



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PQI 3301 – FENÔMENOS DE TRANSPORTE II

APOSTILA ⑤ – Transferência de Calor por Radiação

Prof. José Luís de Paiva

Prof. Jorge A. W. Gut

Versão 2022

Conteúdo

| | |
|--|----|
| 1. RADIAÇÃO TÉRMICA..... | 2 |
| 1.1 Conceitos básicos | 2 |
| 1.2 Emissão do Corpo Negro | 5 |
| 1.3 Superfícies reais | 12 |
| 1.4 Fator de Vista | 16 |
| 1.5 Troca de radiação entre superfícies (meios não participantes)..... | 23 |
| 1.6 Meio Participante..... | 27 |
| 2. EXERCÍCIOS..... | 34 |
| 3. LISTA DE SÍMBOLOS..... | 41 |
| 4. BIBLIOGRAFIA..... | 42 |

Produção 2013: Caio Luca Joppert, bolsista do Programa de Estímulo ao Ensino de Graduação (PEEG) da Pró-Reitoria de Graduação da USP.

Revisão 2015: Yuri Nascimento Nariyoshi, bolsista do Programa de Aperfeiçoamento de Ensino (PAE) da CAPES.

1. RADIAÇÃO TÉRMICA

1.1 Conceitos básicos

- Radiação: transmissão de energia por meio de ondas eletromagnéticas.
- Espectro Eletromagnético: classificação das ondas de acordo com seu comprimento de onda λ ou sua frequência f (**Figura 1**).
- Radiação térmica: radiação emitida em consequência da temperatura de um corpo (ou superfície) compreendendo comprimentos de onda entre 0,1 a 100 μm . Engloba parte do espectro Ultravioleta (UV, 0,01 a 0,4 μm), todo o espectro visível (0,4 a 0,7 μm) e quase todo o espectro infravermelho (IV, 0,7 a 1000 μm).

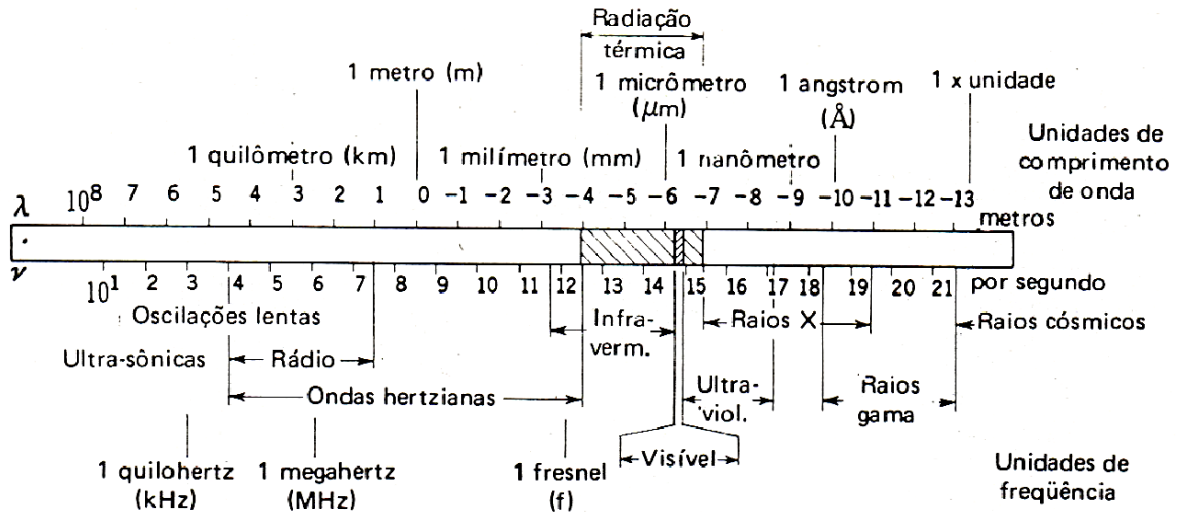


Figura 1: Espectro eletromagnético.

(fonte: KREITH, 3ª edição)

Terminologia utilizada no estudo da radiação:

- Interações de radiação com uma superfície: de uma radiação incidente parte pode ser refletida, parte absorvida e parte transmitida; um corpo pode, ainda emitir radiação (**Figura 2**);
- Irradiação (G): toda a radiação que chega a uma superfície (ou seja, toda a radiação incidente);
- Radiosidade (J): toda a radiação que deixa uma superfície (ou seja, a emissão de uma superfície somada à reflexão da radiação incidente);

- Poder Emissivo Espectral (E_λ): distribuição de energia emitida por um corpo com temperatura acima de 0 K, em função do comprimento de onda e da temperatura;
- Intensidade Espectral de Radiação (I_λ): fluxo de energia que passa por um ângulo sólido para um dado comprimento de onda;
- Radiação difusa: a emissão espectral que independe das direções de propagação (emite radiação igualmente em todas as direções);
- Espectral x global: uma grandeza espectral depende do comprimento de onda; uma grandeza global contempla todos os comprimentos de onda (uma grandeza global é a integral da grandeza espectral quanto aos comprimentos de onda);

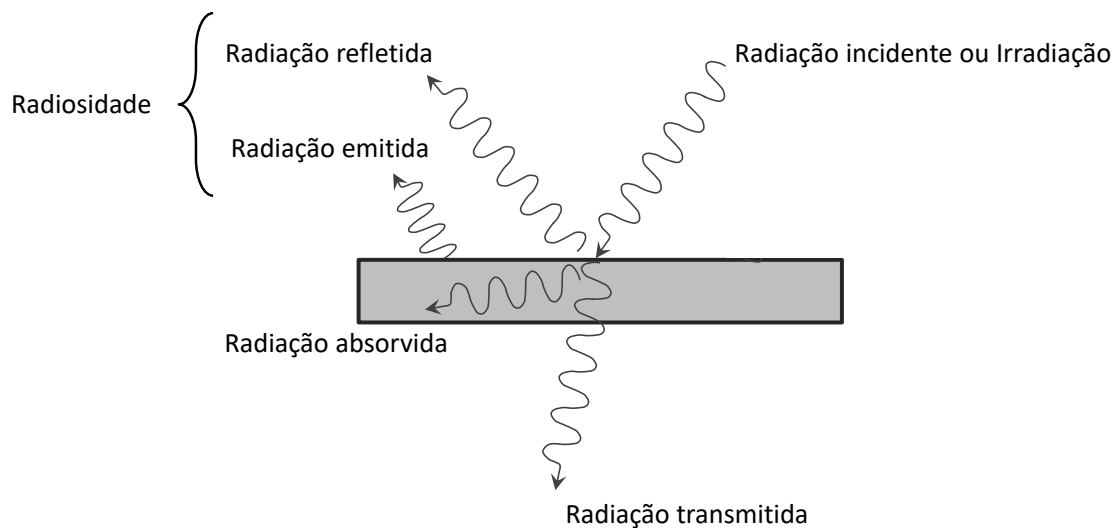


Figura 2: Interações da radiação com uma superfície.

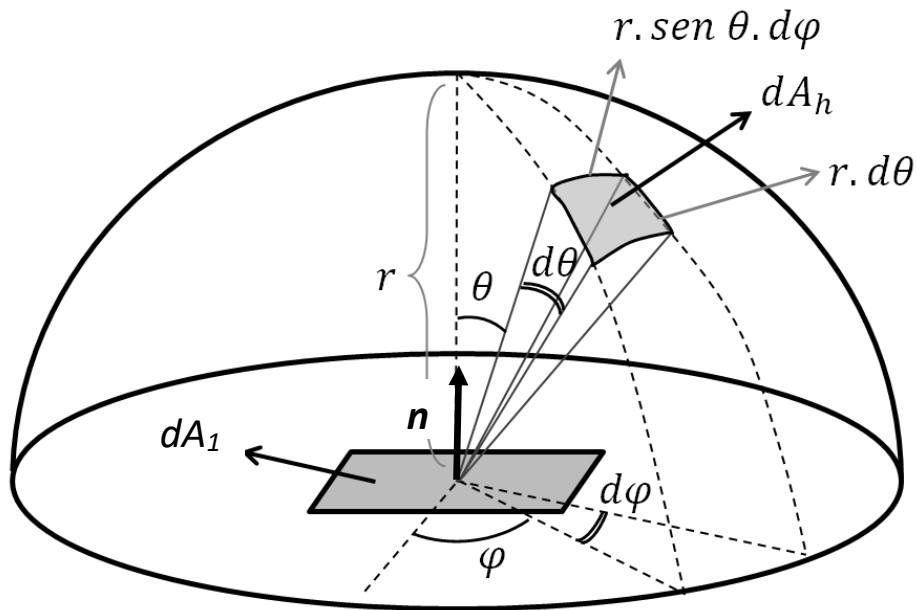


Figura 3: Radiação emitida pela superfície dA_1 para um elemento dA_h .

- Definição de ângulo sólido (**Figura 3**):

$$d\omega = \frac{dA_h}{r^2} = \frac{(r \cdot \text{sen } \theta \cdot d\phi) \cdot (r \cdot d\theta)}{r^2} = \text{sen } \theta \cdot d\phi \cdot d\theta$$

- Relações importantes (**Figuras 2 e 3**):

- Intensidade

$$I_\lambda = \frac{[\text{Energia da radiação}]}{[\text{tempo}] \cdot [\text{área}]_{\text{normal}} \cdot [\text{ângulo}]_{\text{sólido}} \cdot [\text{comprimento}]_{\text{de onda}}}$$

$$\therefore I_\lambda = \frac{dq}{dA_1 \cdot \cos \theta \cdot d\omega \cdot d\lambda} = \frac{dq''_\lambda}{\cos \theta \cdot d\omega}$$

$$dq''_\lambda = I_\lambda \cdot \cos \theta \cdot d\omega$$

Integrando a expressão acima em um hemisfério ($0 < \varphi < 2\pi$; $0 < \theta < \pi/2$), tem-se o Poder Emissivo Espectral E_λ :

$$E_\lambda = \int I_\lambda(\theta, \varphi) \cdot \cos \theta \cdot d\omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_\lambda \cdot \text{sen } \theta \cdot \cos \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi$$

$$\therefore E_\lambda = \pi \cdot I_\lambda$$

De forma geral, pode-se dizer que a mesma relação existe quando se trata tanto de Irradiação, decorrente da intensidade de radiação incidente, I_λ , quanto de Radiosidade, decorrente da soma das intensidades de radiação refletida, $I_{\lambda,ref}$, e emitida, $I_{\lambda,ems}$:

$$G_\lambda = \pi \cdot I_{\lambda i}$$

$$J_\lambda = \pi \cdot (I_{\lambda,ems} + I_{\lambda,ref})$$

- Poder de emissão global (contribuição de todos os comprimentos de onda).

$$E = \int E_\lambda \cdot d\lambda = \pi \int I_\lambda \cdot d\lambda$$

De forma análoga:

$$G = \pi \int I_{\lambda i} \cdot d\lambda$$

- Absortividade, refletividade e transmitância

$$G_\lambda = G_{\lambda,abs} + G_{\lambda,ref} + G_{\lambda,trs}$$

$G_{\lambda,abs}$, $G_{\lambda,ref}$, $G_{\lambda,trs}$ indicam as frações da radiação incidente absorvidas, refletidas e transmitidas, respectivamente. Definem-se, então os termos adimensionais de absortividade, refletividade e transmitância espectrais (α_λ , ρ_λ , τ_λ):

$$\alpha_\lambda = \frac{G_{\lambda,abs}}{G_\lambda}; \rho_\lambda = \frac{G_{\lambda,ref}}{G_\lambda}; \tau_\lambda = \frac{G_{\lambda,trs}}{G_\lambda};$$

Sendo:

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

1.2 Emissão do Corpo Negro

Corpo Negro: caso ideal de emissão de radiação de um corpo com temperatura absoluta não nula.

Um corpo negro é aquele que:

- Absorve toda a radiação nele incidente, independentemente do comprimento de onda ou da direção desta radiação;
- Emite radiação em todas as direções (é um emissor difuso);

- Emite a máxima energia de um corpo numa dada temperatura.

A emissão espectral de um corpo negro é expressa pela Distribuição de Planck:

$$I_{\lambda} = \frac{2hc_0^2\lambda^{-5}}{n^2 \left(e^{\frac{hc_0}{n\lambda kT}} - 1 \right)}$$

Sendo: $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, a constante de Planck, $k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$, a constante de Boltzmann, $c_0 = 2,988 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, a velocidade da luz no vácuo e n , índice de refração do meio (**Tabela 1**). Observe que para o vácuo , $n = 1$.

O poder emissivo espectral de um corpo negro é dado por:

$$E_{\lambda} = \pi \cdot I_{\lambda} = \pi \cdot \left[\frac{2hc_0^2\lambda^{-5}}{n^2 \left(e^{\frac{hc_0}{n\lambda kT}} - 1 \right)} \right]$$

A distribuição espectral de um corpo negro no vácuo está representada nas **Figuras 4 e 5**. Para visualizar temperaturas menores, a escala logarítmica é recomendada.

Tabela 1: índice de refração (n) médio de alguns meios.

| Meio | Índice de refração |
|--------------|--------------------|
| Vácuo | 1,00 |
| Ar seco | 1,0003 |
| Água Líquida | 1,311 – 1,395 |
| Vidro | 1,55 – 1,65 |

Obs: o índice de refração depende da temperatura do corpo e do comprimento de onda que nele incide.
Os valores tabelados são valores médios.

