

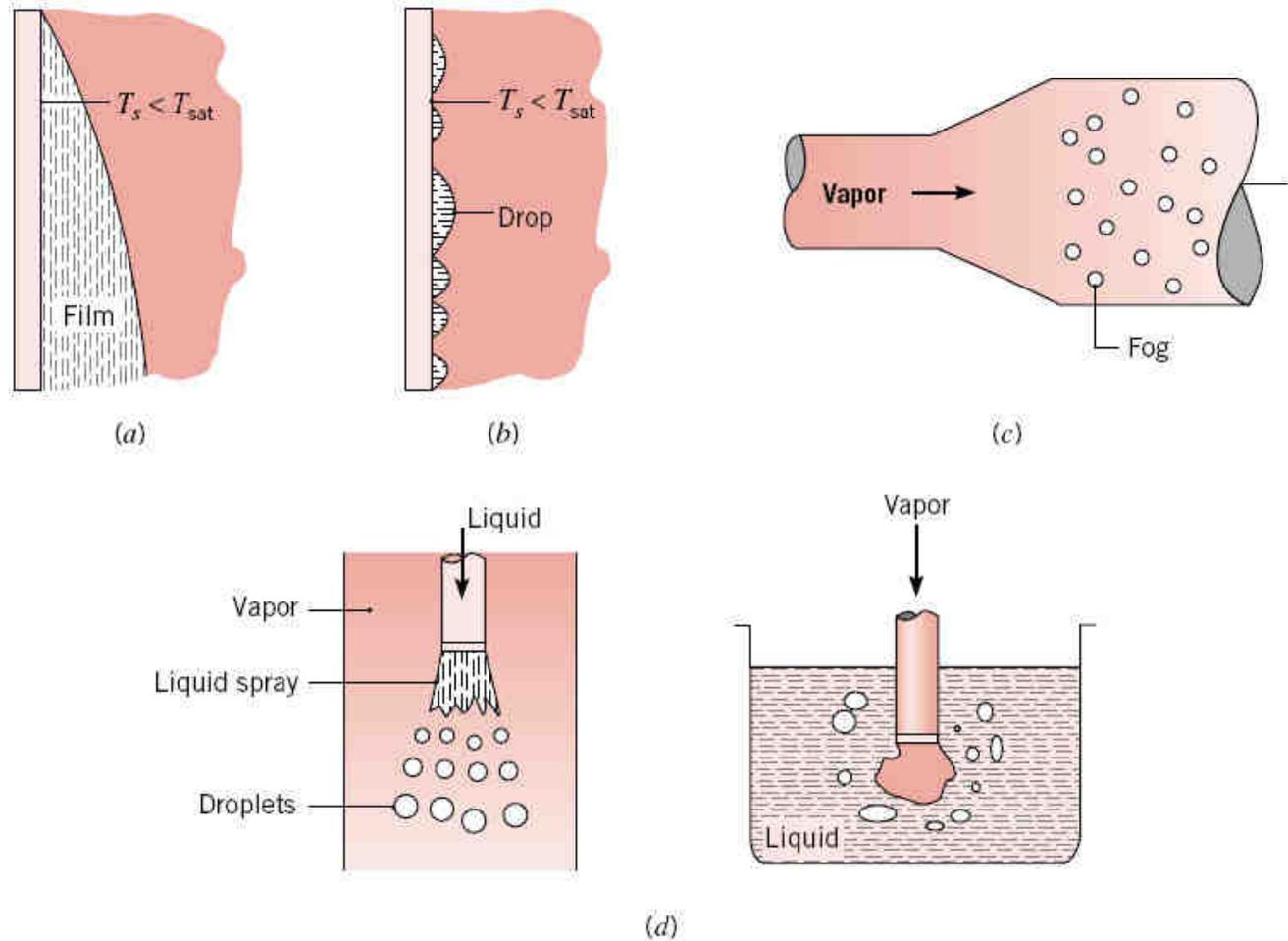


CAPÍTULO 5 – EBULIÇÃO E CONDENSAÇÃO

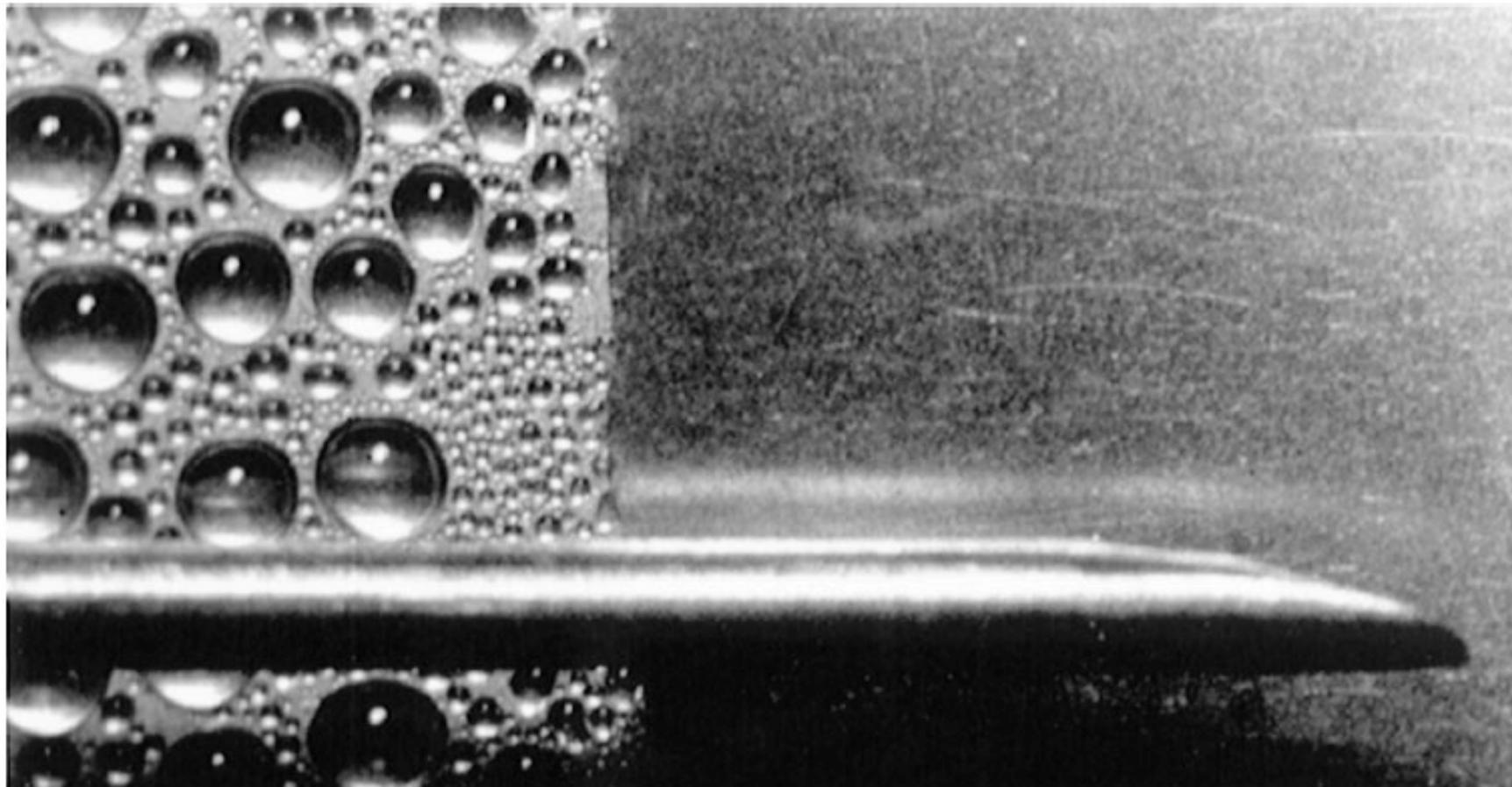
Prof. Dr. Santiago del Rio Oliveira

5.6 CONDENSAÇÃO: MECANISMOS FÍSICOS

- Ocorre quando a **temperatura de um vapor é reduzida a valores inferiores a sua temperatura de saturação**.
- Em equipamentos industriais, o processo ocorre usualmente do **contato entre o vapor e uma superfície fria**.
- A **energia latente do vapor é liberada**, calor é transferido para a superfície e o condensado é formado.
- **Condensação homogênea**: vapor condensa em gotículas que permanecem suspensas em uma fase gasosa (névoa).
- **Condensação por contato direto**: ocorre quando vapor é colocado em contato com um líquido frio.



