



Ebulição e condensação

Prof. Alexei Essiptchouk

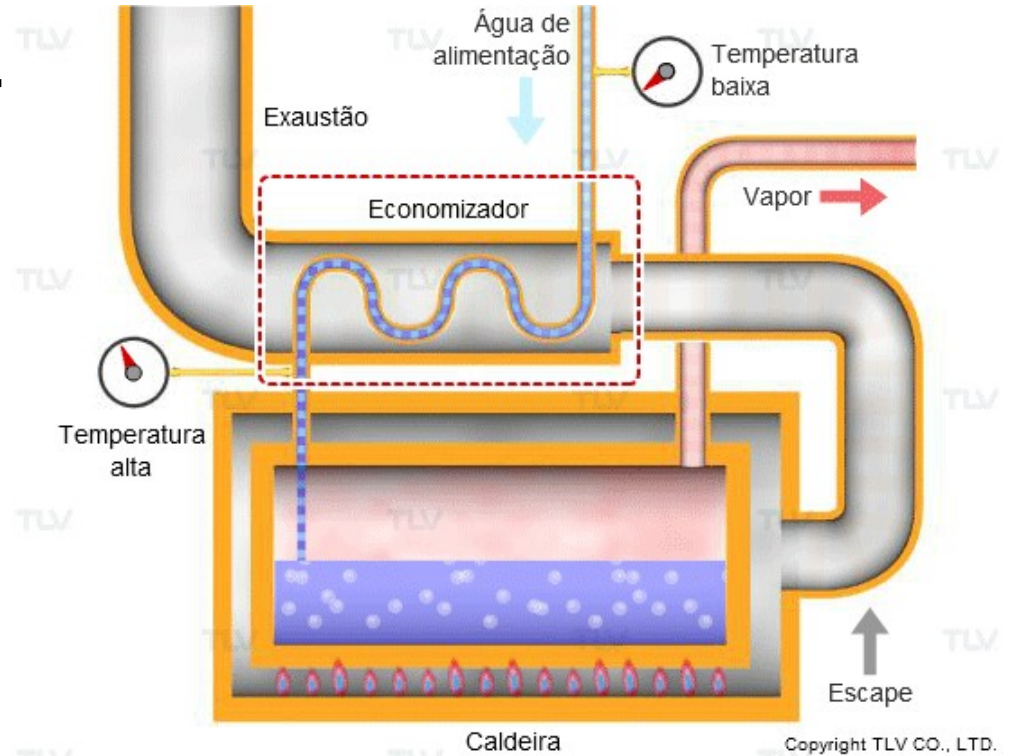
**Dep. Engenharia Ambiental
Instituto de Ciência e Tecnologia
Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho”**

Introdução

- Ebulição e condensação – processos que ocorrem em uma interface sólido – líquido ou sólido – vapor
- Efeitos de calor latente é significativo (mudança de fase, com alta q e pequena ΔT)
- Ebulição – transferência de calor DE uma superfície
- Condensação – transferência de calor PARA uma superfície
- Como envolvem o movimento do fluido é classificado como transferência de calor por convecção

Introdução

As taxas de transferência de calor na ebulição e condensação são, em geral, muito maiores do que aqueles característicos da transferência de calor sem mudança de fase.



Parâmetros adimensionais

Podem ser obtidos usando a teorema pi de Buckingham

O coeficiente convectivo depende:

- Diferença das temperaturas da superfície e saturação $\Delta T = |T_s - T_{sat}|$
- Força de corpo $g(\rho_l - \rho_v)$ que induz a força de empuxo
- Calor latente h_{fg}
- Tensão superficial σ
- Comprimento característico L
- Propriedades termofísicas do líquido ou vapor (ρ , c_p , k e μ)

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

Parâmetros adimensionais

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

Número de variáveis: 10

Dimensões: 5 (m, kg, s, J, K)

Número de grupos pi: $10 - 5 = 5$

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

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

Ja – número de Jakob: razão entre a máxima energia sensível absorvida pelo líquido (vapor) e a energia latente absorvida durante a condensação (ebulição)

Bo – número de Bond: razão entre a força de empuxo e a força de tensão superficial

Parâmetro sem nome: efeito de movimento do fluído induzido pelo empuxo na transferência de calor

