

# Transporte de Masa

Convección: Aproximación de intercara

Dr. Bernardo Hernández Morales

Depto. de Ingeniería Metalúrgica  
Facultad de Química, UNAM

*Semestre 2016-2*

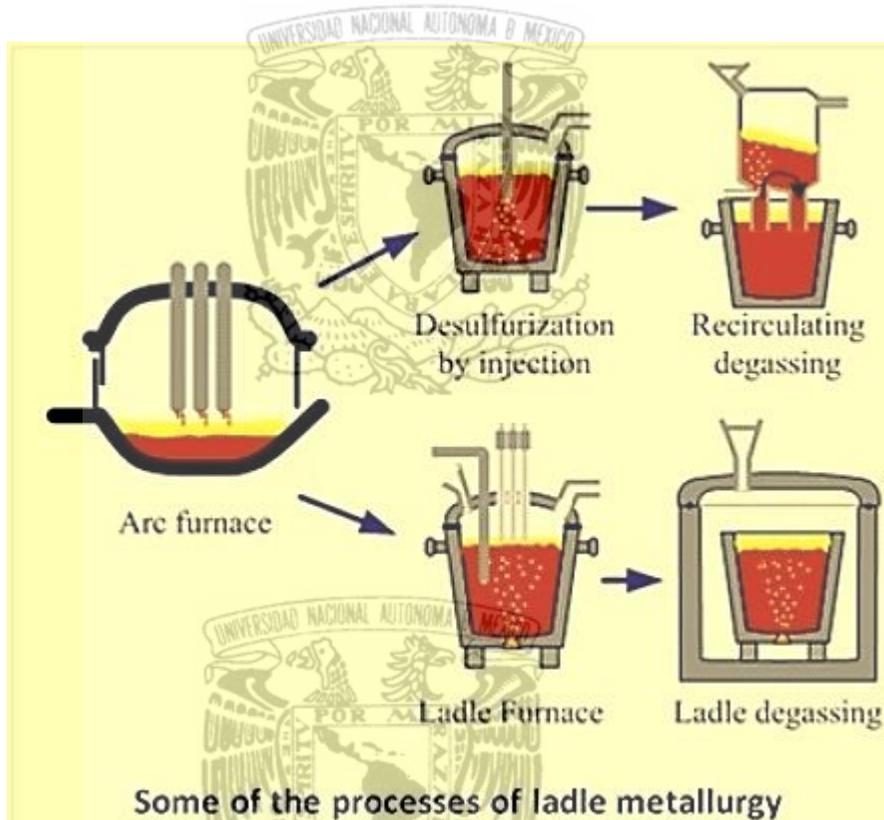


- Flux molar total (dirección  $x$ )

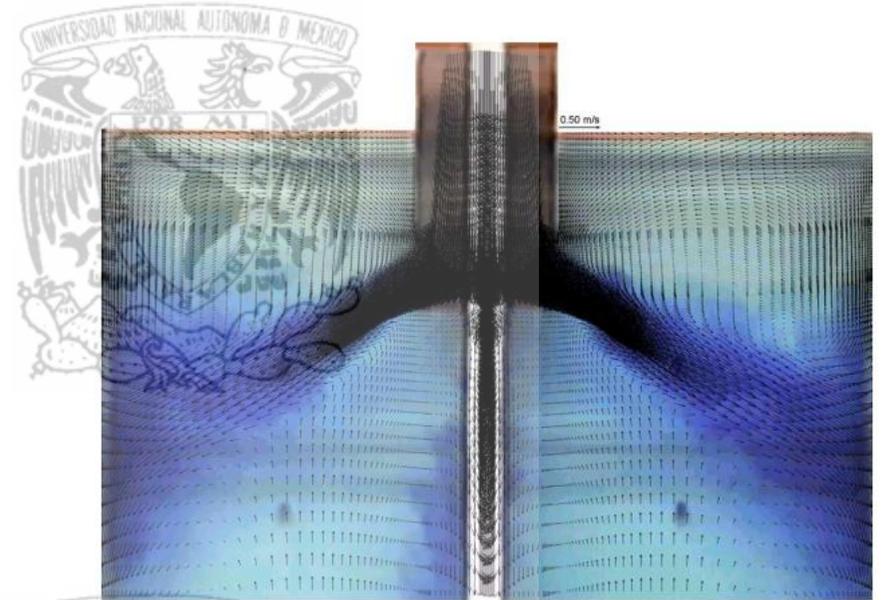
$$N_{A,x} = -D_A c \frac{\partial X_A}{\partial x} + (cu_x)(X_A)$$

