7 - Transferência de Calor

A primeira lei da termodinâmica diz que a energia é conservada. A energia total do sistema e das suas vizinhanças permanece constante. Diferentes formas de energia podem se transformar, mas sua soma permanece constante.

A termodinâmica diz que o calor flui espontaneamente a partir de um corpo de uma temperatura mais elevada para a mais baixa.

Dois sistemas estão em equilíbrio térmico, quando as suas temperaturas são iguais. Isto é diferente de estado estacionário. Em estado estacionário, as temperaturas não devem mudar com o tempo. Em equilíbrio, não existem fluxos de calor.

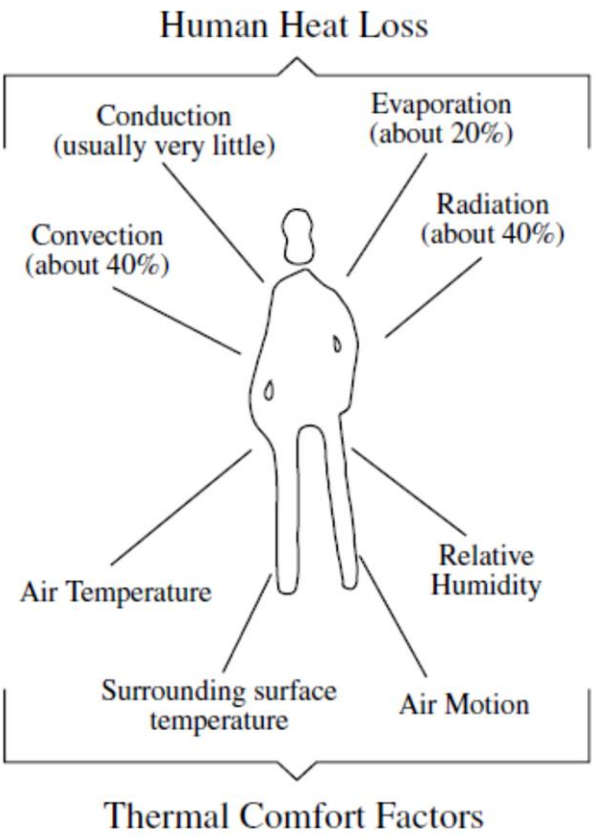
A transferência de energia (calor) ocorre apenas quando dois corpos não estão em equilíbrio.

Conforto Térmico

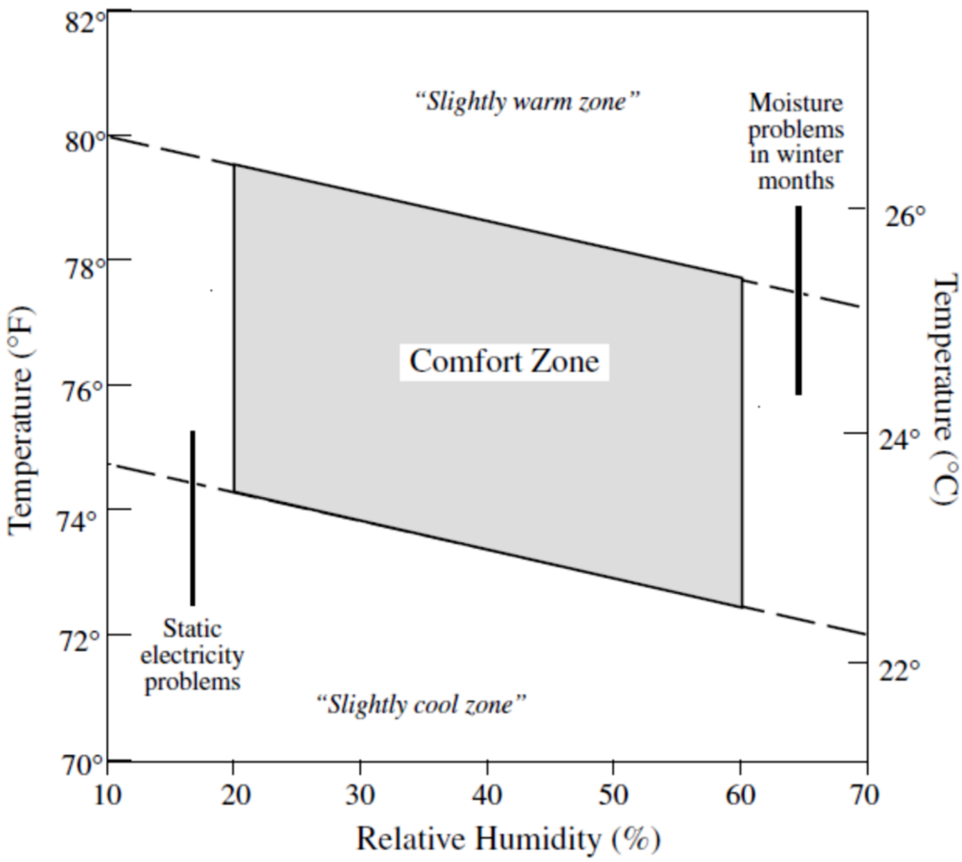
O corpo humano mantém um equilíbrio com o ambiente através de pequenas alterações fisiológicas (isto é, pelo aumento ou diminuição do fluxo de sangue para a pele). Termorregulação é o mecanismo fisiológico pelo qual os mamíferos e as aves tentam equilibrar o ganho e a perda de calor de modo a manter a temperatura corporal constante.

Quando rodeado por ar, as perdas de calor do corpo são principalmente por convecção, evaporação e radiação. As perdas de calor do corpo são afetadas pela temperatura, umidade e velocidade do ar, tipo de vestimenta, etc.

