
2. Processos de Transmissão de Calor

Para se proceder ao estudo do comportamento térmico de uma edificação é necessário o conhecimento de diversos assuntos, dentre os quais podem ser citados:

- fisiologia térmica dos ocupantes da edificação;
- climatologia;
- processos de transmissão de calor.

Neste capítulo são estudados os processos de transmissão de calor, bem como as propriedades térmicas dos materiais envolvidos nos processos de troca de calor.

O calor ou energia térmica se transmite por duas razões:

- existência de um gradiente de temperatura entre os corpos;
- mudança de estado físico.

Quando um corpo troca calor devido à existência de diferenças de temperatura, chama-se essa forma de transferência de calor de **troca seca** e a energia transmitida de **calor sensível**, enquanto que a transferência de calor que envolve mudança de estado, chama-se **troca úmida** e a energia transmitida de **calor latente**.

2.1. Trocas térmicas secas (calor sensível)

Constituem as formas de transferência de calor que ocorrem devido a um gradiente de temperatura, podendo ocorrer por **condução**, **convecção** ou **radiação**.

2.1.1. Transmissão de calor por condução

Trata-se da transmissão de calor molécula a molécula, conseqüentemente havendo necessidade de um meio material, ocorrendo sempre de um ponto de maior potencial energético (maior temperatura) para um de menor potencial (menor temperatura).

Verifica-se experimentalmente que a quantidade de calor que flui através de um elemento opaco é função do material que o constitui, da espessura do elemento e do gradiente de temperatura. A grandeza física que caracteriza se um material é melhor ou pior condutor de calor chama-se condutibilidade térmica (k). A figura 1 ilustra o processo de transmissão de calor por condução.

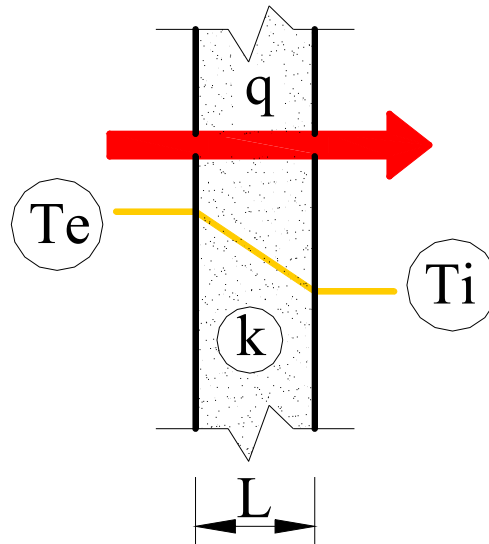


Figura 1: Transmissão de calor por condução.

$$q = k \cdot \frac{\Delta T}{L} \rightarrow Q = S \cdot k \cdot \frac{\Delta T}{L} \rightarrow E = S \cdot k \cdot \frac{\Delta T}{L} \cdot \Delta t \dots\dots\dots \text{Eq. 1, 2 e 3, respectivamente.}$$

onde:

- q = intensidade de fluxo de calor, em W/m²;
- Q = intensidade total de fluxo de calor, em W (J/s);
- E = energia (calor), em J;
- k = condutibilidade térmica do material, em W/m. °C;
- ΔT = diferença de temperatura entre exterior e interior, em °C;
- Δt = intervalo de tempo;
- S = área atravessada pelo fluxo de calor, em m²;
- L = espessura da parede, em m.

A equação 1 pode ser re-escrita da seguinte forma:

$$q = \frac{\Delta T}{R_t} \text{ ou } q = K_t \cdot \Delta T \dots\dots\dots \text{Eq. 4 e 5, respectivamente.}$$

onde:

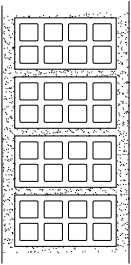
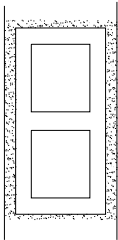
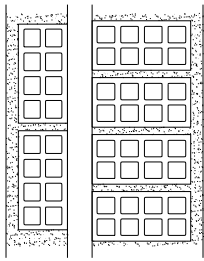
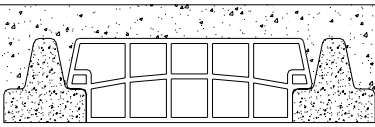
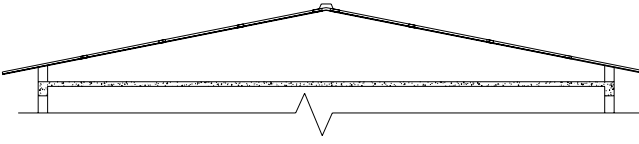
- q = intensidade de fluxo de calor, em W/m²;
- R_t = resistência térmica do material, sendo R_t=L/k, em m². °C/W;
- K_t = condutância térmica do material, sendo K_t=1/R_t, em W/m². °C;
- ΔT = diferença de temperatura entre exterior e interior, em °C.

A tabela 1 apresenta valores de condutibilidade térmica de diversos materiais, enquanto na tabela 2 são apresentados valores de resistências térmicas de diversos elementos construtivos.

Tabela 1: Condutibilidade térmica de materiais de construções.

Material	Condutibilidade k (W/m. ⁰ C)	Massa específica ρ (kg/m ³)	Calor específico c (J/kg. ⁰ C)
a) uso em paredes, lajes e pisos			
Argamassa de cimento-areia	1,15	2000	880
Argamassa de cimento-saibro	1,10	1800	1000
Argamassa de gesso	0,53	1000	857
Argamassa celular	0,30	600	1047
	0,51	100	1047
	0,81	1400	1047
Bloco cerâmico maciço	0,81	1600	920
Bloco cerâmico furado	0,67	1250	880
Bloco de concreto furado	0,91	1700	1005
Bloco de solo-cimento	0,78	2000	576
Bloco de adobe	0,52	1700	837
Concreto simples	1,50	2200	1005
Concreto armado	1,75	2400	1005
Concreto celular	0,13	300	1000
	0,20	500	1000
	0,27	700	1000
	0,40	1000	1000
Laminados e aglomerados de madeira	0,10	400	1424
	0,14	600	1424
	0,17	800	1424
Madeira maciça	0,10	400	1340
	0,15	600	1340
	0,19	800	1340
Revestimento de ardósia	2,10	2700	837
Revestimento de arenito	1,28	2000	837
Revestimento de granito	3,50	2700	837
Revestimento de mármore	3,26	2700	837
Vidro	1,20	2600	840
b) uso em telhados			
Telha de aço	47	7800	460
Telha de alumínio	230	2700	880
Telha de alumínio + Madeirit	230	2700	880
	0,14	800	1214
Telha de alumínio + poliuretano + alumínio	230	2700	880
	0,023	50	1590
	230	2700	880
Telha de cerâmica	0,85	1700	921
Telha de fibro-cimento	0,41	1600	1010
Telhado de palha (sapê)	0,12	200	2300
Telhado de vegetação	0,12	350	1200
Cobertura de água	0,62	1000	4190
c) uso como isolante			
Cortiça	0,035	50	1900
	0,040	100	1900
	0,051	200	1900
	0,069	400	1900
Lã de vidro	0,030	100	754
	0,044	200	754
Vermiculita solta	0,070	100	1000
Vermiculita em placa	0,079	250	1000
	0,116	400	1000
Poliestireno expandido (isopor)	0,035	20	1420
Poliuretano	0,023	50	1590

Tabela 2: Resistência térmica de alguns elementos construtivos.