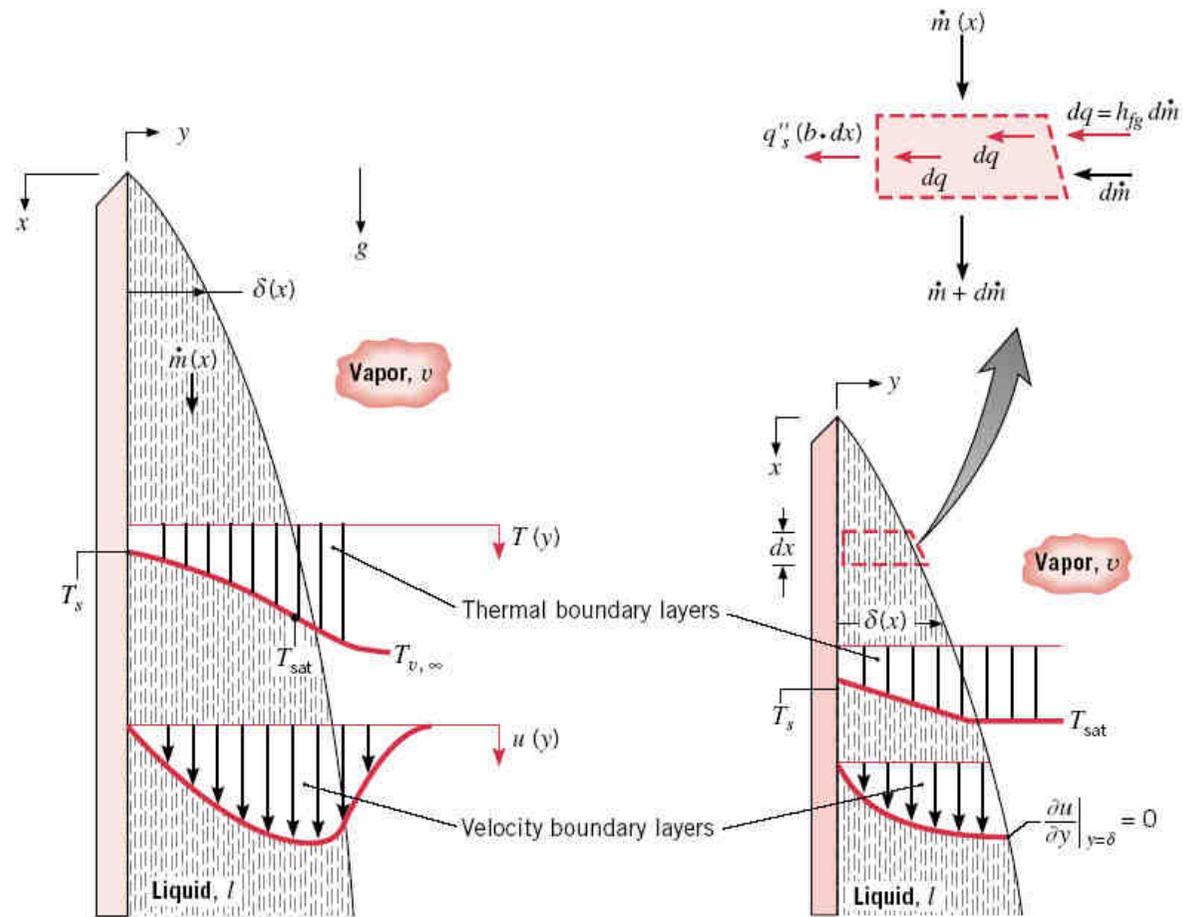
(a) Condensação em filme (b) Condensação em gotas (c) Condensação homogênea
 (d) Condensação por contato direto.



(a) Condensação em gotas (b) Condensação em filme.

- **Condensação em filme:** característica de **superfícies limpas e isentas de contaminação.**
- **Condensação em gotas:** característica de **superfícies com baixa molhabilidade** (silicone, Teflon, ceras e ácidos graxos).
- O condensado representa uma **resistência à transferência de calor** entre o vapor e a superfície.
- A taxa de transferência de calor por **condensação em gotas** é **maior** do que a taxa de transferência de calor por **condensação em filme.**
- É desejável se obter **condensação em gotas em aplicações industriais**, porém é difícil manter essa condição (oxidação, deposição ou remoção).
- Nesse capítulo será analisada principalmente a condensação em filme.

