CONVECCION

CONVECCIÓN

I. Introducción

- ❑Convección. Tipos.
- ❑Concepto de capa límite.
- ❑Ecuaciones básicas de la transmisión de calor por convección. Adimensionalización.
- ❑Números adimensionales.

II. Convección Forzada

- ❑Correlaciones convección forzada exterior
    - ❑Placa
    - ❑Tubería
    - ❑Haces de tubos
- ❑Correlaciones convección forzada interior

III. Convección Natural

IV. Cambio de Fase

INTRODUCCION A LA CONVECCION.

Convección: Conducción + Movimiento

Transferencia de calor entre una superficie y un fluido. Depende de las condiciones de la superficie (geometría y temperatura) y del fluido (temperatura, velocidad y propiedades termofísicas del mismo).

Según sea el flujo → Forzado o Natural (agente que provoca el mov.)
→ Externo o Interno

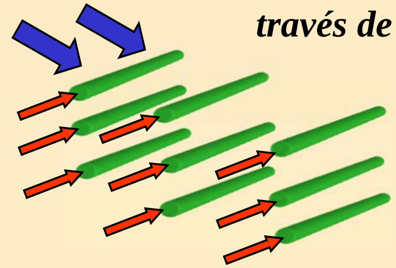
Según la fase del fluido → Monofásico (líquido o gas)
→ Con cambio de fase (condensación o evaporación)

Ley de Enfriamiento de Newton (1701) :

$$q'' = \frac{q}{A} = h\ (T_{\sup} - T_{fluido})$$

Flujo externo cruzado sobre un banco de tubos

Flujo interno a través de los tubos



h: Coeficiente de convección (W/m^2 K) (no es una propiedad del fluido)

Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección

Proceso	h [W/m² K]
• *Convección libre*	
– Gases	2 - 25
– líquidos	50 - 1000
• *Convección forzada*	
– Gases	25 - 250
– líquidos	50 - 20000
• *Convección con cambio de fase*	
– Ebullición o condensación	2500 - 100000

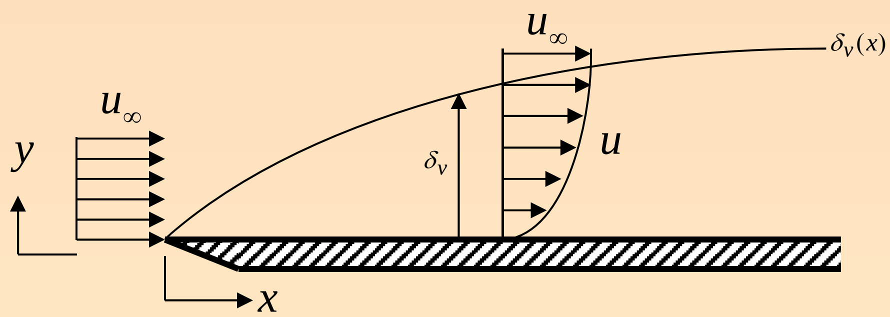
INTRODUCCION A LA CONVECCION.

Capa límite : *Zona en que los gradientes de velocidad y temperatura son significativos (la viscosidad adquiere importancia)*

Capa límite cinemática :

Espesor capa límite cuando : $u = 95\%\, u_\infty$

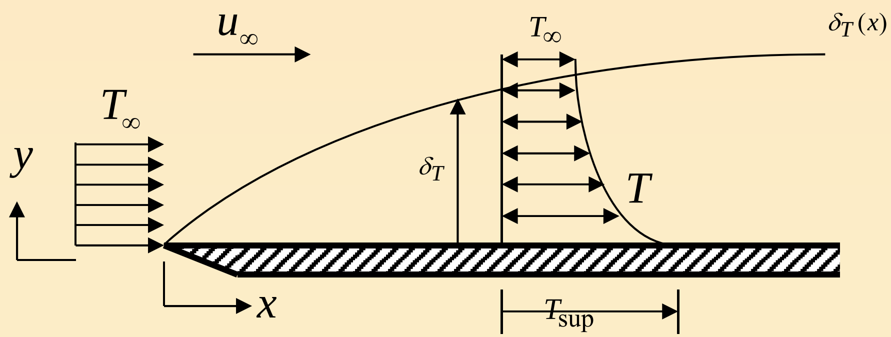
Tensión tangencial : $$\tau_{sup} = \mu \left.\frac{\partial u}{\partial y}\right|_{y=0}$$



Capa límite térmica :

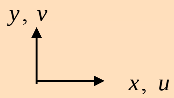
Espesor capa límite térmica cuando:

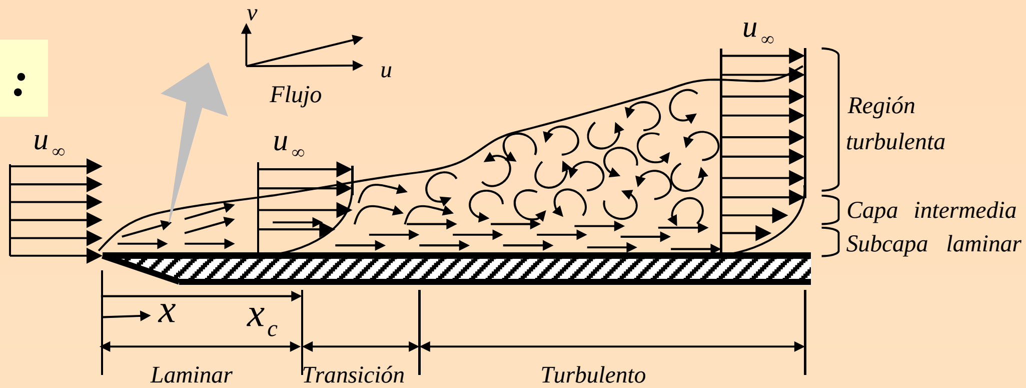
$$\frac{T_{sup} - T}{T_{sup} - T_\infty} = 95\,\%$$



INTRODUCCION A LA CONVECCION.

Flujo laminar y flujo turbulento :





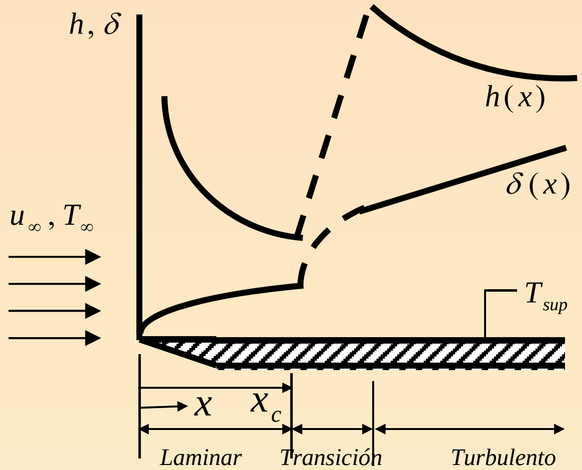
u_∞ = *velocidad media del fluido*

Laminar

- *Fuerzas viscosas importantes frente a las de inercia*
- *Líneas de corriente paralelas - mov. ordenado*

Turbulento

- *Gran traspaso de materia en sentido normal a las capas*
- *Mayor transmisión de calor*
- *Gran incremento de: espesor capa límite, tensiones cortantes, coef. de convección y pérdidas por rozamiento*



Transición

- *Comienza la inestabilidad de las líneas de fluido.*

Número de Reynolds :

Número adimensional que caracteriza las condiciones des fluido.