A evaporação (transpiração) tem um efeito de resfriamento, uma maior evaporação é necessária em temperaturas mais elevadas. A baixa umidade do ar facilita a evaporação, o que leva à combinação de umidade/temperatura como parâmetros de conforto humano.



Adaptado de Biological and Bioenvironmental Heat and Mass Transfer, Ashim K. Datta



Adaptado de Biological and Bioenvironmental Heat and Mass Transfer, Ashim K. Datta

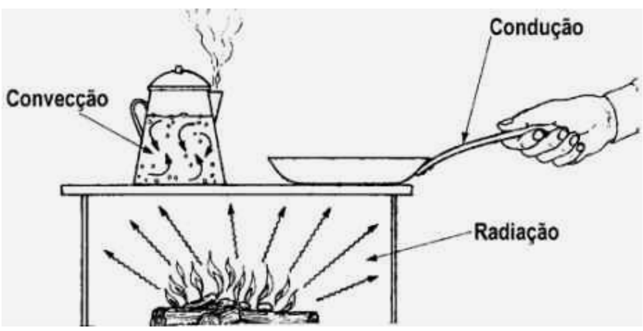
Mecanismos de Transferência de Calor

Transporte de calor é o transporte de energia que ocorre devido à força motriz que chamamos de diferença de temperatura.

Condução: condução de calor pode ocorrer através de sólidos, líquidos e gases. O calor é conduzido pelo transporte de energia do movimento entre moléculas adjacentes. Pode ocorrer pela vibração dos átomos em uma estrutura cristalina, pelo movimento randômico das moléculas em um gás, ou por elétrons livres em sólidos metálicos.

Convecção: transporte de calor devido ao movimento de porções e mistura macroscópica de elementos do fluido. A transferência de calor envolve movimento do fluido. Se a convecção é induzida por diferença de densidades resultante de diferenças de temperatura no interior do fluido, chamamos de *convecção natural*. Se o movimento do fluido resulta da ação de forças externas, como um ventilador, chamamos de *convecção forçada*.

Radiação: transporte de calor por radiação eletromagnética, ou fótons, com certa faixa de comprimento de onda. Embora ocorra transferência de energia por radiação através de gases, líquidos e sólidos, estes meios absorvem energia e, portanto, esta energia é irradiada mais eficientemente através do vácuo.



Condução, Condutividade e Difusividade Térmicas

A equação básica da condução de calor, no regime estacionário é conhecida como equação de Fourier. Para a condução em uma direção:

$$\dot{Q} = -KA\frac{dT}{dx}$$

$\dot{Q}$ = taxa de transferência de calor na direção x (energia/tempo);
A = área da seção normal ao fluxo de calor;
dT/dx = gradiente de temperatura na direção x;
K = condutividade térmica do meio condutor.

$$\dot{Q} \equiv \left[\frac{J}{s}\right] = [W] \text{ ou } \left[\frac{kcal}{h}\right] \text{ ou } \left[\frac{Btu}{h}\right]$$

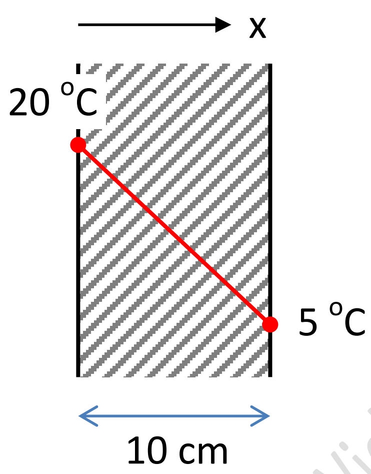
$$K \equiv \left[\frac{J}{°Cms}\right] = \left[\frac{W}{°Cm}\right] \text{ ou } \left[\frac{kcal}{h°Cm}\right]$$

Entende-se por regime estacionário aquele em que a taxa de transporte de calor, através de uma seção qualquer do sistema, não varie com o tempo. A condutividade térmica é função da temperatura e da pressão.

Material	T (°C)	K (kcal/hm°C)
Alumínio	0	174
	100	177
Cobre	0	340
	100	325
Água	0	0,510
	93	0,585
Ar	0	0,0208
	100	0,0273

Em geral, observa-se que um aumento da temperatura acarreta um aumento na condutividade dos gases e diminuição da condutividade dos sólidos e líquidos. Contudo, existem muitas exceções a estas generalizações.

Ex. - Considere uma parede plana com 10 cm de espessura, cujas temperaturas superficiais sejam 20 ^oC e 5 ^oC. Compare os fluxos de calor para dois diferentes materiais da parede, tijolo e madeira. K_{tijolo} = 0,69 W/m.K; $K_{madeira}$ = 0,208 W/m.K.



$$\dot{Q} = - KA\frac{dT}{dx} = - KA\frac{\Delta T}{\Delta x}$$

O fluxo de calor:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \dot{q} = - K\frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Para tijolo:

$$\dot{q} = - 0,69\frac{(5 - 20)}{0,1} = 103,5\ \frac{W}{m^2}$$

Para madeira:

$$\dot{q} = - 0,208\frac{(5 - 20)}{0,1} = 31,2\ \frac{W}{m^2}$$

Como a condutividade térmica do tijolo é maior, a parede de tijolo transfere calor mais rápido que a parede de madeira.

A equação de Fourier pode ser reescrita:

$$\dot{q} = -\frac{K}{\rho C_P}\frac{d(\rho C_P T)}{dx} = -\alpha\frac{dU}{dx}$$

ρ = densidade (kg/m^3);
C_P = calor específico (J/kg^{o}C);
U = energia interna por unidade de volume (J/m^3);
α = difusividade térmica (m^2/s).