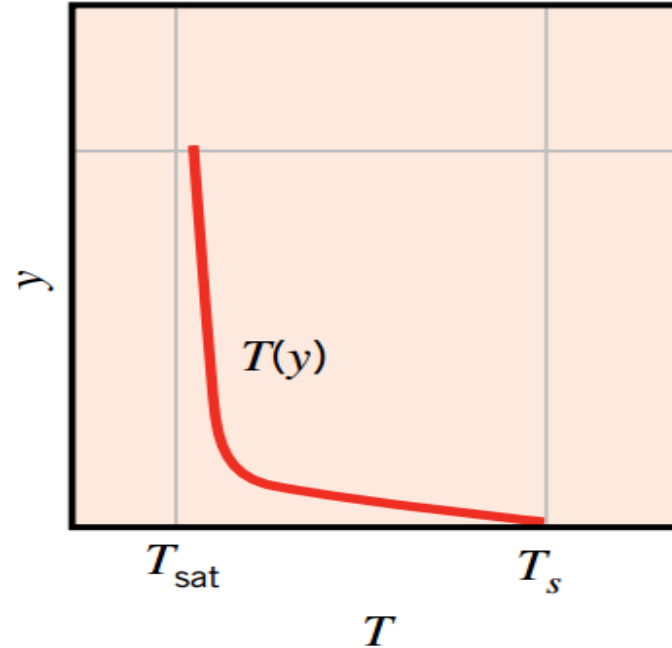
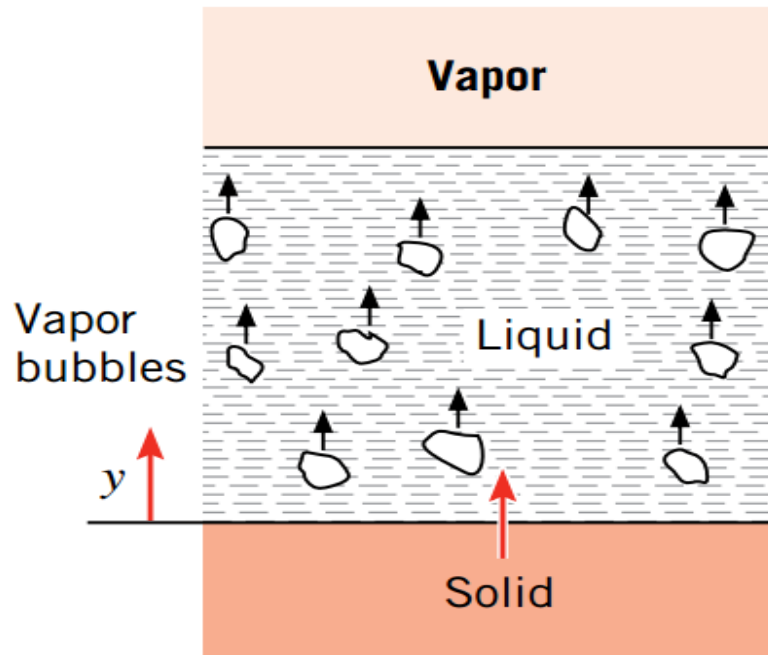
Ebulição

- Ebulição ocorre quando a temperatura da superfície $T_s > T_{sat}$ (temperatura de saturação) $q_s'' = h(T_s - T_{sat}) = h \Delta T_e$
- Lei de resfriamento do Newton,
- ΔT_e – excesso de temperatura
- Formação, crescimento e dinâmica das bolhas de vapor dependem do ΔT_e , das propriedades termofísicas do fluido (tensão superficial), natureza da superfície
- Movimento das bolhas influencia fortemente o coeficiente de transferência de calor