		Laminar	Transición	Turbulento
Para flujo externo :	$R_{e_x} = \dfrac{\rho u_\infty x}{\mu} \longrightarrow$	$< 5\ 10^5$	$\approx 5\ 10^5$	$> 5\ 10^5$
Para flujo interno :	$R_{e_D} = \dfrac{\rho u_\infty D}{\mu} \longrightarrow$	< 2300	$2300 < \mathrm{Re} < 4000$	> 4000

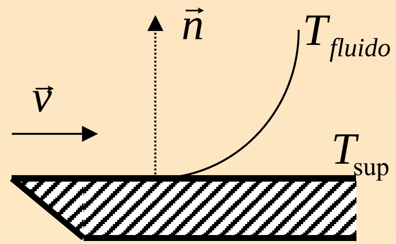
INTRODUCCION A LA CONVECCION.

Ecuaciones básicas para el cálculo de la transmisión de calor por convección.

Con la definición dinámica y térmica del flujo hallamos "h" (coef. convección)

Sistema de 6 ecuaciones :

- *Ecuaciones de continuidad (o conservación de la masa)*
- *Ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento : en derivadas parciales (3D)*
- *Ecuación de conservación de la energía*
- *Ecuación de estado del fluido*



Incógnitas :

- *Velocidades : u, v, w*
- *Presión, temperatura, densidad*

Hipótesis simplificativas :

- *Régimen estacionario (permanente)*
- *Fluido incompresible* $(\rho = cte)$

Por Newton: $$dq = h(T_{sup} - T_{\infty})\, dA$$

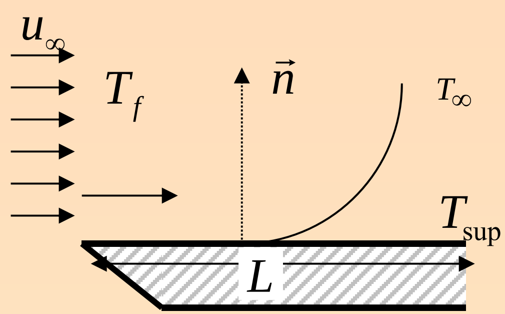
Por Fourier: $$dq = -k \left.\frac{\partial T}{\partial n}\right|_{n \to 0} dA$$

$$\boxed{h = -\frac{k}{T_{sup} - T_{\infty}} \frac{\partial T}{\partial n}}$$

INTRODUCCION A LA CONVECCION.

Convección. Planteamiento general.

Solución analítica de un problema de convección para flujo incompresible en estado estacionario.



$$dq = h\left(T_{sup} - T_f\right)dA \qquad h = -\frac{k}{T_{sup} - T_f}\left.\frac{\partial T}{\partial n}\right|_{n\to 0}$$

$$T = f(x,y,z)$$
$$u = f(x,y,z)$$
$$v = f(x,y,z)$$
$$w = f(x,y,z)$$

Ec. continuidad.:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Ec. cant. mov.:

$$\left(u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) = X - \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} + \nu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)$$

$$\left(u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}\right) = Y - \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y} + \nu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)$$

$$\left(u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) = Z - \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z} + \nu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)$$

Ec. conservación de la energía.:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} + u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} + w\frac{\partial T}{\partial z}\right)\rho\ cp = k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + (Xu + Yv + Zw)\rho -$$

$$-\left(u\frac{\partial P}{\partial x} + v\frac{\partial P}{\partial y} + w\frac{\partial P}{\partial z}\right) + +2\mu\left(\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)\right)$$

INTRODUCCION A LA CONVECCION.

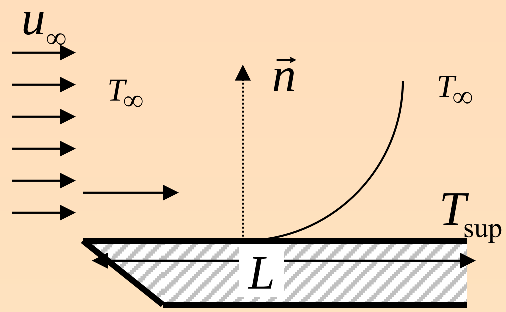
Convección forzada, régimen estacionario.

Adimensionalización :

$$\mathrm{x}=\frac{x}{L} \quad \mathrm{y}=\frac{y}{L} \quad \mathrm{z}=\frac{z}{L} \quad \mathrm{u}=\frac{u}{u_\infty} \quad \mathrm{v}=\frac{v}{u_\infty} \quad \mathrm{w}=\frac{w}{u_\infty} \quad \mathrm{P}=\frac{P}{\rho u_\infty}$$

Sustituyendo en las cuaciones,
fluido incompresible nos queda:

$$\theta=\frac{T-T_\infty}{T_{sup}-T_\infty}$$



$$T=f(x,y,z)$$
$$u=f(x,y,z)$$
$$v=f(x,y,z)$$
$$w=f(x,y,z)$$

Ec. continuidad

$$\mathrm{u}\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{x}}+\mathrm{v}\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{y}}+\mathrm{w}\frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{z}}=0$$

Ec. cant. mov.:

$$\left(\mathrm{u}\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{x}}+\mathrm{v}\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{y}}+\mathrm{w}\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{z}}\right)=-\frac{\partial \mathrm{P}}{\partial \mathrm{x}}+\frac{1}{Re}\left(\frac{\partial^2 \mathrm{u}}{\partial \mathrm{x}^2}+\frac{\partial^2 \mathrm{u}}{\partial \mathrm{y}^2}+\frac{\partial^2 \mathrm{u}}{\partial \mathrm{z}^2}\right)$$

$$\left(\mathrm{u}\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{x}}+\mathrm{v}\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{y}}+\mathrm{w}\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{z}}\right)=-\frac{\partial \mathrm{P}}{\partial \mathrm{y}}+\frac{1}{Re}\left(\frac{\partial^2 \mathrm{v}}{\partial \mathrm{x}^2}+\frac{\partial^2 \mathrm{v}}{\partial \mathrm{y}^2}+\frac{\partial^2 \mathrm{v}}{\partial \mathrm{z}^2}\right)$$

$$\left(\mathrm{u}\frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{x}}+\mathrm{v}\frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{y}}+\mathrm{w}\frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{z}}\right)=-\frac{\partial \mathrm{P}}{\partial \mathrm{z}}+\frac{1}{Re}\left(\frac{\partial^2 \mathrm{w}}{\partial \mathrm{x}^2}+\frac{\partial^2 \mathrm{w}}{\partial \mathrm{y}^2}+\frac{\partial^2 \mathrm{w}}{\partial \mathrm{z}^2}\right)$$

$$\mathrm{Re}=\frac{u_\infty L}{\nu}$$
$$\mathrm{Pr}=\frac{\mu c_p}{k}$$
$$Ec=\frac{u^2_\infty}{c_p\,(T_{sup}-T_\infty)}$$

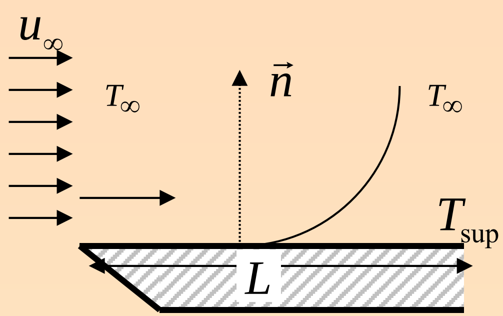
Ec. conservación de la energía.

$$\left(\mathrm{u}\frac{\partial \theta}{\partial \mathrm{x}}+\mathrm{v}\frac{\partial \theta}{\partial \mathrm{y}}+\mathrm{w}\frac{\partial \theta}{\partial \mathrm{z}}\right)=\frac{1}{RePr}\left(\frac{\partial \theta^2}{\partial \mathrm{x}^2}+\frac{\partial \theta^2}{\partial \mathrm{y}^2}+\frac{\partial \theta^2}{\partial \mathrm{z}^2}\right)-$$

$$-\left(\mathrm{u}\frac{\partial \mathrm{P}}{\partial \mathrm{x}}+\mathrm{v}\frac{\partial \mathrm{P}}{\partial \mathrm{y}}+\mathrm{w}\frac{\partial \mathrm{P}}{\partial \mathrm{z}}\right)+2\frac{Ec}{Re}\left(\left(\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{x}}\right)^2+\left(\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{y}}\right)^2+\left(\frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{z}}\right)^2+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{y}}+\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{x}}\right)+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{z}}+\frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{x}}\right)+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{z}}+\frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{y}}\right)\right)$$

INTRODUCCION A LA CONVECCION.