(Fonte: CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85ª edição)

Poder emissivo espectral de um Corpo Negro

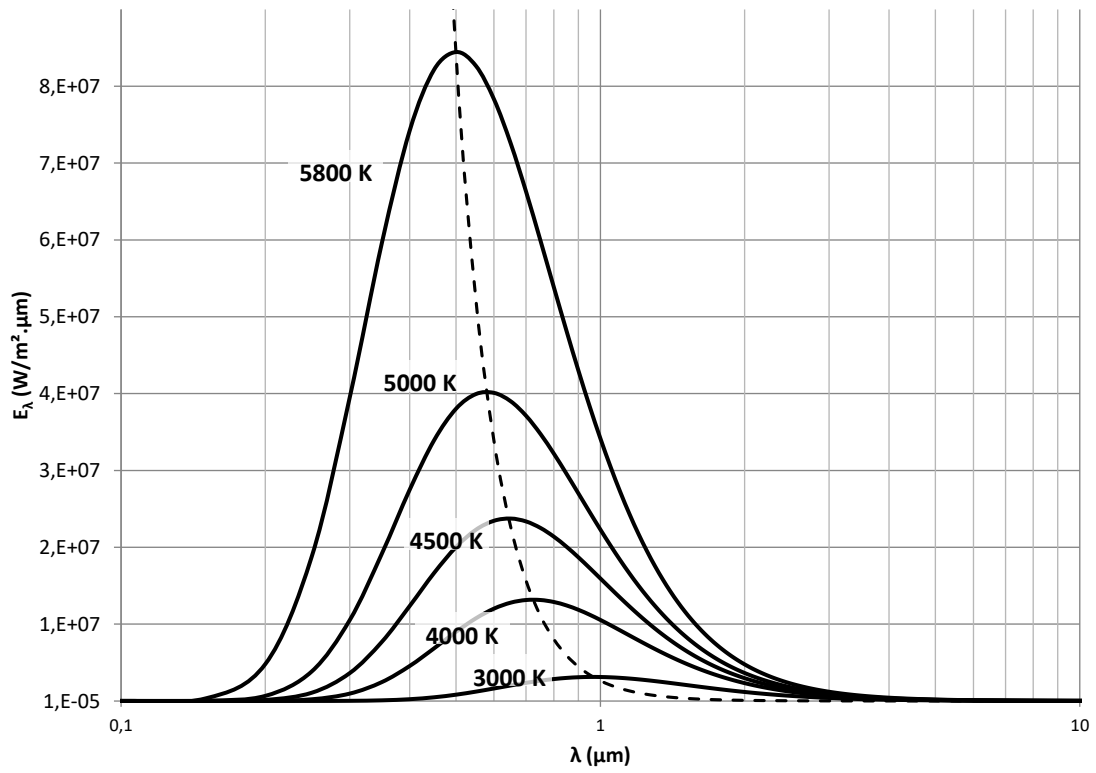


Figura 4: Poder emissivo espectral de um Corpo Negro no vácuo (escala monolog).

Poder emissivo espectral de um Corpo Negro

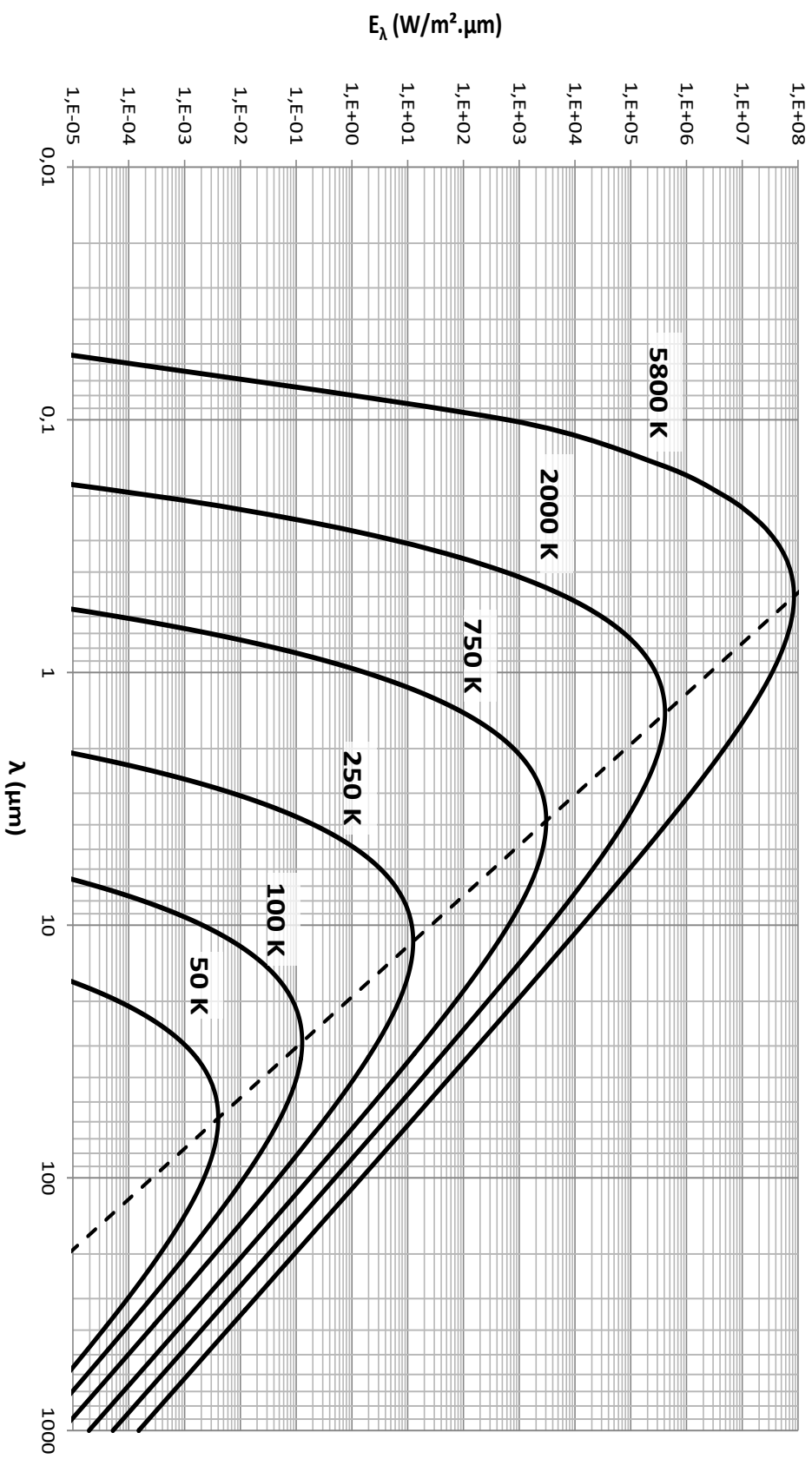


Figura 5: Poder emissivo espectral de um Corpo Negro (escala dilog).

- Lei de Deslocamento de Wien

Os comprimentos de onda correspondentes à máxima emissão de um corpo negro podem ser determinados a partir da distribuição espectral, resultando na chamada Lei de Wien (n=1):

$$\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \right) = (C_1 \lambda^{-5}) \cdot \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \right) + \left(\frac{1}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \right) \cdot \frac{d}{d\lambda} (C_1 \lambda^{-5}) = 0$$

Sendo : $C_1 = 2\pi h c_0^2$; $C_2 = \frac{hc_0}{k}$

Desenvolvendo a expressão acima, vem:

$$\frac{C_2}{\lambda T} \cdot e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 5 \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right) = 0$$

$$\therefore \frac{C_2}{\lambda T} = 4,965$$

$$\lambda T = C_2 / 4,965 = 2897,77$$

$$\therefore \lambda T \approx 2898 \mu m \cdot K$$

Este resultado mostra a relação entre o comprimento de onda na qual o corpo negro emite com maior intensidade e a temperatura (linha tracejada nas **Figuras 4 e 5**).

- Lei de Stefan-Boltzmann

Energia emitida por um corpo negro (integral da distribuição de Planck):

$$E_{CN} = \int_0^{\infty} \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda$$

Fazendo-se a seguinte substituição:

$$u = \frac{C_2}{\lambda T} \Rightarrow \lambda = \frac{C_2}{Tu}$$

$$du = -\frac{C_2}{\lambda^2 T} d\lambda = -\frac{Tu^2}{C_2} d\lambda$$

Chega-se em:

$$E_{CN} = -\frac{C_1 T^4}{C_2^4} \int_{\infty}^0 \frac{u^3}{e^u - 1} du$$

A integral acima tem resolução complicada. Pode-se demonstrar que seu resultado exato é $-\pi^4/15$. Então:

$$E_{CN} = \frac{\pi^4 C_1 T^4}{15 \cdot C_2^4} = \sigma T^4$$

Em que $\sigma = \pi^4 C_1 / 15 \cdot C_2^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$ é a constante de Stefan-Boltzmann.

No caso geral:
$$E_{CN} = n^2 \sigma T^4$$

- Fração de emissão

Fração de emissão $F_{(0 \rightarrow \lambda)}$: Fração da energia emitida pelo Corpo Negro entre o comprimento de onda nulo e a com valor λ (banda entre 0 e λ). Para uma banda que esteja situada entre comprimentos de onda λ_1 e λ_2 , basta tomar integral entre λ_1 e λ_2 , que é igual à diferença entre a integral de 0 até λ_2 e a integral de 0 até λ_1 , ou seja:

$$F_{(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2)} = F_{(0 \rightarrow \lambda_2)} - F_{(0 \rightarrow \lambda_1)}$$

A **Figura 6** e a **Tabela 2** mostram a fração acumulada entre o comprimento de onda nulo e um dado comprimento λ .

Para uma dada temperatura, pode perceber pela **Figura 6** que as emissões de um corpo negro concentram-se entre uma dada faixa de comprimento de onda. Entre λ . T igual a 1495 e 23912, cerca de 97,85% da radiação emitida pelo corpo negro é encontrada. Ou seja, para qualquer temperatura, a radiação emitida pelo corpo negro se concentra entre $\lambda_{max}/2$ e $8 \cdot \lambda_{max}$ (λ_{max} sendo aquele determinado pelo Lei de Wien).

Fração da emissão do corpo negro na banda 0→λ

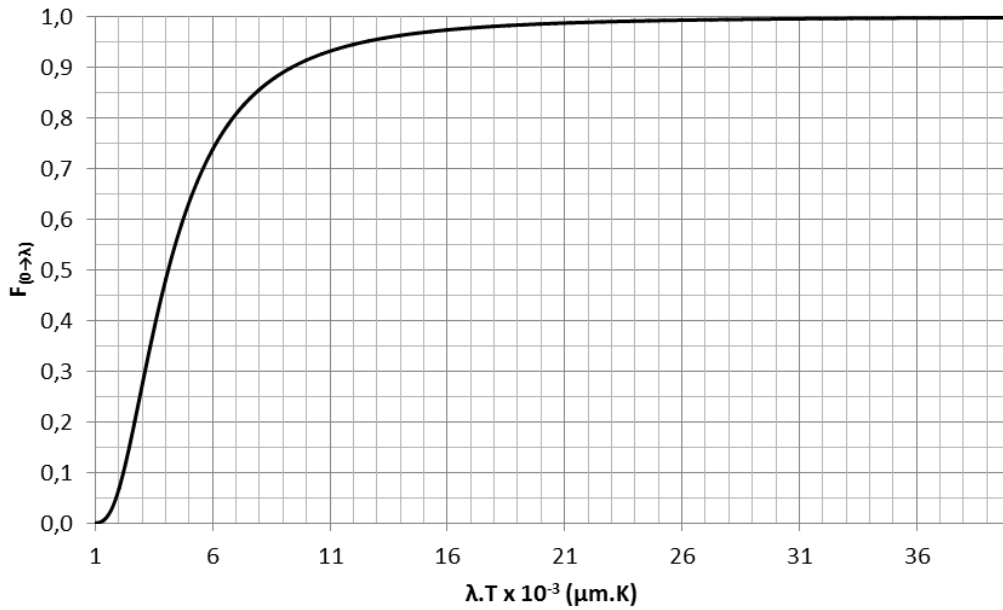


Figura 6: Fração acumulada de emissão do corpo negro na banda de comprimento de onda de 0 até λ.

Tabela 2: Fração acumulada de emissão do corpo negro na banda de comprimento de onda de 0 até λ.

| λT (μm.K) | F _(0→λ) | λT (μm.K) | F _(0→λ) | λT (μm.K) | F _(0→λ) | λT (μm.K) | F _(0→λ) |
|-----------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|--------------------|
| 200 | 0,00000 | 3200 | 0,31832 | 6200 | 0,75419 | 11000 | 0,93186 |
| 400 | 0,00000 | 3400 | 0,36194 | 6400 | 0,76927 | 11500 | 0,93893 |
| 600 | 0,00000 | 3600 | 0,40380 | 6600 | 0,78323 | 12000 | 0,94506 |
| 800 | 0,00002 | 3800 | 0,44356 | 6800 | 0,79616 | 13000 | 0,95510 |
| 1000 | 0,00032 | 4000 | 0,48104 | 7000 | 0,80813 | 14000 | 0,96285 |
| 1200 | 0,00215 | 4200 | 0,51617 | 7200 | 0,81923 | 15000 | 0,96894 |
| 1400 | 0,00783 | 4400 | 0,54894 | 7400 | 0,82954 | 16000 | 0,97377 |
| 1600 | 0,01980 | 4600 | 0,57941 | 7600 | 0,83911 | 18000 | 0,98081 |
| 1800 | 0,03946 | 4800 | 0,60767 | 7800 | 0,84801 | 20000 | 0,98555 |
| 2000 | 0,06688 | 5000 | 0,63385 | 8000 | 0,85629 | 25000 | 0,99216 |
| 2200 | 0,10107 | 5200 | 0,65806 | 8500 | 0,87460 | 30000 | 0,99529 |
| 2400 | 0,14046 | 5400 | 0,68044 | 9000 | 0,89001 | 40000 | 0,99791 |
| 2600 | 0,18334 | 5600 | 0,70112 | 9500 | 0,90307 | 50000 | 0,99890 |
| 2800 | 0,22812 | 5800 | 0,72022 | 10000 | 0,91417 | 75000 | 0,99966 |
| 3000 | 0,27345 | 6000 | 0,73787 | 10500 | 0,92368 | 100000 | 0,99985 |

Exemplo de uma boa aproximação de um corpo negro: o Sol se comporta quase como um corpo negro a 5800 K. A radiação solar que chega à atmosfera terrestre é atenuada pela atmosfera, que interage com a radiação (**Figura 7**).

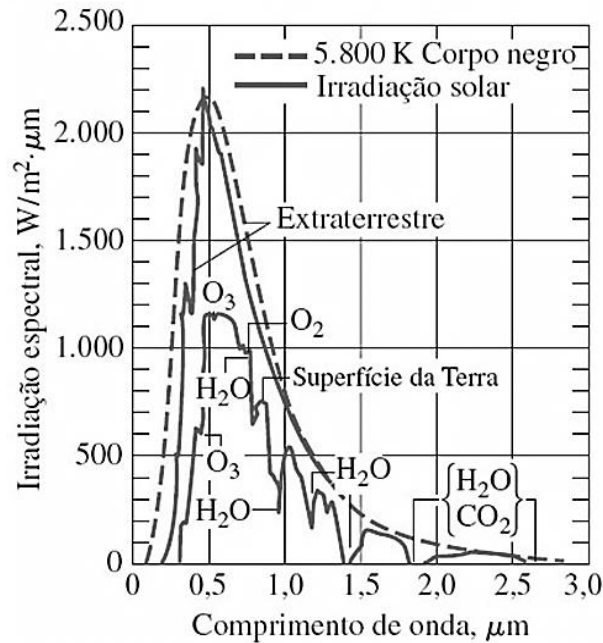


Figura 7: Distribuição espectral da radiação solar.
(fonte: ÇENGEL & GHAJAR, 4ª edição)

1.3 Superfícies reais

Superfícies reais: emitem radiação com poder emissivo menor do que aquele de um corpo negro e a emissão depende da direção θ .

