# CONVECCION

Para el diseño de Intercambiadores de calor necesitamos el coeficiente global de transferencia, U

U está formado por resistencias convectivas y conductivas.

Las convectivas se expresan por el coeficiente convectivo, *h*.

Hasta ahora nunca se dijo como se determina *h*.

Para eso hay que plantear el problema de la convección.

Este modo de transferencia de calor depende del movimiento de un fluido de temperatura no uniforme.

En la conducción pura: el calor se transfiere de molécula a molécula.

En la convección: el movimiento macroscópico del fluido (campo de velocidades) transporta calor que se suma a la conducción.

El movimiento macroscópico mezcla porciones de fluido a distintas temperaturas.

Habrá dos formas de convección:

- ✓ convección forzada causada por fuentes de energía externa (bomba),
- ✓ convección natural causada por fuerzas de empuje en el interior del fluido.

## CONVECCION SOBRE UNA SUPERFICIE SÓLIDA

El contacto entre un fluido y una superficie sólida es importante para el diseño de intercambiadores de calor.

Distinguimos entre :

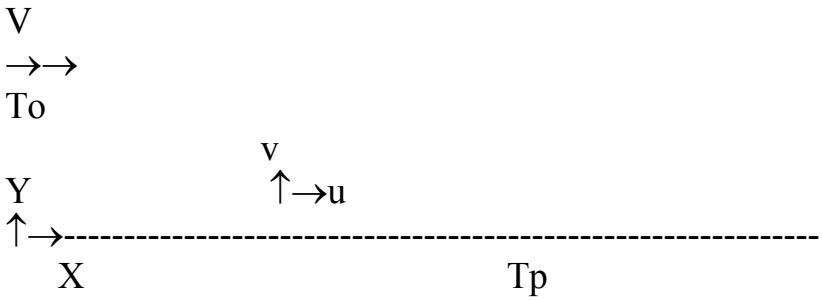
- ✓ Flujos internos
- ✓ Flujos externos

Una superficie a temperatura Tp > To (ambiente) transfiere calor por conducción directamente a las moléculas de fluido más cercanas.

El campo de flujo de velocidad **V**, transporta las moléculas calentadas lejos de la

superficie.

Esta combinación de conducción y movimiento de fluido es lo que llamamos convección.




El calor transferido en las direcciones x e y se puede representar ahora por la suma de:

Una componente de Fourier (conducción)
Una componente de transporte convectivo:

$$q_x = -k\frac{\partial T}{\partial x} + \rho C u(T - T_o) \qquad (1)$$

$$q_y = -k\frac{\partial T}{\partial y} + \rho C v(T - T_o) \qquad (2)$$

En la conducción **k es la conductividad del fluido. L**a componente convectiva del flujo se evalúa con referencia a una temperatura ambiente, o media del fluido (To).

En esta componente aparece al campo de flujo. (u, v)

Si en la ecuación del calor del capítulo 1 reemplazamos estas nuevas expresiones de los q, obtenemos:

$$\rho C(\frac{\partial T}{\partial t} + u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y}) = k\nabla^2 T \qquad (3)$$

En que los nuevos términos son los términos convectivos. (Derivada total de la temperatura).

En transferencia por convección se considera siempre fluidos viscosos.
Para éstos, en la superficie habrá siempre una velocidad igual a la de la superficie.
Si ésta está en reposo, la velocidad es nula (u=v=0).

El calor transferido de la superficie al fluido:
Es el flujo de calor normal a la superficie.
Se expresa, por el lado del fluido, por:

$$q_y = -k \frac{\partial T(y = 0)}{\partial y}$$

En que, dado que la velocidad en la superficie es nula, aparece solo el término de Fourier.

Se puede ahora definir en forma rigurosa el coeficiente convectivo, h:

$$h = \frac{q_y}{\Delta T} = \frac{- k \frac{\partial T(0)}{\partial y}}{(T_p - T_o)}$$

Que dice esta ecuación?

Que el coeficiente convectivo es un parámetro de superficie. Para calcularlo, es necesario evaluar:

- el campo de temperatura en el interior del fluido,
- y luego su gradiente normal al nivel de la superficie.
- La conductividad térmica del fluido.
- La diferencia de temperatura entre la pared y el fluido lejos de ésta.

De la ecuación (3) vemos que para conocer el campo de temperatura en un fluido en movimiento es necesario saber cual es el campo de velocidades con que se mueve.

El campo de velocidades se obtiene del sistema de ecuaciones de Navier-Stokes y continuidad.