Convección forzada. Números adimensionales.



$$Re = \frac{\rho u_\infty L}{\mu} = \frac{u_\infty L}{\nu} \qquad Pr = \frac{\mu c_p}{k} \qquad Ec = \frac{u_\infty^2}{c_p (T_{sup} - T_\infty)}$$

$$\theta = f(Re, Pr, Ec) \qquad \theta = \frac{T - T_\infty}{T_{sup} - T_\infty}$$

Distribución de temperatura adimensionalizada

Aplicación de la definición de coeficiente de convección

$$\left.\frac{\partial T}{\partial n}\right|_{n\to 0} = \left.\frac{\partial T}{\partial n}\frac{\partial n_{a\dim}}{\partial n_{a\dim}}\frac{\partial \vartheta}{\partial \vartheta}\right|_{n\to 0} = \left.\frac{\partial T}{\partial \vartheta}\frac{\partial n_{a\dim}}{\partial n}\frac{\partial \vartheta}{\partial n_{a\dim}}\right|_{n\to 0} = (T_{sup} - T_\infty)\left.\frac{1}{L}\frac{\partial \vartheta}{\partial n_{a\dim}}\right|_{n\to 0}$$

$$h = -\frac{k}{T_{sup} - T_\infty}\left.\frac{\partial T}{\partial n}\right|_{n\to 0} = -\frac{k}{L}\left.\frac{\partial \vartheta}{\partial n_{a\dim}}\right|_{n\to 0} \longrightarrow Nu = \frac{hL}{k} = -\left.\frac{\partial \theta}{\partial n_{a\dim}}\right|_{n\to 0}$$

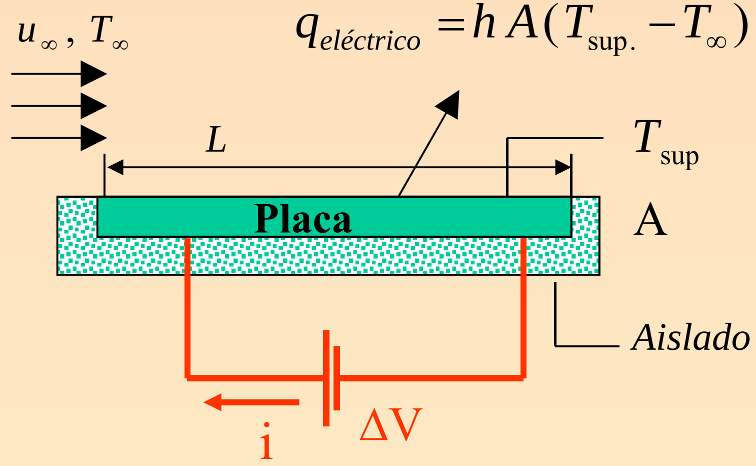
$$Nu = f(Re, Pr, Ec) \xrightarrow[\text{Despreciando los efectos viscosos}]{} Nu = f(Re, Pr)$$

INTRODUCCION A LA CONVECCION.

Método experimental par hallar la correlación entre Nu, Re y Pr

Midiendo el flujo de calor $q_{eléctrico}$, la temperatura superficial y la del medio podemos determinar el valor del coeficiente de convección. Por otra parte también debemos medir la velocidad del fluido.

$$q_{eléctrico} = h\,A(T_{sup.} - T_\infty)$$

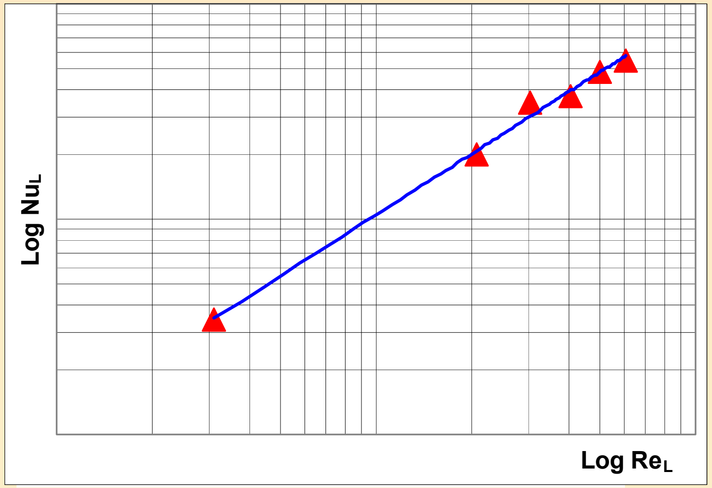


Conocidas las propiedades del fluido (conductividad,...) y las dimensiones de la placa (L) estimamos los números adimensionales (Nu, Re, Pr), los cuales finalmente podemos correlacionar y representar gráficamente.

$$Re = \frac{\rho u_\infty L}{\mu} = \frac{u_\infty L}{\nu} \qquad Pr = \frac{\mu c_p}{k}$$

Por teoría sabemos que esta correlación tiene carácter general en este tipo de geometría.

$$\overline{N}_{u_L} = \frac{\overline{h}L}{k_{fluido}} = cRe_L^m Pr^n$$



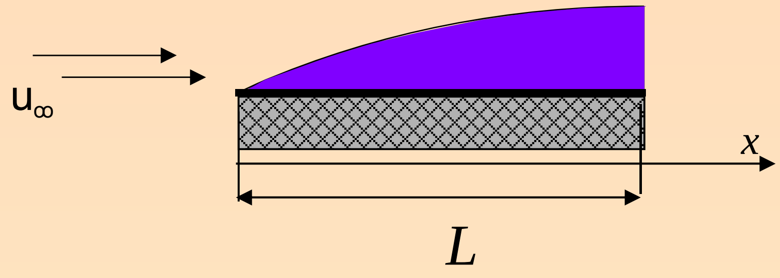
ECUACIONES CONVECCION FORZADA EXTERIOR

1. Flujo paralelo a un plano.

$$Nu_L = \frac{hL}{k} \qquad Re_L = \frac{\rho u_\infty L}{\mu} = \frac{u_\infty L}{\nu} \qquad Pr = \frac{\mu c_p}{k}$$

(local) $Nu_x = C\, Re_x^m\, Pr^n$

(promedio) $Nu_L = A\, Re_L^m\, Pr^n$



	C	m	n	A
Flujo laminar $Re < 500000$				
$0.6 < Pr < 50$	0.332	1/2	1/3	0.664
$Pr < 0.05$	0.565	1/2	1/2	1.13
Flujo turbulento	0.0296	0.8	1/3	0.037

Para flujo mezclado (zonas laminar y turbulenta ambas significativas):

$$Nu_L = (0.037 \cdot Re_L^{4/5} - 871) \cdot Pr^{1/3} \qquad Re_{tr} < Re < 10^8 \quad 0.6 < Pr < 60$$

Propiedades a T_f $\qquad T_f = \dfrac{T_{pared} + T_\infty}{2}$

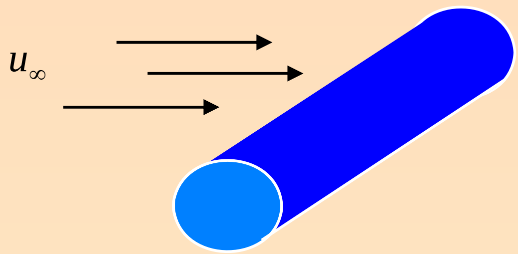
Para el caso de ser aire:

