

Selección de fórmulas recomendadas para el cálculo de coeficientes de CONVECCIÓN NATURAL

Nusselt	$Nu = \frac{hL}{k}$
Reynolds	$Re = \frac{vL}{\nu}$
Prandtl	$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$
Grashof	$Gr = \frac{g\beta L^3 \Delta T}{\nu^2}$
Rayleigh	$Ra = Gr Pr$

1. ESPACIO ILIMITADO

En las ecuaciones que aparece el término $(Pr/Pr_s)^{0,25}$ las propiedades se deben evaluar a la temperatura del fluido lejos de la superficie considerada, T_∞ .

En las ecuaciones en las que NO aparece el término $(Pr/Pr_s)^{0,25}$ las propiedades se deben evaluar a la temperatura de film: $T_f = 0,5(T_\infty + T_s)$.

ΔT en Gr o Ra es la diferencia entre T_s y T_∞ .

1.1. Placas verticales

Longitud característica $L=H$ con H altura de la placa plana.

Se recomiendan dos expresiones:

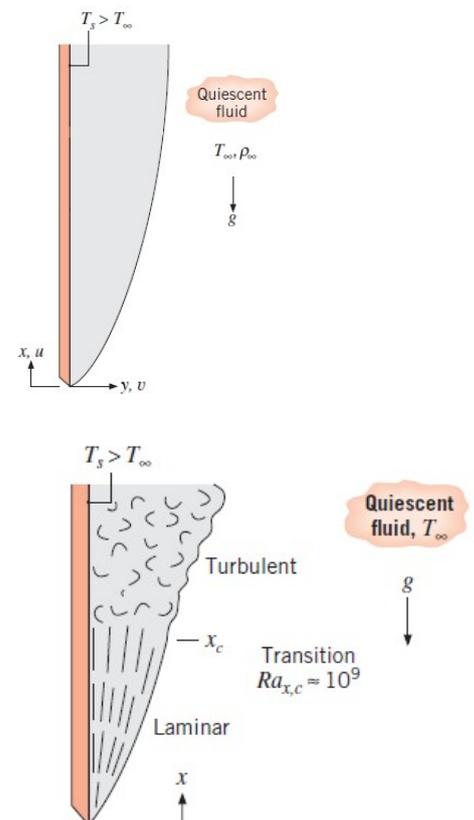
1.

$$10^3 < Ra < 10^9$$

$$Nu = 0,76 Ra^{0,25} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0,25}$$

$$Ra > 10^9$$

$$Nu = 0,15 Ra^{0,33} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0,25}$$



Ver Referencia I, Capítulo 3

2. Ra puede variar en todo el rango positivo

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

Ver Referencia II, Capítulo 9

El espesor de la capa límite en la región laminar $\delta_{CN_{Lam}}(x)$ se puede calcular con la expresión:

$$\frac{\delta(x)}{x} = \frac{6}{\left(\frac{Gr_x}{4} \right)^{1/4}}$$

1.2. Placas horizontales

Longitud característica $L = \text{Área de placa} / \text{Perímetro de placa}$

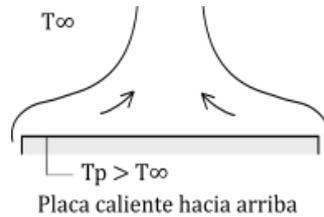
1. Placa caliente hacia arriba o fría hacia abajo

$$10^4 < Ra < 10^7$$

$$Nu = 0,54 Ra^{0,25}$$

$$10^7 < Ra < 10^{11}$$

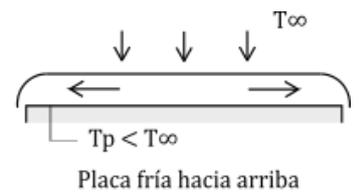
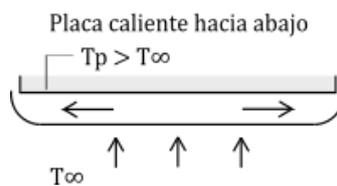
$$Nu = 0,15 Ra^{0,33}$$



2. Placa fría hacia arriba o caliente hacia abajo

$$10^5 < Ra < 10^{10}$$

$$Nu = 0,27 Ra^{0,25}$$



Ver Referencia II, Capítulo 9

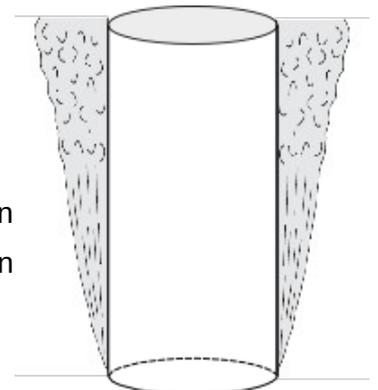
1.3. Tubos o cilindros verticales

Fluido exterior, sin movimiento.