5.7 CONDENSAÇÃO EM FILME LAMINAR SOBRE UMA PLACA VERTICAL



(a) Sem aproximação (b) Com aproximação.

- Análise de Nusselt:

1. Escoamento laminar e propriedades constantes no filme líquido.

2. O gás é um **vapor puro** na temperatura T_{sat} .

3. Com a ausência de gradiente de temperatura no vapor, a transferência de calor para a interface líquido-vapor pode ocorrer somente pela **condensação na interface** e não por condução vinda do vapor.

4. A **tensão de cisalhamento na interface líquido-vapor** é desprezível, $\partial u / \partial y|_{y=\delta} = 0$.

5. A transferência de calor através do filme ocorre apenas por **condução** em virtude das baixas velocidades associadas ao filme.

- Equação do momento na direção x : $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = -\frac{g}{\mu_l}(\rho_l - \rho_v)$

- Integrando duas vezes com $u(0) = 0$ e $\partial u / \partial y|_{y=\delta} = 0$ obtém-se:

$$u(y) = \frac{g(\rho_l - \rho_v)\delta^2}{\mu_l} \left[\frac{y}{\delta} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{\delta} \right)^2 \right]$$

- **Vazão mássica de condensado por unidade de largura:** $\Gamma(x) = \frac{g\rho_l(\rho_l - \rho_v)\delta^3}{3\mu_l}$

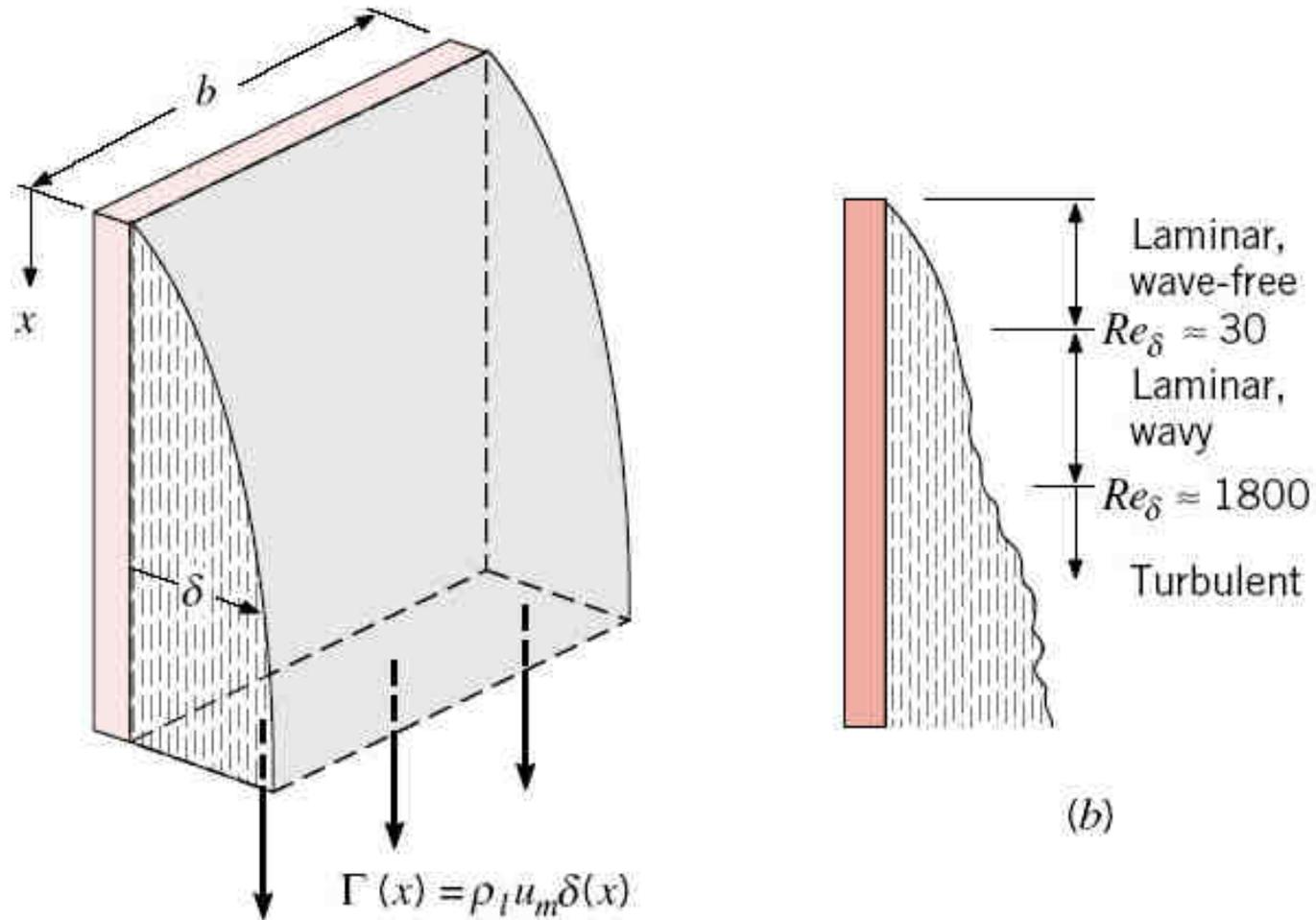
- **Espessura do condensado:** $\delta(x) = \left[\frac{4k_l\mu_l(T_{sat} - T_s)x}{g\rho_l(\rho_l - \rho_v)h_{fg}} \right]^{1/4}$

