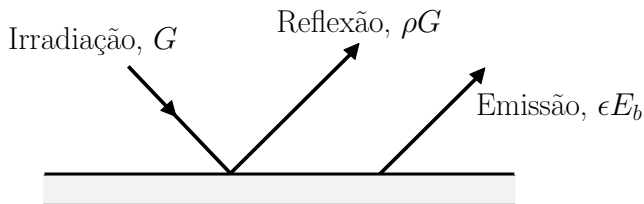
- ❶ Corpo negro: $\alpha = 1$ e $\tau = \rho = 0$
- ❷ Superfície opaca: $\tau = 0$ e $\alpha + \rho = 1$
- ❸ Maioria dos gases: $\rho = 0$ e $\alpha + \tau = 1$

Lei de Kirchhoff: para um corpo em equilíbrio térmico temos

$$\epsilon(T) = \alpha(T) \quad (12)$$

Ou seja, a emissividade de uma superfície na temperatura T é igual à sua absorptividade para a radiação proveniente de um corpo negro na mesma temperatura.

Radiosidade: energia total emitida por uma superfície por meio de radiação. É formada pela emissão e pela reflexão.

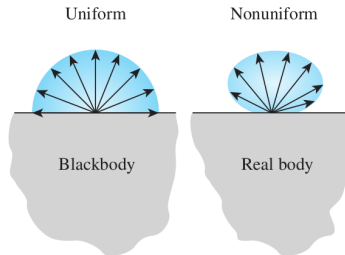


Vamos representar a radiosidade pela letra J . Assim:

$$J = \epsilon E_b + \rho G \quad (13)$$

$$[J] = W/m^2$$

Para um **corpo negro** a radiosidade é igual à energia emitida, uma vez que ele absorve toda a radiação incidente e não reflete nada.



Sumário

- 1 Introdução
- 2 Radiação Térmica
- 3 Radiação de Corpo Negro
- 4 Propriedades Radioativas
- 5 Radiação Solar**
- 6 Efeito Estufa
- 7 Cálculo da Transferência de Calor entre Duas Superfícies

O Sol é um corpo quase esférico com diâmetro $D \approx 1,39 \times 10^9 m$ e massa $m = 2 \times 10^{30} kg$. O Sol está localizado a uma distância média $L = 1,50 \times 10^{11} m$ da Terra.

O Sol emite energia de radiação continuamente a uma taxa de $E_{sol} \approx 3,8 \times 10^{26} W$.

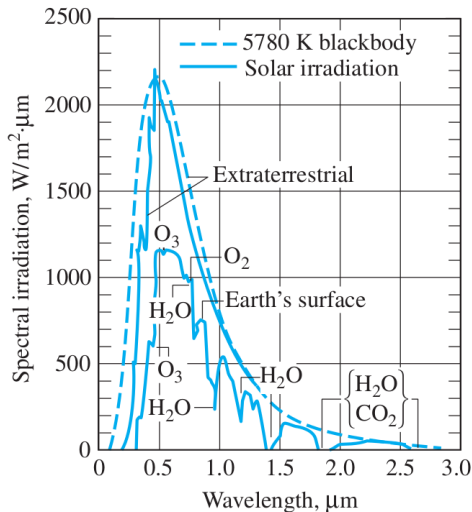
Cerca de $1,7 \times 10^{17} W$ chegam na Terra (menos de um bilionésimo).

A energia do Sol é devido à fusão contínua, na qual dois átomos de hidrogênio se fundem para formar um átomo de hélio.

Temperatura no núcleo: $40.000.000 K$

Temperatura na superfície externa: $5780 K$

O Sol pode ser tratado como um corpo negro a uma temperatura de $5780K$.



Note a diferença entre a radiação emitida pelo Sol e a radiação que chega na superfície da Terra. Qual é o motivo dessa diferença?