Emissividade (ϵ): razão entre a emissão de uma superfície real e a de um corpo negro na mesma temperatura.

$$\epsilon_{\lambda,\theta} = \frac{E_{\lambda,\theta}}{E_{\lambda,CN}}$$

Geralmente se encontram dados de emissividade média quanto à direção (emissividade espectral, ϵ_{λ}) na literatura, assim como, dados de emissividade total (emissividade hemisférica total, ϵ):

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{E_{\lambda}}{E_{\lambda,CN}} \quad ; \quad \epsilon = \frac{E}{E_{CN}}$$

Superfície cinza: a emissividade espectral não depende do comprimento de onda considerado (a razão $E_{\lambda}/E_{\lambda,CN}$ é constante, **Figura 8**).

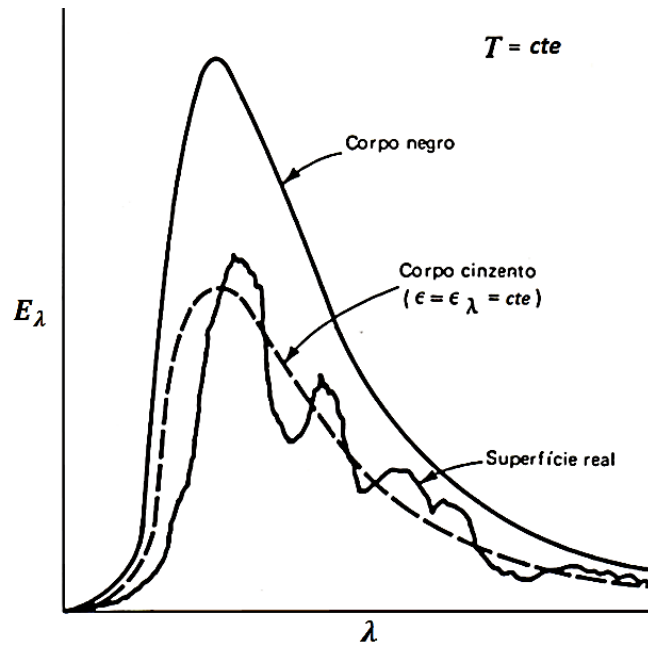


Figura 8: Emissões de um corpo negro, de uma superfície cinza e de uma superfície real. (Adaptado de KREITH, 3ª edição)

De maneira semelhante, geralmente são encontrados valores espectrais para absorptividade, refletividade e transmitância. Também de maneira análoga, definem-se absorptividade, refletividade e transmitância hemisféricas globais:

$$\alpha = \frac{G_{abs}}{G} ; \rho = \frac{G_{ref}}{G} ; \tau = \frac{G_{trs}}{G}$$

Lei de Kirchoff: Suponha um recipiente oco, extenso, com interior em vácuo, isolado externamente e cuja superfície interna se comporte como um corpo negro à temperatura T_s . Suponha também que há n corpos pequenos dentro deste recipiente, cada um com uma temperatura inicial T_i , $i = 0, 1, \dots, n$. No equilíbrio, todos os corpos atingem temperatura T_s e o balanço de energia mostra que a energia absorvida por cada um dos corpos é igual àquela que é emitida por ele. Sendo G a radiação incidente em cada um dos corpos e E_{CN} a radiação emitida por um corpo negro, admitindo-se que não há interferência de natureza geométrica entre a superfície do recipiente e os corpos e, tem-se para cada corpo:

$$A_i \alpha_i G = A_i \varepsilon_i E_{CN,i}$$

Mas a radiação incidente G é aquela enviada pela superfície que engloba todos os n corpos, ou seja, $G = E_{CN,s}$. Então, tem-se:

$$G = \frac{\varepsilon_i E_{CN,i}}{\alpha_i} = E_{CN,s}$$

Como $T_i = T_s$, $E_{CN,i} = E_{CN,s}$. Portanto, tem-se o seguinte resultado:

$$\alpha_i = \varepsilon_i$$

Este resultado vale se a superfície que emite radiação se porte como um corpo negro ou se a superfície que recebe radiação for cinza. O resultado da Lei de Kirchoff não pode ser estendido para absorptividades e emissividades totais, uma vez que elas dependem da distribuição espectral do corpo.

A seguir, nas **Figuras 9 a 14**, encontram-se diagramas de emissividade, absorbância, refletividade e transmitância para alguns materiais:

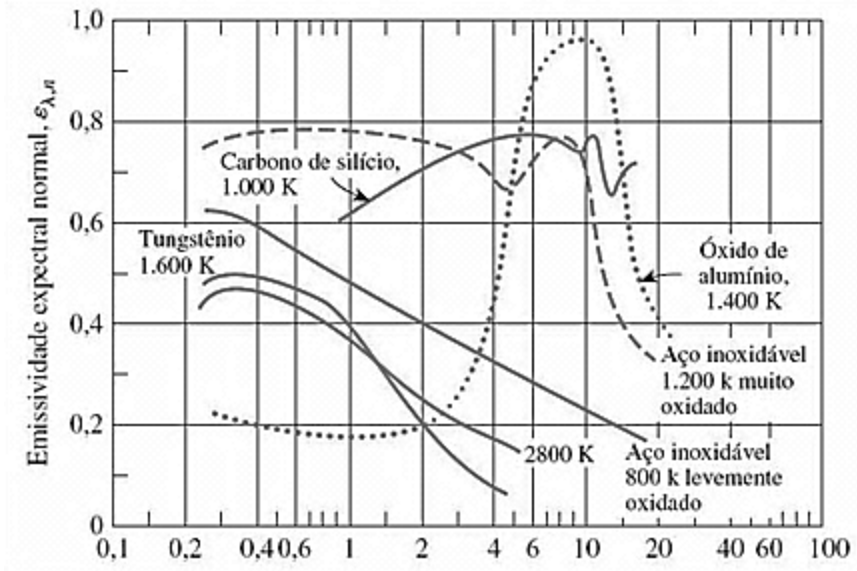


Figura 9: Emissividades espectrais de alguns materiais.
(fonte: ÇENGEL & GHAJAR, 4ª edição)

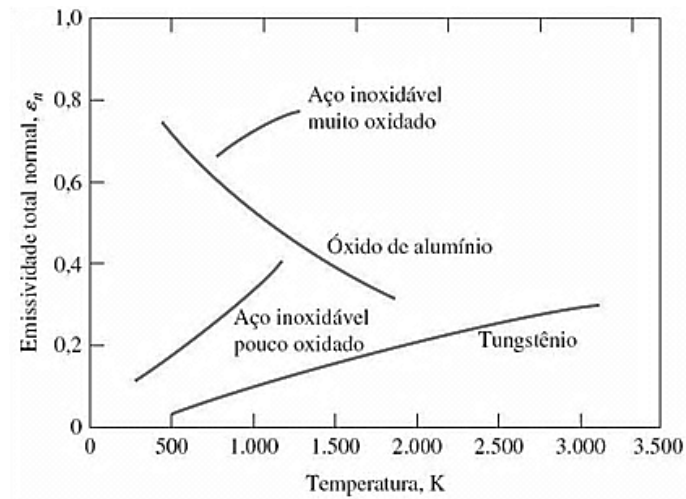


Figura 10: Emissividades totais de alguns materiais.
(fonte: ÇENGEL & GHAJAR, 4ª edição)

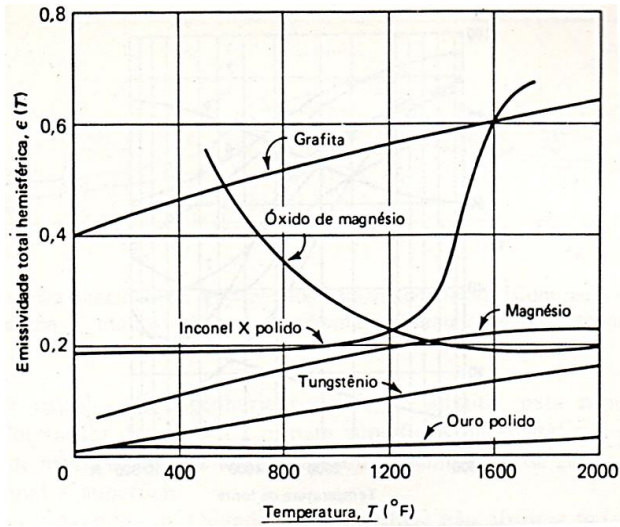


Figura 11: Emissividades totais de alguns materiais.
(fonte: KREITH, 3ª edição)

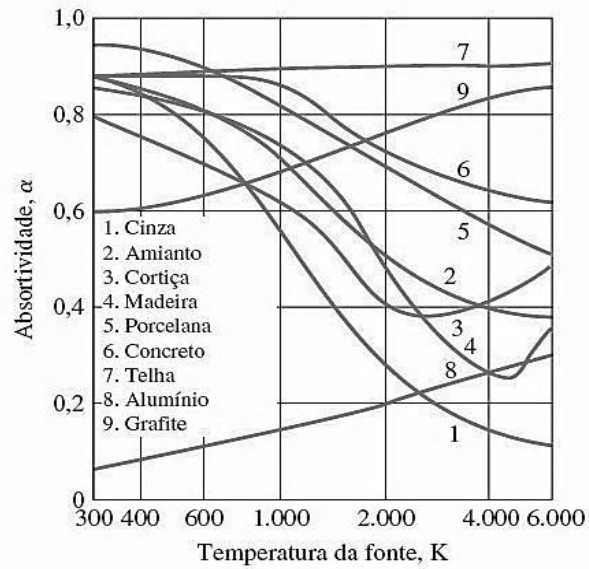


Figura 12: Absorptividades totais de alguns materiais.
(fonte: ÇENGEL & GHAJAR, 4ª edição)

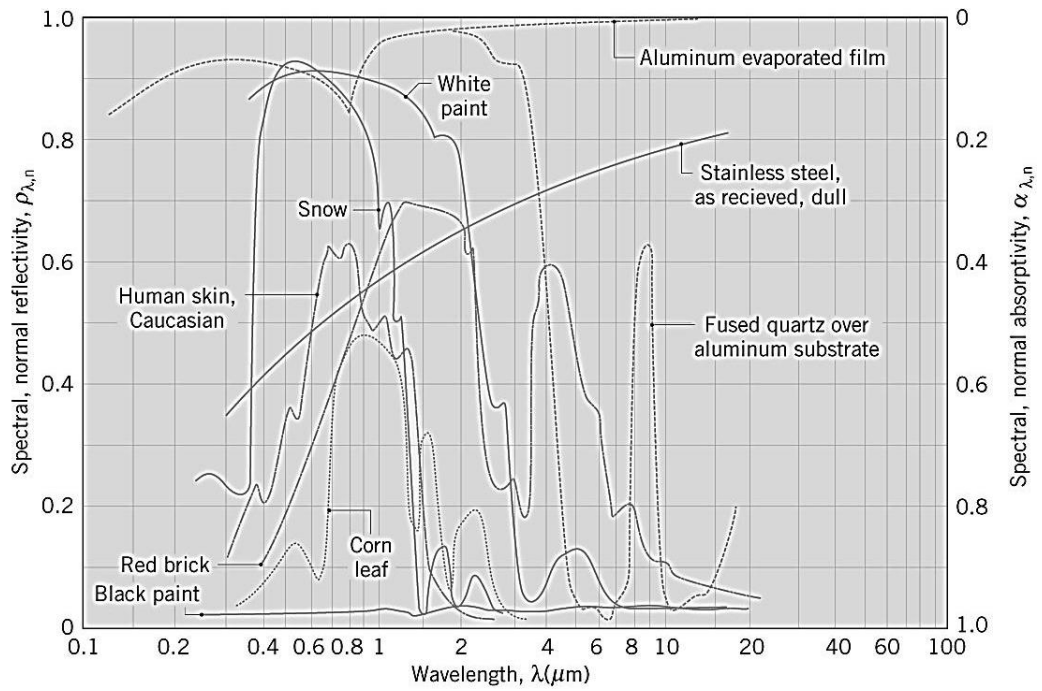


Figura 13: Refletividade e absorptividade espectrais de alguns materiais opacos ($\tau=0$)
(fonte: INCROPERA et al., 6ª edição)

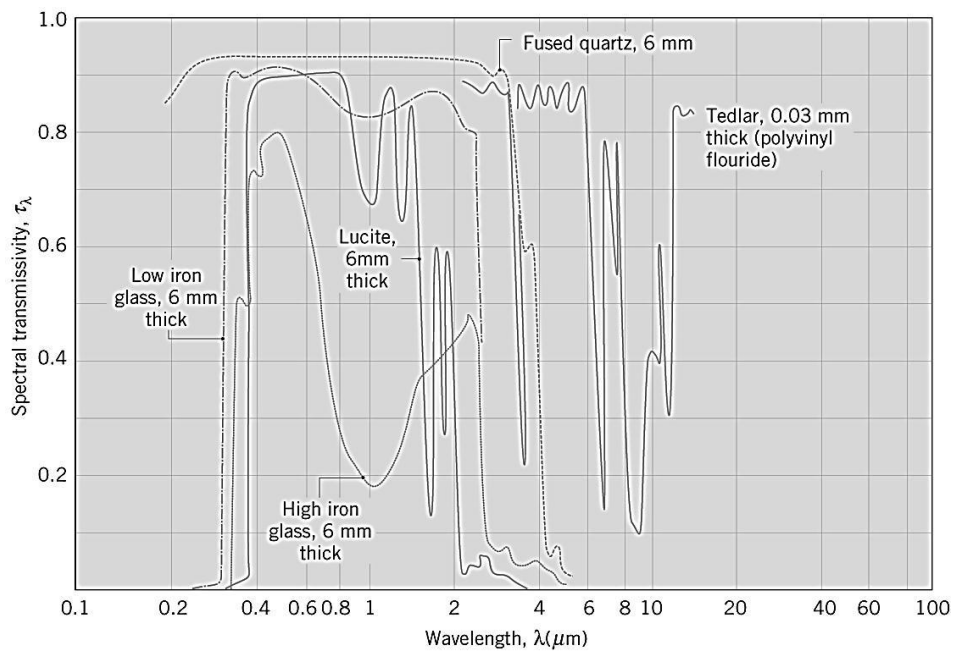


Figura 14: Transmitância de alguns materiais semitransparentes.
(fonte: INCROPERA et al., 6ª edição)

1.4 Fator de Vista

Fator de Vista ou Fator de Forma (F_{ij}) é fração da radiação que deixa superfície i e que é interceptada pela superfície j .