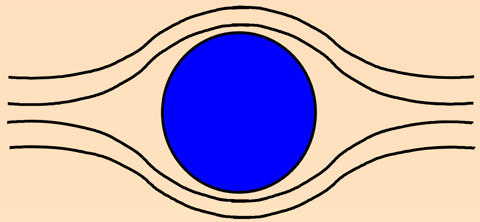
$$h = 2.38\,(u_\infty)^{0.89} \qquad h(W/m^2\,{}^oC), u_\infty(m/s)$$

ECUACIONES CONVECCION FORZADA EXTERIOR

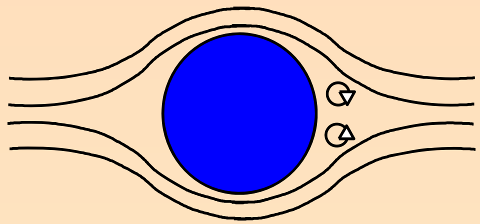
2. Cilindro circular con flujo normal.

$$Nu_D = \frac{hD}{k} \qquad Re_D = \frac{\rho u_\infty D}{\mu} = \frac{u_\infty D}{\nu} \qquad Pr = \frac{\mu c_p}{k}$$





$Re_D < 2\ 10^5$



$Re_D > 2\ 10^5$

$$Nu_D = C\, Re_D^m\, Pr^{1/3}$$

Re_D	C	m
0,4 a 4	0,989	0,330
4 a 40	0,911	0,385
40 a 4000	0,683	0,466
4000 a 40000	0,193	0,618
40000 a 400000	0,027	0,805

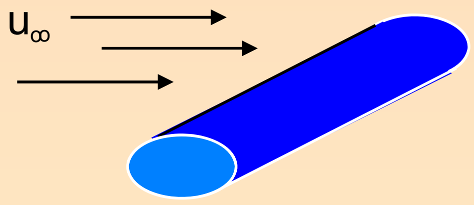
Propiedades a T_f

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

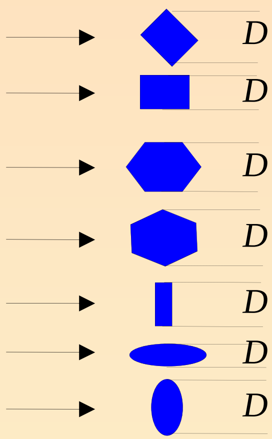
ECUACIONES CONVECCION FORZADA EXTERIOR

3. Tubería no circular con flujo normal de gases.

$$Nu_D = \frac{hD}{k} \qquad Re_D = \frac{\rho u_\infty D}{\mu} = \frac{u_\infty D}{\nu} \qquad Pr = \frac{\mu c_p}{k}$$



$$Nu_D = C\, Re_D^m\, Pr^{1/3}$$



	Re_D	*C*	*m*
D	$5\ 10^3$ a 10^5	0,246	0,588
D	$5\ 10^3$ a 10^5	0,102	0,675
D	$5\ 10^3$ a $2\ 10^4$	0,160	0,638
	$2\ 10^4$ a 10^5	0,0385	0,782
D	$5\ 10^3$ a 10^5	0,153	0,638
D	$4\ 10^3$ a $1{,}5\ 10^4$	0,228	0,731
D	$2\ 10^3$ a $1{,}5\ 10^4$	0,224	0,612
D	$3\ 10^3$ a $1{,}5\ 10^4$	0,085	0,804

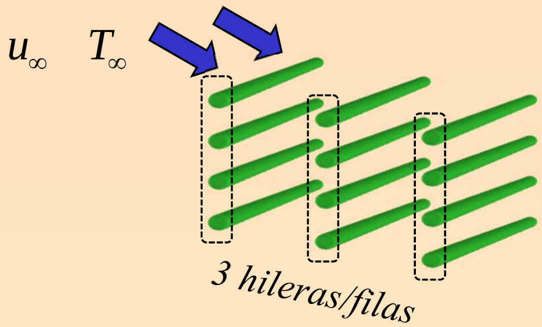
Propiedades a T_f

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

ECUACIONES CONVECCION FORZADA EXTERIOR

4. Haces de tubos con flujo normal.

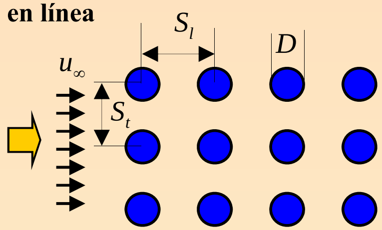
Flujo externo cruzado sobre un banco de tubos

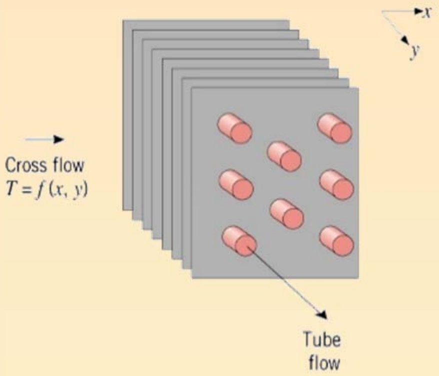


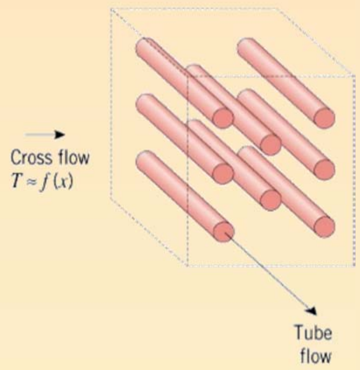
$$Re_D = \frac{\rho u_{max} D}{\mu} = \frac{u_{max} D}{\nu}$$

Ej.: banco de 4 hileras en línea

$$u_{max.} = \frac{S_t}{S_t - D} u_\infty$$



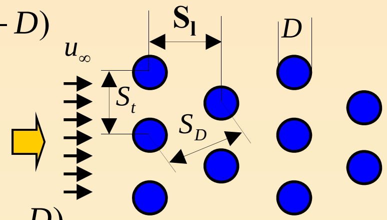




Ej.: banco de 4 hileras al tresbolillo

$$Si \quad 2(S_D - D) > (S_t - D)$$

$$u_{max.} = \frac{S_t}{S_t - D} u_\infty$$



$$Si \quad 2(S_D - D) < (S_t - D)$$

$$u_{max.} = \frac{S_t}{2(S_D - D)} u_\infty$$

ECUACIONES CONVECCION FORZADA EXTERIOR

4. Haces de tubos con flujo normal.

$$Nu_D = \frac{hD}{k}$$

$$\overline{N}u_D = C_1 C_2 \, Re_D^m Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_{sup}} \right)^{1/4}$$

$$0.7 < \Pr < 500$$

Zukauskas (1972)

Configuración	Re_D	C_1	m
Línea	$10 - 10^2$	0.80	0.40
Línea	$10^2 - 10^3$	0.51	0.5
Línea $(S_t / S_l > 0.7)$	$10^3 - 2\ 10^5$	0.27	0.63
Para S_t/S_l<0.7 no usar tubos en línea			
Línea	$2\ 10^5 - 2\ 10^6$	0.021	0.84
Tresbolillo	$10 - 10^2$	0.90	0.40
Tresbolillo	$10^2 - 10^3$	0.51	0.5
Tresbolillo $(S_t / S_l < 2)$	$10^3 - 2\ 10^5$	$0.35\,(S_t / S_l)^{1/5}$	0.60
Tresbolillo $(S_t / S_l > 2)$	$10^3 - 2\ 10^5$	0.40	0.60
Tresbolillo	$2\ 10^5 - 2\ 10^6$	0.022	0.84

$$\text{Propiedades a } T_{promedio} = \frac{T_{entrada} + T_{salida}}{2}$$

Para el uso de esta correlación específica se usa la $T_{promedio}$ pese a que en convección externa es más usual usar la de película