Sumário

- 1 Introdução
- 2 Radiação Térmica
- 3 Radiação de Corpo Negro
- 4 Propriedades Radioativas
- 5 Radiação Solar
- 6 Efeito Estufa**
- 7 Cálculo da Transferência de Calor entre Duas Superfícies

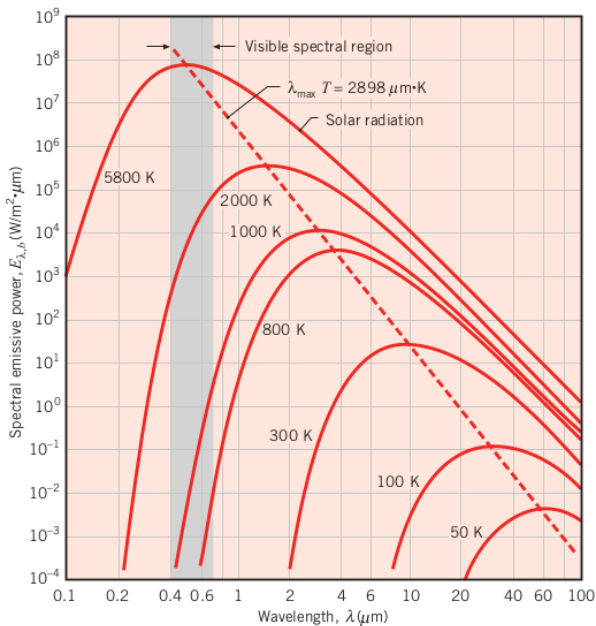
O efeito estufa ocorre devido à **curva espectral da transmissividade do vidro**, ou seja, devido ao fato da transmissividade ser dependente do comprimento de onda.

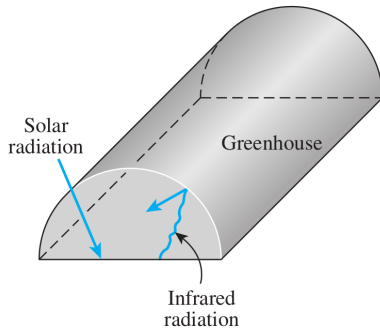
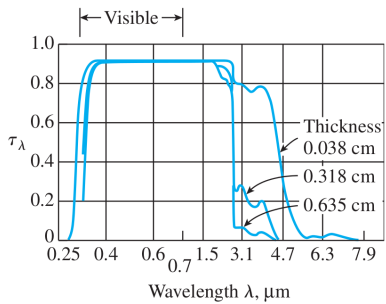
O vidro transmite mais de 90% da radiação na faixa visível e é praticamente opaco à radiação na região do infravermelho.

Portanto, o vidro permite que a radiação solar (5780 K) entre, mas não permite que a radiação infravermelha emitida pelas superfícies internas (300 K) saia.

Isso é o **efeito estufa**. A radiação entra mas não sai, porque os comprimentos das ondas eletromagnéticas são diferentes.

Na escala planetária, gases da atmosfera, como o CO_2 e o vapor de água, transmitem a maior parte da radiação solar, mas absorvem a radiação infravermelha emitida pela superfície da Terra.







Sumário

- 1 Introdução
- 2 Radiação Térmica
- 3 Radiação de Corpo Negro
- 4 Propriedades Radioativas
- 5 Radiação Solar
- 6 Efeito Estufa
- 7 Cálculo da Transferência de Calor entre Duas Superfícies**

A transferência de calor entre duas superfícies depende

- 1 das propriedades radioativas (ϵ , ρ , α)
- 2 das temperaturas das superfícies
- 3 da geometria (distância e orientação das superfícies)

As propriedades radioativas e as temperaturas já foram definidas. Falta falar sobre a geometria.

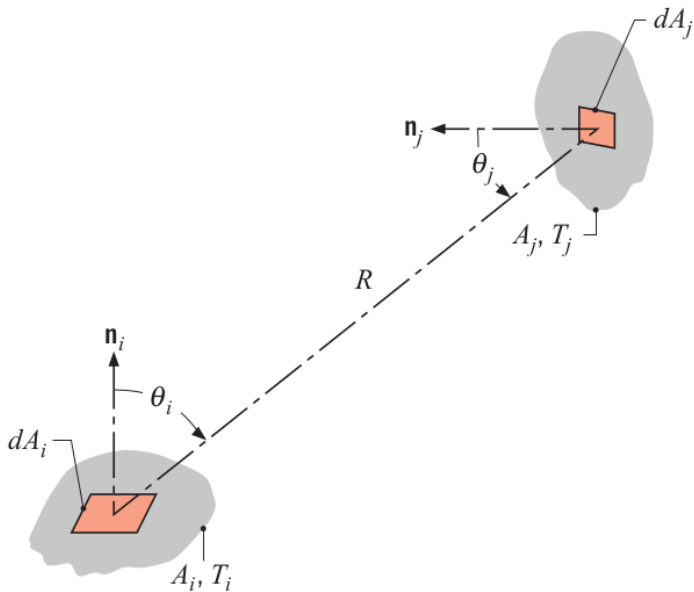
A caracterização da geometria é feita pelo Fator de Forma.