- Rohsenov e Nusselt mostraram que melhores resultados podem ser obtidos com a utilização de $h'_{fg} = h_{fg} + 0,68c_{p,l}(T_{sat} - T_s)$ no lugar de h_{fg} .
- O **número de Nusselt médio** possui a forma:

$$\overline{\text{Nu}}_L = \frac{\bar{h}_L L}{k_l} = 0,943 \left[\frac{\rho_l g (\rho_l - \rho_v) h'_{fg} L^3}{\mu_l k_l (T_{sat} - T_s)} \right]^{1/4}$$

- Na equação acima, todas as propriedades do líquido devem ser avaliadas em $T_f = (T_{sat} + T_s)/2$ e ρ_v e h_{fg} deve ser estimado a T_{sat} .
- **Transferência total de calor para a superfície:** $q = \bar{h}_L A (T_{sat} - T_s)$
- **Taxa de condensação total:** $\dot{m} = \frac{q}{h'_{fg}} = \frac{\bar{h}_L A (T_{sat} - T_s)}{h'_{fg}}$

5.8 CONDENSAÇÃO EM FILME TURBULENTO



- Na **região laminar sem ondulações**:

$$\frac{\bar{h}_L (v_l^2 / g)^{1/3}}{k_l} = 1,47 \text{Re}_\delta^{-1/3} \quad \text{Re}_\delta = 3,78 \left[\frac{k_l L (T_{sat} - T_s)}{\mu_l h'_{fg} (v_l^2 / g)^{1/3}} \right]^{3/4} \quad \text{Re}_\delta \leq 30$$