Transferência de Calor por Convecção

A transferência de calor por convecção é o movimento de calor através de um meio como resultado do movimento do meio material. Convecção forçada é devido a uma força externa, tal como um ventilador, enquanto a convecção livre ou natural é impulsionada por uma diferença de densidade do material.

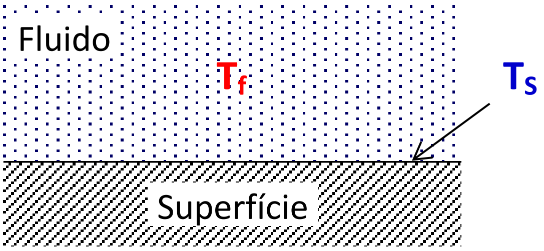
Os problemas de transporte de calor por convecção podem ser expressos em termos de balanços diferenciais de massa, energia e quantidade de movimento, contudo as dificuldades matemáticas são relevantes, e uma solução simples, muitas vezes não é possível. Assim, é comum em engenharia expressar a velocidade de transporte de calor em termos de um coeficiente de transporte de calor.

A convecção sobre uma superfície é descrita por:

$$\dot{Q} = \bar{h}A\Delta T$$

A = área da seção normal ao fluxo de calor;
ΔT = diferença de temperatura entre a superfície e o fluido;
$\bar{h}$ = coeficiente médio de transferência de calor por convecção ou coeficiente de película (W/m^2 ^{o}C).

A maioria dos processos de transporte de calor em fluidos é acompanhada de alguma forma de movimentação do fluido, portanto o transporte não se dá apenas por condução. O coeficiente de película sempre inclui os efeitos da condução no fluido. Ele é uma função da geometria do sistema, das propriedades do fluido e do escoamento, e da magnitude do ΔT.



T_f = temperatura do fluido a alguma distância da superfície;
T_S = temperatura da superfície.

A diferença de temperatura entre a superfície e o fluido, ΔT, deve tornar o valor de $\dot{Q}$ sempre positivo.

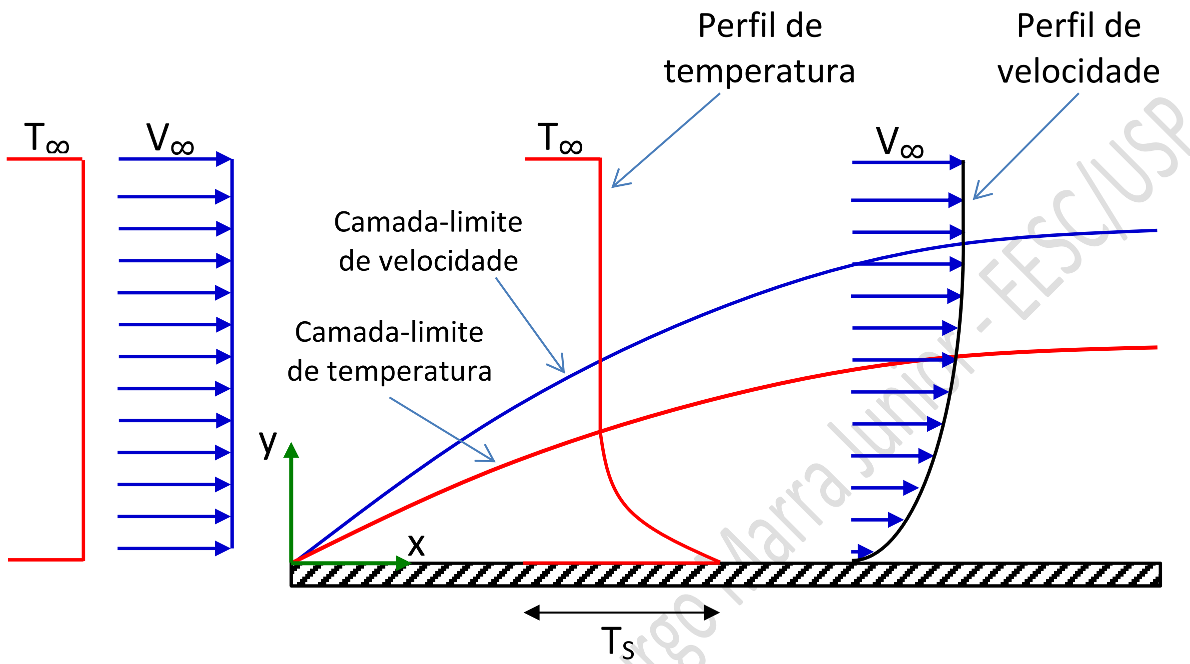
O conceito de coeficiente de transporte de calor é útil, porém não evita a natureza complexa do problema, uma vez que $\bar{h}$ é função das propriedades do fluido, da geometria da superfície e do padrão de escoamento do fluido, sua determinação não é tarefa simples.

Perfil de Temperatura e Camadas-Limite sobre uma Superfície

Quando um fluido com velocidade inicial uniforme, V_∞, escoa sobre uma superfície, tal como uma placa plana, a velocidade se anula na superfície da placa. O decréscimo na velocidade, desde a velocidade da corrente até zero, acontece em uma fina camada, conhecida como camada-limite de velocidade. A espessura desta camada-limite é definida como:

$$\delta_{vel} = y|_{V_x = 0,99V_\infty}$$

Se a temperatura da superfície, T_S, for diferente da temperatura inicial do fluido, T_∞, uma camada-limite de temperatura se desenvolverá.



A temperatura variará de T_S até T_∞, e a espessura da camada-limite de temperatura é definida como a distância na qual a temperatura é dada por: $T = 0{,}99\ T_\infty$.