:

$$q_{i \rightarrow j} = F_{ij} A_i J_i$$

O cálculo da radiação que deixa a superfície i (radiosidade uniforme J_i) e atinge a superfície j é dado por (**Figura 15**):

$$dq_{i \rightarrow j} = \frac{J_i}{\pi} \cdot \cos \theta_i \cdot dA_i \cdot d\omega_{j \rightarrow i} \quad \text{sendo} \quad d\omega_{j \rightarrow i} = \cos \theta_j \cdot dA_j / R^2$$

$$dq_{i \rightarrow j} = \frac{J_i}{\pi} \cdot \cos \theta_i \cdot dA_i \cdot \cos \theta_j \cdot dA_j / R^2$$

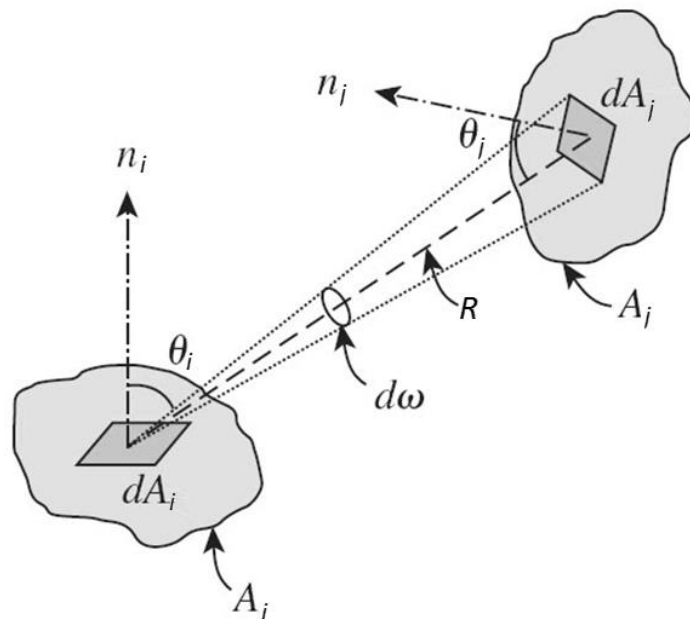


Figura 15: Determinação do fator de vista.
(Adaptado de ÇENGEL & GHAJAR, 4ª edição)

Integrando-se, resulta: $q_{i \rightarrow j} = F_{ij} A_i J_i$

Sendo: $F_{ij} = \frac{1}{A_i} \cdot \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_i \cdot dA_j$

Face à dificuldade de se utilizar a expressão geral para se calcular fatores de vista. Há três regras úteis para se determinar estes fatores:

- **Regra da reciprocidade:** correlaciona o fator de vista de i para j e de j para i . Geralmente, $F_{ij} \neq F_{ji}$. A relação correta entre estes dois fatores de vista é a relação de reciprocidade:

$$A_i \cdot F_{ij} = A_j \cdot F_{ji}$$

- **Regra da somatória:** para um invólucro composto de N superfícies adjacentes:

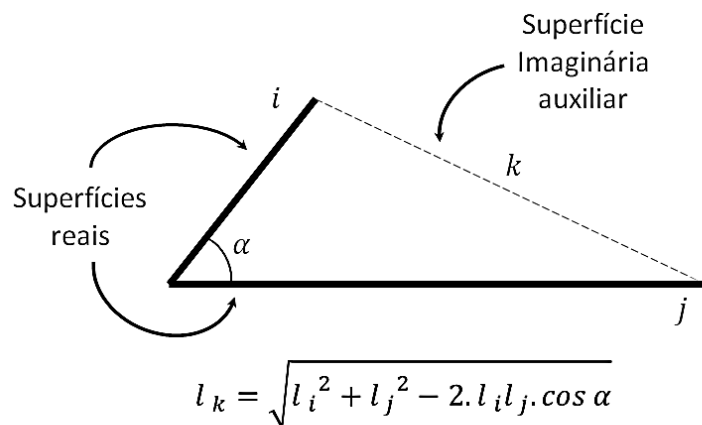
$$\sum_{i=1}^N F_{ij} = 1$$

Obs: $F_{ii} = 0$ se a superfície i for convexa; $F_{ii} \neq 0$ se a superfície i for côncava.

- **Regra da composição de áreas:** se uma superfície (j) é composta de n superfícies menores, a radiação que deixa (i) e que chega em j é da por:

$$F_{i(j)} = \sum_{k=1}^n F_{ik}$$

Uma prática comum na determinação de fator de vista é o uso de superfícies imaginárias auxiliares, cujas dimensões podem ser determinadas por relações geométricas simples. Como pode ser visto no exemplo da **Figura 16**.



$$\begin{array}{lll} F_{ij} + F_{ik} + F_{ii} = 1 & A_i \cdot F_{ij} = A_j \cdot F_{ji} & F_{ii} = 0 \\ F_{ji} + F_{jk} + F_{jj} = 1 & A_i \cdot F_{ik} = A_k \cdot F_{ki} & F_{jj} = 0 \\ F_{ki} + F_{kj} + F_{kk} = 1 & A_j \cdot F_{jk} = A_k \cdot F_{kj} & F_{kk} = 0 \end{array}$$

Figura 16: Exemplo de determinação de fatores de vista num problema simples usando superfícies imaginárias e relações trigonométricas.

A **Tabela 3** mostra algumas expressões para a fatores de vista de geometrias simples.

Tabela 3: Resultados de fatores de vista para geometrias simples.

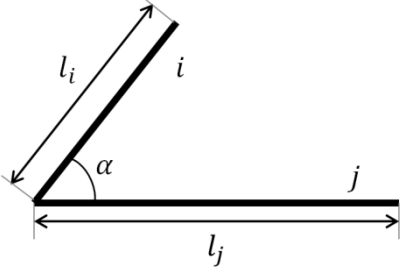
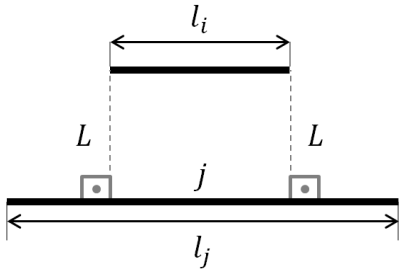
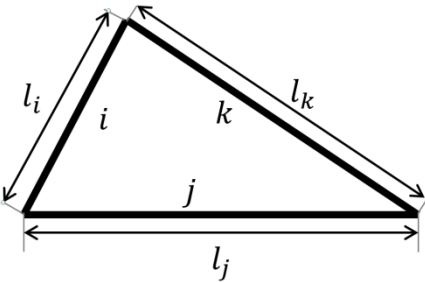
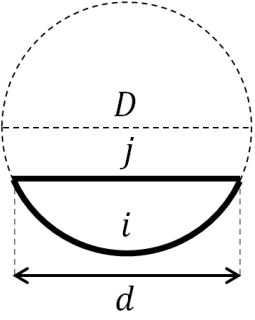
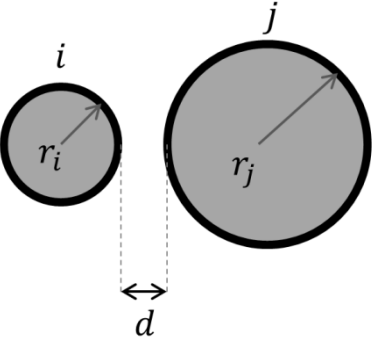
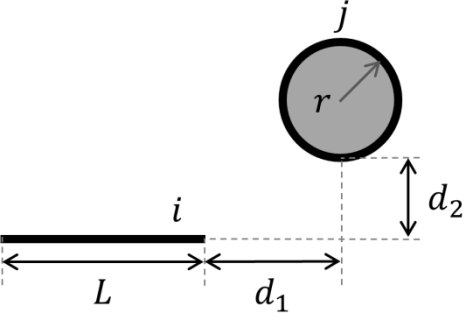
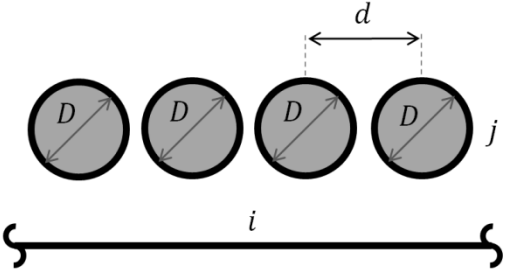
| Caso | Fator de vista |
|---|--|
|  <p data-bbox="256 786 778 853">Placas planas infinitas com aresta comum e ângulo α entre si</p> | $F_{ij} = \frac{1 + a - \sqrt{1 + a^2 - 2 \cdot a \cdot \cos \alpha}}{2}$ $a = l_i / l_j$ |
|  <p data-bbox="296 1240 740 1274">Placas infinitas, paralelas e alinhadas</p> | $F_{ij} = \frac{\sqrt{(b + a)^2 + 4} - \sqrt{(b - a)^2 + 4}}{2 \cdot a}$ $a = \frac{l_i}{L} \quad b = \frac{l_j}{L}$ |
|  <p data-bbox="320 1680 715 1713">Tubo infinito de seção triangular</p> | $F_{ij} = \frac{l_i + l_j - l_k}{2 \cdot l_i}$ |

Tabela 3 (cont.): Resultados de fatores de vista para geometrias simples.

| | |
|--|---|
|  <p>Calha com sessão de segmento de círculo</p> | $F_{ij} = \frac{a}{\text{asen}(a)}$ $F_{ii} = 1 - \frac{a}{\text{asen}(a)}$ $a = \frac{d}{D}$ |
|  <p>Dois cilindros alinhados</p> | $F_{ij} = \frac{1}{2\pi} (\pi + A + B)$ $A = \sqrt{c^2 - (r + 1)^2} - \sqrt{c^2 - (r - 1)^2}$ $B = (r - 1) \cdot \text{acos}\left(\frac{r-1}{c}\right) - (r + 1) \cdot \text{acos}\left(\frac{r+1}{c}\right)$ $r = \frac{r_j}{r_i} \quad s = \frac{d}{r_i} \quad c = 1 + r + s$ |
|  <p>Clindro e placa infinita</p> | $F_{ij} = \frac{r}{L} \left(\text{atan}\left(\frac{L + d_1}{r + d_2}\right) - \text{atan}\left(\frac{d_1}{r + d_2}\right) \right)$ |
|  <p>Placa infinita, de largura infinita e cilindros alinhados</p> | $F_{ij} = 1 + A + B$ $A = -\sqrt{1 + a^2}$ $B = a \cdot \text{atan}\left(\sqrt{\frac{1 - a^2}{a^2}}\right)$ $a = D/d$ |

As **Figuras 17, 18 e 19** mostram três casos simples de geometrias tridimensionais. As expressões analíticas são encontradas abaixo da figura correspondente.

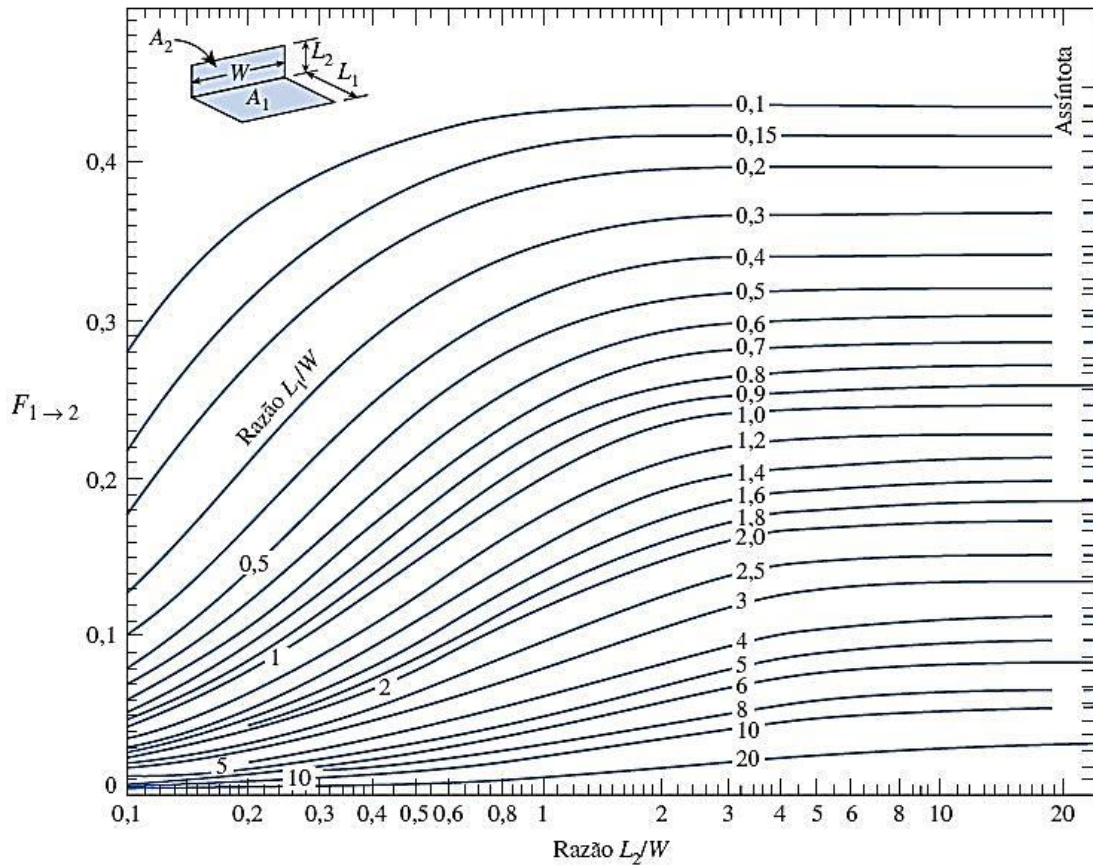


Figura 17: Fator de vista para duas placas dispostas perpendicularmente.
(fonte: ÇENGEL & GHAJAR, 4ª edição)

$$F_{12} = \frac{1}{\pi \cdot L} (A + B + C)$$

$$A = L \cdot \text{atan}(1/L) + H \cdot \text{atan}(1/H)$$

$$B = a^{0,5} \cdot \text{atan}(a^{-0,5})$$

$$C = \frac{1}{4} \ln \left[\left(\frac{(1+a+b)}{1+a} \right) \cdot \left(\frac{L^2(1+a)}{L^4+a+b} \right)^{L^2} \cdot \left(\frac{H^2(1+a)}{H^4+a+b} \right)^{H^2} \right]$$

$$L = \frac{L_1}{W} \quad L = \frac{L_2}{W} \quad a = L^2 + H^2 \quad b = (L \cdot H)^2$$