Valores de la constante C_2

Nº. de hileras	1	2	3	4	5	7	10	13	16	> 20
Línea	0,70	0,80	0,86	0,90	0,92	0,95	0,97	0,98	0,99	1
Tresbolillo	0,64	0,76	0,84	0,89	0,92	0,95	0,97	0,98	0,99	1

ECUACIONES CONVECCION FORZADA INTERIOR

Flujo interno.

$$Nu_D = \frac{hD}{k} \qquad Re_D = \frac{\rho u_\infty D}{\mu} = \frac{u_\infty D}{\nu} \qquad Pr = \frac{\mu c_p}{k}$$

$$\text{Propiedades a } T_{promedio} = \frac{T_{entrada} + T_{salida}}{2}$$

1. Nusselt y factores de fricción para flujo interno laminar (Re_D<2300).

Cross Section	$\frac{b}{a}$	$Nu_D \equiv \frac{hD_h}{k}$ (Uniform q_s'')	(Uniform T_s)	$f\,Re_{D_h}$
	—	4.36	3.66	64
a, b	1.0	3.61	2.98	57
a, b	1.43	3.73	3.08	59
a, b	2.0	4.12	3.39	62
a, b	3.0	4.79	3.96	69
a, b	4.0	5.33	4.44	73
b	8.0	6.49	5.60	82
	∞	8.23	7.54	96
Heated / Insulated	∞	5.39	4.86	96
	—	3.11	2.49	53

Si $\left(\frac{q}{A}\right)$ *es uniforme*

Si T_S *es uniforme*

Válido para flujo totalmente desarrollado y laminar

$$\frac{L}{D} > 0.05\,\mathrm{Re}_D$$

Nota: En conductos no circulares utilizar diámetro hidráulico:

$$D_h = \frac{4\ \ Area\ transveral}{Perímetro}$$

ECUACIONES CONVECCION FORZADA INTERIOR

Flujo interno.

$$Nu_D = \frac{hD}{k} \qquad Re_D = \frac{\rho u_\infty D}{\mu} = \frac{u_\infty D}{\nu} \qquad Pr = \frac{\mu c_p}{k}$$

Nota: En conductos no circulares utilizar diámetro hidráulico: $D_h = \dfrac{4\ \ Area\ transveral}{Perímetro}$

Propiedades a $T_{promedio} = \dfrac{T_{entrada} + T_{salida}}{2}$

2. Flujo interno turbulento (Re_D>4000)

2.1 Dittus-Boelter (1930)

Válido si: $0.7 \leq \Pr \leq 16700, \mathrm{Re} \geq 10000, \mathrm{L/D} \geq 10$

$$\boxed{Nu_D = 0.023\ Re_D^{0.8}\, Pr^{n}}$$

Valores de n: $\begin{cases} 0.3 \text{ si } T_{Sup} < T_m \text{ (flujo se enfria)} \\ 0.4 \text{ si } T_{Sup} > T_m \text{ (flujo se calienta)} \end{cases}$

2.2 Petukhov-Kirilov (1958)

$$\boxed{Nu_D = \frac{(f/8) RePr}{1.07 + 12.7 \cdot (f/8)^{0.5} \left(Pr^{2/3} - 1\right)}}$$

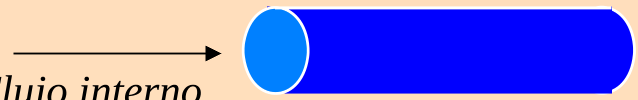
Válido si:

$$0.5 \leq \Pr \leq 2000, 10^4 \leq \mathrm{Re} \leq 5 \cdot 10^6$$

$$\boxed{f = (0.79 \ln \mathrm{Re} - 1.64)^{-2}}$$

Petukhov (1970)

ECUACIONES CONVECCION FORZADA INTERIOR



Flujo interno.

$$Nu_D = \frac{hD}{k} \qquad Re_D = \frac{\rho u_\infty D}{\mu} = \frac{u_\infty D}{\nu} \qquad Pr = \frac{\mu c_p}{k}$$

Nota: En conductos no circulares utilizar diámetro hidráulico: $D_h = \frac{4 \ \mathit{Area\ transveral}}{\mathit{Perímetro}}$

Propiedades a $T_{promedio} = \frac{T_{entrada} + T_{salida}}{2}$

2. Flujo interno turbulento (Re_D>4000)

2.1 Dittus-Boelter (1930)

Válido si: $0.7 \le \Pr \le 16700, \mathrm{Re} \ge 10000, \mathrm{L/D} \ge 10$

$$\boxed{Nu_D = 0.023\ Re_D^{0.8} Pr^n}$$

Valores de n: $\begin{cases} \text{0.3 si } T_{Sup} < T_m \text{ (flujo se enfria)} \\ \text{0.4 si } T_{Sup} > T_m \text{ (flujo se calienta)} \end{cases}$

2.2 Gnielinski (1976)

$$\boxed{Nu_D = \frac{(f/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7\cdot(f/8)^{0.5}\left(Pr^{2/3} - 1\right)}}$$

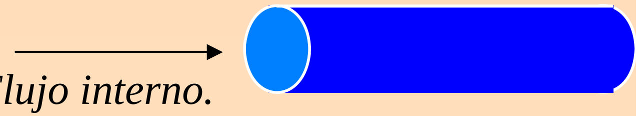
Válido si:

$$0.5 \le \Pr \le 2000,\ 3000 \le \mathrm{Re} \le 5\cdot 10^6$$

$$\boxed{f = (0.79 \ln \mathrm{Re} - 1.64)^{-2}}$$

Petukhov (1970)

En caso de flujo interno, corrección por el efecto de la variación de propiedades entre la temperatura de la superficie y el flujo:



Flujo interno.

LÍQUIDOS		GASES
$\dfrac{f}{f_B} = \left(\dfrac{Pr_s}{Pr_B}\right)^m$ ó $\left(\dfrac{\mu_s}{\mu_B}\right)^m$	ó	$\left(\dfrac{T_s}{T_B}\right)^m$
$\dfrac{Nu}{Nu_B} = \left(\dfrac{Pr_s}{Pr_B}\right)^n$ ó $\left(\dfrac{\mu_s}{\mu_B}\right)^n$	ó	$\left(\dfrac{T_s}{T_B}\right)^n$

Tipo de flujo		Fluido	Sentido transferencia calor	*m*	*n*
Laminar	$\dfrac{\mu_s}{\mu_B}$	Líquidos	Fluido se calienta	0.58	-0.11
			Fluido se enfría	0.50	-0.11
	$\dfrac{T_s}{T_B}$	Gases	Calentándose o enfriándose	1	0
Turbulento	$\dfrac{\mu_s}{\mu_B}$	Líquidos	Fluido se calienta	0.25	-0.11
			Fluido se enfría	0.25	-0.25
	$\dfrac{T_s}{T_B}$	Gases	Fluido se calienta	-0.2	-0.55
			Fluido se enfría	-0.1	0

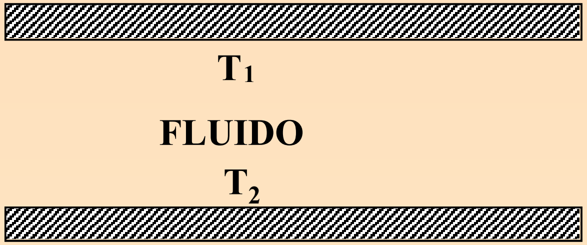
INTRODUCCIÓN A LA CONVECCION NATURAL

- ***Movimiento provocado por fuerzas de empuje gravitacionales asociadas a gradientes de densidad producidos por el propio calentamiento dentro del fluido.***
- ***Velocidades inducidas mucho más pequeñas que en convección forzada,*** *con lo que la* ***transmisión de calor*** **es mucho** ***más reducida.***
- Fundamental en múltiples sistemas:
  - *Conducciones de calefacción, radiadores, etc.*
  - *Dispositivos de disipación de calor al ambiente, (p.e. condensadores).*
  - *Enfriamiento de circuitos electrónicos.*
- Importancia en la ciencia medioambiental (flujos atmosféricos y oceánicos)

