



Mudança de fase

Ebulição e condensação



Ebulição

$$h = h[\Delta T, g(\rho_l - \rho_v), h_{fg}, \sigma, L, \rho, c_P, k, \mu]$$

$$\frac{hL}{k} = f\left[\frac{\rho g(\rho_l - \rho_v)L^3}{\mu^2}, \frac{c_P \Delta T}{h_{fg}}, \frac{\mu c_P}{k}, \frac{g(\rho_l - \rho_v)L^2}{\sigma}\right]$$

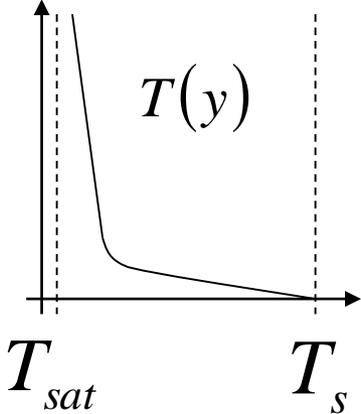
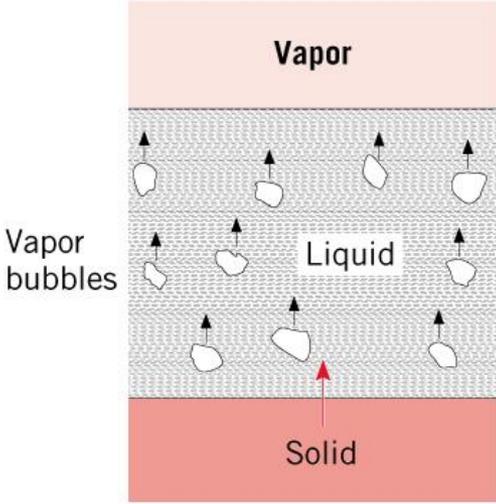
$$Nu_L = f\left[\frac{\rho g(\rho_l - \rho_v)L^3}{\mu^2}, Ja, Pr, Bo\right]$$

- Ebulição em piscina
- Ebulição com convecção forçada

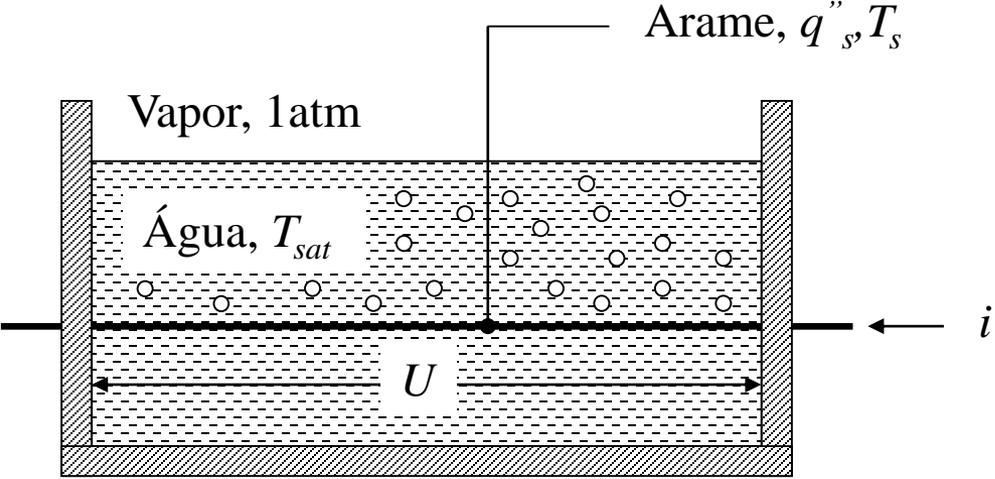
$$q'' = h(T_s - T_{sat}) = h\Delta T_e$$

- Ebulição sub-resfriada
- Ebulição saturada

Ebulição em piscina (Experimento de Nukiyama)



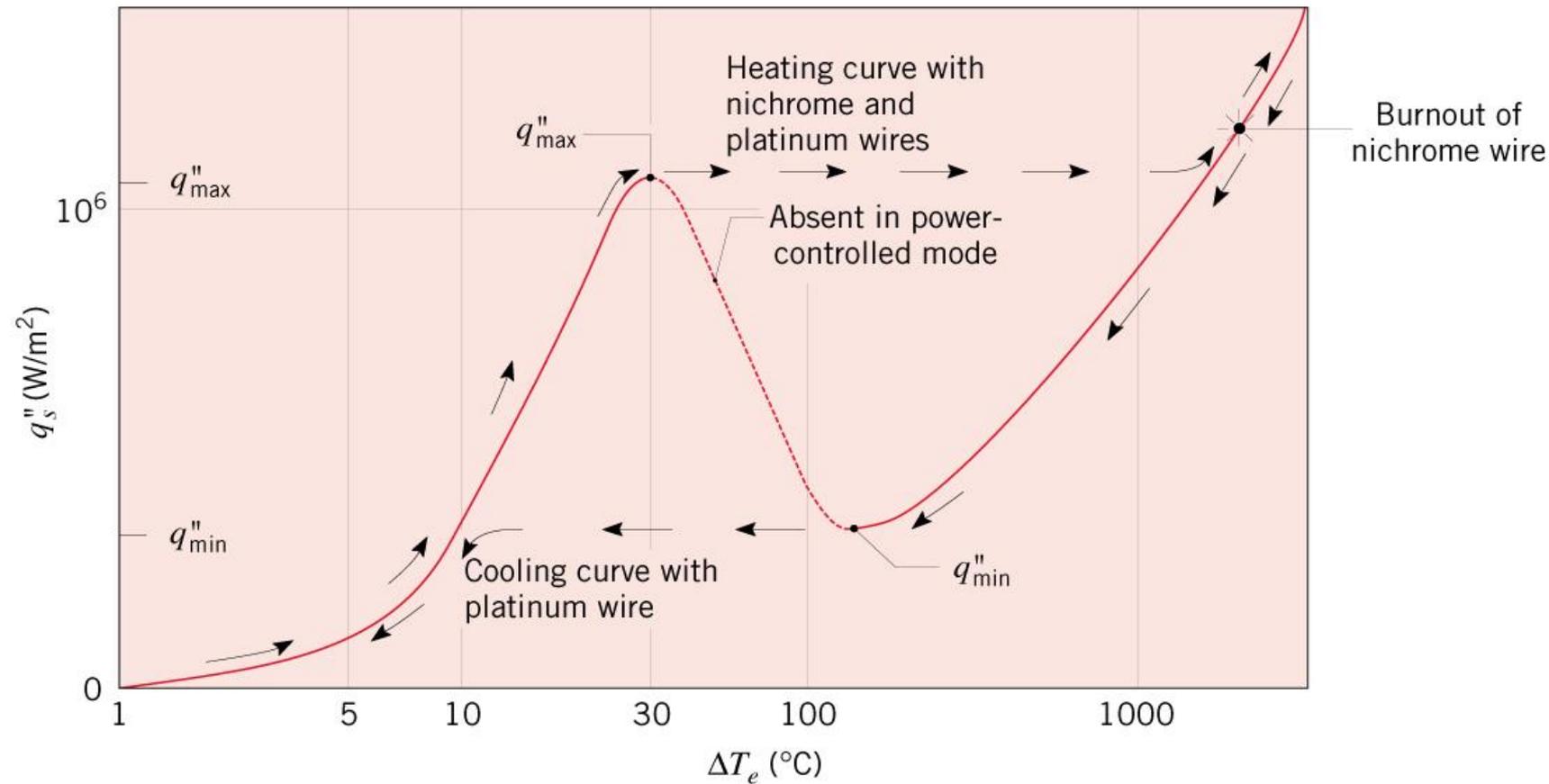
Potência controlada
• T_s é a variável dependente
• q''_s é a variável independente