Modos de ebulição

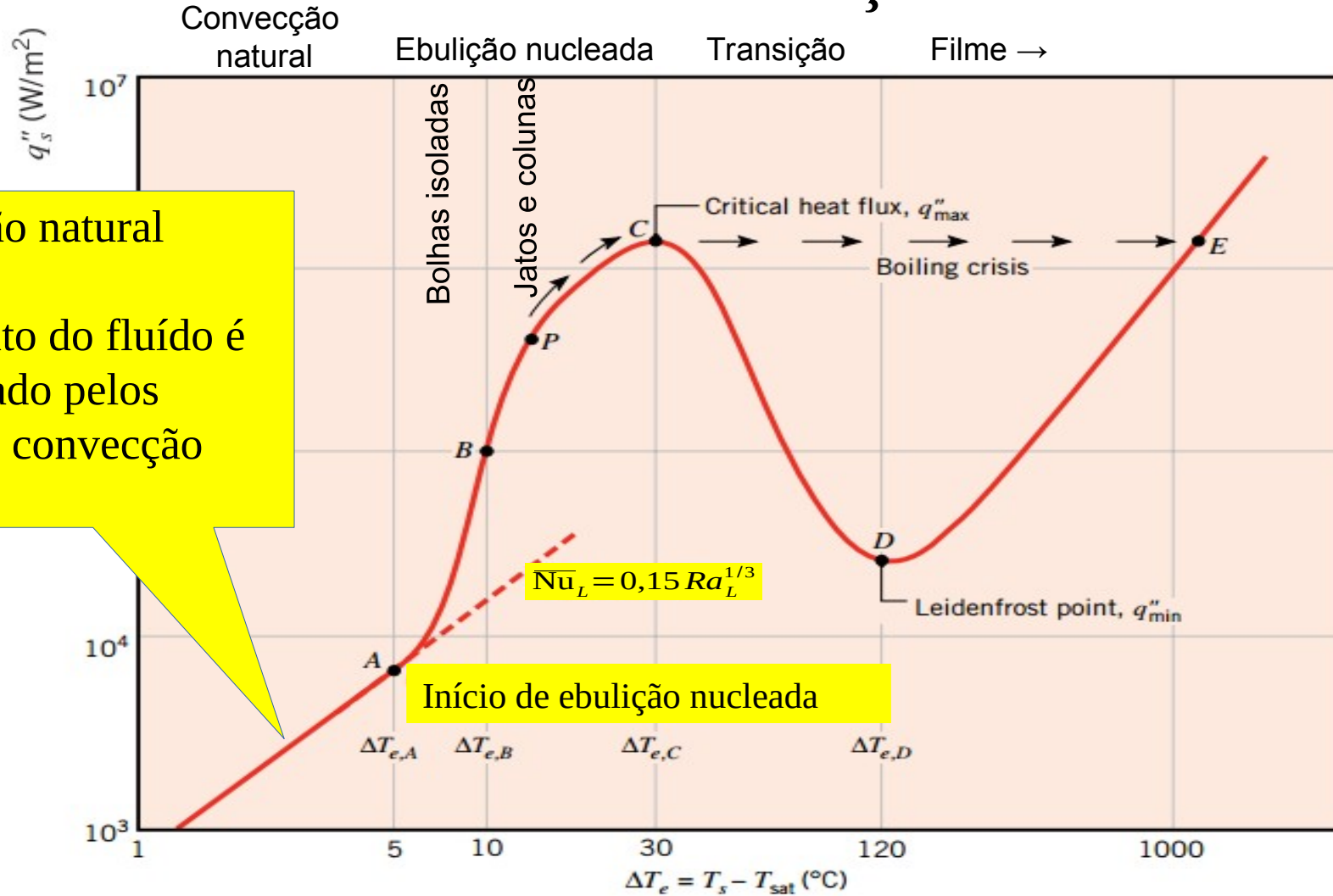
- Ebulição em piscina (líquido quiescente + convecção natural + desprendimento das bolhas)
- Ebulição com convecção forçada (movimento induzido por meios externos, bem como pela convecção normal e pela mistura induzida pela bolhas)
- Ebulição sub-resfriada (em maior parte $T_{liquido} < T_{sat}$, bolhas formadas se condensam no líquido)
- Saturada ($T_l > T_{sat}$, bolhas impelidas através do líquido pelas forças de empuxo, terminam por afloração na superfície livre)

Ebulição em piscina



- Piscina saturada – $T_{liquido}$ ligeiramente maior da T_{sat}
- Bolhas geradas na interface SL ascendem até interface LV
- Um aumento brusco da temperatura do líquido próximo à superfície enquanto na maior parte permanece ligeiramente maior T_{sat} .