Apenas uma fração da radiação saindo de uma determinada superfície atinge uma outra superfície.

Fator de Forma. Representa a fração de radiação que sai de uma superfície e chega em outra.

F_{ij} é a fração da radiação que deixa a superfície i e atinge diretamente a superfície j .

F_{ij} é o fator de forma da superfície i com relação à superfície j .



Definição:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_j} \int_{A_i} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad (14)$$

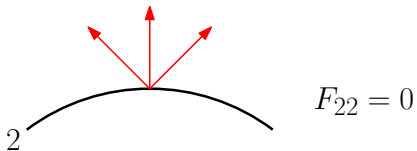
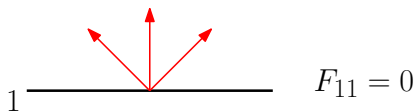
Relação de reciprocidade:

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad (15)$$

Regra da superposição: o fator de forma da superfície i para a superfície j é igual à soma dos fatores de forma da superfície i para as partes da superfície j . Por exemplo, considere que a superfície 2 é formada pelas superfícies 3 e 4. Então:

$$F_{12} = F_{13} + F_{14} \quad (16)$$

F_{ii} é a fração de radiação que deixa a superfície i e a atinge diretamente.



\dot{Q}_i é a radiação total deixando a superfície i .

A radiação que sai de i e atinge j é

$$\dot{Q}_{ij} = F_{ij}\dot{Q}_i = F_{ij}A_iJ_i \quad (17)$$

J_i é a radiosidade da superfície i , e é dada por

$$J_i = \epsilon_i E_{bi} + \rho_i G_i \quad (18)$$

Considere duas superfícies, 1 e 2, em um dado recinto.

A superfície 1 tem área A_1 e emissividade ϵ_1 , enquanto a superfície 2 tem área A_2 e emissividade ϵ_2 .

A transferência líquida de calor da superfície 1 para a superfície 2 é dada por:

$$\dot{Q}_{12} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1-\epsilon_1}{A_1\epsilon_1} + \frac{1}{A_1F_{12}} + \frac{1-\epsilon_2}{A_2\epsilon_2}} \quad (19)$$

Casos particulares:

- dois corpos negros:

$$\dot{Q}_{12} = A_1 F_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (20)$$

- a superfície 2 é muito maior do que a 1, e a envolve completamente:


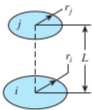

$$\dot{Q}_{12} = A_1 \sigma \epsilon_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (21)$$

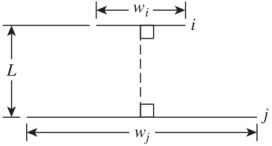
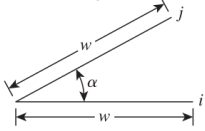
Como obter o fator de forma?

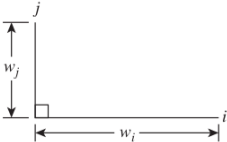
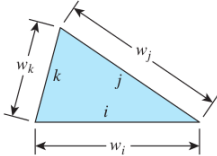
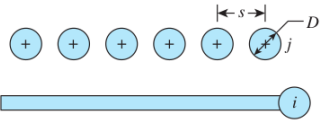
Para cada situação, temos que usar gráficos, tabelas ou equações.