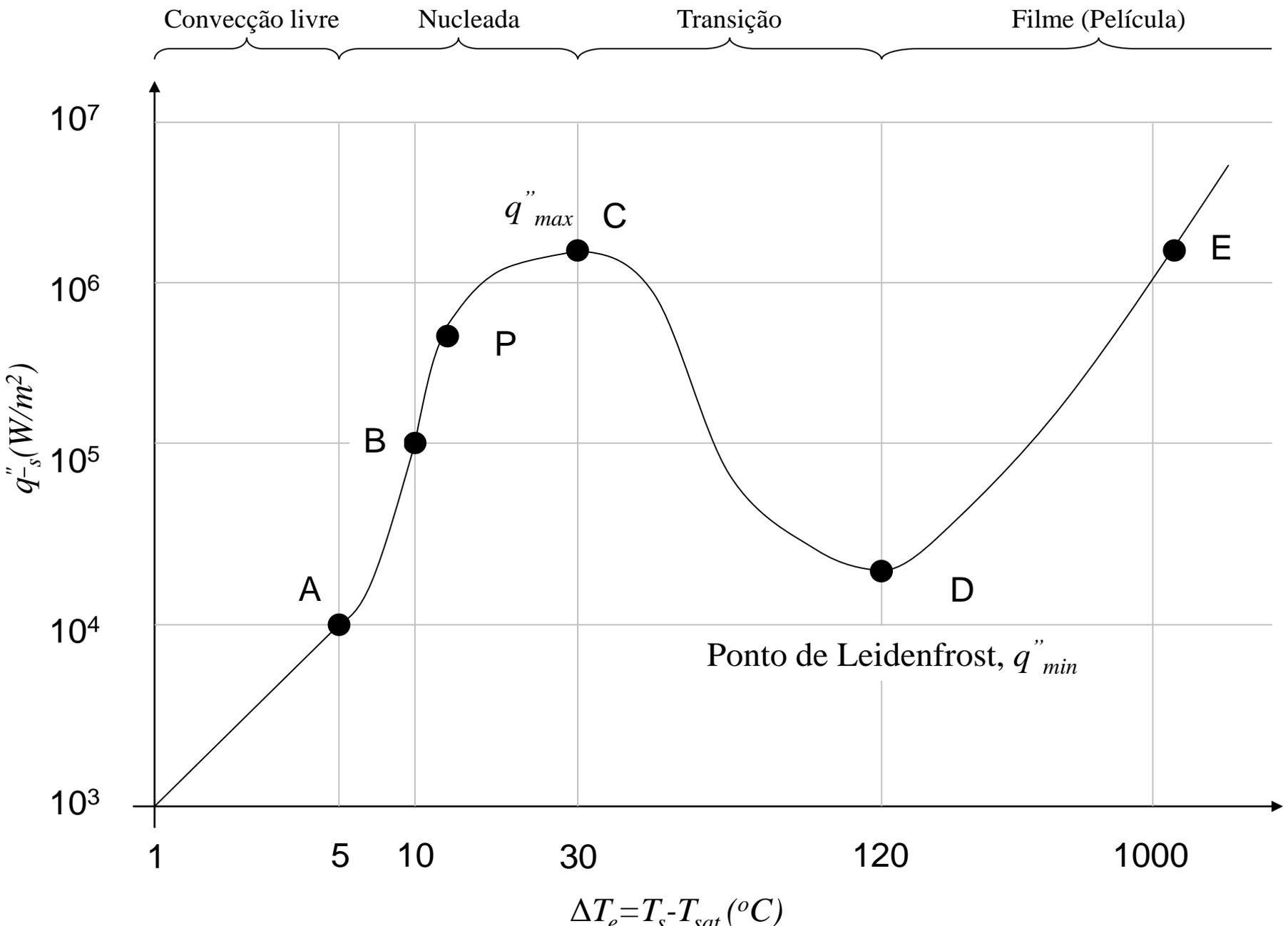
Curva de Ebulição

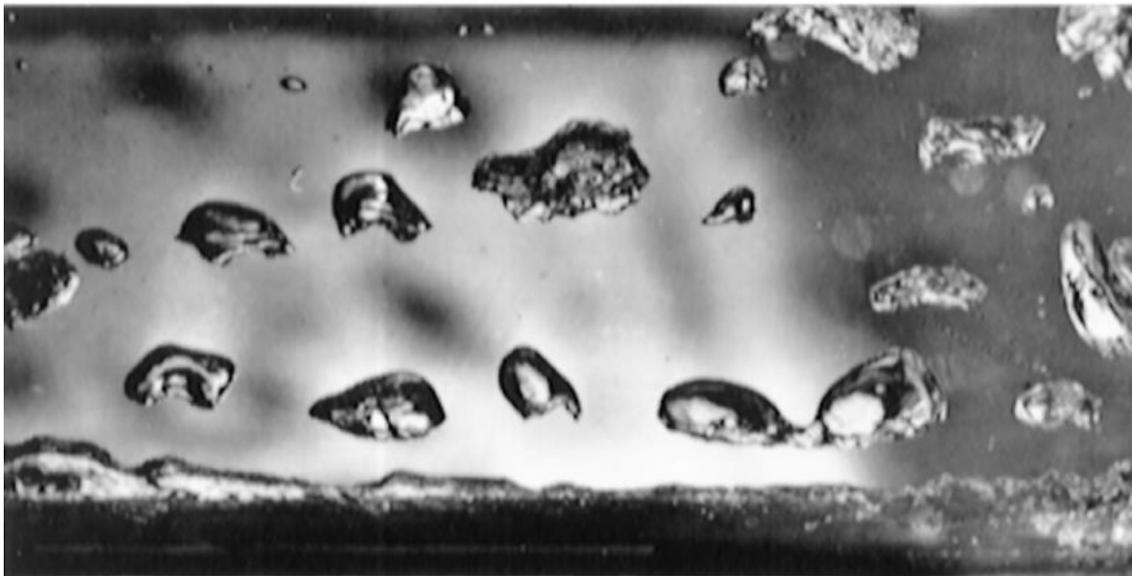
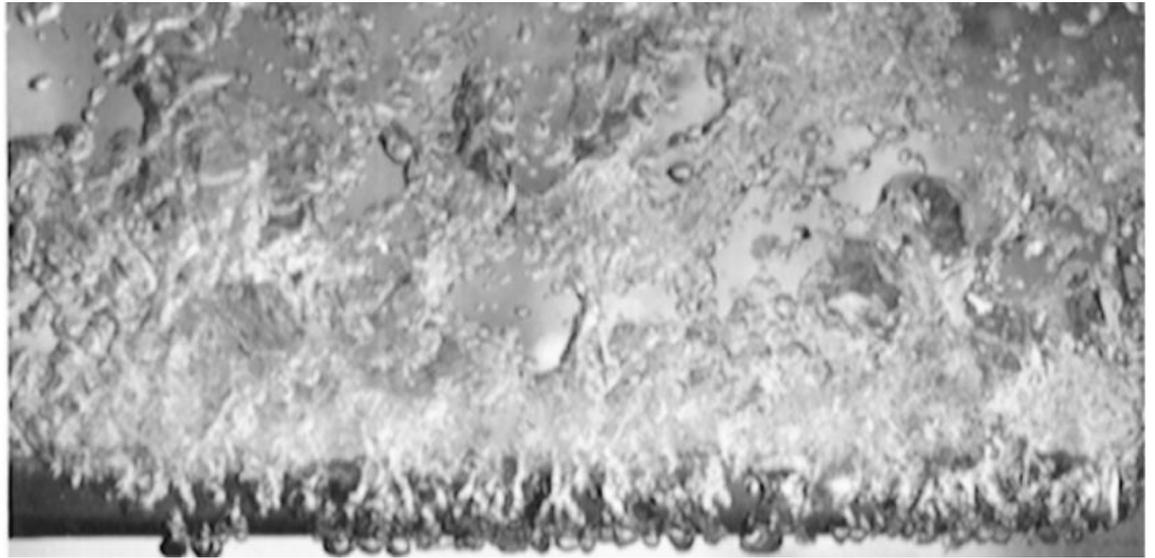
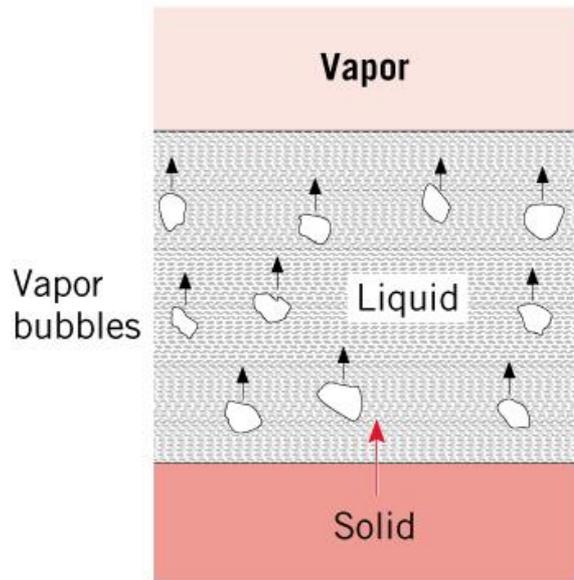
Nukiyama

Drew e Mueller



Curva de Ebulição





Curva de Ebulição

Correlação de Rohsenow

$$q''_{\max} = Ch_{fg}\rho_v \left[\frac{\sigma g(\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{1/4}$$

$$C=0,149$$

$$q''_s = \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left(\frac{c_{p,l} \Delta T_e}{C_{s,f} h_{fg} \text{Pr}_l^n} \right)^3$$

$$q''_{\min} = C\rho_v h_{fg} \left[\frac{g\sigma(\rho_l - \rho_v)}{(\rho_l + \rho_v)^2} \right]^{1/4}$$

$$C=0,09$$

Combinação superfície-fluido	$C_{s,f}$	n
Água-cobre		
Riscado	0,0068	1,0
Polida	0,0128	1,0
Água-aço inoxidável		
Atacada quimicamente	0,0133	1,0
Polida mecanicamente	0,0132	1,0
Esmerilhada e polida	0,0080	1,0
Água-latão	0,0060	1,0
Água-níquel	0,006	1,0
Água-platina	0,0130	1,0
N-Pentato-cobre		
Polida	0,0154	1,7
Esmerilhada	0,0049	1,7
Benzeno-cromo	0,0101	1,7
Álcool etílico-cromo	0,0027	1,7

Ebulição em filme

$$\overline{\text{Nu}}_D = \frac{\bar{h}_{conv} D}{k_v} = C \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v) h'_{fg} D^3}{\nu_v k_v (T_s - T_{sat})} \right]^{1/4}$$