Curva de ebulição

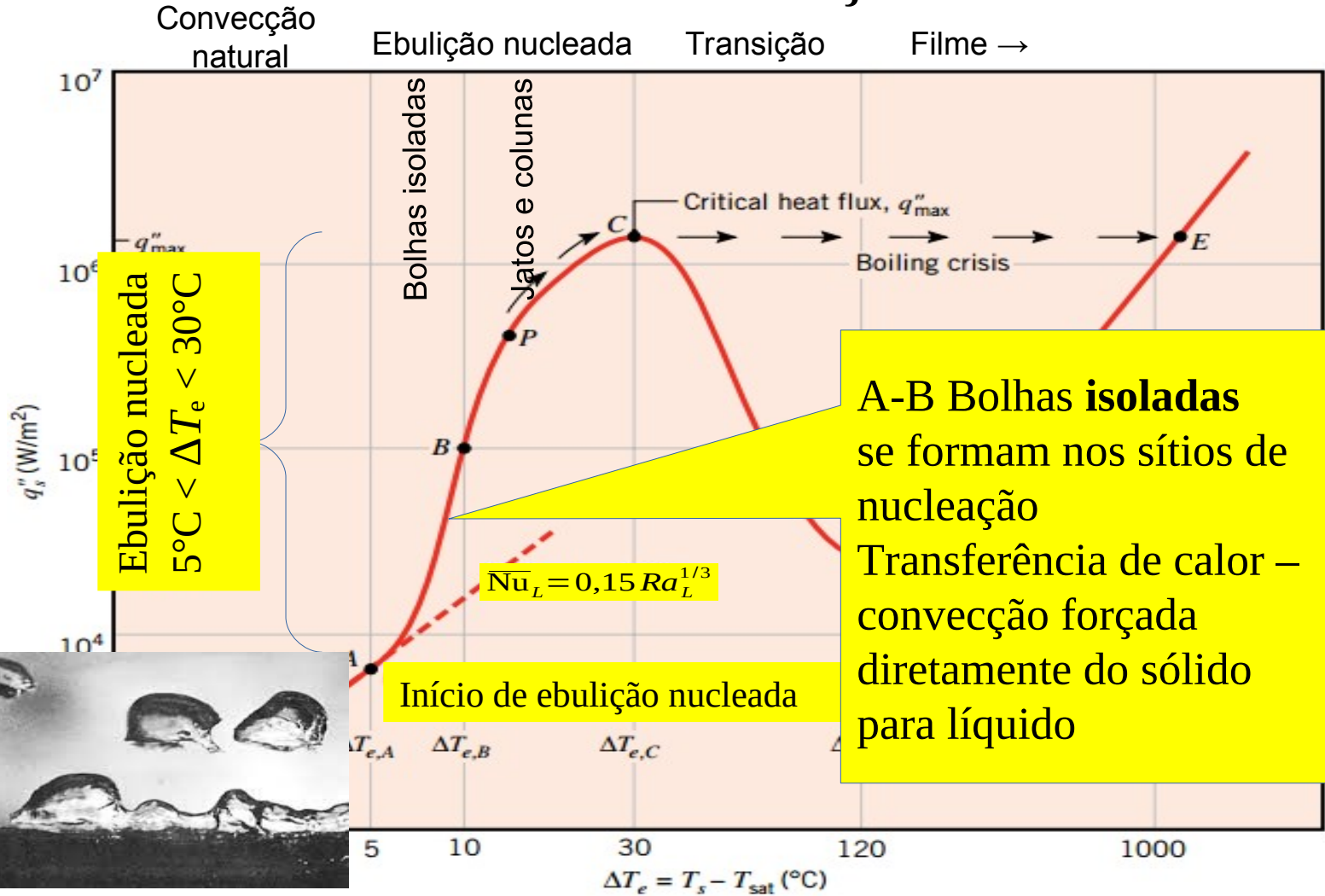


Convecção natural

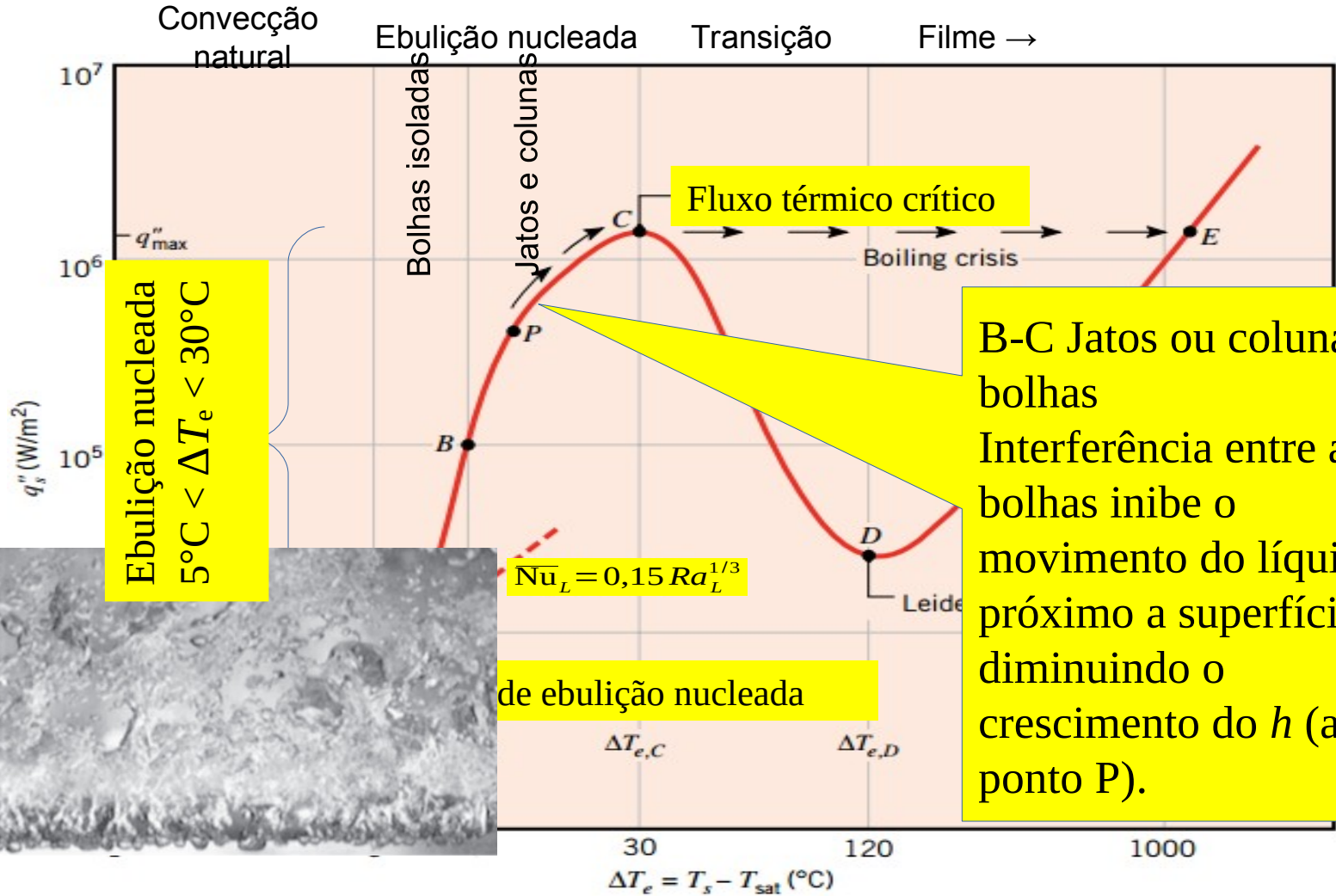
$\Delta T_e < 5^\circ\text{C}$

Movimento do fluido é determinado pelos efeitos de convecção natural

Curva de ebulição



Curva de ebulição



Ebulição nucleada
 $5^\circ\text{C} < \Delta T_e < 30^\circ\text{C}$

Fluxo térmico crítico

B-C Jatos ou colunas de bolhas
 Interferência entre as bolhas inibe o movimento do líquido próximo a superfície, diminuindo o crescimento do h (após ponto P).