- Convección forzada
  - El campo de velocidad es independiente del campo de concentración → ED's independientes
- Convección natural (libre)
  - El campo de velocidad es dependiente del campo de concentración → ED's simultáneas

❖ Algunos procesos en la industria metalúrgica y de materiales ocurren en presencia de convección asociada con un campo de velocidad complejo



<http://ispatguru.com/ladle-metallurgy/>

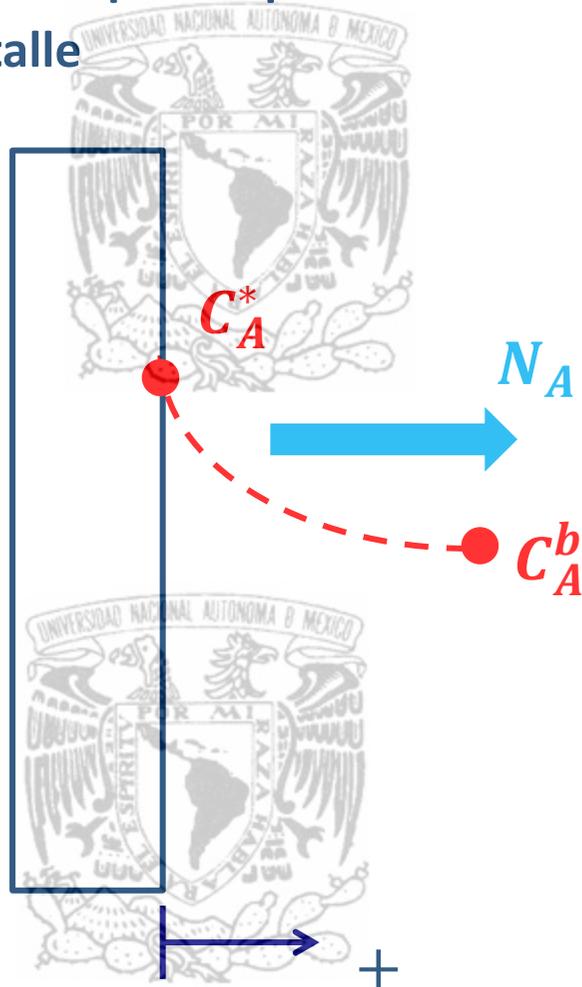


Campo de velocidad (vectores) e imagen de adición de tinta

B.G. Thomas, R. O'Malley, et al., MCWASP IX, Shaker Verlag, GmbH, Aachen, Germany, 2000, pp. 769-776.

Validation of Fluid Flow and Solidification Simulation of a Continuous Thin-Slab Caster

- ❖ Para estimar el transporte de materia se propone que el baño líquido está bien agitado por lo que no es indispensable conocer el perfil de concentración en detalle



Se propone que el *flux* molar es proporcional a la diferencia de concentración:

$$N_A \propto \Delta C_A$$

$$N_A = + k_A \Delta C_A$$

$$\Delta C_A = (C_A^* - C_A^b)$$

## Aproximación de intercara

- ❖ El coeficiente de transferencia de masa es una constante de proporcionalidad




$$k_A = \frac{N_A}{\Delta C_A} \equiv \frac{\text{Longitud}}{\text{Tiempo}}$$

**Nota:** La diferencia de concentración puede expresarse en diversas unidades, por lo que puede tener unidades distintas a éstas

- ❖ El coeficiente de transferencia de masa es análogo al coeficiente de transferencia de calor (definido por la “Ley” de Newton de enfriamiento)

- ❖ Usando la analogía con la Ley de Ohm:




$$N_A A_{\perp} = [k_A A_{\perp}] \Delta C_A \equiv \frac{\text{Fuerza motriz}}{\text{Resistencia}}$$

## ❖ Tipos de convección

### ➤ Forzada

- El movimiento del fluido se debe a fuerza externas (gravedad, una bomba mecánica, etc.)

### ➤ Natural (libre)

- El movimiento del fluido se debe a fuerzas internas causadas por diferencias de densidades
- La diferencia de densidad puede ocurrir por:
  - Gradientes de temperatura
  - Gradientes de concentración