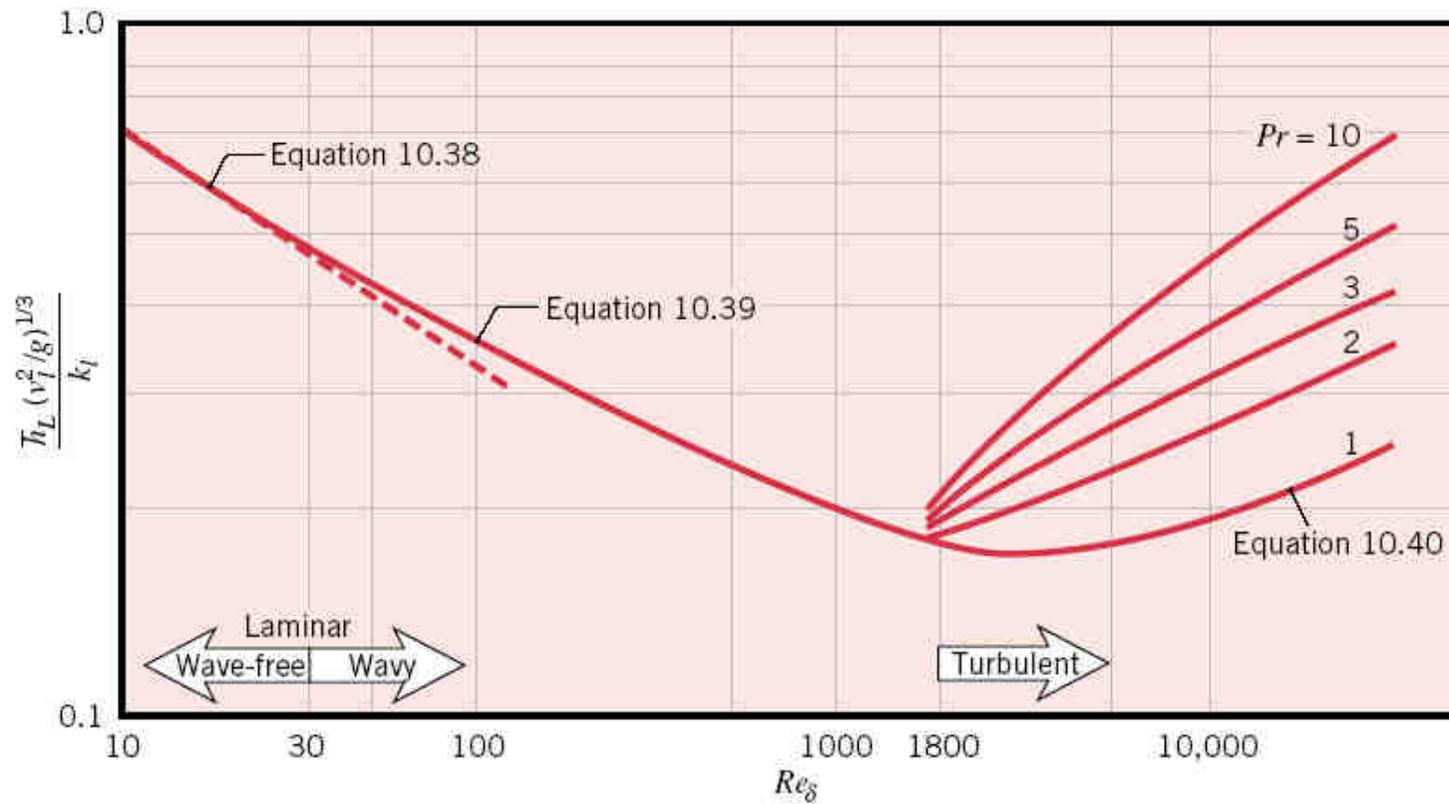
- Na **região laminar com ondulações**:

$$\frac{\bar{h}_L (v_l^2 / g)^{1/3}}{k_l} = \frac{\text{Re}_\delta}{1,08 \text{Re}_\delta^{1,22} - 5,2} \quad \text{Re}_\delta = \left[\frac{3,70 k_l L (T_{sat} - T_s)}{\mu_l h'_{fg} (v_l^2 / g)^{1/3}} + 4,8 \right]^{0,82} \quad 30 \leq \text{Re}_\delta \leq 1800$$

- Na **região turbulenta**:

$$\frac{\bar{h}_L (v_l^2 / g)^{1/3}}{k_l} = \frac{\text{Re}_\delta}{8750 + 58 \text{Pr}_l^{-0,5} (\text{Re}_\delta^{0,75} - 253)}$$