$$\overline{Nu}_L = 0,15 Ra_L^{1/3}$$

de ebulição nucleada

Curva de ebulição

Convecção
natural

Ebulição nucleada

Transição

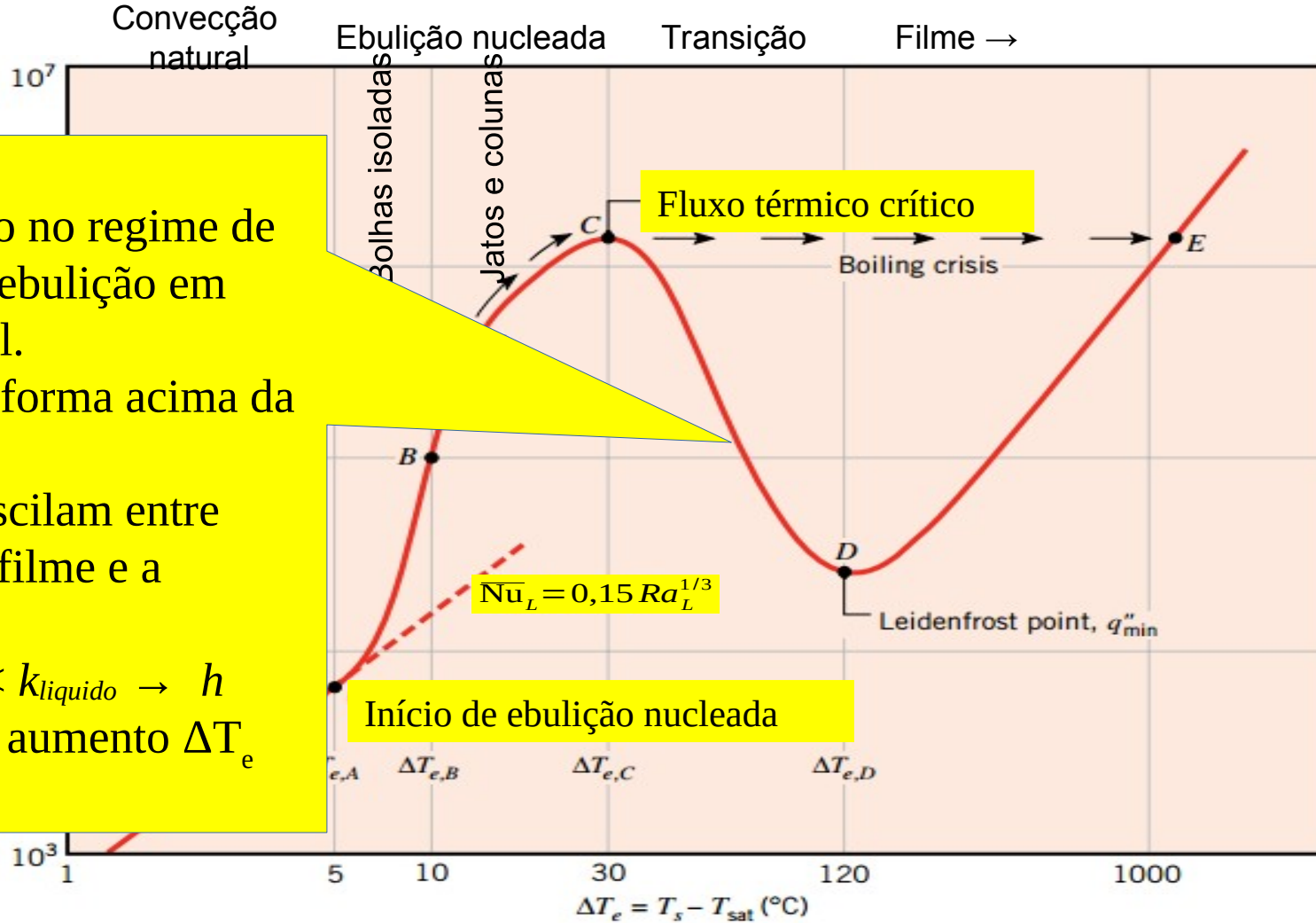
Filme →

C-D Ebulição no regime de transição ou ebulição em filme instável.