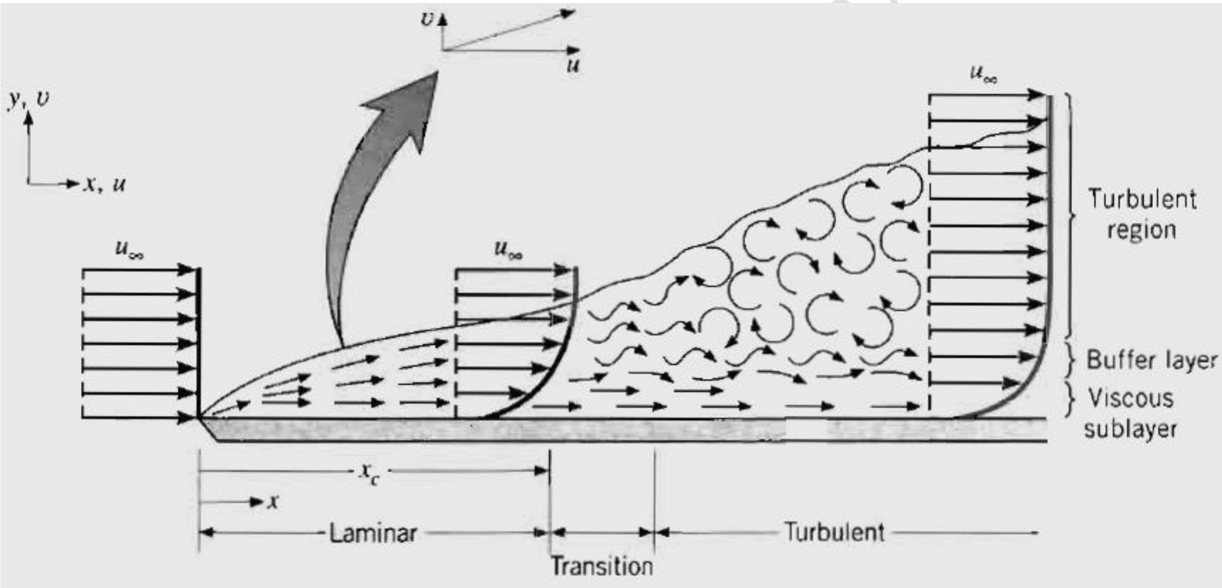
Para escoamento sobre uma placa plana, a espessura da camada-limite de velocidade é dada por:

Escoamento laminar:	$\dfrac{\delta_{vel}}{x} = \dfrac{5}{Re_x^{1/2}}$
Escoamento turbulento:	$\dfrac{\delta_{vel}}{x} = \dfrac{0{,}376}{Re_x^{1/5}}$
$Re_x = \dfrac{V_\infty \rho x}{\mu}$	
x = distância a partir do bordo de ataque da placa.	

A espessura da camada-limite de temperatura é dada por:

$$\frac{\delta_{vel}}{\delta_{temp}} = Pr^{1/3}$$	
$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu/\rho}{K/(\rho C_P)} = \frac{C_P \mu}{K}$$	Número de Prandtl

Embora o movimento de um fluido sobre uma placa plana possa iniciar-se ordenado (laminar), à medida que o fluido se move ao longo da placa, a estrutura do escoamento muda para uma situação mais caótica a alguma distância do bordo de ataque. O movimento caótico ou turbulência aumenta a taxa de transferência de calor.



Para uma placa plana, temos:

$$Re_x < 2x10^5 \quad \rightarrow \quad \text{Escoamento laminar}$$
$$2x10^5 < Re_x < 3x10^6 \quad \rightarrow \quad \text{Escoamento transição}$$
$$Re_x > 3x10^6 \quad \rightarrow \quad \text{Escoamento turbulento}$$

Ex. - Calcular a espessura da camada-limite de velocidade para o escoamento de água (40 ^oC) sobre uma placa plana horizontal de

2,0 m de comprimento. A velocidade da água é de 1,0 m/s. μ = 6,54 milipoise; ρ = 0,9922 g/cm^3.

μ = 6,54 milipoise = 6,54x10^{-3} g/cm.s = 6,54x10^{-4} kg/m.s
ρ = 0,9922 g/cm^3 = 992,2 kg/m^3

x = 0,1 m → Re_x = 1,0 x 992,2 x 0,1/6,54x10^{-4} = 151.713 = 1,52x10^5
x = 2,0 m → Re_x = 3.034.250 = 3,03x10^6

x = 0,1 m	δ_{vel} = 0,00128 m = 1,28 mm	(laminar)
x = 2,0 m	δ_{vel} = 0,0380 m = 38,0 mm	(turbulento)

Se o fluido e a placa do exemplo apresentarem temperaturas diferentes, além da camada-limite de velocidade, uma camada-limite de temperatura se desenvolverá a partir do bordo de ataque. Para ilustração, assumido para a água um número de Prandtl de 4,5 (T=40 ^{o}C), teremos:

Para x = 2,0 m	δ_{vel} = 38,0 mm	δ_{temp} = 23 mm

Os processos de transferência de calor ocorrem no interior da camada-limite de temperatura, ou seja, em uma camada de poucos milímetros de espessura.

Coeficiente de Transferência de Calor Convectivo

Como citado anteriormente, o coeficiente de transferência de calor por convecção é uma função da geometria do sistema, das propriedades do fluido e do escoamento, podendo variar localmente ao longo de uma superfície. Para sua estimativa, adotaremos a forma funcional dos parâmetros significativos de dependência deste coeficiente.