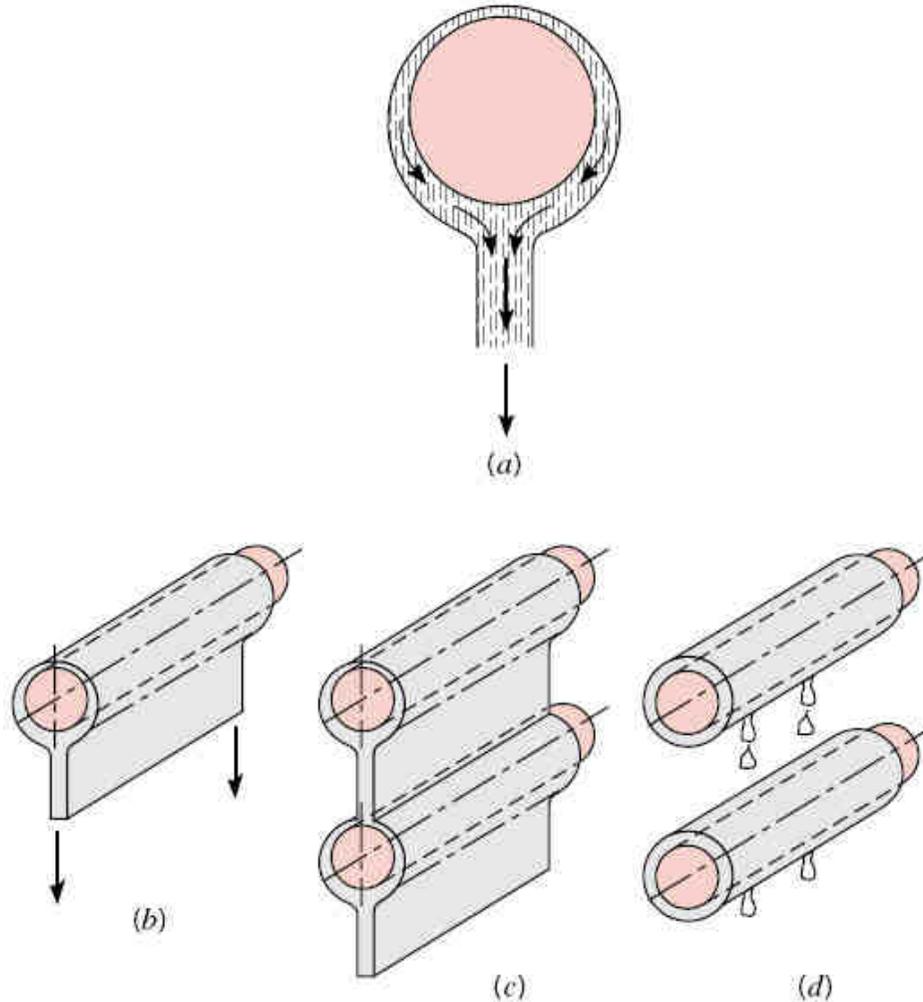
$$\text{Re}_\delta = \left[\frac{0,069 k_l L (T_{sat} - T_s)}{\mu_l h'_{fg} (v_l^2 / g)^{1/3}} \text{Pr}_l^{0,5} - 151 \text{Pr}_l^{0,5} + 253 \right]^{4/3} \quad \text{Re}_\delta \geq 1800$$



- Coeficiente de transferência de calor por convecção:

$$\bar{h}_L = \frac{Re_\delta \mu_f h'_{fg}}{4L(T_{sat} - T_s)}$$

5.9 CONDENSAÇÃO EM FILME SOBRE SISTEMAS RADIAIS



Condensação em filme sobre (a) uma esfera (b) um único tubo horizontal

Uma fileira vertical de tubos horizontais com (c) uma lâmina contínua de condensado (d) gotejamento do condensado

- **Coeficiente convectivo médio:** $\bar{h}_D = C \left[\frac{g\rho_l(\rho_l - \rho_v)k_l^3 h'_{fg}}{\mu_l(T_{sat} - T_s)D} \right]^{1/4}$

- $C = 0,826$ para **esferas** e $C = 0,729$ para **tubos**.