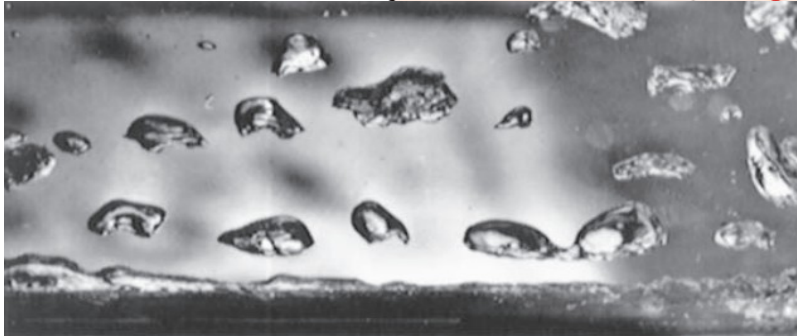
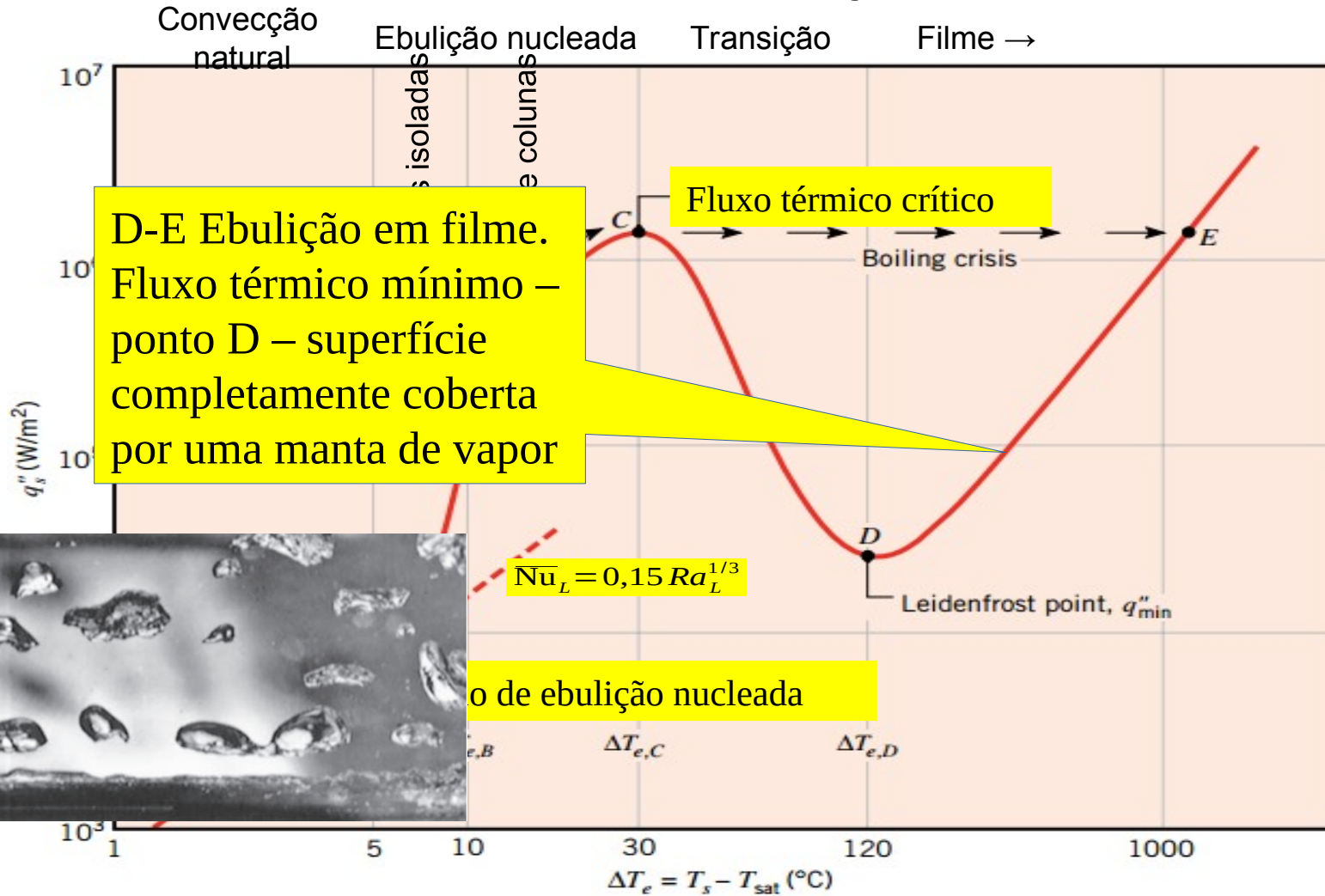
Um filme se forma acima da superfície.