Esfera $C=0,67$
Cilindro horizontal $C=0,62$

$$h'_{fg} = h_{fg} + 0,80 c_{p,v} (T_s - T_{sat})$$

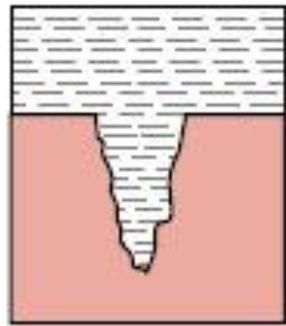
As propriedades do vapor na temperatura do filme e a massa específica do vapor na T_{sat}

$$T_s \geq 300 \text{ } ^\circ\text{C}$$

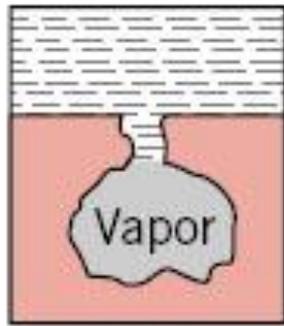
$$\bar{h}^{-4/3} = \bar{h}_{conv}^{-4/3} + \bar{h}_{rad}^{-1/3} \bar{h}^{-1/3}$$

$$\bar{h}_{rad} < \bar{h}_{conv}$$

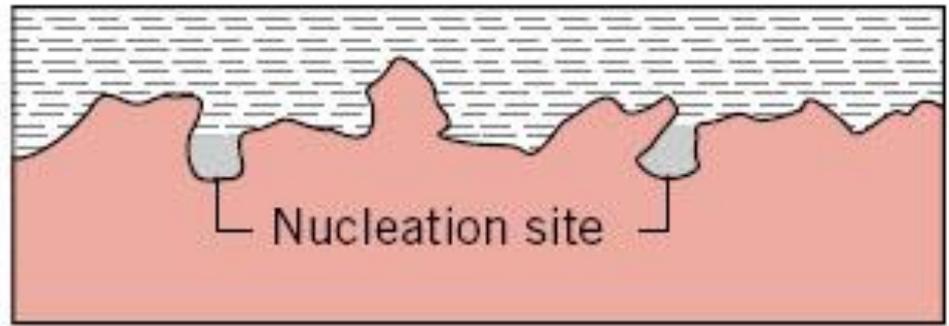
$$\bar{h} \approx \bar{h}_{conv} + 0,75 \bar{h}_{rad} \quad \bar{h}_{rad} = \frac{\varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sat}^4)}{T_s - T_{sat}}$$



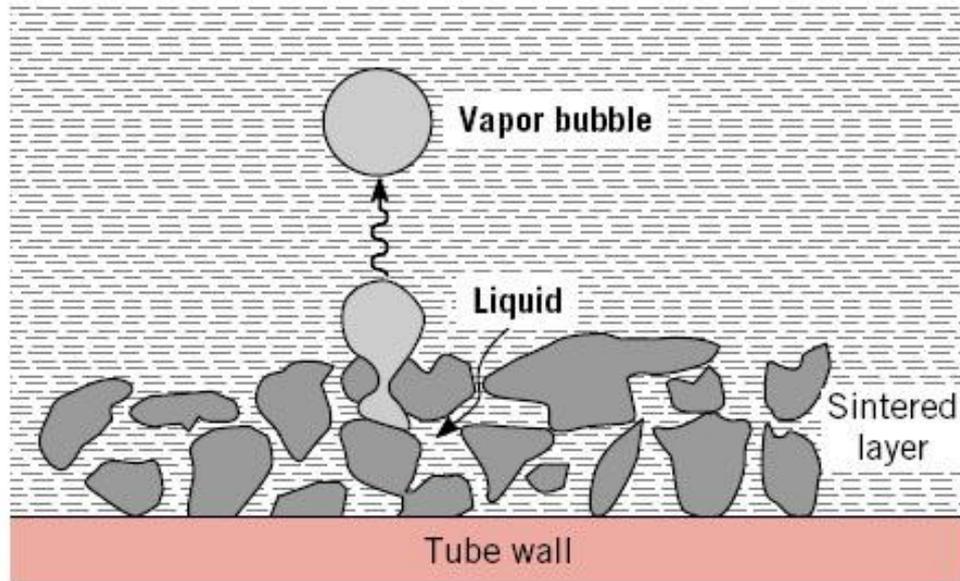
(a)



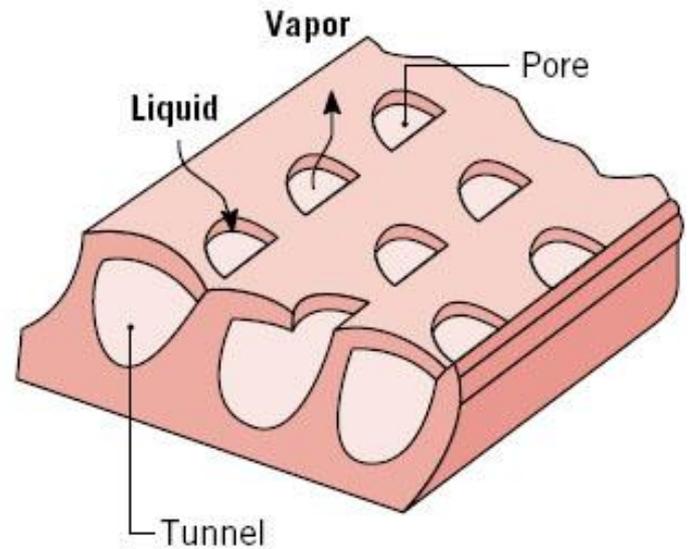
(b)