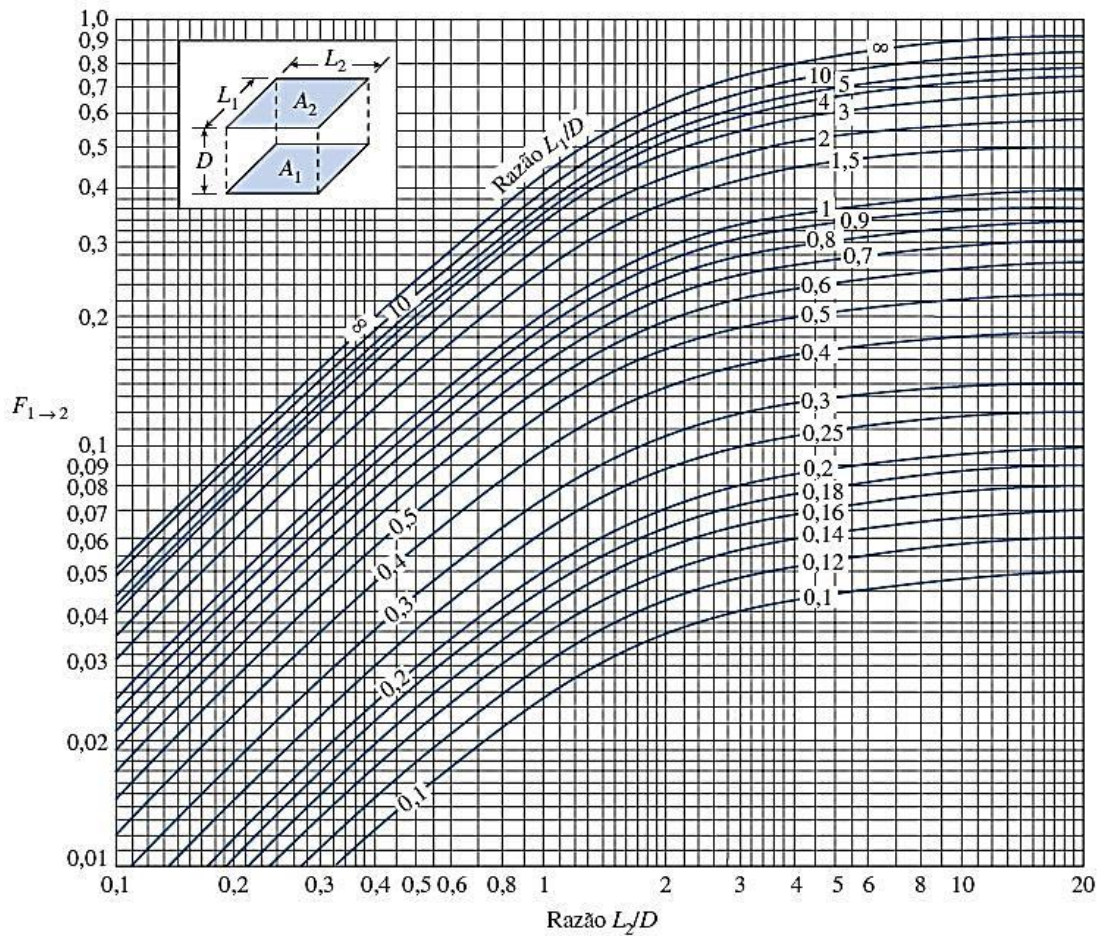


Figura 18: Fator de vista para duas placas paralelas e alinhadas.
(fonte: ÇENGEL & GHAJAR, 4ª edição)

$$F_{12} = \frac{1}{\pi \cdot X \cdot Y} \cdot \ln(A + B + C)$$

$$A = \sqrt{\frac{a + b}{a + b - 1}}$$

$$B = X \cdot \sqrt{b} \cdot \operatorname{atan}\left(\frac{X}{\sqrt{b}}\right) + Y \cdot \sqrt{a} \cdot \operatorname{atan}\left(\frac{Y}{\sqrt{a}}\right)$$

$$C = -(X \cdot \operatorname{atan}(X) + Y \cdot \operatorname{atan}(Y))$$

$$X = \frac{L_1}{D} \quad Y = \frac{L_2}{D} \quad a = 1 + X^2 \quad b = 1 + Y^2$$

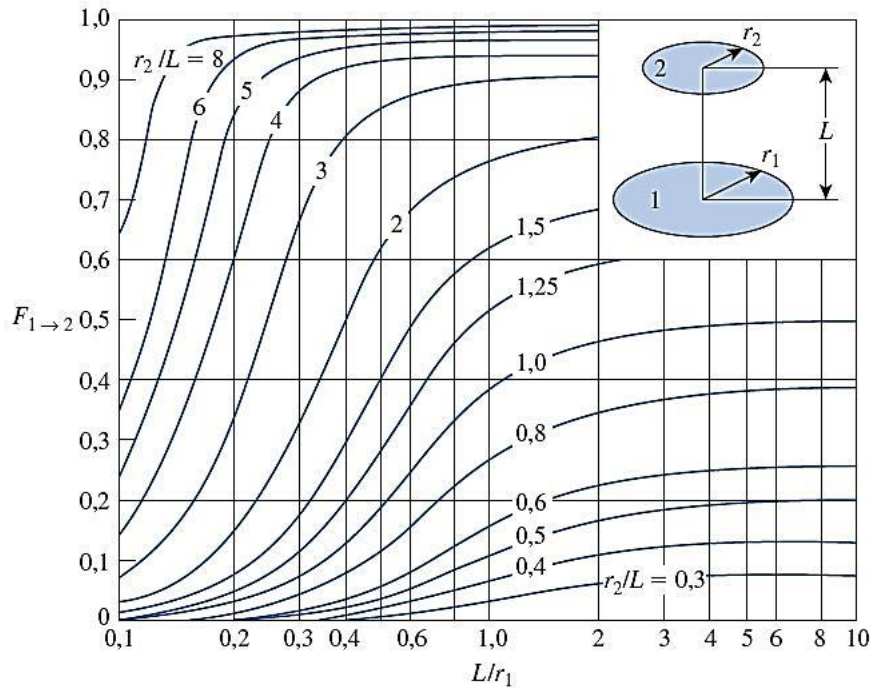


Figura 19: Fator de vista para dois discos alinhados.
(fonte: ÇENGEL & GHAJAR, 4ª edição)

$$F_{12} = \frac{1}{2} \cdot \left(S - \sqrt{S^2 - 4 \cdot (r_2/r_1)^2} \right)$$

$$R_1 = \frac{r_1}{L} \quad R_2 = \frac{r_2}{L} \quad S = \frac{1 + R_1^2 + R_2^2}{R_1^2}$$

1.5 Troca de radiação entre superfícies (meios não participantes)

Troca de radiação entre superfícies: uma dada superfície recebe radiação de outra superfície, mas também emite radiação, além de refletir a radiação incidente. Portanto, existe um valor “líquido” na troca de radiação entre as duas superfícies.

Hipóteses:

- Superfícies isotérmicas, opacas (só ocorre absorção e reflexão, $\rho = 1 - \alpha$, sem transmissão) que se portam ou como corpos negros ou como superfícies cinzas ($\alpha = \varepsilon$);
- Radiação difusa, Radiosidade e Irradiação uniformes;
- Meio não influencia a troca de radiação (não participante);
- Regime permanente.

Troca líquida de radiação entre duas superfícies i e j :

$$q_{ij} = A_i F_{ij} J_i - A_j F_{ji} J_j$$

Pela relação de reciprocidade: $A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$, então:

$$q_{ij} = A_i F_{ij} (J_i - J_j)$$

Para uma superfície, o balanço de radiação resulta no aporte de calor que deve ser suprido para manter a superfície com temperatura constante:

$$q_i = A_i (J_i - G_i)$$

- Pela definição de radiosidade e considerando-se superfícies cinzentas:

$$J_i = E_i + \rho_i G_i = \varepsilon_i E_{CN} + (1 - \alpha_i) G_i$$

$$G_i = \frac{J_i - \varepsilon_i E_{CN}}{(1 - \varepsilon_i)}$$

$$\therefore q_i = A_i \left(J_i + \frac{\varepsilon_i E_{CN} - J_i}{(1 - \varepsilon_i)} \right) = \frac{A_i \cdot \varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i} \cdot (E_{CN} - J_i)$$

- Radiação que chega à superfície i por meio de superfícies em seu entorno (inclusive dela mesma):

$$A_i G_i = \sum_j F_{ji} \cdot A_j \cdot J_j = \sum_j F_{ij} \cdot A_i \cdot J_j$$

$$G_i = \sum_j F_{ij} \cdot J_j$$

$$\therefore q_i = A_i \left(J_i - \sum_j F_{ij} \cdot J_j \right)$$

Pela regra da soma: $J_i = \sum_j F_{ij} \cdot J_j$. Então:

$$q_i = A_i \left(\sum_j F_{ij} \cdot J_i - \sum_j F_{ij} \cdot J_j \right) = \sum_j F_{ij} \cdot A_i \cdot (J_i - J_j)$$

Portanto:

$$\frac{A_i \cdot \varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i} \cdot (E_{CN} - J_i) = \sum_j F_{ij} \cdot A_i \cdot (J_i - J_j)$$

$$q_i = \sum_j q_{ij}$$

No caso de superfícies negras ($\varepsilon_i = 1, \rho_i = 0$), $J_i = E_{CN,i} = \sigma T_i^4$ e:

$$q_i = \sum_j F_{ij} \cdot A_i \cdot \sigma \cdot (T_i^4 - T_j^4)$$

Caso particular: duas superfícies dispostas formando um invólucro fechado (caso mais simples de troca de radiação entre duas superfícies).

$$q_{12} = q_1 = -q_2$$

- Radiação líquida, para a superfície 1:

$$q_1 = \frac{A_1 \cdot \varepsilon_1}{1 - \varepsilon_1} \cdot (\sigma T_1^4 - J_1)$$

- Radiação líquida, para a superfície 2:

$$q_2 = \frac{A_2 \cdot \varepsilon_2}{1 - \varepsilon_2} \cdot (\sigma T_2^4 - J_2)$$

- Troca de calor líquida entre as duas superfícies:

$$q_{12} = A_1 \cdot F_{12} \cdot (J_1 - J_2)$$

Resolvendo as equações para J_1 e J_2 :

$$q_{12} = q_1 = -q_2 = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{A_1 \cdot \varepsilon_1} + \frac{1}{A_1 \cdot F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{A_2 \cdot \varepsilon_2}}$$

O resultado se assemelha a uma definição de resistência ao transporte de calor. Obviamente, cada geometria de superfícies fechadas irá ter um resultado específico.

A equação acima pode ser expressa por:

$$q_{12} = A_1 \mathfrak{S}_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

Sendo:

$$\frac{1}{A_1 \mathfrak{S}_{12}} = \frac{1 - \varepsilon_1}{A_1 \cdot \varepsilon_1} + \frac{1}{A_1 \cdot F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{A_2 \cdot \varepsilon_2}$$

Alguns resultados para geometrias simples são descritos na **Tabela 4**. Cada um dos casos descritos pode ter um das superfícies como sendo um corpo negro num caso particular ($\varepsilon=1$). Os casos descritos podem ser estendidos para o uso de um escudo de radiação entre as duas superfícies.

Tabela 4: Troca líquida de radiação entre duas superfícies para várias geometrias.

| Geometria | Parâmetros Geométricos | Troca Líquida |
|---|--|--|
| Placas planas infinitas paralelas | $A = A_1 = A_2$ $F_{12} = 1$ | $q_{12} = \frac{A \cdot \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$ |
| Cilindros infinitos Concêntricos | $A_1 = 2\pi \cdot r_1 L$ $A_2 = 2\pi \cdot r_2 L$ $F_{12} = 1$ | $q_{12} = \frac{2\pi \cdot L \cdot \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{r_1 \cdot \varepsilon_1} + \frac{1}{r_2 \cdot \varepsilon_2} - \frac{1}{r_2}}$ |
| Esferas concêntricas | $A_1 = 4\pi \cdot r_1^2$ $A_2 = 4\pi \cdot r_2^2$ $F_{12} = 1$ | $q_{12} = \frac{4\pi \cdot \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{r_1^2 \cdot \varepsilon_1} + \frac{1}{r_2^2 \cdot \varepsilon_2} - \frac{1}{r_2^2}}$ |
| Pequeno objeto convexo em uma grande superfície fechada | $A_1 = A$ $A_2 \rightarrow \infty$ $F_{12} = 1$ | $q_{12} = A \cdot \sigma \cdot \varepsilon_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4)$ |

Considerando-se o caso de três superfícies, sendo uma refratária (R), tem-se a seguinte expressão para a troca líquida entre as outras duas (1 e 2):

$$q_{12} = q_1 = -q_2 = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{A_1 \cdot \varepsilon_1} + \frac{1}{A_1 \cdot F_{12} + \left[\left(\frac{1}{A_1 F_{1R}} \right) + \left(\frac{1}{A_1 F_{2R}} \right) \right]^{-1}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{A_2 \cdot \varepsilon_2}}$$

1.6 Meio Participante

Meio participante: quando o meio interfere na troca de radiação. Particulados em suspensão (sólidos, gotículas, névoas) e moléculas como CO, CO₂, NH₃, SO₂, H₂S e H₂O agem como meio participante. Gases simples (moléculas pouco polares), como N₂, H₂ e O₂, são praticamente transparentes, e, assim, não interferem na troca de radiação.

Lei de Beer: uma radiação de intensidade $I_{\lambda,0}$ incide em uma camada fixa de gás, deixando a região com intensidade $I_{\lambda,L}$, menor que a inicial (**Figura 20**). Por hipótese, a região apenas absorve e transmite a radiação, de forma que $\alpha_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1$.

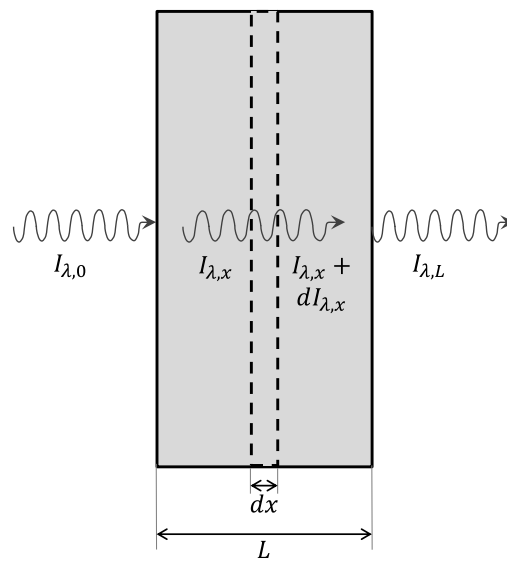


Figura 20: Interação do gás reduzindo a intensidade da radiação incidente.