Todas las propiedades necesarias en los cálculos se evalúan a la temperatura media entre la superficie y el fluido sin perturbar

CONVECCION NATURAL: MECANISMO FÍSICO

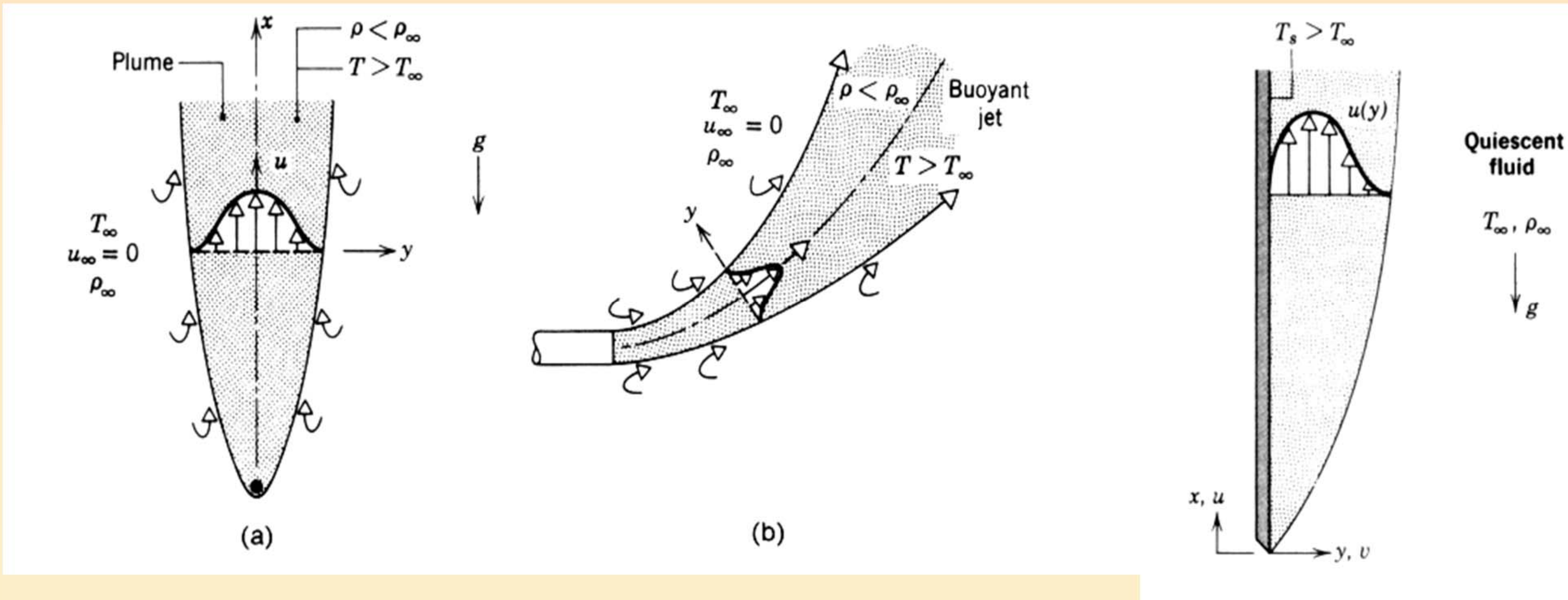
- El calentamiento provoca la aparición de un gradiente de densidades. En presencia de un campo gravitacional, las fuerzas de empuje asociadas inducen un movimiento en el fluido.



$T_1>T_2$: estratificación: conducción

$T_1<T_2$: convección natural

Diferentes configuraciones según la geometría considerada

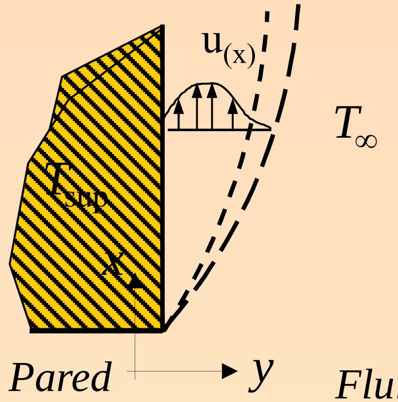


CONVECCIÓN NATURAL. PLANTEAMIENTO GENERAL

$$dq = h(T_{\text{sup}} - T_\infty)dA \qquad h = -\frac{k}{T_{\text{sup}} - T_\infty}\left.\frac{\partial T}{\partial y}\right|_{y\to 0}$$

Sólo se contempla bidimensionalidad
Se desprecia energía liberada por fricción
Régimen estacionario

$$T = f(x,y)$$
$$u = f(x,y)$$
$$v = f(x,y)$$



Ec. conservación masa

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

Ec. conservación movimiento *(La gravedad se asume fuerza externa $X = -g$)*

$$\left(u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y}\right) = -g - \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} + \nu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)$$

Aplicando las condiciones de contorno (capa límite)

$$U = 0, \quad \rho = \rho_\infty \quad \rightarrow \quad \frac{\partial P}{\partial x} = -\rho_\infty g$$

Haciendo uso de la definición de coeficiente de dilatación térmica :

$$\beta = -\frac{1}{\rho}\left.\frac{\partial \rho}{\partial T}\right|_P \rightarrow \rho_\infty - \rho = -\beta\rho(T_\infty - T) \rightarrow g\frac{\rho_\infty - \rho}{\rho} = -\beta g(T_\infty - T)$$

Obtenemos :

$$\left(u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y}\right) = -\beta g(T_\infty - T) + \nu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + v\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)$$

Ec. conservación de energía

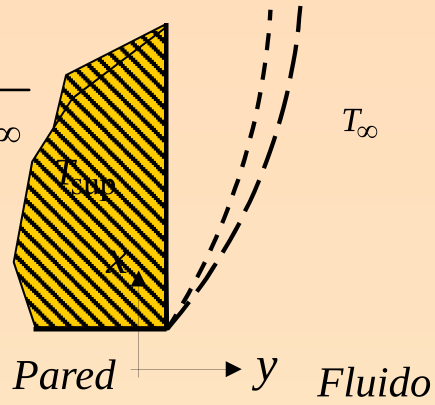
$$\left(u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y}\right)\rho Cp = k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)$$

CONVECCIÓN NATURAL. PLANTEAMIENTO GENERAL

Adimensionalizando las anteriores ecuaciones

$$X=\frac{x}{L}\quad Y=\frac{y}{L}\quad Z=\frac{z}{L}\quad U=\frac{u}{u*}\quad V=\frac{v}{u*}\quad W=\frac{w}{u*}\quad \theta=\frac{T-T_\infty}{T_{sup}-T_\infty}$$

u^* : velocidad ficticia (inventada)



$$\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial v}{\partial y}=0$$

$$\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)=\frac{Gr}{\mathrm{Re}^2}\theta+\frac{1}{\mathrm{Re}}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+v\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)$$

$$\left(u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}\right)=\frac{1}{RePr}\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}\right)$$

Deberá existir la relación

$$\theta = f(Re,Pr,Gr)$$

Nº Reynolds

$$\mathrm{Re}=\frac{\rho u^* L}{\mu}=\frac{u^* L}{\nu}$$

Nº Prandtl

$$\mathrm{Pr}=\frac{\mu Cp}{k}=\frac{\nu}{\alpha}$$

Nº Grashof

$$Gr=\frac{g\beta L^3(T-T_\infty)}{\nu^2}$$

Nº Rayleigh

$$Ra=Gr\,Pr=\frac{g\beta L^3(T-T_\infty)}{\nu\alpha}$$

Aplicación de la definición de coeficiente de convección

$$h=-\frac{k}{T_{sup}-T_\infty}\left.\frac{\partial T}{\partial n}\right|_{n\to 0}\qquad h=-\frac{k}{L}\left.\frac{\partial\theta}{\partial n}\right|_{n\to 0}\longrightarrow Nu=\frac{hL}{k}=-\left.\frac{\partial\theta}{\partial n}\right|_{n\to 0}$$

Luego : ***Nu = f(Re, Pr, Gr)*** $\longrightarrow$ ***Nu = f(Gr, Pr)***

No tiene sentido la velocidad característica u^*

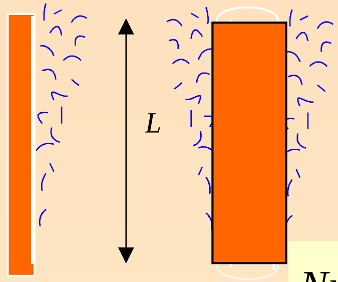
CONVECCIÓN NATURAL.