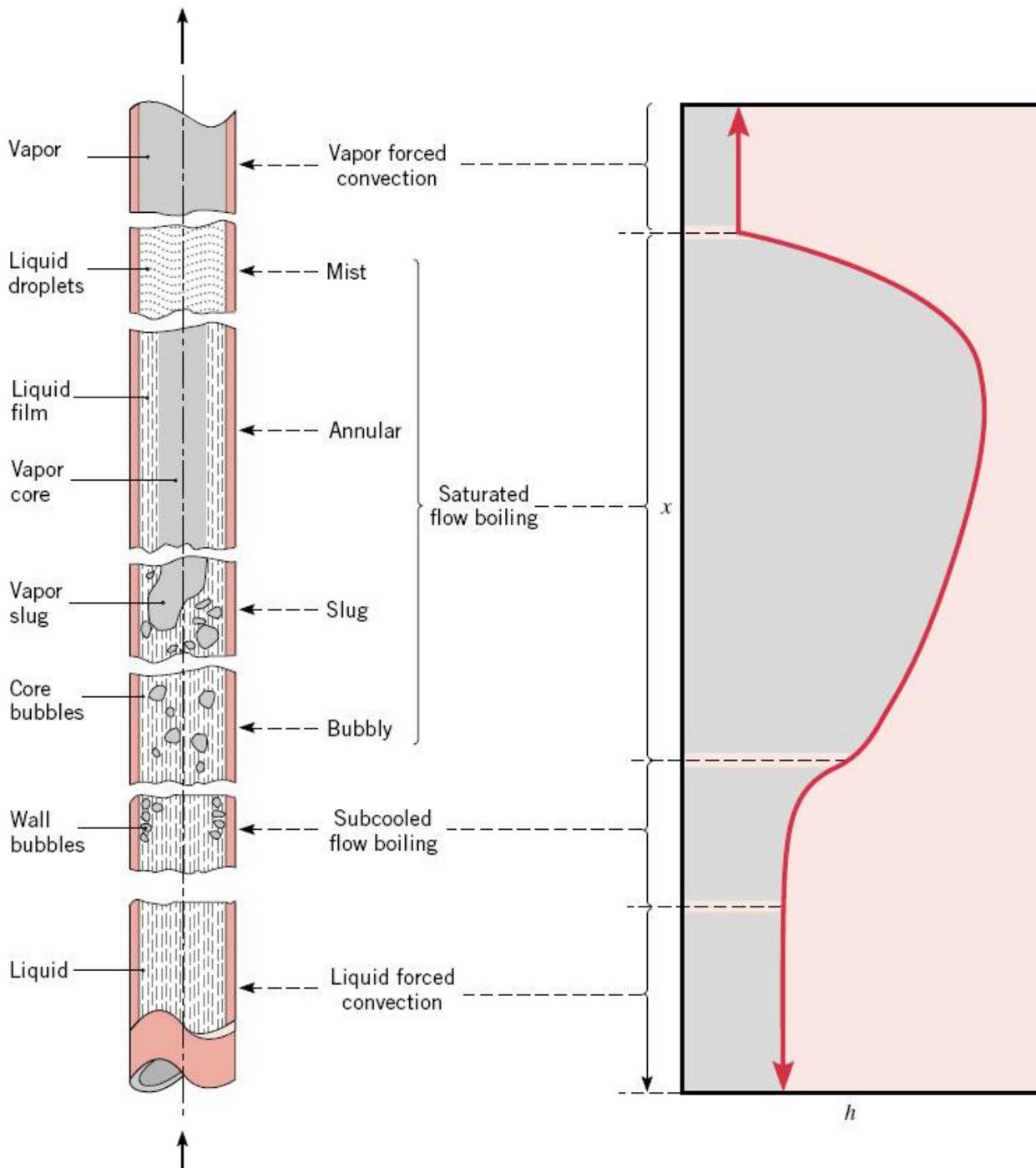
(c)



(a)



(b)



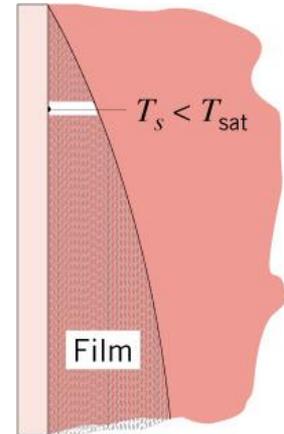
Considerações Gerais

- A transferência de calor para uma superfície ocorre por condensação quando a temperatura da superfície é menor que a temperatura de saturação do vapor.

- **Condensação em Filme**

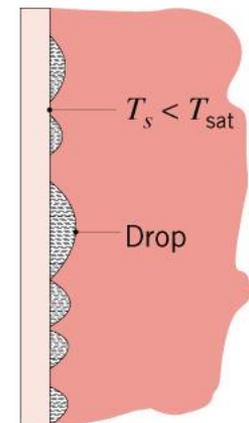
- A superfície é coberta por um condensado, que escoia continuamente na superfície e provoca uma resistência a transferência de calor entre a superfície e o vapor.

- Superfície lisa e livre de contaminantes.



- **Condensação por gotas**

- A superfície é coberta por gotas que variam de poucos micrometros até a aglomerações visíveis a olho nu.



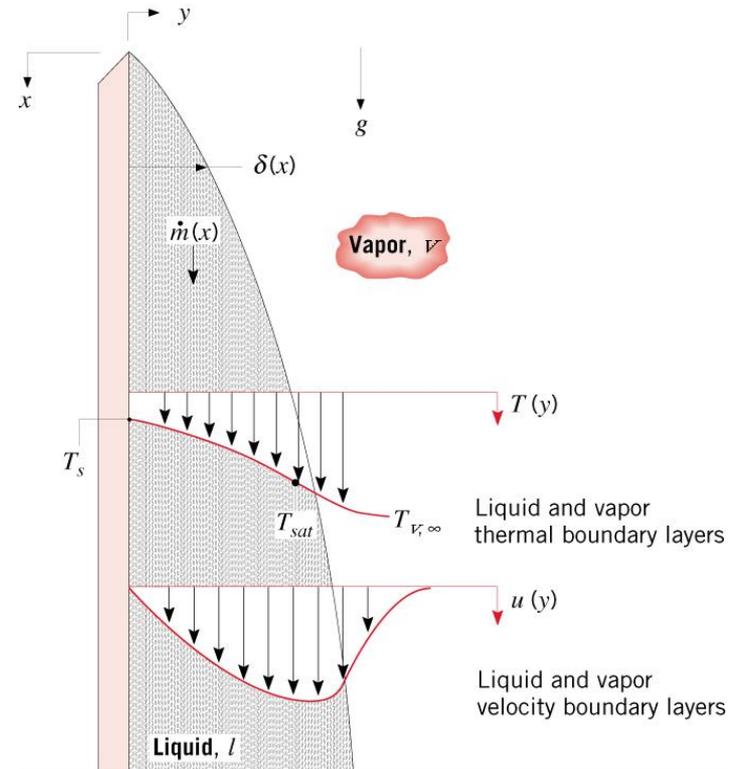
Condensação em película sobre uma placa vertical