Um coeficiente médio, $\bar{h}$, pode ser obtido através de uma relação funcional do tipo:

$$\frac{\bar{h}L}{K} = f(Re_L, Pr)$$

L = dimensão característica do sistema.

O grupo adimensional abaixo é chamado de número de Nusselt:

$$\frac{\bar{h}L}{K} = Nu_L \equiv \text{número de Nusselt}$$

Para muitas situações práticas, podemos obter uma relação funcional do tipo apresentado acima. Para casos mais complexos, $\bar{h}$ pode ser determinado experimentalmente.

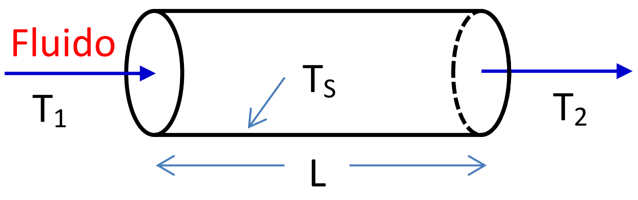
O coeficiente de transferência de calor convectivo varia, consideravelmente, com a posição. Assim, para uso das correlações para sua estimativa, deve-se observar se as expressões são indicadas para coeficientes locais ou médios.

Além disso, devemos considerar que a temperatura do fluido varia ao longo da camada-limite, e as propriedades do fluido (densidade, viscosidade, condutividade térmica, etc.) também variam. Assim, adota-se uma temperatura média para a avaliação dessas propriedades, chamada de temperatura de película (T_f):

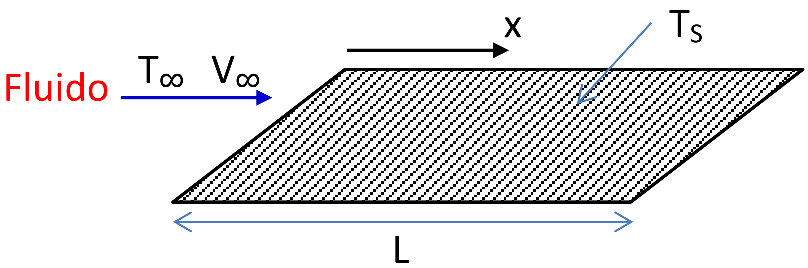
$$T_f = \frac{T_S + T_\infty}{2}$$

Para escoamento no interior de condutos, define-se a temperatura volumétrica (T_b):

$$T_b = \frac{T_1 + T_2}{2}$$



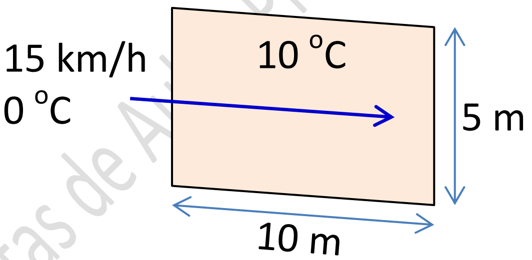
Placa Plana - Convecção Forçada: a dimensão característica para a convecção forçada sobre uma placa plana é a distância ao longo do escoamento.



As expressões abaixo podem ser utilizadas para cálculo de h:

$Nu_x = 0{,}332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$	$Re_x < 2x10^5$	Coeficiente local
$Nu_L = 0{,}664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3}$	$Re_L < 2x10^5$	Coeficiente médio
$Nu_x = 0{,}0288 Re_x^{4/5} Pr^{1/3}$	$Re_x > 3x10^6$	Coeficiente local
$Nu_L = 0{,}0360 Re_L^{4/5} Pr^{1/3}$	$Re_L > 3x10^6$	Coeficiente médio

Ex. - Uma superfície vertical está exposta a ventos com velocidade de 15 km/h e temperatura de 0 °C. Se a superfície está a 10 °C, estime a taxa de transferência de calor neste caso. As dimensões da superfície são 10 m e 5 m.



$$T_f = \frac{T_S + T_\infty}{2}$$

$T_f = (10 + 0)/2 = 5\ ^oC$

Propriedades do ar T = 5 °C	$C_P = 1.005$ J/kg °C K = 0,0245 W/m °C $\rho = 1{,}27$ kg/m³ $\mu = 1{,}74x10^{-5}$ kg/m s

$V_\infty = 15$ km/h = 4,17 m/s

Coeficiente médio de transferência de calor:

$Re_L = \dfrac{V_\infty \rho L}{\mu}$	$Re_L = \dfrac{4{,}17 \times 1{,}27 \times 10}{1{,}74 \times 10^{-5}} = 3{,}044 \times 10^6$
$Pr = \dfrac{C_P \mu}{K}$	$Pr = \dfrac{1000 \times 1{,}74 \times 10^{-5}}{0{,}0245} = 0{,}71$

Baseado no número de Reynolds, vamos assumir escoamento turbulento:

$$Nu_L = 0{,}0360 Re_L^{4/5} Pr^{1/3}$$

$$\frac{\bar{h}L}{K} = 0{,}0360\left(3{,}044 \times 10^6\right)^{4/5} (0{,}71)^{1/3}$$

$$\frac{\bar{h}10}{0{,}0245} = 0{,}0360 \times 153729 \times 0{,}89 = 4925{,}5$$

$$\bar{h} = 12{,}1 \text{ W/m}^2 \text{ °C}$$

$$\dot{Q} = \bar{h}A(T_S - T_f) = 12{,}1 \times 10 \times 5\ (10 - 5) = 3.025 \text{ W}$$

Placa Plana - Convecção Natural: durante a convecção natural, a movimentação do fluido ocorre em função da alteração de sua densidade, devido a mudanças na temperatura. O coeficiente de expansão térmica, β, caracteriza a mudança na densidade:

$$\beta = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial T}\bigg|_{P=\text{constante}}$$

Para um gás ideal: $\beta = 1/T$. Para líquidos, β é obtido experimentalmente.