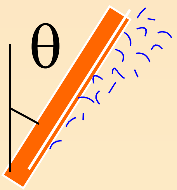
$$Nu_L = \frac{hL}{k} \qquad Gr_L = \frac{g\beta(T_{sup} - T_\infty)L^3\rho^2}{\mu^2} \qquad Pr = \frac{\mu Cp}{k}$$

1. Pared o cilindro vertical.

Pared o cilindro : longitud característica : L

Cilindro: siempre que $D/L > 35/Gr_D^{1/4}$

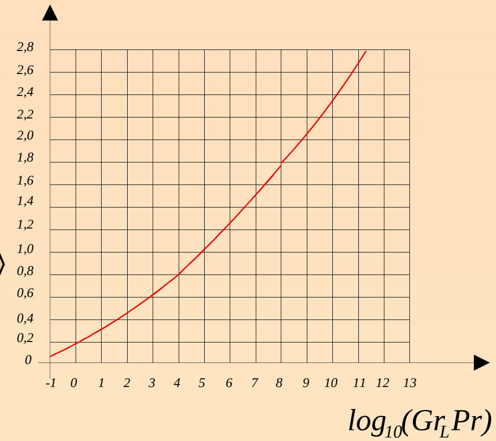




$$Nu_L = C(Gr_L Pr \cos\theta)^m$$

$0 \leq \theta \leq 60^o$

$0.1 < Gr_L Pr < 10^4$ →



		C	m
$10^4 < Gr_L Pr < 10^9$	laminar	0.59	1/4
$10^9 < Gr_L Pr < 10^{12}$	turbulento	0.129	1/3

Para el caso de ser aire:

Laminar : $10^4 < Gr_L Pr < 10^9$ $\quad h = 1.42\left(\frac{T_{sup} - T_\infty}{L}\cos\theta\right)^{1/4}$

Turbulento : $10^9 < Gr_L Pr$ $\quad h = 1.31((T_{sup} - T_\infty)\cos\theta)^{1/3}$

$h(W/m^{2\,o}C), L(m), T(^oC)$

Propiedades a T_f

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

TEMA 3. CONVECCION

2. Convección natural (1h)

CONVECCIÓN NATURAL.

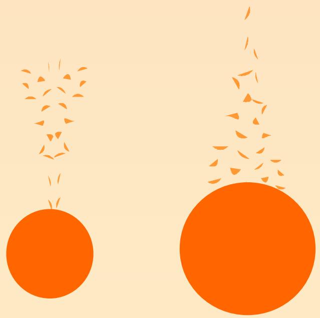
$$Nu_D = \frac{hD}{k} \qquad Gr_D = \frac{g\beta(T_{sup} - T_\infty)D^3\rho^2}{\mu^2} \qquad Pr = \frac{\mu Cp}{k}$$

2. Cilindro horizontal.

Longitud característica = D

3. Esfera.

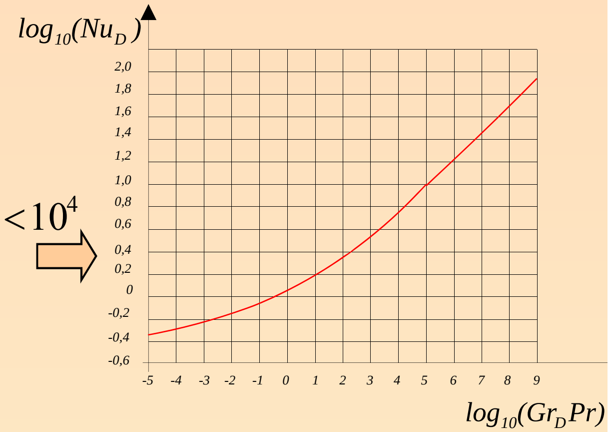
Longitud característica = R



$$Nu_D = C(Gr_D Pr)^m$$

Ec. válida para esferas y cilindro horizontal

$10^{-5} < Gr_D Pr < 10^4$ ⇨



		C	m
$10^4 < Gr_D Pr < 10^7$	laminar	0.480	1/4
$10^7 < Gr_D Pr < 10^{12}$	turbulento	0.125	1/3

Propiedades a T_f

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

Para el caso de ser aire:

Laminar : $10^4 < Gr_D Pr < 10^9$ $\qquad h = 1.31\left(\frac{T_{sup} - T_\infty}{D}\right)^{1/4}$

Turbulento : $10^9 < Gr_D Pr$ $\qquad h = 1.24(T_{sup} - T_\infty)^{1/3}$

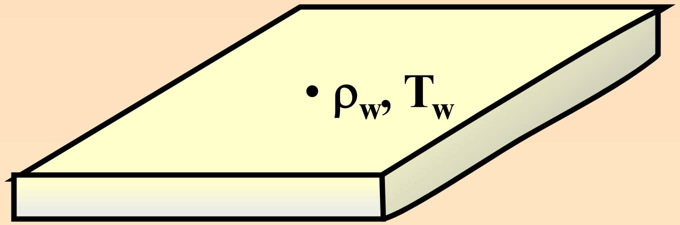
$h(W/m^{2\,o}C), D(m), T(^oC)$

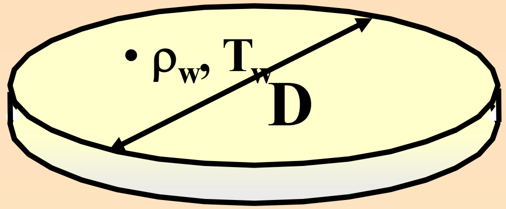
CONVECCIÓN NATURAL.

4. Placa horizontal.

$$Nu_L = \frac{hL}{k} \qquad Gr_L = \frac{g\beta(T_{sup} - T_\infty)\, L^3 \rho^2}{\mu^2} \qquad Pr = \frac{\mu\, Cp}{k}$$

$$Nu_L = C\,(Gr_L\, \Pr)^m$$

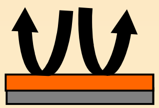


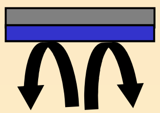


L placa = Area/Perímetro

L=0.9D

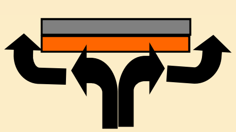
Cara caliente hacia arriba o cara fría hacia abajo:

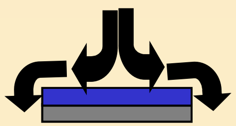




		C	m
Laminar :	$10^4 < Gr_L Pr < 10^7$	0.54	1/4
Turbulento :	$10^7 < Gr_L Pr < 10^{11}$	0.15	1/3

Cara caliente hacia abajo o cara fría hacia arriba:





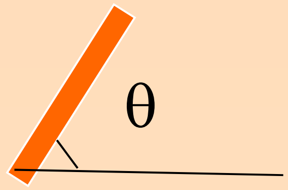
		C	m
Laminar :	$10^5 < Gr_L Pr < 10^{10}$	0.27	1/4

Propiedades a T_f

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

CONVECCIÓN NATURAL.