Ecuaciones generales en su forma incompresible bidimensional (velocidades u, v, presión p, temperatura T):

1. Continuidad:

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

2. Momentum x:

$$\rho(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}) + \rho g_x$$

3. Momentum y:

$$\rho(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}) + \rho g_y$$

4. Energía térmica:

$$\rho C(\frac{\partial T}{\partial t} + u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y}) = k(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}) + \mu\phi$$

En la última ecuación, $\phi$ es la función "disipación viscosa" que representa el calor generado por el roce interno del fluido.

$$\phi = 2\left(\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2\right) + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2$$

En las ecuaciones de movimiento están, de izquierda a derecha, los términos de aceleración (o inercia), el gradiente de presión, los términos viscosos, y las fuerzas en el volumen.

En la ecuación de la energía, o ecuación de calor: los términos convectivos, los términos conductivos y la disipación.

(La deducción de esta ecuación es más compleja que el simple reemplazo de los nuevos flujos de calor en la ecuación del calor, que se hizo con fines didácticos).

Con el sistema de ecuaciones anterior, y condiciones de borde apropiadas, se determina los campos de velocidad y temperatura, y de éstos, los

- Coeficientes de fricción (del campo de velocidades)
- Flujos de calor y coeficientes convectivos (a partir del campo de temperatura).

FORMA ADIMENSIONAL DE LAS ECUACIONES:

Como en Mecánica de Fluidos, la transferencia de calor se puede caracterizar por números o grupos adimensionales.

Para encontrar estos números, veremos la forma adimensional de las ecuaciones (Caso de Convección forzada):

Pasos de la adimensionalización

1.- Se eligen magnitudes de referencia para las diferentes variables: para convección forzada, éstas son:

L, longitud significativa del cuerpo (para coordenadas)
Uo, velocidad del flujo libre o velocidad de gasto (para velocidades)
$\rho Uo^2$ (para presiones)
Tp-To (para temperaturas)

2.- Se definen las variables adimensionales en función de las dimensionales y las magnitudes de referencia:

X=x/L, Y=y/L, Z=z/L, U =u/Uo, etc.

3. Se despejan las variables dimensionales de estas definiciones.

4. Se sustituyen las variables dimensionales así expresadas en las ecuaciones diferenciales.

5. Se reducen factores, y las ecuaciones adimensionalizadas con estas magnitudes de referencia, quedan de la siguiente manera, en que se han omitido los términos de fuerzas en el volumen y el término transiente:

1. Continuidad:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0$$

2. Momentum x:

$$U\frac{\partial U}{\partial X}+V\frac{\partial U}{\partial Y}=-\frac{\partial P}{\partial X}+(\frac{1}{\mathrm{Re}})(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 U}{\partial Y^2})$$

3. Momentum y:

$$U\frac{\partial V}{\partial X}+V\frac{\partial V}{\partial Y}=-\frac{\partial P}{\partial Y}+(\frac{1}{\mathrm{Re}})(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial Y^2})$$

5. Energía térmica:

$$U\frac{\partial \Theta}{\partial X}+V\frac{\partial \Theta}{\partial Y}=(\frac{1}{\mathrm{Re}\ \ \mathrm{Pr}})(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2})+\frac{E}{\mathrm{Re}}\Phi$$

Aparecen los grupos adimensionales:

- Re = Uo ρ L/μ, número de Reynolds, razón entre fuerzas de inercia y viscosas, indicativo del régimen de flujo, laminar o turbulento.
- Pr = μ C/k =ν/α, número de Prandtl, relaciona las propiedades de transporte de cantidad de movimiento y de calor.
- E = $Uo^2$/C(Tp-To), número de Eckert, razón entre energía disipada por roce viscoso, y calor transferido por convección

En la mayoría de las aplicaciones la disipación viscosa es despreciable.

En consecuencia, la distribución de temperatura, su gradiente superficial, y el coeficiente convectivo dependerán de los adimensionales Re y Pr:

h = f ( Re, Pr)

El coeficiente convectivo h puede ser adimensionalizado con la dimensión del cuerpo y la conductividad térmica del fluido, definiendo el número de Nusselt, Nu

$$Nu=hL/k=f(\mathrm{Re},\ \ \mathrm{Pr})$$

El número de Nusselt tiene la misma forma que el Biot, *Bi*, pero en *Nu* la conductividad usada es la del fluido.

Se verán a continuación algunos casos de flujo interno y externo

Flujo en el interior de un tubo o en el interior de un canal de placas paralelas:

(Aplicación principal: intercambiadores de calor tubulares)

Flujo externo: Capa límite

Aplicación principal: Pérdidas o ganancias de calor desde /hacia espacios habitables, frigoríficos, vehículos, superficies externas de tubos de intercambiadores de calor.

Variables significativas en cada caso:
-Diferencia de temperatura disponible
-Propiedades físicas del fluido: k, $\mu$, $\rho$, C
-Geometría y su dimensión de longitud significativa