Elemento construtivo	Espessura (m)	Resistência térmica ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)
	0,15 (*) 0,25 (*)	0,02+0,20+0,02=0,24 0,02+0,40+0,02=0,44
	0,10 (**) 0,15 (**) 0,20 (**) 0,15 (*) 0,20 (*) 0,25 (*)	0,15 0,18 0,21 0,02+0,15+0,02=0,19 0,02+0,18+0,02=0,22 0,02+0,21+0,02=0,25
	(***)	0,02+0,20+0,17+0,40+0,02=0,79
	0,12 0,15 0,20	0,15 0,17 0,20
	(****)	0,01+0,20+0,05=0,26

Observações:

(*) – bloco cerâmico furado com emboço (2,5 cm) de argamassa de cimento e saibro

(**) – bloco de cimento sem emboço

(***) – câmara de ar não ventilada (5,0 cm)

(****) – telha de cimento-amianto / câmara de ar / laje de concreto armado maciça

2.1.2. Transmissão de calor por convecção

Trata-se da transmissão de calor que ocorre entre um corpo sólido e um fluido em movimento, podendo o corpo fluido ser líquido ou gasoso. A convecção pode ser natural ou forçada. Diz-se que a convecção é natural quando o movimento do fluido ocorre unicamente devido a variações de seu peso específico (densidade). Na convecção forçada o movimento do fluido é provocado por uma bomba, no caso de um líquido, ou por um ventilador, no caso de um fluido gasoso.

Verifica-se experimentalmente que a quantidade de calor que flui no processo de convecção é diretamente proporcional ao gradiente de temperatura entre o material sólido e a região do fluido não “perturbado” pelo deslocamento do fluido. A grandeza física que caracteriza se o processo convectivo é mais ou menos intenso chama-se coeficiente de trocas térmicas por convecção (h_c). A figura 2 ilustra o processo de transmissão de calor por convecção.

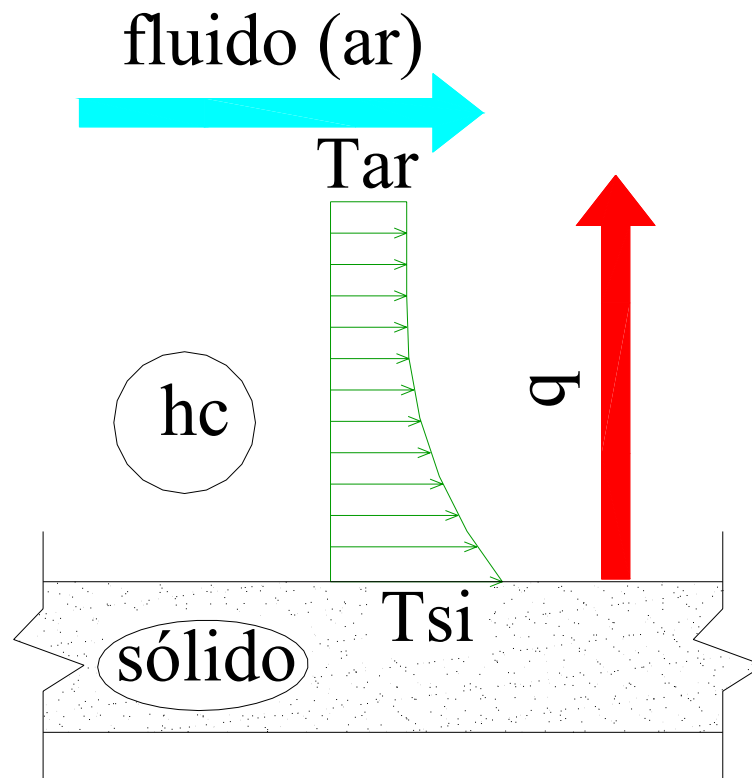


Figura 2: Transmissão de calor por convecção.

$$q = h_c \cdot (T_{si} - T_{ar}) \dots\dots\dots \text{Eq. 6}$$

onde:

- q = intensidade de fluxo de calor, em W/m^2 ;
- h_c = coeficiente de convecção, em $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$;
- T_{si} = temperatura da superfície do sólido, em $^\circ\text{C}$;
- T_{ar} = temperatura do fluido (ar) não perturbado, em $^\circ\text{C}$.

A determinação do coeficiente de transmissão de calor por convecção depende de inúmeros fatores, dentre os quais podem ser citados:

- natureza do fluido;
- velocidade do fluido;
- geometria e rugosidade da superfície sólida;
- características da camada limite;
- se a convecção é natural ou forçada;
- da direção de deslocamento do fluido.

No caso específico de uma construção pode-se considerar o seguinte:

- em paredes verticais a convecção é intensamente ativada pela velocidade do ar, considerando-se que, mesmo que a velocidade do ar se origine de causas naturais (vento), a convecção é considerada como forçada;
- no caso de superfícies horizontais a quantidade de calor transmitido por convecção depende do sentido do fluxo, sendo mais intenso quando o fluxo é ascendente do que quando descendente.

CROISSET (1972) sugere os valores constantes da tabela 3 para coeficiente de trocas de calor por convecção, para o caso de convecção natural, e os constantes do gráfico da figura 3, quando se tratar de ventilação forçada.

Tabela 3: Coeficientes de convecção para convecção natural.

Situação parede / fluxo de ar	Coefficiente de convecção (h_c)
Superfície horizontal / fluxo descendente	$h_c = 1,2 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
Superfície horizontal / fluxo ascendente	$h_c = 7,0 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
Superfície vertical	$h_c = 4,7 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

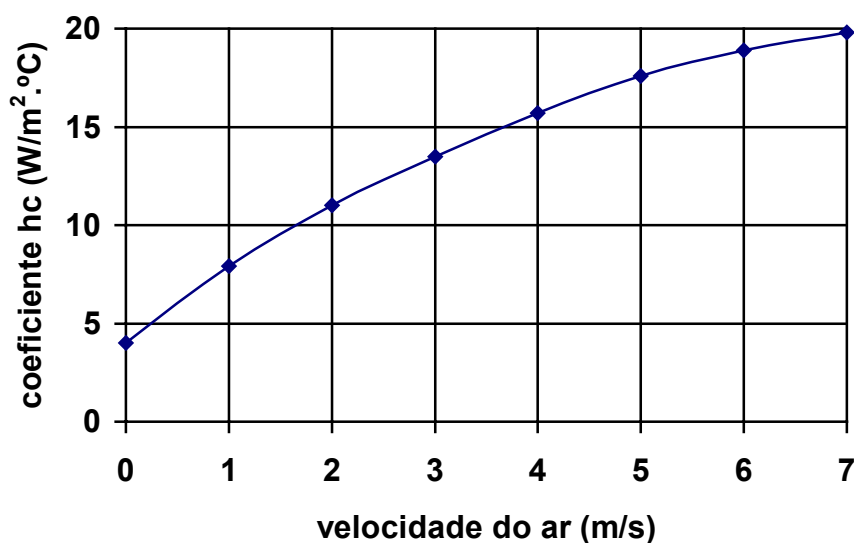


Figura 3: Variação do coeficiente de convecção com a velocidade do ar.