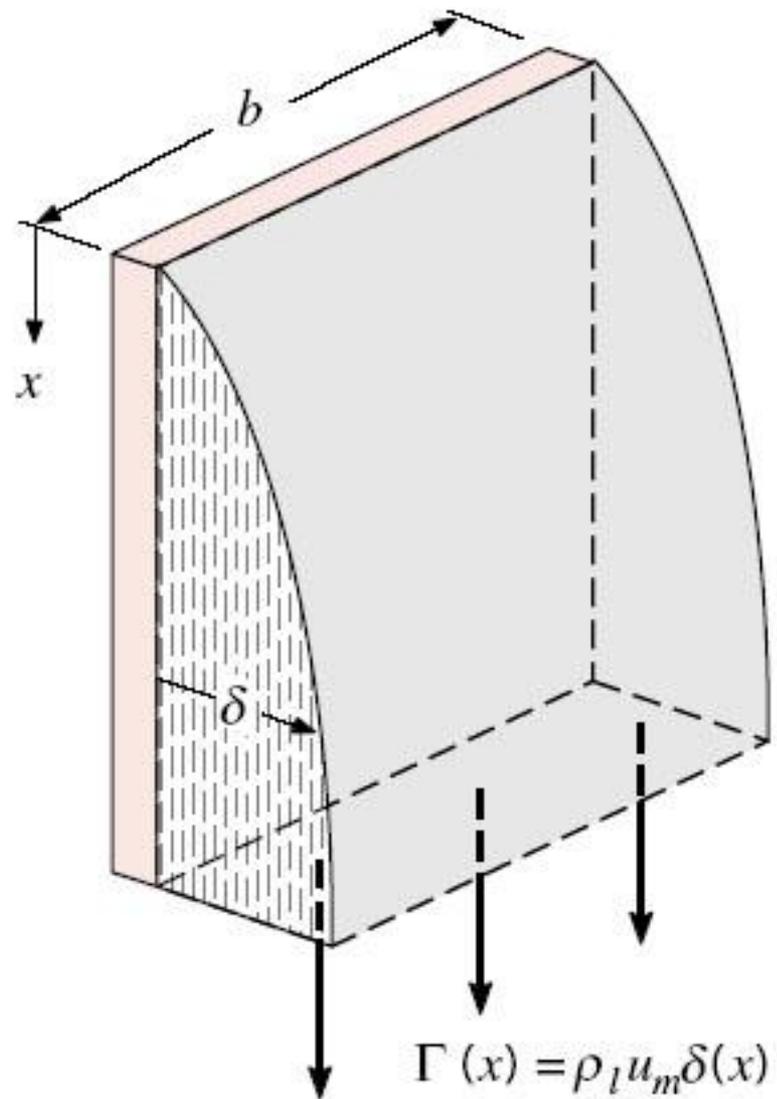
$$\delta(x) = \left[\frac{4k_l \mu_l (T_{sat} - T_s) x}{g \rho_l (\rho_l - \rho_v)} \right]$$

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

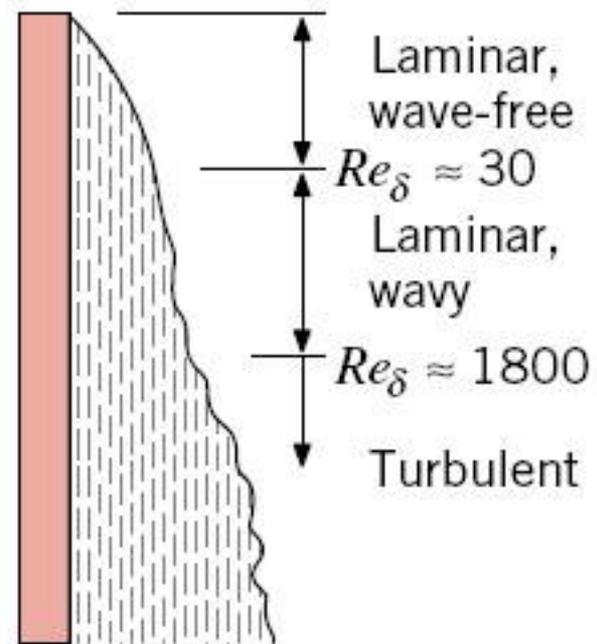
$$h'_{fg} = h_{fg} + 0,68 c_{p,l} (T_{sat} - T)$$