A velocidade do fluido surge a partir das diferenças de densidade. Uma vez que não há nenhuma velocidade forçada, o conceito do número de Reynolds não se aplica. Em vez disso, define-se outro parâmetro adimensional, o número de Grashof:

$$Gr = \frac{\beta g \rho^2 L^3 \Delta T}{\mu^2}$$

ΔT = diferença de temperatura entre a superfície e o fluido.

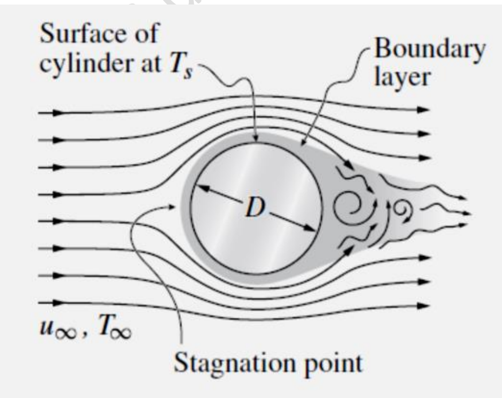
Fórmulas para convecção natural dependem da orientação da superfície. Por exemplo, para uma parede vertical aquecida, temos:

$$Nu_L = \left(0{,}825 + \frac{0{,}387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0{,}492/Pr)^{9/16}]^{8/27}}\right)^2$$

Neste caso, a dimensão caracterítica, L, é a altura da superfície vertical.

Outro número adimensional, chamado de número de Rayleigh (Ra), é definido em termos do número de Grashof (Gr) e do número de Prandtl (Pr), como: Ra = Gr Pr.

Cilindro - Convecção Forçada: a dimensão característica é o diâmetro externo do cilindro. Temos a seguinte correlação:



$$Nu_D = B Re_D^n Pr^{1/3}$$

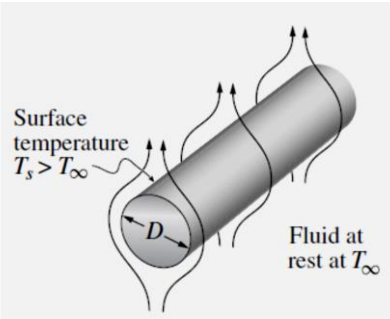
O número de Reynolds é baseado no diâmetro externo do cilindro:

$$Re_D = \frac{\rho V_\infty D}{\mu}$$

Os valores para B e n:

Re_D	B	n
0,4 - 4	0,989	0,330
4 - 40	0,911	0,385
40 - 4.000	0,683	0,366
4.000 - 40.000	0,193	0,618
40.000 - 400.000	0,027	0,805

Cilindro - Convecção Natural: para um cilindro aquecido na horizontal:



$$Nu_D = \left(0,60 + \frac{0,387 Ra_D^{1/6}}{[1 + (0,559/Pr)^{9/16}]^{8/27}}\right)^2$$

$$10^{-5} < Ra_D < 10^{12}$$

No escoamento de fluidos no interior de cilindros (condutos), a dimensão caracterítica é o diâmetro interno do cilindro. Apresentam-se as correlações:

$Nu_D = 3,66$ para $Re_D < 2.300$
$Nu_D = 0,023 Re_D^{0,8} Pr^n$ $Re_D > 10.000$ $L/D > 10$ $0,6 < Pr < 160$ n = 0,3 para resfriamento do fluido n = 0,4 para aquecimento do fluido

Propriedades da água saturada.

> Cuidado! Nestas tabelas, o ponto é vírgula, pois os dados originais estão em inglês.

Temp K	Pressure $P \times 10^{-5}$ Pa	Specific Heat c_p kJ/kg·K	Viscosity $N \cdot s/m^2$ $\mu \times 10^6$	Thermal Conduc. k W/m·K	Prandtl Number Pr	Expansion Coefficient $\beta \times 10^6$ K^{-1}
273.15	0.00611	4.217	1750	0.569	12.99	-68.05
275	0.00697	4.211	1652	0.574	12.22	-32.74
280	0.00990	4.198	1422	0.582	10.26	46.04
285	0.01387	4.189	1225	0.590	8.81	114.1
290	0.01917	4.184	1080	0.598	7.56	174.0
295	0.02617	4.181	959	0.606	6.62	227.5
300	0.03531	4.179	855	0.613	5.83	276.1
305	0.04712	4.178	769	0.620	5.20	320.6
310	0.06221	4.178	695	0.628	4.62	361.9
315	0.08132	4.179	631	0.634	4.16	400.4
320	0.1053	4.180	577	0.640	3.77	436.7
325	0.1351	4.182	528	0.645	3.42	471.2
330	0.1719	4.184	489	0.650	3.15	504.0
335	0.2167	4.186	453	0.656	2.88	535.5
340	0.2713	4.188	420	0.660	2.66	566.0
345	0.3372	4.191	389	0.668	2.45	595.4
350	0.4163	4.195	365	0.668	2.29	624.2
355	0.5100	4.199	343	0.671	2.14	652.3
360	0.6209	4.203	324	0.674	2.02	697.9
365	0.7514	4.209	306	0.677	1.91	707.1
370	0.9040	4.214	289	0.679	1.80	728.7
373.15	1.0133	4.217	279	0.680	1.76	750.1
375	1.0815	4.220	274	0.681	1.70	761
380	1.2869	4.226	260	0.683	1.61	788

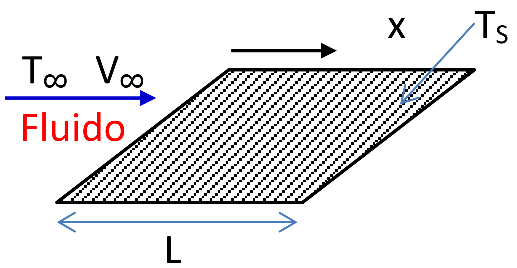
Adapted from Mills, A.F. 1995. *Basic Heat and Mass Transfer*. Irwin, Chicago.