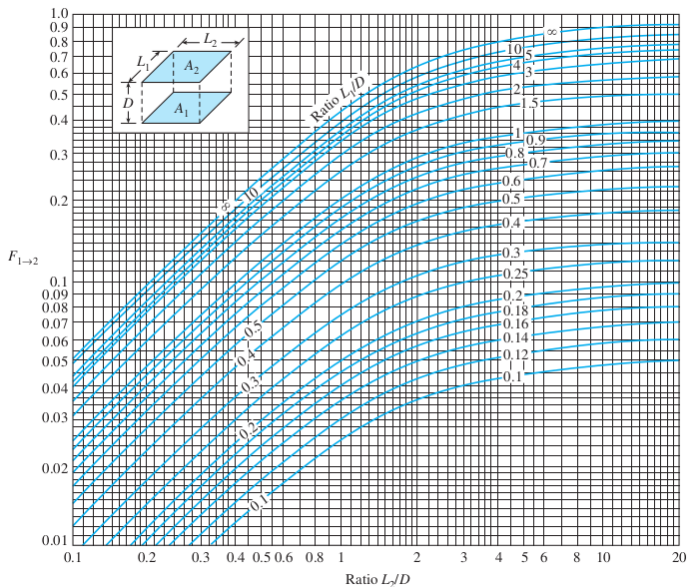
TABLE 13-1

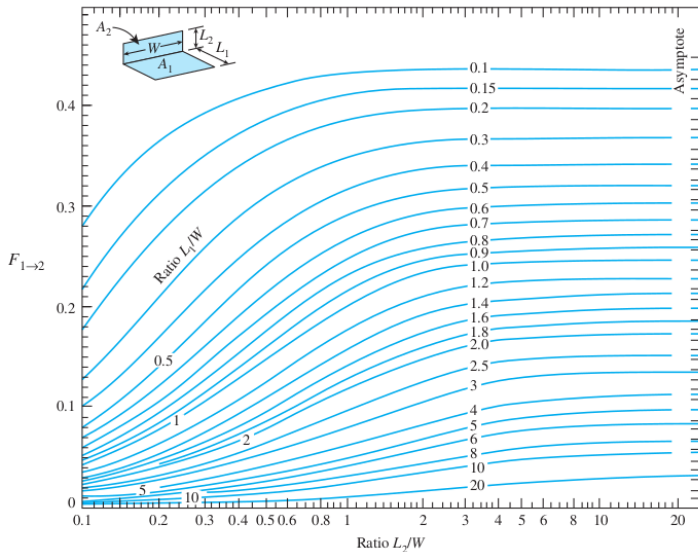
View factor expressions for some common geometries of finite size (3-D)