2.1.3. Transmissão de calor por radiação

2.1.3.1. Radiação emitida por um corpo

Todos os corpos estando à determinada temperatura acima de 0 K (-273 °C), conseqüentemente, possuindo movimento molecular e atômico, emitem radiação eletromagnética. Esta radiação deve ser analisada sob o ponto de vista de **qualidade** e de **quantidade**, por que suas características, comportamento e interação com os elementos construtivos, dependem intensamente dessas propriedades da radiação eletromagnética.

a) Qualidade da radiação eletromagnética

Para que haja a transmissão de energia radiante é necessária a existência de um meio transparente a essa onda. As ondas eletromagnéticas propagam-se no vácuo à velocidade constante de 300.000 km/s, sendo pouco menor a sua velocidade no ar da atmosfera terrestre.

Duas teorias são adotadas para explicar os fenômenos de transmissão de calor na ausência de meio físico para propagação:

- que a transmissão tem **natureza ondulatória**, dando-se por meio de **ondas eletromagnéticas**;
- que a transmissão tem natureza corpuscular, dando-se meio de **partículas**, chamados **fótons**.

Dependendo do que se quer explicar, uma teoria funciona melhor que a outra, sendo hoje plenamente aceito no meio científico a dualidade da natureza da luz, ora sendo considerada como radiação eletromagnética, ora como fótons.

Na teoria eletromagnética, as grandezas que caracterizam a radiação são sua frequência e seu comprimento de onda, conforme apresentado na figura 4 e na equação 7. A equação 8 representa a relação entre massa e energia conforme apresentada na teoria corpuscular.

$$c = \lambda \cdot f \dots\dots\dots \text{Eq. 7}$$

onde:

c = velocidade da luz;

λ = comprimento de onda (distância entre dois picos da onda);

f = frequência da onda (número de ciclos por unidade de tempo).

$$E = m \cdot c^2 \dots\dots\dots \text{Eq. 8}$$

onde:

E = quantidade equivalente de energia;

m = massa equivalente à quantidade de energia;

c = velocidade da luz.

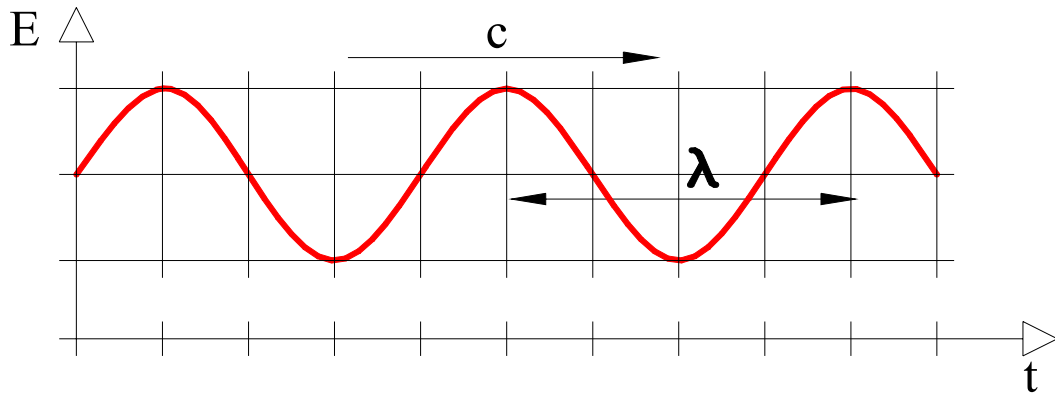


Figura 4: Representação de uma onda eletromagnética.

A emissão em uma única ou pequena faixa de frequência é típica dos gases, citando-se como exemplo as lâmpadas fluorescentes. Os corpos sólidos e líquidos, quando a determinada temperatura, emite em uma faixa de frequência contínua, constituindo um espectro de ondas eletromagnéticas de várias frequências.

Para entendimento dos processos de transmissão de calor em uma edificação, dois espectros de frequência são particularmente importantes:

- o espectro da radiação solar, correspondente a radiação emitida por um corpo negro, a cerca de 6000 K;
- o espectro da radiação terrestre, correspondente a radiação emitida por um corpo negro, a cerca de 300 K.

A figura 5 apresenta o espectro da radiação solar.

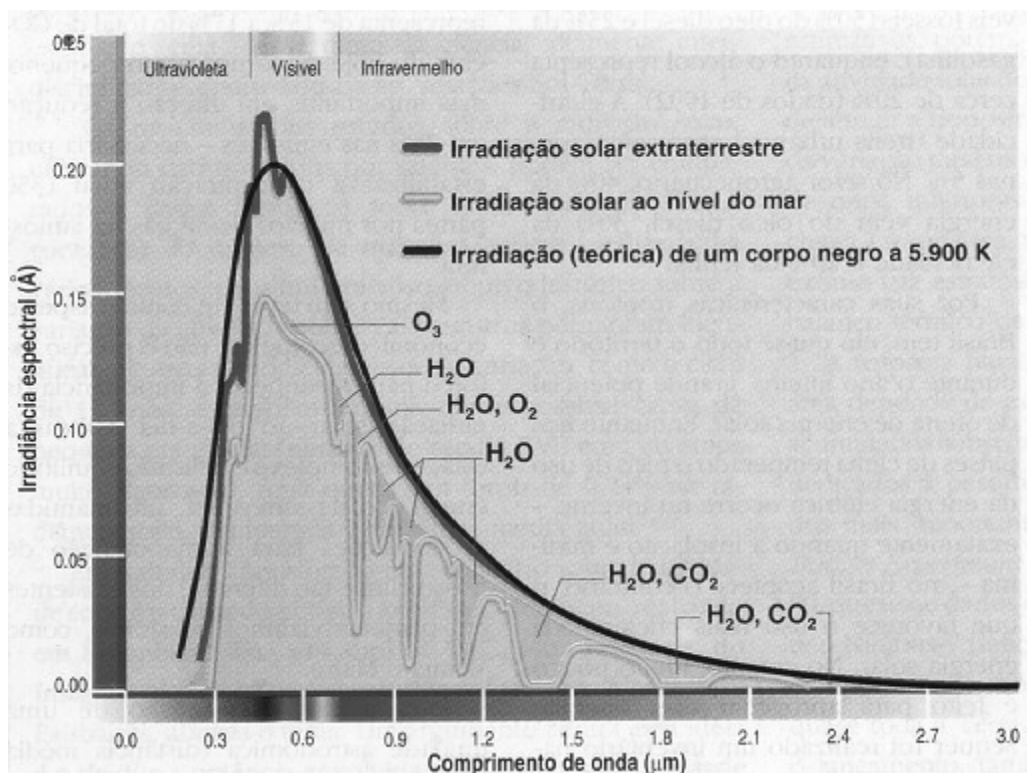


Figura 5: Espectro da radiação solar.

b) Quantidade da radiação eletromagnética

A quantidade de energia radiante emitida por m^2 por um corpo, depende da quarta potência da sua temperatura absoluta (**Lei de Stephan Boltzmann**) e das características de emissividade da sua superfície, sendo apresentada na equação 9.

$$H_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad \text{Eq. 9}$$

onde:

H_r = irradiância de um corpo, em W/m^2 ;

σ = constante de Stephan Boltzmann, ($5,67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$);

ε = emissividade da superfície;

T = temperatura da superfície, em K.