Propriedades do ar à pressão atmosférica.

Temp K	Density ρ kg/m^3	Specific Heat c_p kJ/kg · K	Viscosity $\mu \times 10^5$ kg/m · s	Thermal Conductivity k W/m · K	Thermal Diffusivity $\alpha \times 10^5$ m^2/s	Prandtl Number Pr
200	1.7690	1.0064	1.3286	0.01809	1.0161	0.739
250	1.4133	1.0054	1.5992	0.02227	1.5673	0.722
260	1.3587	1.0054	1.6504	0.02308	1.6896	0.719
270	1.3082	1.0055	1.7005	0.02388	1.8154	0.716
280	1.2614	1.0057	1.7504	0.02467	1.9447	0.714
290	1.2177	1.0060	1.7985	0.02547	2.0792	0.710
300	1.1769	1.0063	1.8465	0.02624	2.2156	0.708
310	1.1389	1.0068	1.8929	0.02701	2.3556	0.705
320	1.1032	1.0073	1.9392	0.02779	2.5008	0.703
330	1.0697	1.0079	1.9855	0.02853	2.6462	0.701
340	1.0382	1.0085	2.0302	0.02928	2.7965	0.699
350	1.0086	1.0092	2.0748	0.03003	2.9503	0.697
360	0.9805	1.0100	2.1177	0.03078	3.1081	0.695
370	0.9539	1.0109	2.1606	0.03150	3.2666	0.693
380	0.9288	1.0120	2.2018	0.03223	3.4289	0.691
390	0.9050	1.0130	2.2447	0.03295	3.5942	0.690
400	0.8822	1.0142	2.2859	0.03365	3.7609	0.689
450	0.7842	1.0212	2.4849	0.03710	4.6327	0.684
500	0.7057	1.0300	2.6703	0.04041	5.5594	0.681

Adapted from *Tables of Thermal Properties of Gases*, National Bureau of Standards Circular 564, Washington, D.C. (1955).

Ex. - Considere o escoamento laminar de um fluido frio sobre uma superfície plana aquecida. Para uma mesma velocidade do fluido e mesma temperatura de película (300 K), compare os fluxos de calor para água e para o ar. Mantendo-se todos os outros parâmetros, o que acontece com o fluxo de calor se a velocidade do escoamento dobra?



T_f = 300 K = 27 °C	Ar	Água
ρ (kg/m³)	1,18	995,8
μ (kg/m.s)	$1{,}84 \times 10^{-5}$	$8{,}6 \times 10^{-4}$
C_P (J/kg °C)	1.006	4.179
K (W/m °C)	0,0262	0,613

Para escoamento laminar sobre uma placa plana:

$Nu_L = 0{,}664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3}$	$Re_L < 2 \times 10^5$	Coeficiente médio

$$\frac{\bar{h}L}{K} = 0{,}664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \quad \rightarrow \quad \bar{h} = \frac{K}{L} 0{,}664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3}$$

O fluxo de calor:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \dot{q} = \bar{h}\Delta T$$

Podemos comparar os fluxos de calor:

$$\frac{\dot{q}_{água}}{\dot{q}_{ar}} = \frac{\bar{h}_{água}}{\bar{h}_{ar}} = \frac{K_{água}\left(Re_L^{1/2} Pr^{1/3}\right)_{água}}{K_{ar}\left(Re_L^{1/2} Pr^{1/3}\right)_{ar}}$$

P/ água:

$Pr_{água} = C_P\, \mu / K = 4179 \times 8{,}6 \times 10^{-4} / 0{,}613 = 5{,}86$

$Re_L = 995{,}8\, V_\infty\, L / 8{,}6 \times 10^{-4} = 1.157.907\, V_\infty\, L$

P/ ar:

Pr_{ar} = 1006 x 1,84x10^{-5}/0,0262 = 0,71

Re_L = 1,18 V_∞ L/1,84x10^{-5}= 64.130 V_∞ L

$$\frac{\dot{q}_{água}}{\dot{q}_{ar}} = \frac{0{,}613\left[1.157.907^{1/2}\ (V_\infty\ L)^{1/2} 5{,}83^{1/3}\right]_{água}}{0{,}0262\left[64.130^{1/2}\ (V_\infty\ L)^{1/2} 0{,}71^{1/3}\right]_{ar}}$$

$$\frac{\dot{q}_{água}}{\dot{q}_{ar}} = \frac{1.187{,}2}{5{,}92} = 200{,}5 \qquad \rightarrow \qquad \dot{q}_{água} = 200{,}5\ \dot{q}_{ar}$$

A transferência de calor para a água é cerca de 200 vezes maior que a transferência para o ar.