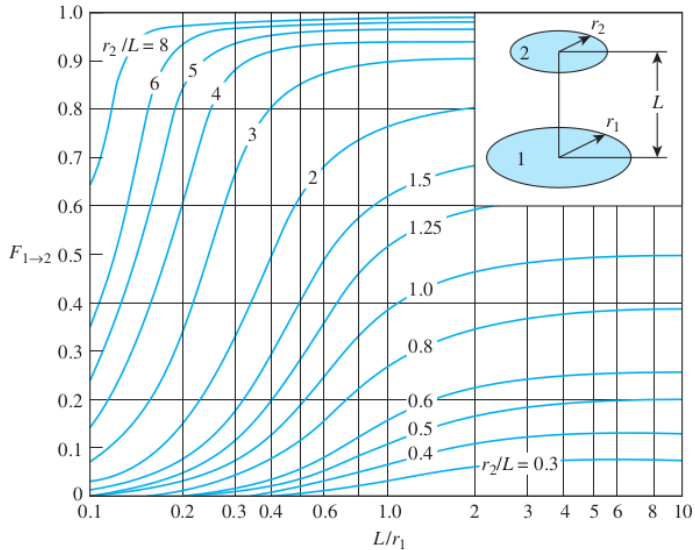
Geometry	Relation
<p>Aligned parallel rectangles</p> 	$\bar{X} = X/L \text{ and } \bar{Y} = Y/L$ $F_{i \rightarrow j} = \frac{2}{\pi \bar{X} \bar{Y}} \left\{ \ln \left[\frac{(1 + \bar{X}^2)(1 + \bar{Y}^2)}{1 + \bar{X}^2 + \bar{Y}^2} \right]^{1/2} + \bar{X}(1 + \bar{Y}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{X}}{(1 + \bar{Y}^2)^{1/2}} \right. \\ \left. + \bar{Y}(1 + \bar{X}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{Y}}{(1 + \bar{X}^2)^{1/2}} - \bar{X} \tan^{-1} \bar{X} - \bar{Y} \tan^{-1} \bar{Y} \right\}$
<p>Coaxial parallel disks</p> 	$R_i = r_i/L \text{ and } R_j = r_j/L$ $S = 1 + \frac{1 + R_i^2}{R_j^2}$ $F_{i \rightarrow j} = \frac{1}{2} \left\{ S - \left[S^2 - 4 \left(\frac{r_j}{r_i} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}$ <p>For $r_i = r_j = r$ and $R = r/L$: $F_{i \rightarrow j} = F_{j \rightarrow i} = 1 + \frac{1 - \sqrt{4R^2 + 1}}{2R^2}$</p>
<p>Perpendicular rectangles with a common edge</p> 	$H = Z/X \text{ and } W = Y/X$ $F_{i \rightarrow j} = \frac{1}{\pi W} \left(W \tan^{-1} \frac{1}{W} + H \tan^{-1} \frac{1}{H} - (H^2 + W^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{1}{(H^2 + W^2)^{1/2}} \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \ln \left\{ \frac{(1 + W^2)(1 + H^2)}{1 + W^2 + H^2} \left[\frac{W^2(1 + W^2 + H^2)}{(1 + W^2)(W^2 + H^2)} \right]^{W^2} \right. \right. \\ \left. \left. \times \left[\frac{H^2(1 + H^2 + W^2)}{(1 + H^2)(H^2 + W^2)} \right]^{H^2} \right\} \right)$

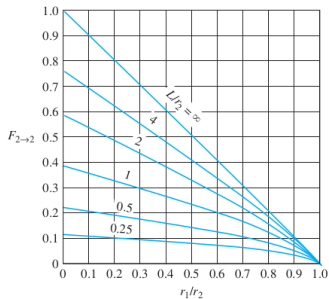
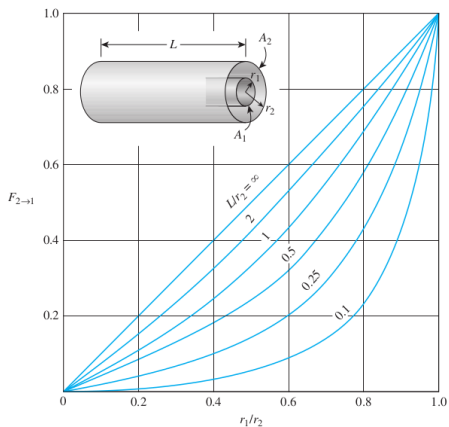
Geometry	Relation
<p>Parallel plates with midlines connected by perpendicular line</p> 	$W_i = w_i/L \text{ and } W_j = w_j/L$ $F_{i \rightarrow j} = \frac{[(W_i + W_j)^2 + 4]^{1/2} - (W_j - W_i)^2 + 4]^{1/2}}{2W_i}$
<p>Inclined plates of equal width and with a common edge</p> 	$F_{i \rightarrow j} = 1 - \sin \frac{1}{2} \alpha$

<p>Perpendicular plates with a common edge</p> 	$F_{i \rightarrow j} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{w_j}{w_i} - \left[1 + \left(\frac{w_j}{w_i} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}$
<p>Three-sided enclosure</p> 	$F_{i \rightarrow j} = \frac{w_i + w_j - w_k}{2w_i}$
<p>Infinite plane and row of cylinders</p> 	$F_{i \rightarrow j} = 1 - \left[1 - \left(\frac{D}{s} \right)^2 \right]^{1/2} + \frac{D}{s} \tan^{-1} \left(\frac{s^2 - D^2}{D^2} \right)^{1/2}$