$$\dot{m} = \frac{q}{h'_{fg}} = \frac{\bar{h}_L A (T_{sat} - T_s)}{h'_{fg}}$$

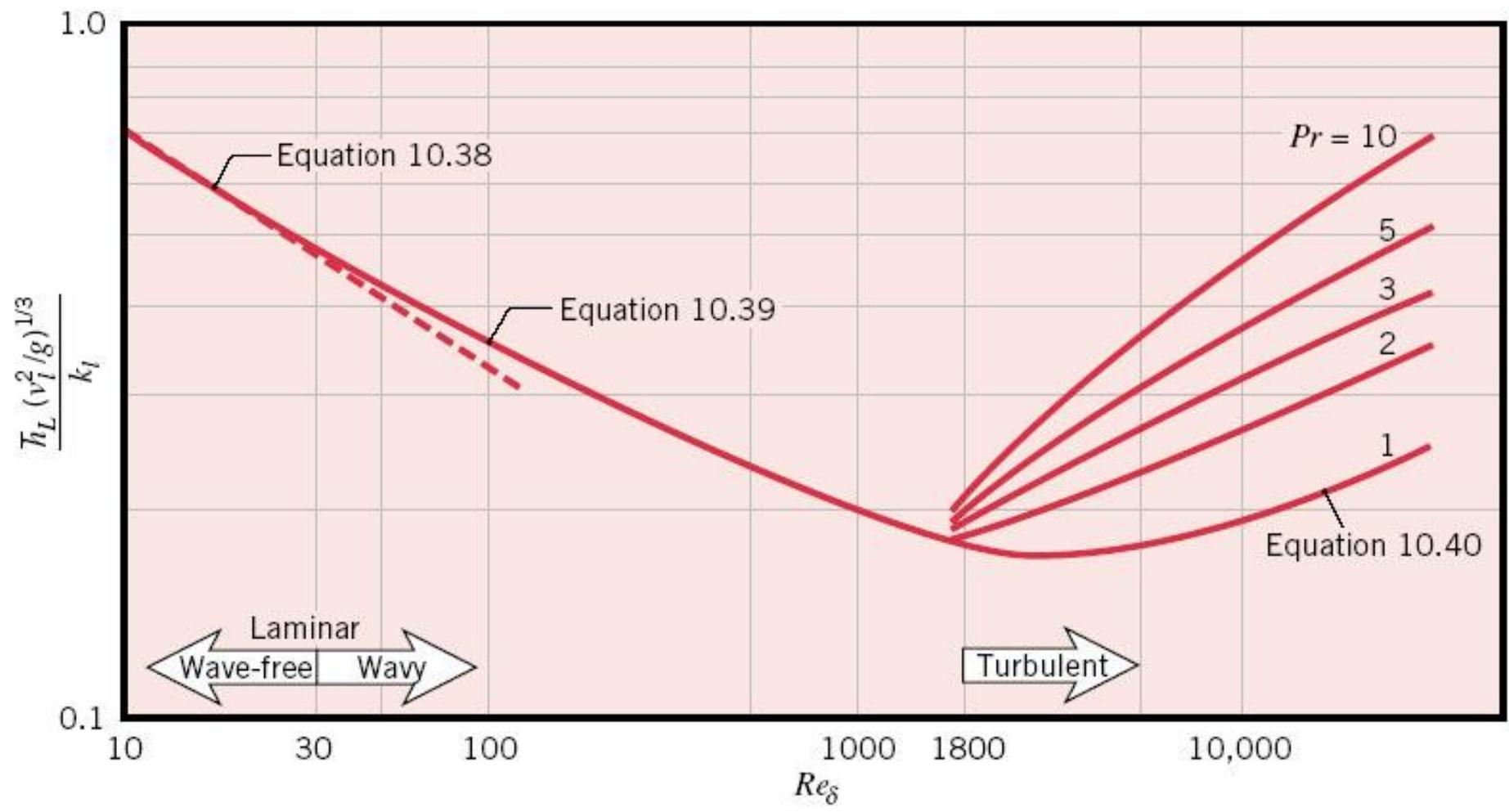




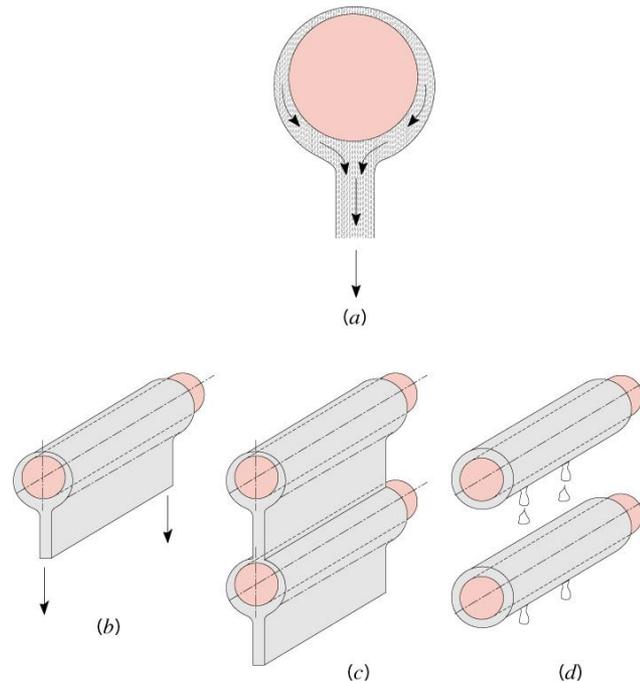
(a)



(b)



Condensação em filme em sistemas radiais



Único tubo ou esfera

$$\overline{Nu}_D = C \left[\frac{\rho_l g (\rho_l - \rho_v) h'_{lv} D^3}{\mu_l k_l (T_{sat} - T_s)} \right]^{1/4}$$

$$\bar{h}_{D,N} = \bar{h}_D N^{-1/6}$$

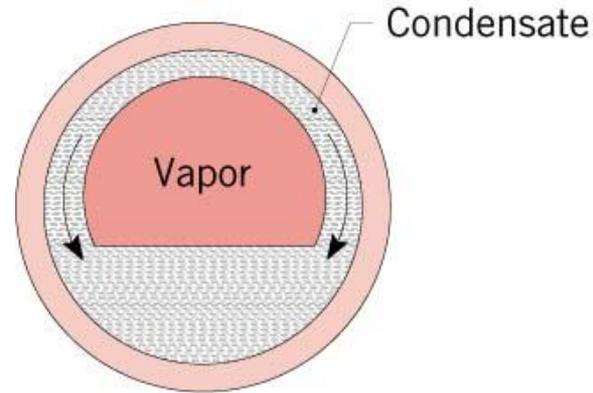
Tubo: $C = 0.729$

Esfera: $C = 0.826$

Condensação em filme para um fluxo de vapor em um tubo horizontal

- Se a vazão de vapor é pequena, o fluxo de condensado é circunferencial e axial

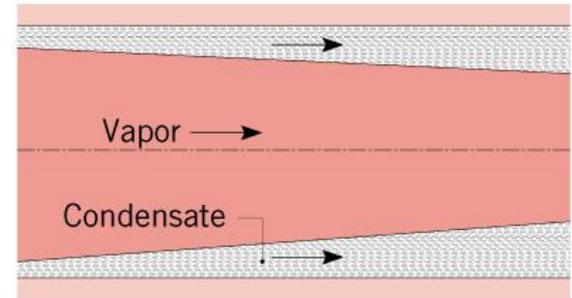
$$Re_{v,i} = \left(\frac{\rho_v u_{m,v} D}{\mu_v} \right)_i < 35000$$



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

$$h'_{fg} = h_{fg} + 3/8 c_{P,l} (T_{sat} - T_s)$$

- Para altas velocidades de vapor, o fluxo é principalmente na direção axial.