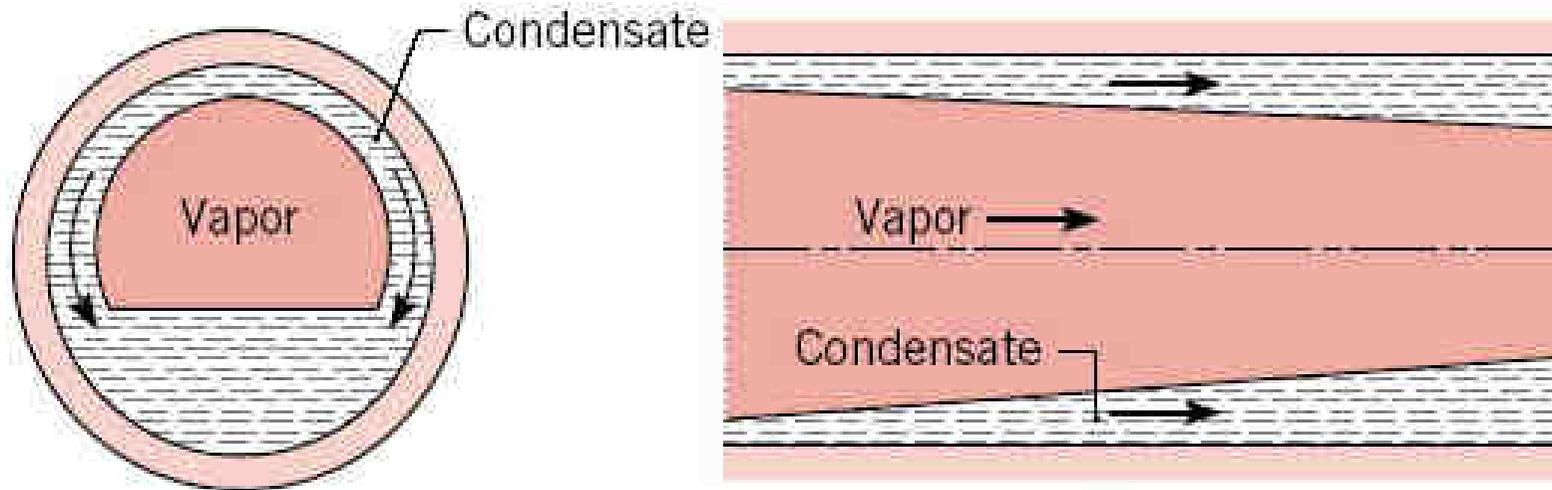
- Na equação acima, todas as propriedades do líquido devem ser avaliadas em $T_f = (T_{sat} + T_s)/2$ e ρ_v e h'_{fg} deve ser estimado a T_{sat} .

- Para uma **fileira vertical** com N **tubos horizontais** o **coeficiente convectivo médio** pode ser calculado como:

$$\bar{h}_{D,N} = 0,729 \left[\frac{g\rho_l(\rho_l - \rho_v)k_l^3 h'_{fg}}{N\mu_l(T_{sat} - T_s)D} \right]^{1/4}$$

- Nota-se que $\bar{h}_{D,N} = \bar{h}_D N^{-1/4}$

5.10 CONDENSAÇÃO EM FILME NO INTERIOR DE TUBOS HORIZONTAIS



(a) Baixas velocidades do vapor (b) Altas velocidades do vapor.

- Situação comum em sistemas de refrigeração e de condicionamento de ar. Para **baixas velocidades do escoamento do vapor**:

$$Re_{v,ent} = \left(\frac{\rho_v u_{m,v} D}{\mu_v} \right)_{ent} < 35000$$

- Chato (1962) recomenda a seguinte correlação:

$$\bar{h}_D = 0,555 \left[\frac{g\rho_l(\rho_l - \rho_v)k_l^3 h'_{fg}}{\mu_l(T_{sat} - T_s)D} \right]^{1/4}$$

- **Calor latente modificado:** $h'_{fg} = h_{fg} + \frac{3}{8}c_{p,l}(T_{sat} - T_s)$

- Na equação acima, todas as propriedades do líquido devem ser avaliadas em $T_f = (T_{sat} + T_s)/2$ e ρ_v e h_{fg} deve ser estimado a T_{sat} .
- Para velocidades mais elevadas, o regime de escoamento bifásico se torna anular e resultados para essa condição de escoamento são fornecidas por Marto (1998).

5.11 CONDENSAÇÃO EM GOTAS

- Para a condensação de vapor d'água sobre **superfícies de cobre** com **baixa molhabilidade**, tem-se as seguintes correlações para \bar{h}_{cg} (W/m².K)

$$\bar{h}_{cg} = 51104 + 2044T_{sat} \text{ (}^\circ\text{C)} \Rightarrow 22^\circ\text{C} \leq T_{sat} \leq 100^\circ\text{C} \quad \bar{h}_{cg} = 255510 \Rightarrow 100^\circ\text{C} \leq T_{sat}$$

- **Transferência total de calor para a superfície:** $q = \bar{h}_{cg} A (T_{sat} - T_s)$

- **Taxa de condensação total:** $\dot{m} = \frac{q}{h'_{fg}} = \frac{\bar{h}_{cg} A (T_{sat} - T_s)}{h'_{fg}}$

- **Calor latente corrigido:** $h'_{fg} = h_{fg} + 0,68c_{p,l} (T_{sat} - T_s)$

- Na equação acima, todas as propriedades do líquido devem ser avaliadas em $T_f = (T_{sat} + T_s)/2$ e ρ_v e h_{fg} deve ser estimado a T_{sat} .