4. Placa horizontal (suelos y techos).



Para el caso de ser aire:

Cara caliente hacia arriba o fría hacia abajo (favorecido el movimiento):

$$h = \frac{9.482}{7.283 - \cos\theta}\left(T_{\sup} - T_{\infty}\right)^{1/3}$$

Cara caliente hacia abajo o fría hacia arriba (desfavorecido el movimiento):

$$h = \frac{1.81}{1.382 + \cos\theta}\left(T_{\sup} - T_{\infty}\right)^{1/3}$$

$$h(W/m^{2}\,{}^{o}C), L(m), T({}^{o}C)$$

CONVECCIÓN MIXTA

Situaciones en las que el efecto de la convección natural y forzada son comparables, no pudiéndose ignorar ninguna de ambas.

La convección forzada es predominante si: $\frac{Gr}{\mathrm{Re}^2} \ll 1$

La convección natural es predominante si: $\frac{Gr}{\mathrm{Re}^2} \gg 1$

Convección mixta: $\frac{Gr}{\mathrm{Re}^2} \approx 1$

Posibles configuraciones:
- ***Flujos equicorriente.***
- ***Flujos contracorriente***
- ***Flujos transversales***

Expresión a utilizar: $Nu^n = Nu_F^n \pm Nu_N^n$ se asume n=3.

+: *para flujos equicorrientes y transversales.*

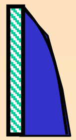
-: *para flujos contracorriente.*

CONVECCIÓN EN CAMBIO DE FASE. CONDENSACIÓN.

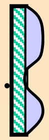
Condensación: este fenómeno se produce cuando la $T_{superficie} < T_{vapor\ saturado}$ a la presión que se desarrolla el proceso.

•Tipos de condensación:

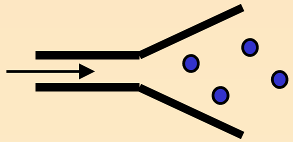
a)Pelicular



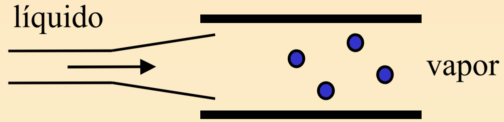
b)Goticular (el flujo de calor es del orden de 10 veces mayor).



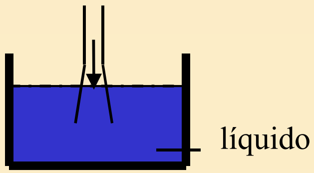
c)Vapor en expansión.



d)Líquido pulverizado sobre un medio de vapor.



e)Inyección de vapor en el seno de un líquido.



CONVECCIÓN EN CAMBIO DE FASE. EBULLICIÓN.

Ebullición: es el fenómeno de formación de vapor en el interior de una masa líquida.Para ello es necesario que : $T_{líquido} > T_{saturación}$ a la presión que se desarrolla el proceso.

•Condiciones para que se origine la ebullición:

a) que la $T_{líquido} > T_{saturación}$ a la presión que se desarrolla el proceso.

b) deben existir puntos de partida localizados en esta superficie caliente: irregularidades superficiales,burbujas de aire, partículas de polvo etc..

•El recalentamiento necesario ($\Delta T = T_{líquido} - T_{saturación}$) va a depender de:

las propiedades del líquido, su pureza, presión, estado superficial del sólido que limita el sistema.

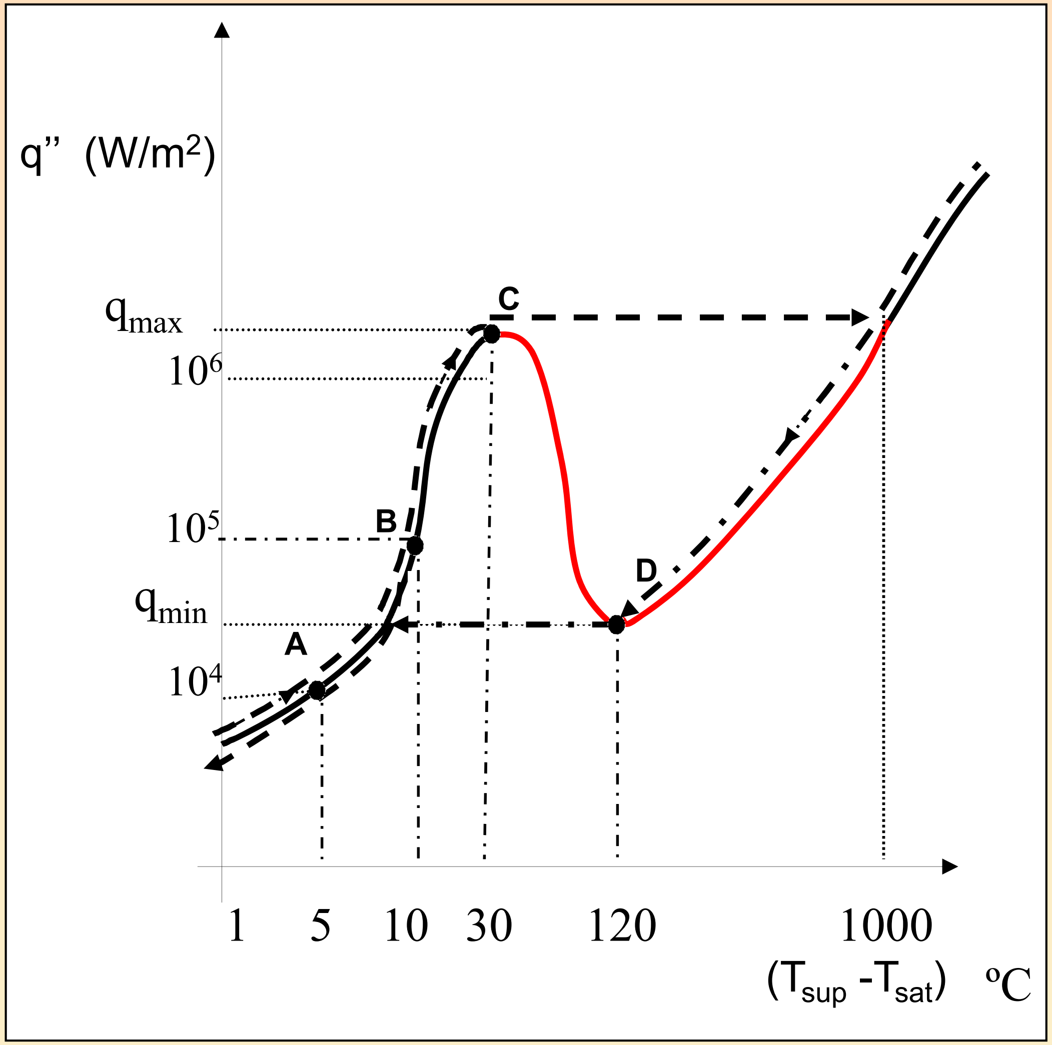
Líquidos puros: gran cohesión de moléculas - el recalentamiento es mayor (ebullición impetuosa).

Líquidos impuros: gases e impurezas el recalentamiento es menor (ebullición tranquila).

Rugosidad superficial: Recalentamientos bajos.

CONVECCIÓN EN CAMBIO DE FASE. EBULLICIÓN.

Curva típica de ebullición para el agua a 1 atm.



Hasta A : Convección libre
A - C: Ebullición nucleada

- **A-B:** Las burbujas condensan en el seno de la masa líquida.
- **B-C:** Las burbujas alcanzan la superficie libre del líquido.

C-D: Ebullición transitoria.

Desde D: Ebullición pelicular estable. La radiación entra en juego.