A **Lei de Wien**, que diz que o comprimento de onda de máxima emissão é inversamente proporcional a temperatura absoluta do corpo emissor, é apresentada na equação 10, permitindo concluir que para o espectro da radiação solar a maior potência de emissão corresponde ao visível ($\lambda_{max} \approx 0,5 \mu m$), enquanto, para o espectro da radiação terrestre, a maior potência de radiação corresponde ao infravermelho ($\lambda_{max} \approx 10 \mu m$).

$$\lambda_{max} = \frac{2897}{T} \quad \text{Eq. 10}$$

2.1.3.2. Radiação recebida por um corpo

A energia radiante incidente sobre um corpo é em parte absorvida, refletida e transmitida através do corpo. A energia incidente se divide nessas três parcelas, dependendo das condições de incidência, se o corpo é opaco ou transparente à radiação, de condições de superfície, de massa e de transmissividade.

A energia radiante absorvida por um corpo se transforma em calor, contribuindo para aumentar sua temperatura, no entanto as parcelas transmitidas e refletidas não sofrem mudança em seus comprimentos de onda.

Chamam-se **coeficientes de absorção** (α), **de reflexão** (ρ) e **de transmissão** (τ) aos percentuais da energia total incidente que são, respectivamente, absorvido, refletido e transmitido por um corpo como mostrado na figura e equações seguintes.

Chamando-se de E_i a energia radiante incidente em uma determinada superfície, de E_α à parcela de energia absorvida, de E_ρ à energia refletida e de E_τ à energia transmitida, tem-se que:

$$E_i = E_\alpha + E_\rho + E_\tau \quad \text{Eq. 11}$$

Dividindo-se a equação 11 por E_i , vem:

$$\frac{E_i}{E_i} = \frac{E_\alpha}{E_i} + \frac{E_\rho}{E_i} + \frac{E_\tau}{E_i} \quad \text{Eq. 12}$$

$$1 = \alpha + \rho + \tau \dots\dots\dots \text{Eq. 13}$$

Se a superfície é opaca tem-se:

$$1 = \alpha + \rho \dots\dots\dots \text{Eq. 14}$$

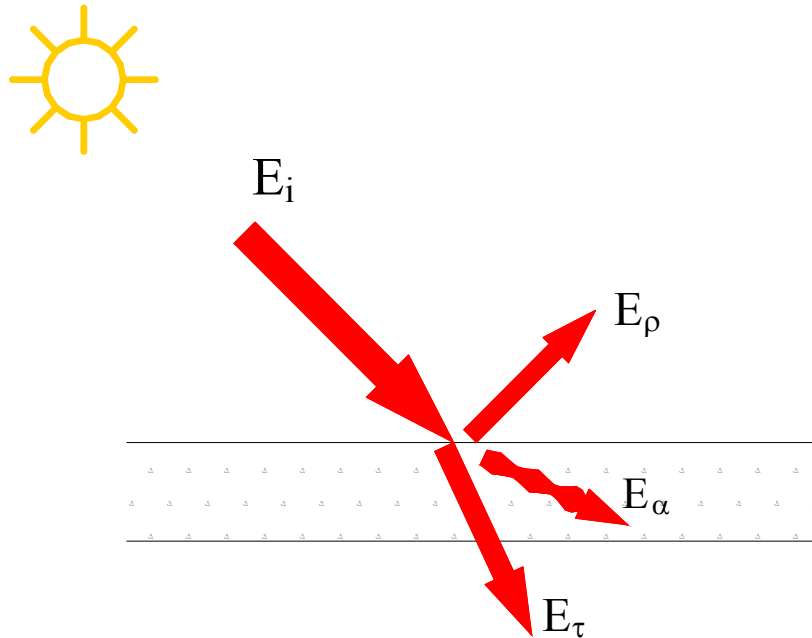


Figura 6: Radiação solar incidente (E_i), refletida (E_ρ), transmitida (E_τ) e absorvida (E_α).

2.1.3.3. Radiação trocada entre dois corpos

Dois corpos a diferentes temperaturas ($T_{s1} > T_{s2}$), separados por uma determinada distância, e sem contato físico trocam calor entre eles por meio de ondas eletromagnéticas. O fluxo líquido de calor radiante entre os dois corpos pode ser estimado pela equação 15.

$$q = \sigma \cdot F \cdot (T_{s1}^4 - T_{s2}^4) \dots\dots\dots \text{Eq. 15}$$

onde:

- q = calor transmitido por radiação, em W/m^2 ;
- σ = constante de Stephan Boltzmann, ($5,67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$);
- F = fator de forma que considera as emissividades (ϵ_1 e ϵ_2) e absortividades (α_1 e α_2) das superfícies, bem como a forma como uma superfície “vê” a outra;
- T_{s1} e T_{s2} = temperatura das superfícies, em K.

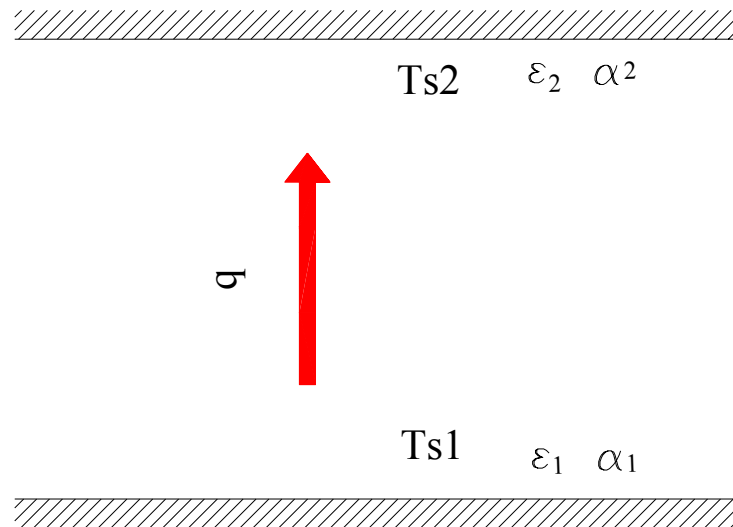


Figura 7: Troca de calor por radiação entre duas superfícies.