Condensação por gotas

- Vapor condensando em um superfície de cobre:

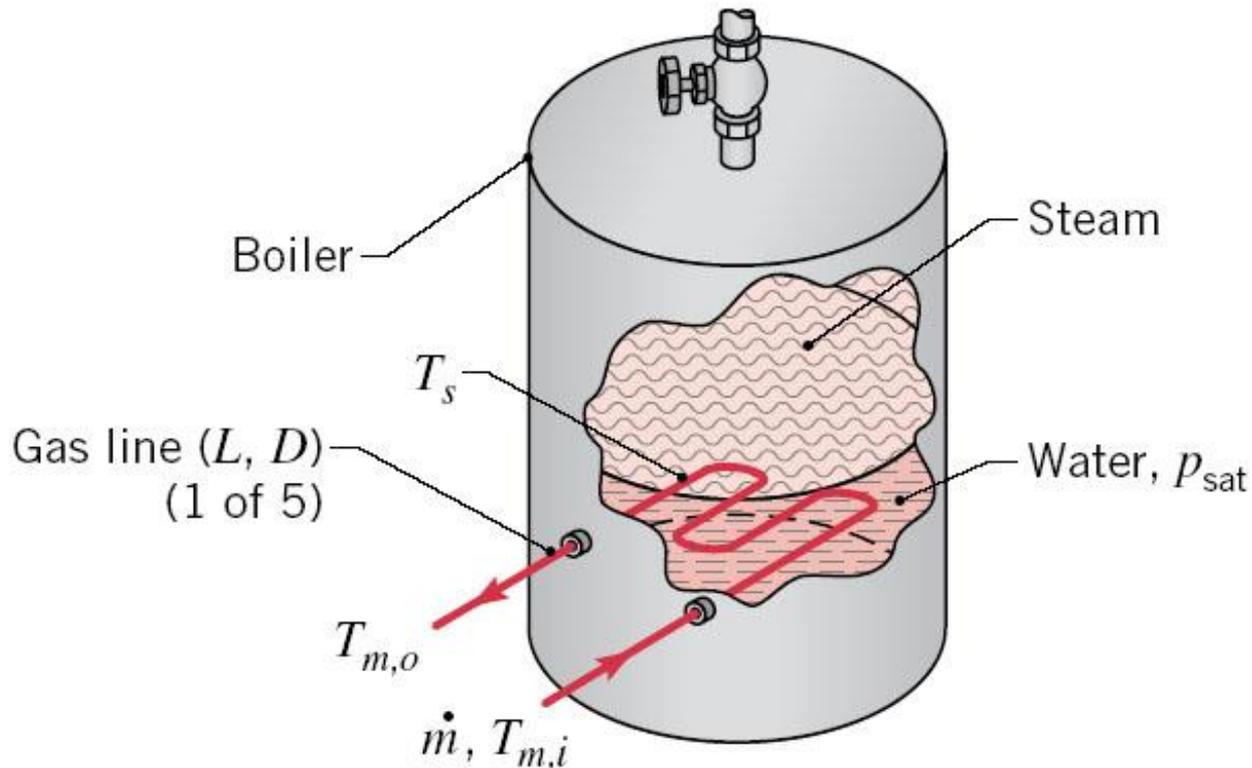
$$q = \bar{h}_{dc} A (T_{sat} - T_s)$$

$$\bar{h}_{dc} = 51.104 + 2.044T_{sat} \quad 22^\circ C < T_{sat} < 100^\circ C$$

$$\bar{h}_{dc} = 255.510 \quad 100^\circ C < T_{sat}$$

Exercício 10.17 (7ª. Edição) Considere uma caldeira que queima gás na qual cinco serpentinas de cobre, com parede delgada, diâmetro de 25 mm e 8 m de comprimento, estão submersos em água pressurizada a 4,37 bar. As paredes das serpentinas são polidas e podem ser consideradas isotérmicas. Gases de combustão entram em cada serpentina com uma temperatura de $T_{m,ent} = 700^\circ\text{C}$ e a uma vazão de $\dot{m} = 0,08 \text{ kg/s}$, respectivamente.

Determine a temperatura da parede da serpentina T_s e a temperatura do gás na saída da serpentina, $T_{m,sai}$ para as condições especificadas. Como uma primeira aproximação, as propriedades dos gases de combustão podem ser considerados iguais as do ar a 700 K.



Exercício 10.19 (7ª. Edição) Estime a potência (W/m^2) necessária para manter uma placa de latão a $\Delta T_e = 15^\circ\text{C}$ em contato com água saturada fervendo a 1 atm. Qual é a potência necessária se a água estiver pressurizada a 10 atm? A que fração do fluxo térmico crítico a placa está operando?

Exercício 10.33 (7ª. Edição) Um elemento aquecedor de 5 mm de diâmetro é mantido com uma temperatura superficial de 350°C , quando imerso horizontalmente em água sob pressão atmosférica. A cobertura do elemento é de aço inoxidável com acabamento de polimento mecânico com uma emissividade de 0,25.

- (a) Calcule a dissipação de potência elétrica e a taxa de produção de vapor por unidade de comprimento do aquecedor.
- (b) Se o aquecedor fosse operado na mesma taxa de dissipação de potência no regime de ebulição nucleada, qual temperatura a superfície atingiria. Calcule a taxa de produção de vapor por unidade de comprimento para essa condição de operação.
- (c) Esboce a curva de ebulição e represente as duas condições de operação das partes (a) e (b). Compare os resultados de suas análises. Se o elemento aquecedor for operado na opção de potência controlada, explique como você alcançaria essas duas condições, iniciando a partir de um elemento frio.

Exercício 10.54 (7ª. Edição) O condensador de uma planta de potência a vapor é constituído por uma matriz quadrada alinhada com 625 tubos, cada um com diâmetro de 25 mm. Considere condições nas quais o vapor de água saturada a 0,105 bar condensa sobre a superfície externa de cada tubo, enquanto uma temperatura de parede do tubo igual a 17°C é mantida pelo escoamento de água de resfriamento no seu interior. Qual é a taxa de transferência de calor para a água por unidade de comprimento da matriz tubular? Qual é a taxa de condensação correspondente?