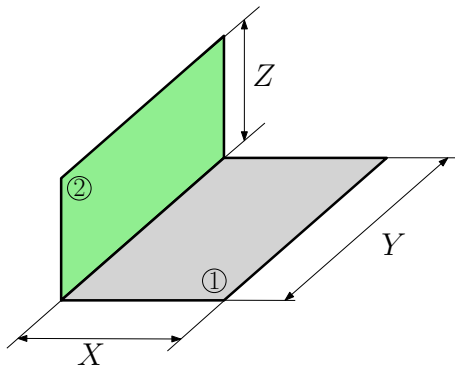








Exemplo. Determine transferência líquida de calor por radiação térmica entre as duas superfícies retangulares abaixo, que são perpendiculares. A superfície 1, com $\epsilon_1 = 0,8$, está a uma temperatura de 100°C e a superfície 2, com $\epsilon_2 = 0,95$, está a uma temperatura de 200°C . Dimensões: $X = 1\text{ m}$, $Y = 2\text{ m}$, $Z = 1,5\text{ m}$.

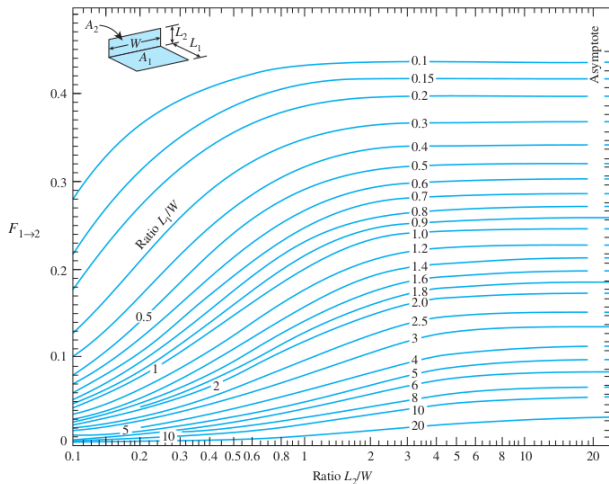


Resposta:

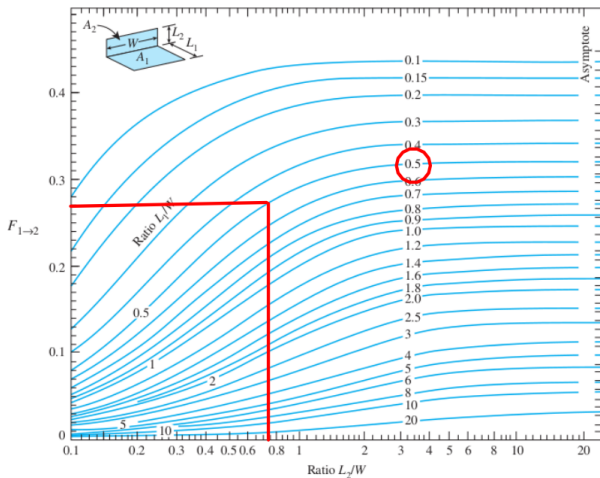
$$\dot{Q}_{12} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1-\epsilon_1}{A_1\epsilon_1} + \frac{1}{A_1F_{12}} + \frac{1-\epsilon_2}{A_2\epsilon_2}} \quad (22)$$

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W/(m^2.K^4)$; $T_1 = 373,15 K$; $T_2 = 473,15 K$; $\epsilon_1 = 0,8$; $\epsilon_2 = 0,95$; $A_1 = 2 m^2$; $A_2 = 3 m^2$; $F_{12} = ????$

Temos o gráfico do próximo slide.



$L_1 = 1\text{ m}$, $L_2 = 1,5\text{ m}$, $W = 2\text{ m}$. Assim, $L_1/W = 0,5$ e $L_2/W = 0,75$.



Resultado: $F_{12} = 0,27$.

Então:

$$\dot{Q}_{12} = \frac{5,67 \times 10^{-8}(373,15^4 - 473,15^4)}{\frac{1-0,8}{2 \times 0,8} + \frac{1}{2 \times 0,27} + \frac{1-0,95}{3 \times 0,95}} = -873,60 \text{ W} \quad (23)$$

$$\dot{Q}_{12} = -874 \text{ W} \quad (24)$$

As duas superfícies trocam calor a uma taxa líquida de 874 W . O sinal negativo indica que o calor vai da superfície 2 para a 1, já que $T_2 > T_1$.