Pode-se analisar a transmissão de calor por radiação, de forma simplificada, à semelhança da transmissão de calor por convecção, calculando-se o fluxo de calor trocado entre as duas superfícies pela expressão da equação 16.

$$q = h_r \cdot (T_{s1} - T_{s2}) \dots\dots\dots \text{Eq. 16}$$

onde:

- q = calor transmitido por radiação, em W/m²;
- h_r = coeficiente de troca de calor por radiação, em W/m².°C;
- T_{s1} e T_{s2} = temperatura das superfícies, em °C.

O coeficiente h_r é um parâmetro simplificado, que resume todos os fatores que interferem na troca de calor por radiação, tais como, as temperaturas das superfícies, os aspectos geométricos e físicos das superfícies, principalmente as emissividades (ε) e absorptividades (α) das superfícies. Para troca de calor entre materiais de construções, sem brilho metálico em que a maioria deles possui emissividade em torno de 0,9 pode-se adotar, aproximadamente, h_r = 5 W/m².°C (FROTA e SCHIFFER, 1995).

2.2. Trocas térmicas úmidas (calor latente)

Normalmente, quando transferimos calor para um corpo sua temperatura aumenta, sendo as grandezas físicas envolvidas no processo relacionadas pela equação 17.

$$Q = m \cdot c \cdot (T_f - T_i) \dots\dots\dots \text{Eq. 17}$$

onde:

- Q = energia transferida, em J;
- m = massa do corpo, em kg;
- c = calor específico do material, em J/kg.°C;
- T_f e T_i = temperatura final e inicial, respectivamente, em °C.

Chamamos de troca de calor por via úmida ou transferência de calor latente as trocas de calor que ocorrem sem que haja mudança de temperatura, sendo característica das trocas de calor em que há mudança de fase, tais como na evaporação e condensação, em que o fluxo de calor não ocorre devido a gradientes de temperatura, e sim a gradientes de pressão de vapor, ocorrendo, portanto, transferência de calor e de massa.

Chama-se **calor latente** (entalpia de mudança de fase) a quantidade de energia absorvida ou liberada por unidade de massa quando ocorre a mudança de fase.

A tabela 4 fornece valores do calor latente de evaporação da água, em função da sua temperatura.

Tabela 4: Calor latente de evaporação da água.

Temperatura (°C)	Calor latente (kJ/kg)
0	2501
10	2462
20	2440
30	2416
40	2406

Em termos construtivos, o estudo das trocas de calor úmidas é importante nos sistemas de resfriamento evaporativo e nos problemas de condensação, tanto superficiais quanto internos.

Os processos de troca de calor latente têm também papel importante nos mecanismos fisiológicos de manutenção da homeotermia, por meio da evaporação no trato respiratório e da sudorese, se constituindo, inclusive em regiões de clima quente, na principal via de eliminação de calor corporal.

A velocidade de evaporação é função do estado higrotérmico do ar e da sua velocidade. O estudo das condições higrotérmicas do ar constitui o que chamamos de **psicrometria**, que é apresentada no item seguinte.

2.3. Noções de psicrometria

A psicrometria é a parte da física que estuda as propriedades termodinâmicas da mistura de ar atmosférico com vapor d'água. O conhecimento das propriedades físicas e psicrométricas do ar é de fundamental importância para o projeto das instalações agrícolas e dos equipamentos de controle das variáveis ambientais, bem como, para conhecimento dos mecanismos de troca de calor animal.

2.3.1. Composição do ar atmosférico

A composição do ar atmosférico seco é aproximadamente constante. A tabela 5 fornece a composição dos principais componentes do ar atmosférico seco.

Tabela 5: Composição do ar atmosférico seco.

Constituinte	Volume (%)
Nitrogênio	78,08
Oxigênio	20,95
Argônio	0,93
Dióxido de carbono	0,03
outros gases	0,01

Grande quantidade de agentes poluentes como, poeiras, fumaças e gases industriais também se fazem presentes no ar, principalmente, em regiões mais populosas e industrializadas.

O vapor d'água é encontrado em quantidades variáveis, dependendo da região do globo terrestre, sendo quase zero nas regiões secas e desérticas a até 4%, em volume, nas regiões quentes e úmidas.

2.3.2. Grandezas psicrométricas

- **Temperatura de bulbo seco (T_{bs})**

É a temperatura do ar registrado por um termômetro comum (figura 8). A temperatura de bulbo seco independe da quantidade de vapor d'água contida no ar.

- **Temperatura de bulbo úmido (T_{bu})**

É a temperatura do ar registrada por um termômetro de bulbo úmido. A temperatura de bulbo úmido é função da quantidade de vapor d'água contida no ar. A figura 8 mostra um termômetro de bulbo úmido. O bulbo do termômetro é envolvido por uma gaze molhada, de modo que ao ocorrer evaporação da água em contato com o bulbo, este se esfriará. O esfriamento do bulbo do termômetro é função da intensidade de evaporação e, conseqüentemente, da quantidade de vapor d'água contida no ar. A temperatura de bulbo úmido é sempre inferior a de bulbo seco, exceto quando não ocorre evaporação, sendo as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido de mesmo valor, condição em que o ar é considerado saturado.

- **Temperatura de ponto de orvalho (T_{po})**

É a temperatura correspondente ao ponto do início da condensação do vapor d' água contido no ar úmido.

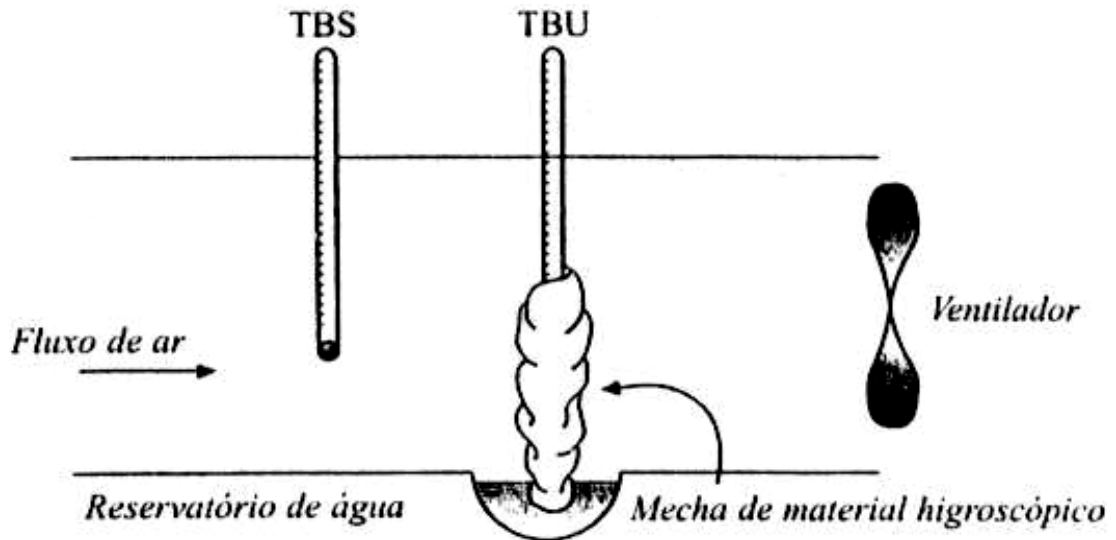


Figura 8: Termômetro de bulbo seco (TBS) e de bulbo úmido (TBU).