Longitud característica $L = H$ con H altura del cilindro.

Se recomiendan las mismas expresiones que para placas verticales.

También se puede utilizar para fluido sin movimiento en el interior de un tubo o cilindro, si es suficientemente amplio como para no interferir en las capas límite laterales.



1.4. Tubos o cilindros horizontales

Longitud característica $L=D$ con D diámetro del cilindro.

$$10^3 < Ra < 10^8$$

$$Nu = 0,5 Ra^{0,25} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0,25}$$

Ver Referencia I, Capítulo 3

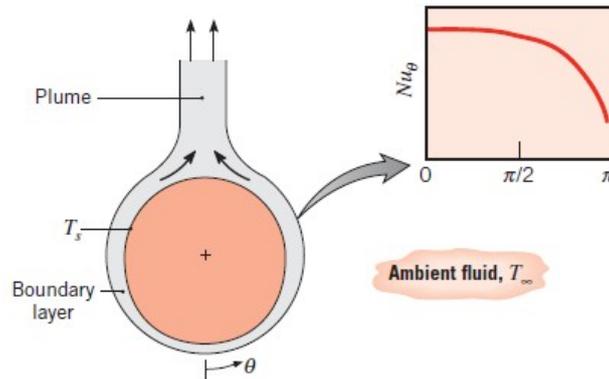


Ilustración: Desarrollo de capa límite y distribución del número de Nusselt en un cilindro horizontal caliente. Fuente: Referencia II, Capítulo 9

Otra expresión que es válida en un campo más amplio es:

$$Nu = C Ra^n$$

Donde C y n son constantes que dependen del valor de Ra de la siguiente forma:

Ra	C	n
$10^{-10} - 10^{-2}$	0,675	0,058
$10^{-2} - 10^2$	1,02	0,148
$10^2 - 10^4$	0,850	0,188
$10^4 - 10^7$	0,480	0,250
$10^7 - 10^{12}$	0,125	0,333

Ver Referencia II, Capítulo 9

1.5. Esferas

Longitud característica $L=D$ con D diámetro de la esfera.

$$Pr \geq 0,7$$

$$Ra < 10^{11}$$

$$Nu = 2 + \frac{0,589 Ra^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0,469}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{4/9}}$$

Ver Referencia II, Capítulo 9

2. ESPACIO LIMITADO

Las propiedades se deben evaluar a la temperatura media entre las superficies consideradas:

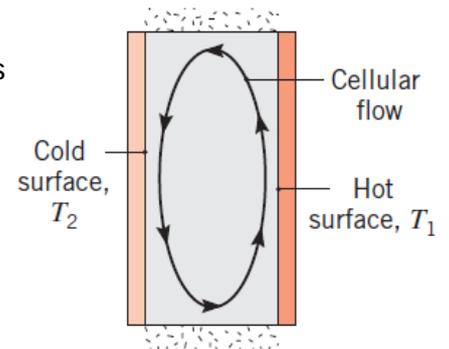
$$T_m = 0,5(T_{s1} + T_{s2}) .$$

ΔT en Gr o Ra es la diferencia entre T_{s1} y T_{s2} .

2.1. Cavidades rectangulares verticales

Longitud característica $L =$ distancia entre placas .