Experimentalmente, constata-se que:

$$dI_{\lambda,x} = -K_{\lambda} \cdot I_{\lambda,x} dx$$

K_{λ} é o coeficiente de extinção molar ou de absorção (m^{-1}) e depende da composição do gás, da temperatura deste e do comprimento de onda. Integrando-se a expressão acima entre $x=0$ e $x=L$ tem-se:

$$I_{\lambda,L} = I_{\lambda,0} \cdot e^{-K_{\lambda}L}$$

A transmissividade é dada por: $I_{\lambda,L}/I_{\lambda,0} = \tau_{\lambda} = 1 - \alpha_{\lambda}$. Daí, vem a forma clássica da Lei de Beer ou Lei da Absorção Volumétrica. Esta lei também é válida para líquidos e meios semitransparentes.

$$\tau_{\lambda} = e^{-K_{\lambda}L}$$

Da Lei de Kirchoff, tem-se:

$$\varepsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda} = 1 - e^{-K_{\lambda}L}$$

Método de Hottel: considera a troca de radiação entre uma massa gasosa hemisférica à temperatura T_g e uma pequena superfície negra em seu centro (**Figura 21**).

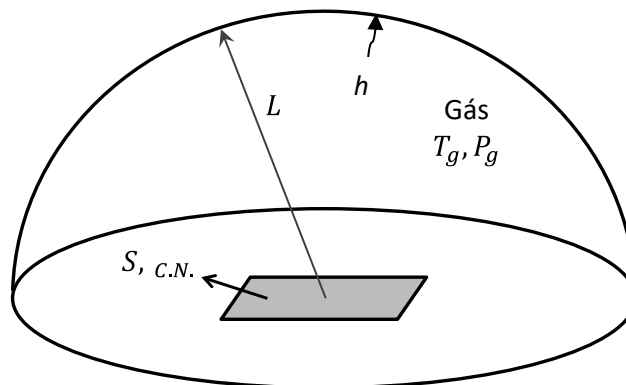


Figura 21: Método de Hottel para definição da emissividade de um gás e interação com uma superfície S.

Hottel define a emissividade do gás como a razão entre a radiação emitida do gás para a superfície ($q_{g \rightarrow s}$) e a radiação emitida para uma casca hemisférica (negra e com temperatura T_g) ($q_{h \rightarrow s}$):

$$q_{g \rightarrow s} = \varepsilon_g \cdot A_s \cdot \sigma \cdot T_g^4$$

$$q_{h \rightarrow s} = A_h \cdot F_{hs} \cdot \sigma \cdot T_g^4 = A_s \cdot \sigma \cdot T_g^4 \quad \text{pela regra da reciprocidade, } F_{sh} = 1$$

$$\therefore \frac{q_{g \rightarrow s}}{q_{h \rightarrow s}} = \frac{\varepsilon_g \cdot A_s \cdot \sigma \cdot T_g^4}{A_s \cdot \sigma \cdot T_g^4} = \varepsilon_g$$

A emissividade ε_g corresponde à emissão de um volume de gás hemisférico de raio L . Este resultado pode ser estendido para outros volumes de gases, definindo-se, assim, o comprimento médio de feixe radiante.

A troca líquida de radiação entre o gás e uma superfície S , negra com temperatura T_s , é dada por:

$$q = q_{g \rightarrow s} - q_{s \rightarrow g} = \sigma \cdot A_s \cdot (\varepsilon_g \cdot T_g^4 - \alpha_g \cdot T_s^4)$$

Como $T_g \neq T_s$, não se aplica a Lei de Kirchoff (as radiações emitida e absorvida são de “qualidades” diferentes). A determinação de ε_g e α_g depende de alguns fatores, como a temperatura do gás, a sua pressão parcial, a sua composição e a geometria do problema, que nem sempre é esférica.

O valor de ε_g é calculado pela seguinte equação:

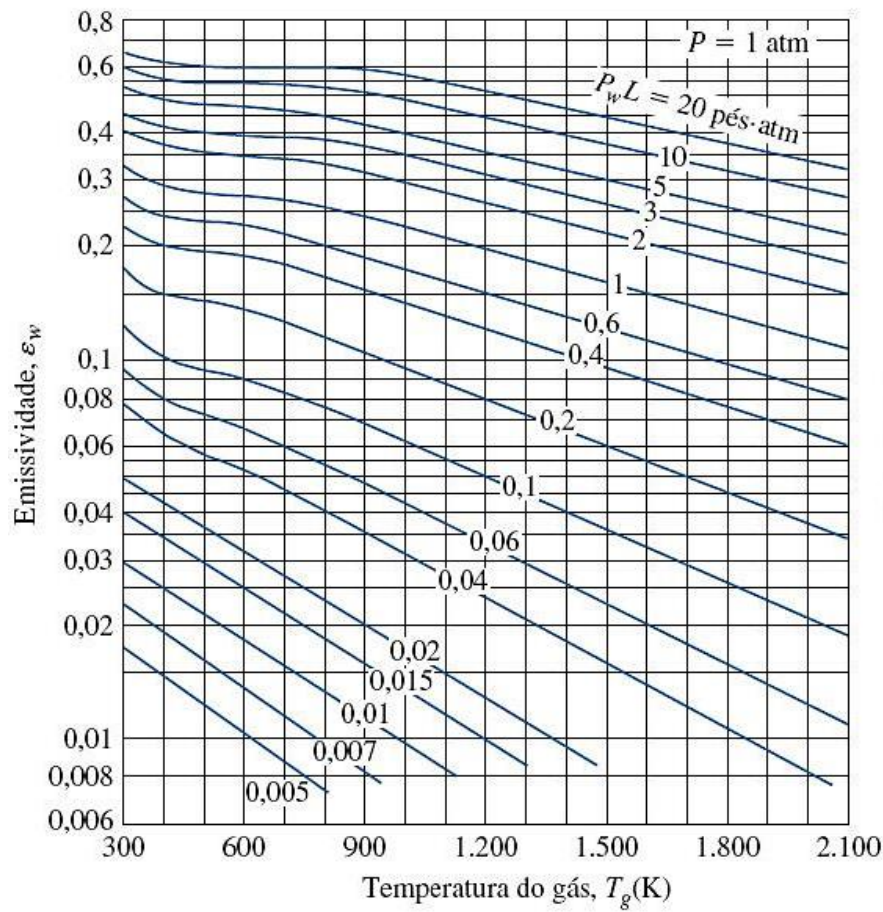
$$\varepsilon_g = \sum C_i \cdot \varepsilon_i - \Delta\varepsilon$$

Em que ε_i é a emissividade de cada componente i da mistura gasosa, C_i é um fator de correção para pressões totais acima de 1 atm e $\Delta\varepsilon$ é a variação da emissividade devido à presença de diferentes gases. Todos estes valores são encontrados por meio de correlações gráficas. As **Figuras 22, 23 e 24** mostram, respectivamente, o valor de ε_i para vapor d’água e dióxido de carbono, os fatores de correção de pressão para vapor d’água e dióxido de carbono e os desvios de emissividade por efeito devido à presença de diferentes gases.

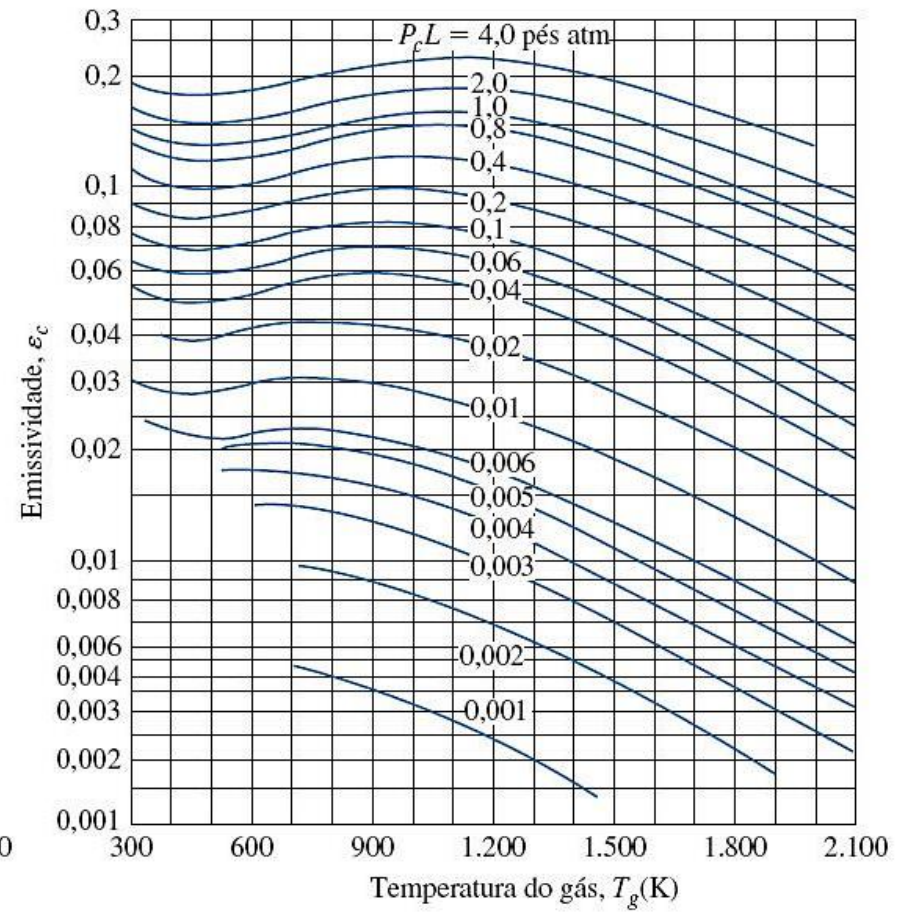
A **Tabela 5** apresenta o comprimento médio de feixe radiante para diferentes geometrias.

Tabela 5 Comprimento médio de feixe radiante para diferentes geometrias.

| Geometria | Comprimento característico | L_e |
|---|-------------------------------|-----------|
| Esfera | Diâmetro D | 0,65 D |
| Cilindro infinito | Diâmetro D | 0,95 D |
| Espaço entre planos paralelos infinitos | Distância entre os planos L | 1,80 L |
| Cilindro de altura igual ao diâmetro | Diâmetro D | 0,60 D |
| Cubo | Lado L | 0,66 L |
| Forma genérica de volume V irradiando para área A | V/A | 3,6 V/A |



(a) H₂O



(b) CO₂

Figura 22: Emissividade de vapor d'água (a) e gás carbônico (b) em função da temperatura, pressão parcial e geometria.

(Fonte: ÇENGEL, Y.A., GHAJAR, A. F. 4ª edição).

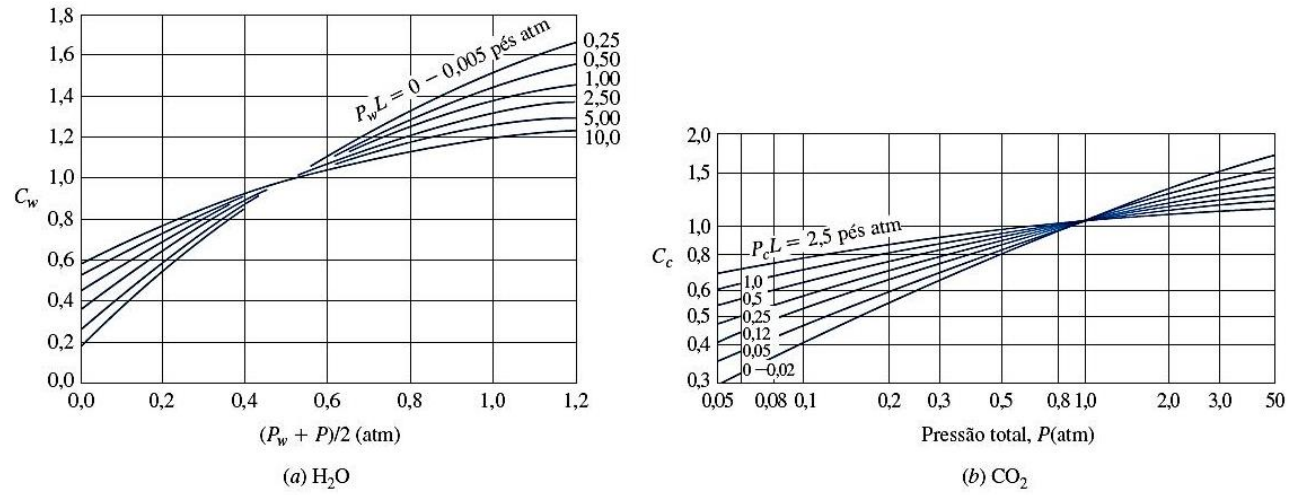


Figura 23: Fator de correção da emissividade em função da pressão para o vapor d'água (a) e gás carbônico (b).

(Fonte: ÇENGEL, Y.A., GHAJAR, A. F. 4ª edição)

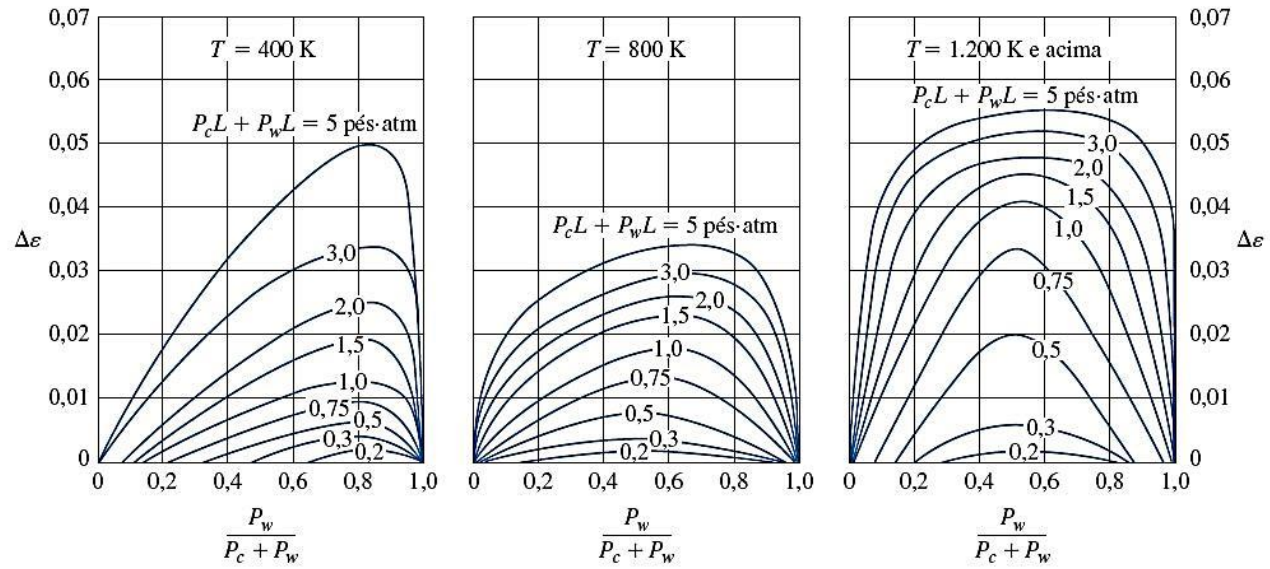


Figura 24: Fator de correção da emissividade pela mistura de vapor d'água e de gás carbônico.