- **Pressão de vapor**

A pressão atmosférica é igual à pressão exercida por todos os componentes do ar atmosférico. No entanto, cada gás constituinte do ar exerce uma pressão parcial. A pressão parcial exercida pelo vapor d' água é chamada de pressão de vapor, sendo função da quantidade de vapor d' água presente no ar. A quantidade de vapor d' água que o ar pode reter, conseqüentemente, da sua pressão de vapor é função da temperatura do ar. Quanto maior a temperatura do ar maior a quantidade de vapor d' água que pode ser por ele retida. Quando o ar úmido não consegue mais reter vapor d' água encontra-se saturado, sendo sua pressão de vapor chamada de pressão de vapor de saturação.

- **Umidade relativa**

É a relação entre a pressão de vapor do ar úmido (P_w), a uma determinada temperatura, e a pressão de vapor de saturação (P_s) à mesma temperatura. A umidade relativa varia de zero, para o ar seco, a 100% para o ar saturado. A temperatura na qual o ar se torna saturado, ocorrendo a condensação da água, é chamada de temperatura de ponto de orvalho (T_{po}).

- **Umidade absoluta**

É a relação entre a massa de água (m_w) contida no ar e a massa de ar seco (m_a) que contém o vapor d' água.

- **Volume específico**

É a relação entre o volume ocupado por determinada massa de ar úmido e o peso de ar seco.

- **Entalpia**

Corresponde ao total de energia, na forma sensível e latente, contido pelo ar.

As grandezas psicrométricas apresentadas anteriormente relacionam-se entre si, sendo esta relação representada, matematicamente, por equações ou, graficamente, por meio do **diagrama** ou **carta psicrométrica**.

2.3.3. Uso da carta psicrométrica e programas psicrométricos (melhorar)

A figura 9 apresenta um diagrama ou carta psicrométrica para pressão atmosférica correspondente ao nível do mar, enquanto a figura 10 mostra telas do programa de computador [PsychTool \(Fridge¹\)](#), que calcula as propriedades psicrométricas do ar.

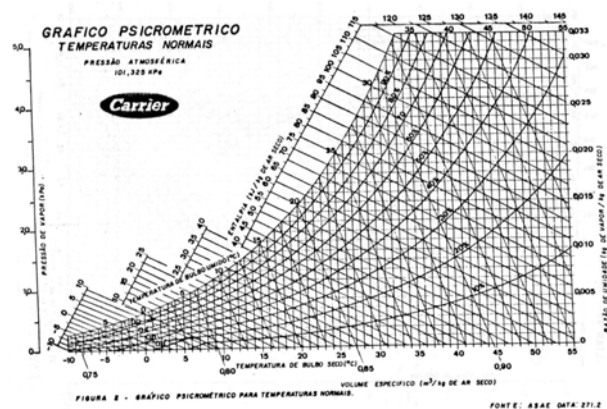


Figura 9: Diagrama ou carta psicrométrica.

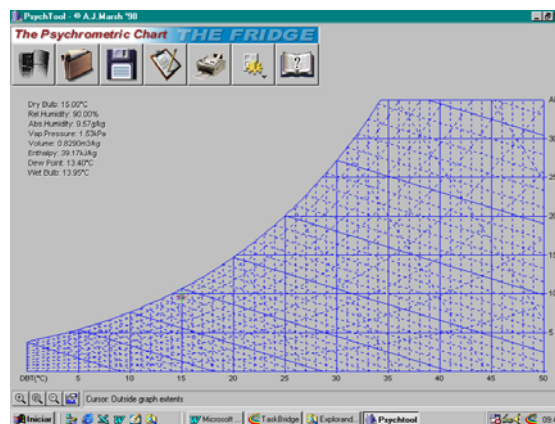


Figura 10: Programa computacional de cálculo das propriedades psicrométricas do ar.

¹ Freeware distribuído pela. Architectural Science Lab. - School of Architecture and Fine Arts
The University of Western Australia.....(<http://fridge.arch.uwa.edu.au/>)

2.4. Transferência de calor em paredes opacas

• Paredes internas

Na figura 11 é apresentado um esquema de troca de calor entre dois ambientes em que as superfícies da parede separam dois ambientes internos, conseqüentemente sem incidência de radiação solar. O esquema considera as trocas de calor por condução, convecção e radiação de onda longa.

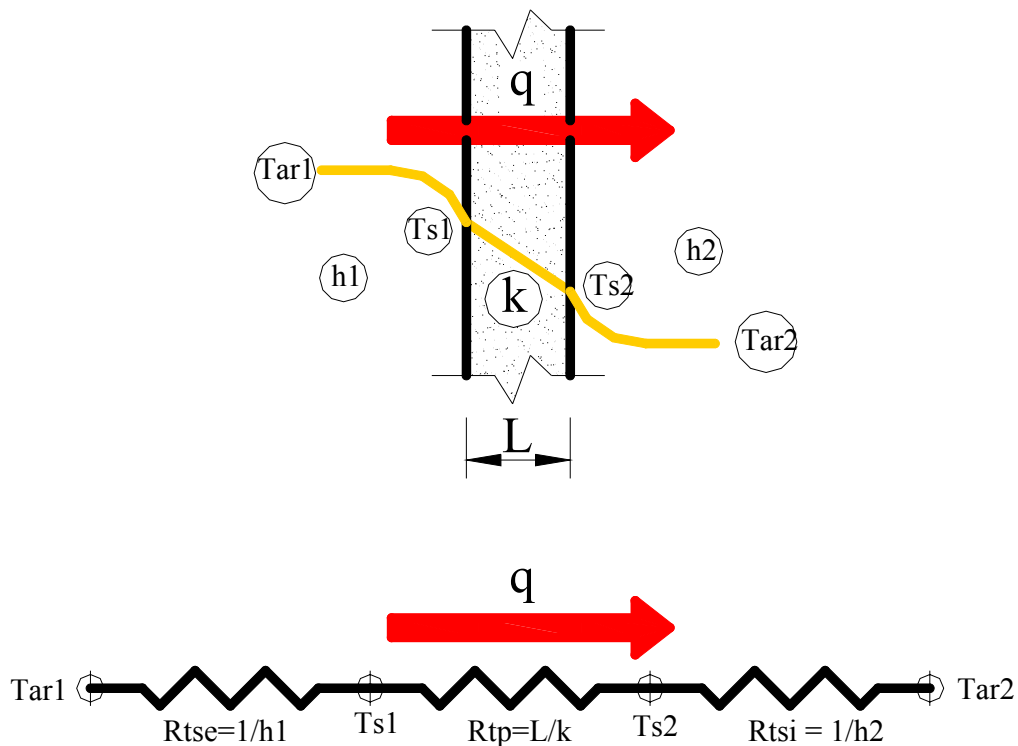


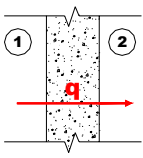
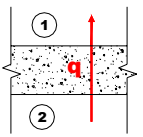
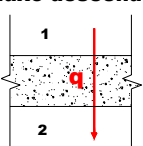
Figura 11: Troca de calor em parede opaca, separando dois meios internos.