H es la distancia entre las paredes horizontales de la cavidad, las que se asumen aisladas.



$$Ra < 10^3$$

$$Nu = 1$$

$$Ra > 10^3$$

$$1 \leq H/L \leq 2$$

$$10^{-3} \leq Pr \leq 10^5$$

$$Ra Pr / (0,2 + Pr) > 10^3$$

$$Nu = 0,18 \left(\frac{Pr}{0,2 + Pr} Ra \right)^{0,29}$$

$$10^3 < Ra < 10^{10}$$

$$2 \leq H/L \leq 10$$

$$Pr \leq 10^5$$

$$Nu = 0,22 \left(\frac{Pr}{0,2 + Pr} Ra \right)^{0,28} \left(\frac{H}{L} \right)^{-0,25}$$

$$10^4 < Ra < 10^7$$

$$10 \leq H/L \leq 40$$

$$1 \leq Pr \leq 2 \times 10^4$$

$$Nu = 0,42 Ra^{\frac{1}{4}} Pr^{0,012} \left(\frac{H}{L} \right)^{-0,3}$$

Otra expresión más general es:

$$10^6 < Ra < 10^9$$

$$1 \leq H/L \leq 40$$

$$1 \leq Pr \leq 20$$

$$Nu = 0,046 Ra^{0,33}$$

Ver Referencia II, Capítulo 9

2.2. Cavidades rectangulares horizontales

Longitud característica $L = \text{distancia entre placas}$.

H es la distancia entre las paredes laterales de la cavidad, las que se asumen aisladas.

1. La temperatura de la placa inferior es mayor que la temperatura de la placa superior

$$Ra < 1708$$

$$L/H \leq 10$$

$$Nu = 1$$

$$3 \times 10^5 < Ra < 7 \times 10^9$$

$$Nu = 0,069 Ra^{0,33} Pr^{0,074}$$

2. La temperatura de la placa inferior es menor que la temperatura de la placa superior

$$Nu = 1$$

Ver Referencia II, Capítulo 9

2.3. Cilindros horizontales concéntricos

Los diámetros de los cilindros son Di y De (cilindro interior y exterior respectivamente).

Las temperaturas de los cilindros son Ti y Te (cilindro interior y exterior respectivamente).

Longitud característica $L = De - Di$

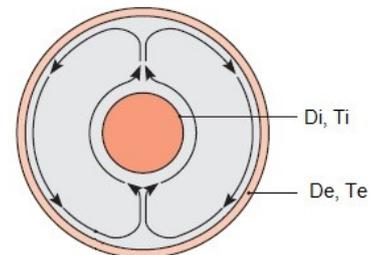
La potencia calorífica transferida por unidad de longitud del cilindro es:

$$\dot{q}' = \frac{2\pi K_{ef}}{\ln\left(\frac{De}{Di}\right)} (Ti - Te)$$

K_{ef} es la conductividad térmica que tendría un fluido que estando en reposo transferiría la misma cantidad de calor.

Se define

$$Ra^* = \frac{\left[\ln\left(\frac{De}{Di}\right)\right]^4}{(De - Di)^3 (Di^{-3/5} + De^{-3/5})^5} Ra$$



$$Ra^* < 100$$

$$K_{ef} = K$$

$$10^2 \leq Ra^* \leq 10^7$$

$$\frac{K_{ef}}{K} = 0,386 \left(\frac{Pr}{0,861 + Pr} \right)^{0,25} (Ra^*)^{0,25}$$

Ver Referencia II, Capítulo 9

2.4. Esferas concéntricas

Los diámetros de las esferas son D_i y D_e (esfera interior y exterior respectivamente).

Las temperaturas de las esferas son T_i y T_e (esfera interior y exterior respectivamente).

Longitud característica $L = D_e - D_i$

La potencia calorífica transferida es:

$$\dot{q}' = \pi K_{ef} \frac{D_i D_e}{D_e - D_i} (T_i - T_e)$$

K_{ef} es la conductividad térmica que tendría un fluido que estando en reposo transferiría la misma cantidad de calor.

Se define

$$Ra^* = \frac{De - Di}{(DiDe)^4 (Di^{-7/5} + De^{-7/5})^5} Ra$$

$$Ra^* < 100$$

$$K_{ef} = K$$

$$10^2 \leq Ra^* \leq 10^4$$

$$\frac{K_{ef}}{K} = 0,74 \left(\frac{Pr}{0,861 + Pr} \right)^{0,25} (Ra^*)^{0,25}$$

Ver Referencia II, Capítulo 9

REFERENCIAS

I – M. A. MIJEEV, I.M. MIJEEVA, *Fundamentos de termotransferencia*, Mir, 1979.

II – FRANK D. INCROPERA, DAVID P. DE WITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, 4ª Edición, Prentice Hall, México 1999.