Se a velocidade dobra, para a água temos: $Re_2 = 2Re_1$

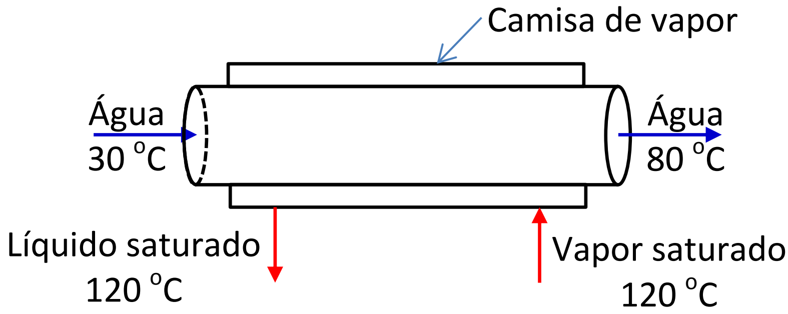
$$\frac{\dot{q}_2}{\dot{q}_1} = \frac{\left(Re_L^{1/2}\right)_2}{\left(Re_L^{1/2}\right)_1} = \frac{2^{1/2}\left(Re_L^{1/2}\right)_1}{\left(Re_L^{1/2}\right)_1} = 1{,}41 \rightarrow \dot{q}_2 = 1{,}41\dot{q}_1$$

O fluxo de calor é cerca de 40% maior.

Ex. - Deseja-se aquecer 8.000 L/h de água, de 30 °C para 80 °C, pela passagem no interior de um tubo encamisado cuja parede está a 120 °C. O aquecimento é realizado pela passagem de vapor de água saturado na camisa. Qual o comprimento de tubo necessário? Qual a vazão de vapor utilizada? O tubo tem diâmetro de 5 cm.

Para escoamento no interior de condutos, define-se a temperatura volumétrica (T_b):

$$T_b = \frac{T_{entrada} + T_{saída}}{2} = \frac{30+80}{2} = 55\ °C = 328\ K$$



$T_b \approx 330$ K Água	ρ (kg/m^3)	984,4
	μ (kg/m.s)	4,89x10^{-4}
	C_P (J/kg °C)	4.184
	K (W/m °C)	0,650

Calculo da velocidade média:

$$\bar{V} = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{4\dot{V}}{\pi D^2} = \frac{4 \times \left(\frac{8000}{1000}\right) \times \frac{1}{3600}}{\pi\ (5/100)^2} = 1{,}13 \text{ m/s}$$

Número de Reynolds:

$$Re_D = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu} = \frac{984{,}4 \times 1{,}13 \times 0{,}05}{4{,}89 \times 10^{-4}} = 113.740$$

Número de Prandtl:

$$Pr = C_P\, \mu/K = 4184 \times 4{,}89\text{x}10^{-4}/0{,}650 = 3{,}15$$

Coeficiente médio de transferência de calor:

$$Nu_D = 0{,}023 Re_D^{0,8} Pr^{0,4} \quad \rightarrow \quad \frac{\bar{h}D}{K} = 0{,}023 Re_D^{0,8} Pr^{0,4}$$

$$\bar{h} = \left(0{,}650 \times 0{,}023 \times 113740^{0,8} 3{,}15^{0,4}\right)/0{,}05 = 5.244{,}8 \text{ W/m}^2\ ^\circ\text{C}$$

Calor transferido para a água da parede do tubo:

$$\dot{Q} = \bar{h}A(T_S\text{-}T_b) = \bar{h}\pi DL(T_S\text{-}T_b)$$

A = área interna do tubo em contato com a água;
D = diâmetro interno do tubo;
L = comprimento do tubo.

$$\dot{Q} = 5.244{,}8\ \pi\ 0{,}05L(120\text{-}55) = 53.550\ L\ [J/s]$$

A energia necessária para aquecer a água pode ser calculada:

Para C_P constante

$$\dot{Q}_{AQ} = \dot{m}_{água} \int_{30}^{80} C_P dT = \dot{m}_{água}\, C_P(80\text{-}30)$$

$$\dot{m}_{água} = \rho\dot{V} = 984{,}4 \times \frac{8000}{1000 \times 3600} = 2{,}19\ kg/s$$

$$\dot{Q}_{AQ} = 2{,}19 \times 4.184\ (80\text{-}30) = 458.148\ J/s$$

Dessa maneira:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{AQ} \rightarrow \quad 53.550\ L = 458.148 \rightarrow L = 8{,}5\ m$$

Para cálculo do consumo de vapor, vemos que o vapor entra na camisa como vapor saturado (120 ^oC) e sai como líquido saturado (120 ^oC). A partir de uma tabela de dados de vapor saturado:

$\widehat{H}_{entrada} = 2.708\ kJ/kg$ $\qquad\qquad$ $\widehat{H}_{saída} = 511\ kJ/kg$

A energia fornecida pelo vapor pode ser estimada por meio da variação da entalpia do vapor:

$$\Delta\dot{H} = \dot{m}_{vapor}\Delta\hat{H} \qquad \rightarrow \qquad \dot{Q} = \Delta\dot{H}$$

$$458{,}148 = \dot{m}_{vapor}\,(2.708 - 511) \rightarrow \dot{m}_{vapor} = 0{,}208 \text{ kg/s} = 751 \text{ kg/h}$$

Transferência de Calor por Radiação

Toda matéria, quando em temperaturas acima do zero absoluto, emite energia radiativa. Esta radiação é atribuída a alterações na configuração dos elétrons dos átomos dentro da matéria e é emitida como ondas eletromagnéticas.

Ao contrário da condução e convecção, a radiação não necessita de um meio material. O fluxo máximo de radiação emitida por um corpo à temperatura absoluta T é dado pela lei de Stefan-Boltzmann:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \dot{q} = \sigma T^4$$

σ = constante de Stefan-Boltzmann = $5{,}676\times10^{-8}$ W/m^2K^4

A energia líquida transferida depende da superfície e da geometria do corpo. Não é objetivo deste curso o aprofundamento neste assunto em particular.