A transferência de calor que ocorre por condução é influenciada pela resistência (R_t) ou pela condutância térmica (K_t) do elemento construtivo, enquanto a transferência de calor do ar e dos elementos vizinhos é influenciada pelo coeficiente de condutância superficial (h_1 e h_2) que englobam as trocas térmicas que ocorrem na superfície da parede por convecção e radiação.

Se considerarmos h_1 e h_2 como a condutância térmica superficial dos lados 1 e 2, respectivamente, $1/h_1$ e $1/h_2$, correspondem as resistências térmicas superficiais de ambos os lados.

A tabela 6 apresenta valores de condutância e resistência térmica superficial, para paredes internas, considerando materiais de construções comuns, sujeitos à velocidade do ar de 0,5 m/s.

Tabela 6: Condutância e resistência térmica superficial para paredes internas.

Elemento construtivo	h_1 (W/m ² .°C)	$1/h_1$ (m ² .°C/W)	h_2 (W/m ² .°C)	$1/h_2$ (m ² .°C/W)	$(1/h_1)+(1/h_2)$ (m ² .°C/W)
<p>parede vertical</p> 	8	0,12	8	0,12	0,24
<p>parede horizontal (fluxo ascendente)</p> 	10	0,10	10	0,10	0,20
<p>parede horizontal (fluxo descendente)</p> 	6	0,17	6	0,17	0,34

- **Paredes externas**

No estudo da transferência de calor entre um meio externo e outro interno, há que se considerar dois fatores importantes em relação ao que foi descrito para paredes internas. A incidência de radiação solar na superfície externa da parede contribui para aumentar a temperatura superficial, tornando o fenômeno da transferência de calor por radiação bem mais intenso, por outro lado, como a velocidade do ar no meio externo, normalmente, é maior que nos meios internos, faz com a convecção no exterior ocorra com mais intensidade que no interior.

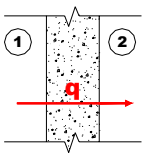
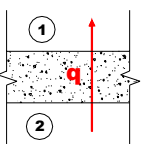
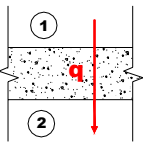
A tabela 7 apresenta valores de condutância e resistência térmica superficial, para paredes externas, considerando materiais de construções comuns sujeitos a velocidade do ar de 0,5 m/s, internamente, e 2,0 m/s, externamente.

O efeito da radiação solar pode ser abordado por meio da teoria da **temperatura sol-ar**.

A temperatura sol-ar corresponde a uma temperatura fictícia para o ar vizinho a superfície, maior que a temperatura real do ar, que considera a radiação solar incidente (I_g), as condições de absorção de radiação solar pela superfície (α = absortividade) e as condições de convecção externa (h_e).

Por esta teoria, a temperatura sol-ar é calculada pela expressão apresentada na equação 18.

Tabela 7: Condutância e resistência térmica superficial para paredes externas.

Elemento construtivo	h_1 (W/m ² .°C)	$1/h_1$ (m ² .°C/W)	h_2 (W/m ² .°C)	$1/h_2$ (m ² .°C/W)	$(1/h_1)+(1/h_2)$ (m ² .°C/W)
<p>parede vertical</p> 	8	0,12	20	0,05	0,17
<p>parede horizontal (fluxo ascendente)</p> 	11	0,09	20	0,05	0,14
<p>parede horizontal (fluxo descendente)</p> 	6	0,17	20	0,05	0,22

$$T_{\text{sol-ar}} = (T_{\text{ar}} + \alpha \cdot I_g / h_e) - \Delta T_{\text{céu}} \dots\dots\dots \text{Eq. 18}$$

onde:

- $T_{\text{sol-ar}}$ = temperatura sol-ar, em °C;
- T_{ar} = temperatura do ar vizinho à superfície externa, em °C;
- α = absortividade da superfície externa;
- I_g = intensidade de radiação solar global, em W/m²;
- h_e = condutância superficial externa, em W/m².°C;
- $\Delta T_{\text{céu}}$ = 4 °C (para planos aproximadamente horizontais) e 0 °C (para planos verticais).

A figura 12 apresenta um esquema de troca de calor em uma parede que separa um meio externo, sujeito à radiação solar, de um meio interno sombreado. Pela equação 19 e 20 é feito o cálculo da quantidade de calor que flui através da parede opaca.

$$q = K_t \cdot (T_{\text{sol-ar}} - T_{\text{arinterno}}) \text{ ou } q = (T_{\text{sol-ar}} - T_{\text{arinterno}}) / R_t \dots\dots\dots \text{Eq. 19 e 20}$$

onde:

- q = calor transmitido através do elemento opaco, em W/m²;
- K_t = condutibilidade térmica total, em W/m².°C;
- R_t = resistência térmica total, em m².°C/W;
- $T_{\text{sol-ar}}$ = temperatura sol-ar, em °C;
- $T_{\text{ar interno}}$ = temperatura do ar vizinho à superfície interna, em °C.