(Fonte: ÇENGEL, Y.A., GHAJAR, A. F. 4ª edição)

Quanto à absorptividade do gás, pode-se utilizar uma expressão semelhante à do cálculo da emissividade:

$$\alpha_g = \sum \alpha_i - \Delta\alpha$$

onde cada α_i é dado pela expressão abaixo e $\Delta\alpha = \Delta\varepsilon$ para uma mesma mistura de gases.

$$\alpha_i = C_i \cdot \varepsilon'_i \left(\frac{T_g}{T_s} \right)^n$$

onde C_i é o coeficiente de correção pro pressão da **Figura 23** e ε'_i é a emissividade lida na **Figura 22**, mas com o parâmetro $P_i \cdot L \cdot \left(\frac{T_s}{T_g} \right)$ ao invés do parâmetro $P_i \cdot L$. Para água, $n = 0,45$ e, para o dióxido de carbono, $n = 0,65$.

Anexo:

Tabela 6: Propriedades de materiais: absorptividade (radiação solar) e emissividade (300 K).

| Materiais | α_s | ε_{300K} | $\alpha_s/\varepsilon_{300K}$ |
|-------------------------|------------|----------------------|-------------------------------|
| Alumínio | | | |
| Polido | 0,09 | 0,03 | 3,0 |
| Anodizado | 0,14 | 0,84 | 0,17 |
| Revestido com sílica | 0,11 | 0,37 | 0,30 |
| Folha | 0,15 | 0,05 | 3,0 |
| Concreto | 0,60 | 0,88 | 0,68 |
| Metal galvanizado | | | |
| Novo | 0,65 | 0,13 | 5,0 |
| Oxidado | 0,80 | 0,28 | 2,9 |
| Metal revestido | | | |
| Sulfeto negro | 0,92 | 0,10 | 9,2 |
| Óxido de cobalto negro | 0,93 | 0,30 | 3,1 |
| Óxido de níquel negro | 0,92 | 0,08 | 11,0 |
| Cromo negro | 0,87 | 0,09 | 9,7 |
| Neve | | | |
| Partículas finas | 0,13 | 0,82 | 0,16 |
| Grânulos de gelo | 0,33 | 0,89 | 0,37 |
| Tijolo vermelho | 0,63 | 0,93 | 0,68 |
| Tintas | | | |
| Negra ("Parsons") | 0,98 | 0,98 | 1,0 |
| Branca (acrílica) | 0,26 | 0,90 | 0,29 |
| Branca (óxido de zinco) | 0,16 | 0,93 | 0,17 |

2. EXERCÍCIOS

- 1) As transmissividades espectrais de vidros fabricados num dado processo são dadas pelas funções (do tipo degrau) abaixo. Compare a fração de energia que seria transmitida por cada um dos dois vidros caso eles fossem irradiados com radiação solar. Compare a fração de energia radiante que seria transmitida apenas na faixa do visível, para cada um dos vidros.

Vidro simples: $\tau = 0,9$ se $0,3 \leq \lambda \leq 2,5 \mu\text{m}$; $\tau = 0$ c. c.

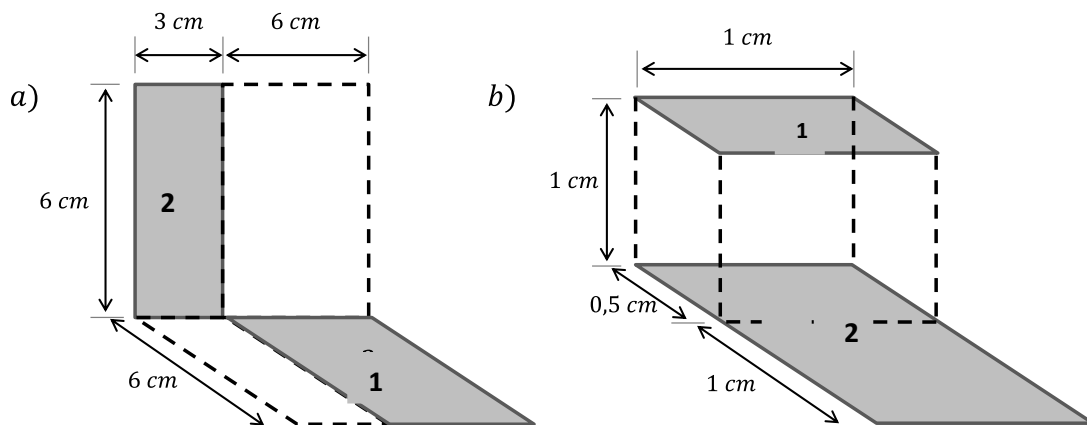
Vidro colorido: $\tau = 0,9$ se $0,5 \leq \lambda \leq 1,5 \mu\text{m}$; $\tau = 0$ c. c.

- 2) Ao escolher o revestimento para o telhado de sua casa, um especialista em radiação solar consultou dados sobre a absorptividade espectral de dois materiais, A e B. Para comprimentos de onda entre 0 e $20 \mu\text{m}$, o material A tem absorptividade de 0,8. O material B tem absorptividade 0,6 para comprimentos de onda entre 0 e $4 \mu\text{m}$ e 0,2 para comprimentos de onda entre 4 e $20 \mu\text{m}$. Após a consulta, o especialista indicou quais os melhores materiais a serem utilizados no inverno e no verão. Quais foram as escolhas do especialista?
- 3) O Sol pode ser considerado, para efeitos de radiação térmica, como um corpo negro esférico de diâmetro de $1,393 \cdot 10^9$ m com temperatura de 5778 K. A Terra encontra-se a uma distância de $1.496 \cdot 10^{11}$ m do Sol, e o fluxo de radiação na superfície logo acima da atmosfera terrestre é denominada constante solar, S_c . Estime esta constante, nos seguintes casos:
- Incidência de radiação normal à superfície da atmosfera terrestre.
 - Incidência de radiação com um ângulo de 25° , com a normal ao solo.
 - A potência que é fornecida à região iluminada da terra, considerando que a Terra tem $6,371 \cdot 10^6$ m de raio.
- 4) Um grupo de alunos, interessados em estudar a transferência de calor por radiação solar, subiu ao topo do edifício Semi-Industrial e deixou um balão de vidro, cheio de água sob a luz solar, entre 11h da manhã e o meio-dia, acompanhando a evolução da temperatura da água com um termômetro e sempre agitando o conteúdo do balão. Utilizando dados de radiação solar de um medidor que se encontra no topo do mesmo edifício, os alunos determinaram que o fluxo de radiação que chegava no local era 79,5% da constante solar e que ele podia ser considerado mais ou menos constante ao longo do tempo. A tabela dos dados obtidos pelos alunos é apresentada abaixo. Considere os seguintes dados: volume do balão = 1 L, temperatura ambiente = 28°C e coeficiente global de troca térmica externo = $54,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ devido ao vento durante o experimento. Ainda, segundo dados da literatura, a absorptividade da água é 75%.

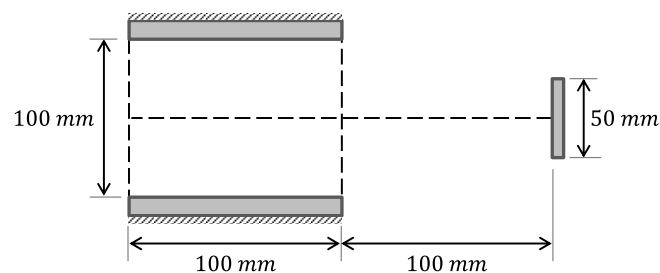
| Hora | T ($^\circ\text{C}$) | | |
|-------|------------------------|-------|------|
| | | 11:20 | 26 |
| 11:00 | 20 | 11:30 | 27,2 |
| 11:05 | 23,2 | 11:40 | 28,7 |
| 11:10 | 24,2 | 11:50 | 30 |
| 11:15 | 25 | 12:00 | 30,5 |

- a) Desenvolva um modelo para prever a temperatura da água ao longo do tempo e verifique se este condiz com os dados obtidos pelos alunos. Explícite as simplificações realizadas.
- b) Qual o valor da temperatura que a água do balão atingiria se fosse deixada no sol com a mesma intensidade de radiação e mesmas condições de vento por muito tempo.
- c) Caso o experimento tivesse sido realizado em horários do dia diferentes, a hipótese de irradiação constante poderia ser considerada válida? Que outros fatores poderiam influenciar nesta hipótese?
- 5) Num dia com céu limpo, irradiação solar de 1100 W/m^2 incide sobre um telhado metálico horizontal e plano, cuja face inferior é isolada termicamente e a face superior tem absorvidade de 0,6 e emissividade de 0,2 (valores válidos para o espectro solar). O vento causa um coeficiente de troca por convecção de $25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e sua temperatura é de $27 \text{ }^\circ\text{C}$. Pede-se estimar a temperatura do telhado em condições de regime permanente.
- 6) O teto de um compartimento de um caminhão frigorífico é constituído de uma fina placa metálica de 5 m de comprimento e 2 m de largura acoplada a uma espuma isolante de 25 mm de espessura e $k = 0,05 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, de forma a manter a temperatura no interior do caminhão em $-13 \text{ }^\circ\text{C}$. Um engenheiro previu que, durante a operação, o movimento do caminhão causava um coeficiente de transferência de calor por convecção de $68,3 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ com o ar a $27 \text{ }^\circ\text{C}$ e uma irradiação solar de 900 W/m^2 . Perguntado sobre qual tinta utilizar para pintar a face externa da chapa metálica (Preta, Branca acrílica ou Branca de ZnO), o engenheiro tomou sua decisão com base nas absorvidades (solar) e emissividades e estimou a temperatura da face externa caso a sua tinta escolhida fosse utilizada. De modo a minimizar a carga térmica do sistema de refrigeração, determine: a tinta que o engenheiro deve ter escolhido, a temperatura da face externa e a carga térmica.
- 7) Um conceito por muitas vezes utilizado é o de *temperatura do céu*, que seria a temperatura que o céu teria caso ele fosse uma superfície infinita que engloba o planeta e que se porta como um corpo negro de forma que a energia trocada por radiação ambiental possa ser estimada. A temperatura do céu é mais elevada quando o dia está fechado, pois a radiação é “retida” pelas nuvens mas, numa noite de céu limpo, a superfície terrestre literalmente perde calor para o céu por radiação, de forma que a temperatura do céu pode atingir valor de até $-40 \text{ }^\circ\text{C}$. Nesta situação, com ar ambiente a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ e estagnado ($h \approx 5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), é possível que a água em regiões superficiais ou de orvalho congele (fenômeno da geada)? Se sim, qual deveria ser o valor limite de h para que isto não ocorresse?

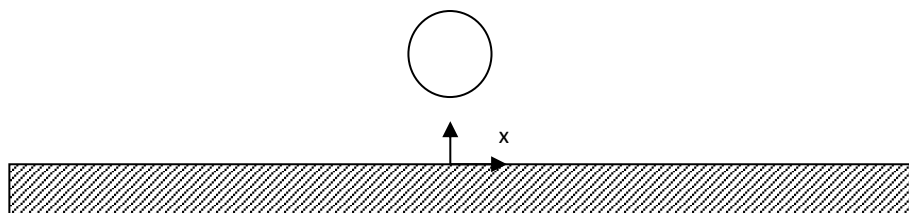
8) Determine os fatores de forma F_{12} para os casos abaixo.



9) Um aquecedor tubular tem temperatura de sua superfície interna de 1000 K e pode ser considerada como um corpo negro, sendo a superfície externa isolada termicamente. Esse tubo irradia energia para um disco que se localiza coaxialmente ao tubo. Determine esta irradiação sobre o disco. (Vide figura abaixo).



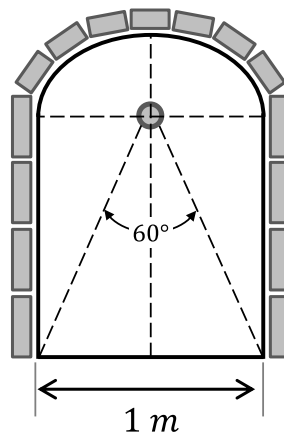
10) Um elemento aquecedor cilíndrico longo com 20 mm de diâmetro e a 700 K está no vácuo. Ele está posicionado a 40 mm de uma superfície perfeitamente isolada na sua face inferior. Considerando-se que o cilindro e a superfície são negras e admitindo-se que a vizinhança (vácuo) encontra-se a 300 K, deduza o perfil de temperatura ao longo do comprimento x da superfície e calcule a temperatura máxima que esta irá atingir.



11) A fim de mitigar a perda de calor de um duto que transporta um fluido de processo quente, colocou-se uma blindagem de radiação concentricamente ao duto, fazendo-se vácuo no espaço anular. A blindagem tem 60 mm de diâmetro e espessura desprezível e o tubo tem 20 mm de diâmetro. As emissividades interna e externa da blindagem são, respectivamente, 0,01 e 0,1, sendo que a parede externa da blindagem está exposta a um ambiente cujos entornos estão à 17 °C e tem-se transferência de calor por convecção

com coeficiente de $10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ com ar à 27°C . Determine a temperatura da superfície externa do tubo (corpo negro) de forma que a blindagem seja mantida a 42°C .

- 12) Utiliza-se um aquecedor com formato de disco de 200 mm de diâmetro para aquecer um recipiente, na forma cilíndrica e diâmetro 200 mm , com água, de forma que o recipiente fica suspenso a 100 mm do aquecedor, que se encontra a 1000°C . Considere a água em ebulição a 100°C . De quanto se aumentaria a produção de vapor de água se o espaço cilíndrico entre o aquecedor e base do recipiente fosse isolado ao invés de estarem expostos a uma vizinhança mantida a 27°C ? Considere que as superfícies se portam como corpos negros.
- 13) A figura abaixo mostra a secção transversal de um forno longo, cujo teto tem formato de uma calha cilíndrica. As paredes internas são construídas de tijolo refratário (agindo como uma superfície cinzenta com emissividade $0,9$) e o elemento aquecedor é um bastão de 10 mm de diâmetro que pode ser considerado como um corpo negro cuja temperatura é mantida em 1500 K . A base do forno mede 1 m e sua superfície é cinzenta, com emissividade de $0,6$ e temperatura mantida em 500 K . Considerando que não há ar dentro do forno, calcule a potência por unidade de comprimento que deve ser suprida ao elemento aquecedor. Calcule também a temperatura da parede interna do forno, considerando-a isotérmica.