## Flujo laminar



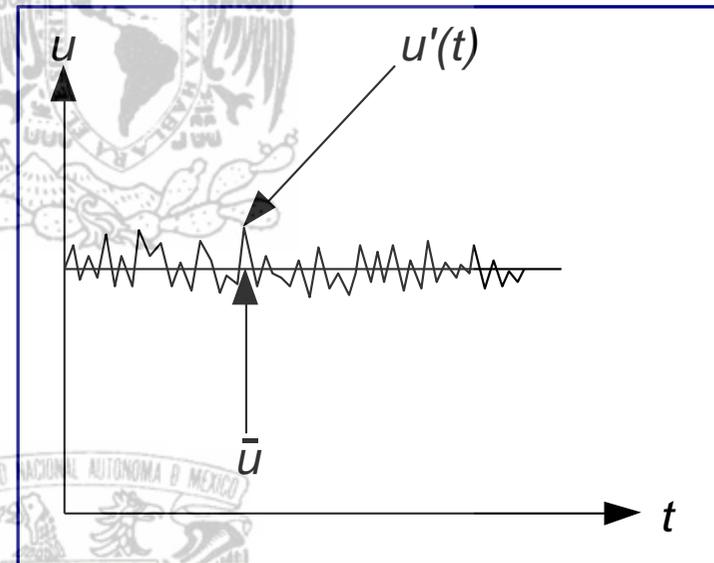
<http://www.pbase.com>

## Flujo turbulento



<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/609625/turbulent-flow>

### Velocidad en una posición fija (flujo turbulento)



- ❖ El teorema  $\pi$  permite determinar los números adimensionales relevantes para la aproximación de intercara

- Convección forzada

$$Sh = f(Re, Sc)$$

$$Sh \equiv \text{Número de Sherwood} \equiv \frac{k_A L_C}{D_A} \equiv \frac{\text{Transferencia de masa total}}{\text{Transferencia por difusión}}$$

$$Re \equiv \text{Número de Reynolds} \equiv \frac{\rho u L_C}{\mu} \equiv \frac{\text{Fuerza inercial}}{\text{Fuerza viscosa}}$$

$$Sc \equiv \text{Número de Schmidt} \equiv \frac{\mu}{\rho D_A} \equiv \frac{\text{Difusividad de momentum}}{\text{Difusividad molecular}}$$



$k_A \equiv$  Coeficiente de transferencia de masa

$L_C \equiv$  Longitud característica

$D_A \equiv$  Coeficiente de difusión de la especie A

$\rho \equiv$  Densidad del fluido

$u \equiv$  Velocidad característica

$\mu \equiv$  Viscosidad del fluido

❖ El teorema  $\pi$  permite determinar los números adimensionales relevantes para la aproximación de intercara

➤ Convección natural

$$Sh = f(Gr_M, Sc)$$

$$Sh \equiv \text{Número de Sherwood} \equiv \frac{k_A L_C}{D_A} \equiv \frac{\text{Transferencia de masa total}}{\text{Transferencia por difusión}}$$

$$Gr_M \equiv \text{Número de Grashof (masa)} \equiv \frac{g \rho^2 (L_C)^3 \beta' \Delta X}{\mu^2} \equiv (Re) \frac{\text{Fuerza de flotación}}{\text{Fuerza viscosa}}$$

$$Sc \equiv \text{Número de Schmidt} \equiv \frac{\mu}{\rho D_A} \equiv \frac{\text{Difusividad de momentum}}{\text{Difusividad molecular}}$$

$k_A \equiv$  Coeficiente de transferencia de masa

$L_C \equiv$  Longitud característica

$D_A \equiv$  Coeficiente de difusión de la especie A

$g \equiv$  Aceleración debido a la fuerza gravitacional

$\rho \equiv$  Densidad del fluido

$\beta' \equiv$  Coeficiente de cambio de densidad debido a la concentración

$\Delta X \equiv$  Fuerza motriz de concentración

$\mu \equiv$  Viscosidad del fluido

## ❖ Existen varios métodos para calcular al coeficiente de transferencia de masa

- A partir de soluciones analíticas
- A partir de correlaciones empíricas
- A partir de los modelos simplificados de transporte de masa
  - Teoría de película
  - Teoría de penetración



- ❖ Existen correlaciones para calcular el coeficiente de transferencia de masa local, pero el parámetro de utilidad es el coeficiente de transferencia de masa promedio

Aplicando el Teorema de valor medio para integrales:

$$\bar{k}_A = \frac{\int_0^A \int_0^t k_{A,x} dt dA}{\int_0^A \int_0^t dt dA}$$

Nota: Una notación alternativa para  $\bar{k}$  es, por ejemplo,  $k_L$

Para transferencia de masa perpendicular a una placa:

$$\bar{k} = \frac{\int_0^L k_{A,x} dx}{\int_0^L dx} = \frac{1}{L} \int_0^L k_{A,x} dx$$

$$\longrightarrow \overline{Sh}_A = \frac{\bar{k}L_c}{D_A}$$

- ❖ Los cálculos basados en el coeficiente de transferencia de masa pueden aplicarse para: 1) una sola fase y 2) entre dos fases, lo cuál depende de la(s) etapa(s) gobernante(s)