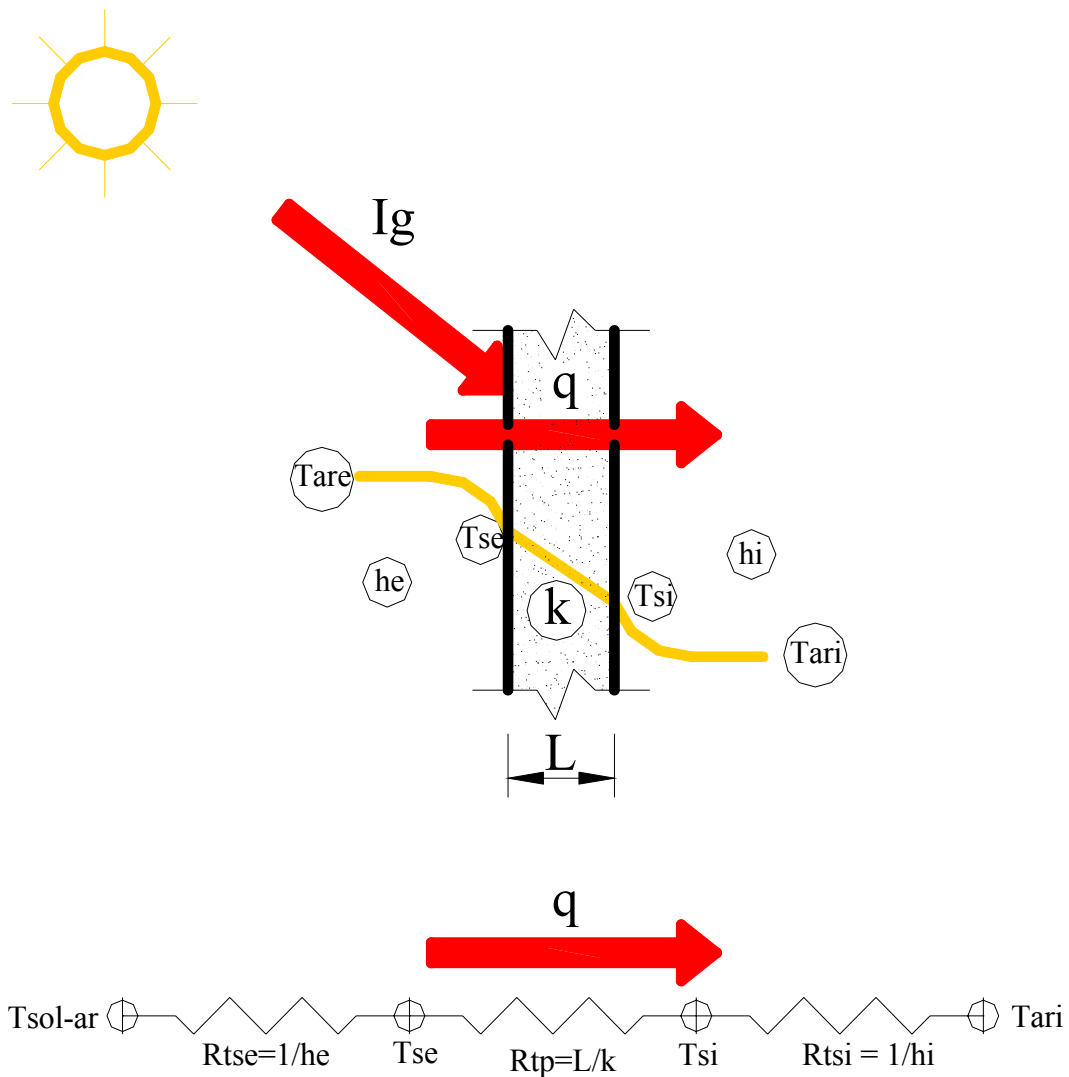


Figura 12: Troca de calor em parede opaca, separando um meio externo de um interno.

2.5. Transferência de calor em paredes transparentes

Este item consiste, basicamente, no estudo da transferência de calor em paredes externas envidraçadas, sujeitas à radiação solar, já que para radiação de onda longa as paredes envidraçadas se comportam como opacas.

As equações que regem o fenômeno de transferência de calor em meios transparentes são as mesmas de paredes opacas, sendo que, deve-se agora considerar, a parcela de radiação solar que simplesmente atravessa a superfície envidraçada.

A figura 13 mostra a transmissão de calor em uma superfície envidraçada, enquanto nas equações 21 e 22 são apresentadas as expressões, que permitem calcular o calor transmitido através da superfície.

$$q = q_1 + q_2 \rightarrow q = \tau \cdot I_g + K_t \cdot (T_{\text{sol-ar}} - T_{\text{arinterno}}) \dots\dots\dots \text{Eq. 21}$$

$$q = q_1 + q_2 \rightarrow q = \tau \cdot I_g + (T_{\text{sol-ar}} - T_{\text{arinterno}}) / R_t \dots\dots\dots \text{Eq. 22}$$

sendo:

τ = transmissividade do meio transparente;

q_1 = energia de onda curta transmitida através do vidro devido a sua transparência;

q_2 = energia de onda longa transmitida por condução através do vidro.

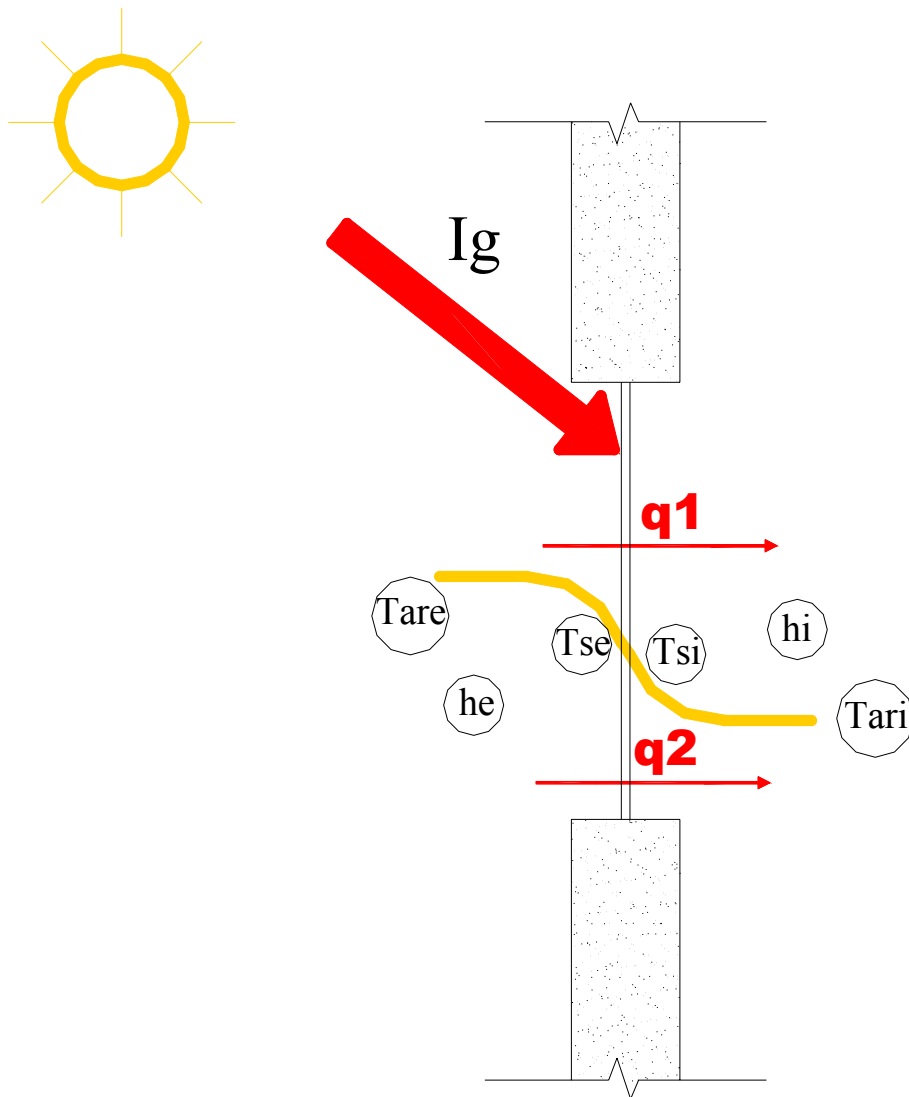


Figura 13: Transmissão de calor em parede transparente.