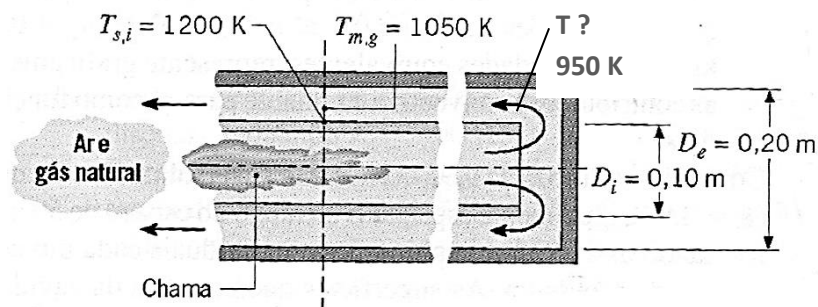


- 14) Obtenha uma expressão para o poder emissivo espectral de um corpo negro, E_ν , expresso em função da frequência ν . Dados: poder emissivo espectral de um corpo negro, E_λ , expresso em função comprimento de onda λ e relação frequência e comprimento de onda.

$$E_\lambda = \frac{2\pi hc_0^2 \lambda^{-5}}{n^2 \left(e^{n\lambda kT} - 1 \right)} \quad ; \quad \lambda\nu = \frac{c_0}{n}$$

- 15) Duas placas planas infinitas paralelas trocam radiação. As suas superfícies internas são cinzentas com $\varepsilon = 0,5$. A placa superior é mantida a 400 K . Na placa inferior a face interna tem transferência de calor por convecção com ar a 300 K e $h = 50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e a face externa é isolada termicamente. Pede-se:
- A temperatura da placa inferior.
 - Estimar o fluxo de energia radiante que chega à superfície interna da placa superior.

- 16) Uma garrafa térmica cilíndrica possui 30 cm de altura. A garrafa interna tem 7 cm de diâmetro e encontra-se acoplada concentricamente a uma superfície que age como uma blindagem de radiação de 8 cm de diâmetro, havendo ar no espaço entre as duas superfícies. Tanto a superfície interna da garrafa quanto a interna da blindagem são revestidas com prata, de forma que ambas as emissividades são de 0,25. Se a superfície interna da blindagem encontra-se a 35 °C e a superfície interna da garrafa encontra-se a 75 °C, qual a perda térmica por radiação da garrafa de café?
- 17) Uma parede plana que pode ser considerada como um corpo negro a 400 K encontra-se voltada para uma barreira de radiação com refletividade de 0,95. Fixada atrás da barreira, há uma parede de material isolante ($k = 0,016 \text{ W.m/K}$) com 25 mm de espessura. Na outra face da parede de isolante, ar ambiente e uma vizinhança a 300 K produzem um coeficiente global de troca térmica (que inclui radiação e convecção) de $10 \text{ W/m}^2.\text{K}$. Determine a perda de calor por unidade de área da parede quente.
- 18) A figura abaixo mostra um tubo radiante de gás do tipo recuperativo de extremidade única. Uma mistura de ar e gás natural é injetada na extremidade esquerda do tubo central e a combustão completa-se enquanto os gases ainda encontram-se no tubo interno. Os gases de combustão são descarregados na região anular. Medições realizadas com termopares em uma posição axial particular indicam que a temperatura da parede do tubo interno é de 1200 K e que a temperatura da região anular é de 1050 K. O tubo radiante está localizado no interior de um forno, cujas paredes internas encontram-se a 950 K. O ar no interior do forno está relativamente estagnado, podendo-se considerar um coeficiente de troca por convecção de $3,8 \text{ W/m}^2.\text{K}$ e sua temperatura também é de 950 K. Os tubos possuem paredes finas com emissividade de 0,6. Calcule a temperatura da parede do tubo radiante admitindo que os gases de combustão não interferem na troca de calor por radiação e que dentro do tubo $h = 28,9 \text{ W/m}^2.\text{K}$.



- 19) Considere um forno cúbico de aresta 2 m, cujo teto é mantido a 1000 K e o piso a 500 K, sendo as demais paredes refratárias. Assumindo-se que o teto e o chão são superfícies negras, determine a troca líquida de radiação entre o teto e o chão.
- 20) Repita o exercício anterior, considerando-se:
- $\epsilon_{\text{teto}} = 1,0$ e $\epsilon_{\text{piso}} = 0,8$
 - $\epsilon_{\text{teto}} = 0,8$ e $\epsilon_{\text{piso}} = 0,8$

- 21) Em uma tubulação escoo gás quente (figura anexa), cuja temperatura é medida por meio de um termopar. A indicação do termopar é $T_1 = 800$ K. Sabe-se que a temperatura da parede da tubulação é $T_2 = 500$ K. O coeficiente convectivo de transferência de calor entre o gás e a superfície do termopar é $h = 120$ W/(m². °C). As emissividades da superfície do termopar e da tubulação são, respectivamente, 0,8 e 0,565. Considere o gás como meio não participante (transparente à radiação) e condição de regime permanente. O termopar é cilíndrico, longo, de diâmetro = 5 mm e não conduz calor para fora (isolado). A tubulação tem diâmetro interno = 100 mm e é longa. Calcule a temperatura real do gás T_G . Calcule o “erro” do termopar (diferença entre T_G e T_1).
- 22) Considere o mesmo problema do exercício anterior. Para minimizar o “erro” do termopar, instala-se uma blindagem, na forma de um longo e fino tubo metálico de diâmetro 20 mm e emissividade $\epsilon_{blindagem} = 0,3$ (superfícies interna e externa). Considere a indicação do termopar $T_1 = 800$ K e a temperatura da parede da tubulação $T_2 = 500$ K. Os coeficientes convectivos de transferência de calor entre o gás e a superfície do termopar e entre o gás e a blindagem podem ser considerados iguais a $h = 100$ W/(m². °C). O coeficiente convectivo de transferência de calor entre o gás e a superfície do termopar é $h = 120$ W/(m².°C). As emissividades da superfície do termopar e da tubulação são, respectivamente, 0,8 e 0,565. Calcule: a) temperatura real do gás T_G , b) o “erro” do termopar (diferença entre T_G e T_1) e c) a temperatura da blindagem.

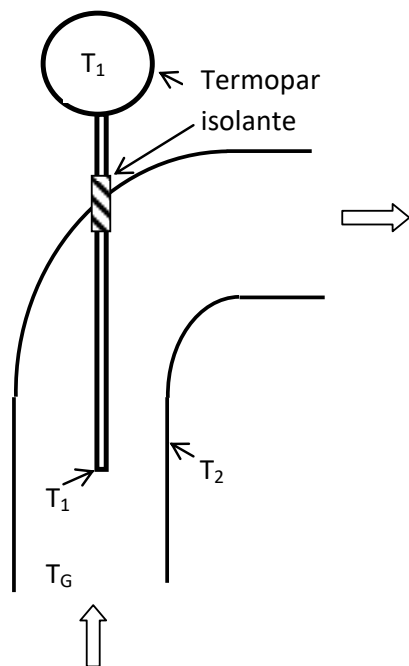


Figura – ex .21

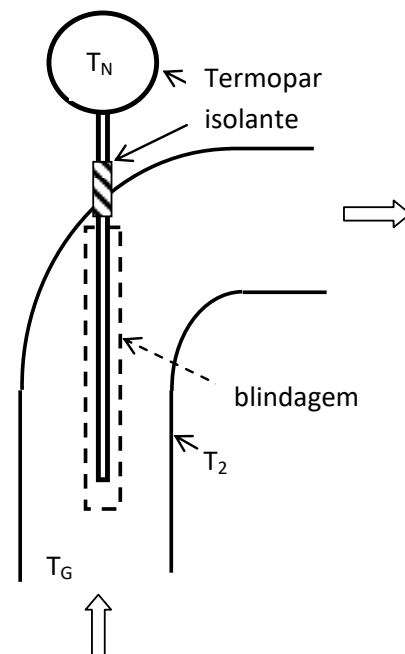


Figura – ex. 22

- 23) Um forno consiste de em duas placas grandes paralelas separadas por uma distância de 0,75 m. Uma mistura composta de O₂, N₂, CO₂ e H₂O, com frações molares de 0,20, 0,50, 0,15 e 0,15, respectivamente, escoo entre as placas a uma pressão total de 2 atm e

temperatura de 1300 K. As placas são superfícies negras e mantidas a 500 K. Estime o fluxo de radiação entre o gás e uma das placas.

- 24) Produtos de combustão, a 2000 K e 1 atm, escoam em um tubo metálico muito fino de 0,25 m de diâmetro, cuja superfície interna é negra. O gás é composto de 10% molar de CO₂ e 10% molar de H₂O. O coeficiente de convecção interno é de 29 W/(m².°C). Externamente ao tubo tem-se o escoamento de água líquida a 300 K, com coeficiente de convecção 1130 W/(m².°C). Estime a temperatura do tubo e fluxo de calor.

RESPOSTAS

| Questão | Respostas |
|---------|--|
| 1 | Todo o espectro - simples: 84%, colorido: 57% Espectro visível - simples: 37%, colorido: 58% |
| 2 | Verão: A; Inverno: B |
| 3 | a) $S_c \approx 1356 \text{ W/m}^2$; b) 1229 W/m^2 ; c) $4,323 \cdot 10^{16} \text{ W}$ |
| 4 | a) $T(t) = T_0 e^{-\frac{6Ut}{\rho c_p D}} + \left(\frac{\alpha G_{rad}}{4U} + T_\infty \right) \left(1 - e^{-\frac{6Ut}{\rho c_p D}} \right)$ b) 31,7 °C |
| 5 | 48,35 °C |
| 6 | Tinta de ZnO (menor α); 22 °C; 704 W |
| 7 | Sim, pois a temperatura da água atingiria -4,7 °C; 7,2 W/m ² .K |
| 8 | a) 0,038; b) 0,23 |
| 9 | 6825 W/m ² |
| 10 | 439 K |
| 11 | 745 K |
| 12 | 83% |
| 13 | 8518 W/m ; 733 K |
| 14 | $E_\lambda = \frac{2\pi h\nu^3 n^2}{c_0^2 \left(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \right)}$ |
| 15 | a) 306 K; b) 816 W/m ² |
| 16 | 3,2 W |
| 17 | 30 W/m ² |
| 18 | 1040 K |
| 19 | 128 kW |
| 20 | a) 21,6 kW; b) 21,0 kW |
| 21 | 931 K e 131 K |
| 22 | 808,3 K, 8,3 K e 783,7 K |
| 23 | 63780 W/m ² |
| 24 | 380 K, 90 kW/m ² |

3. LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Nome | Modificador | Unidade (SI) |
|-----------------|--|--|--------------|
| A | Área | h – do hemisfério | m^2 |
| | | s – da superfície | |
| | | t – que emite radiação | |
| C_1, C_2, C_i | Constantes | - | - |
| c_p | Calor específico à pressão constante | - | J/kg.K |
| c_0 | Velocidade da luz no vácuo | - | m/s |
| E | Poder emissivo | CN – corpo negro | W/m^2 |
| | | i, j – da superfície i ou j | |
| | | s – da superfície | |
| | | λ – espectral | |
| | | θ – não-difusa | |
| F | Fração de emissão | $(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2)$ – da banda entre λ_1 e λ_2 | Adim. |
| | Fator de vista ou de forma | ij – entre as superfície i e j | Adim. |
| f | Frequência | λ – espectral | Hz |
| G | Irradiação | λ – espectral | W/m^2 |
| | | abs - absorvida | |
| | | ref - refletida | |
| | | trs – transmitida | |
| | | i, j - da superfície i ou j | |
| h | Coefficiente convectivo de troca térmica | - | $W/m^2.K$ |
| | Constante de Planck | - | J.s |
| I | Intensidade de radiação | λ – espectral | W/m^2 |
| | | 0 – sem interação | |
| | | L,x – com interação | |
| i, j, k, n | Índice em geral | - | - |
| J | Radiosidade | i, j - da superfície i ou j | W/m^2 |
| K | Coefficiente de absorção | λ – espectral | m^{-1} |
| k | Condutividade térmica | - | J/m.K |
| | Constante de Boltzmann | - | J/K |
| L, x, D | Comprimento ou diâmetro | - | m |
| n | Índice de refração | - | Adim. |
| P | Pressão | g – do gás | Pa |
| q | Calor | i, j - da superfície i ou j | W |
| | | ij – de troca líquida entre i e j | |
| | | $i \rightarrow j$ – da superfície i para a superfície j | |
| q'' | Fluxo de calor | λ – espectral | W/m^2 |
| R, r | Raio, coordenada radial | | m |
| T | Temperatura | g – do gás | K |
| | | i, j - da superfície i ou j | |
| | | s - da superfície | |
| V | Volume | g – ocupado com gás | m^3 |
| α | Absortividade | g – do gás | Adim. |
| | | λ – espectral | |
| Δ | Varição | - | - |
| ε | Emissividade | g – do gás | Adim. |
| | | λ – espectral | |
| | | θ – não-difusa | |
| λ | Comprimento de onda | max – valor da Lei de Wien | m |
| ρ | Refletividade | λ – espectral | Adim. |
| σ | Constante de Stefan-Boltzmann | - | $W/m^2.K^4$ |
| τ | Transmitância | λ – espectral | Adim. |
| θ | Coordenada de altitude | | rad |
| φ | Coordenada de azimute | | rad |
| ω | Ângulo sólido | | srad |

4. BIBLIOGRAFIA

1. INCROPERA, F.P et al – Fundamentos de Transferência de Calor e Massa – 6ª Edição – 2008 – LTC – Rio de Janeiro, Brasil.
2. KREITH, F. – Princípios de Transmissão de Calor – Tradução da 3ª edição americana – 1977 – Edgard Blücher – São Paulo, Brasil.
3. ÇENGEL, Y.A., GHAJAR, A. F. – Transferência de calor e massa – 4ª edição – 2011 - McGraw-Hill.
4. Lide, D.R. - *CRC Handbook of Chemistry and Physics* – 85ª edição – CRC Press – Boca Raton, USA, 2005.