Condições oscilam entre ebulição em filme e a nucleada.

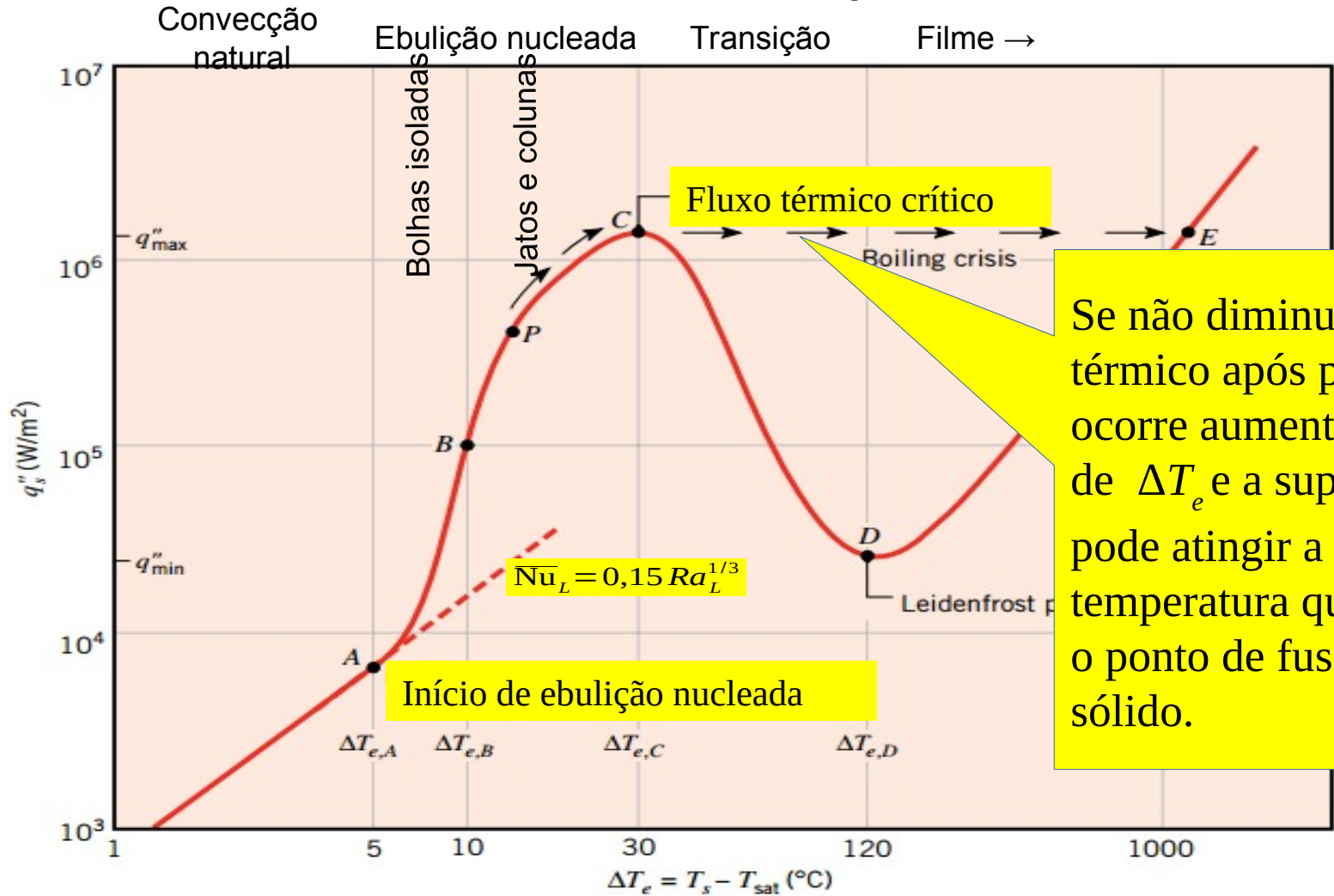
Como $k_{\text{vapor}} < k_{\text{liquido}} \rightarrow h$ diminui com aumento ΔT_e



Curva de ebulição



Curva de ebulição



Se não diminuir o fluxo térmico após ponto C – ocorre aumento abrupto de ΔT_e e a superfície pode atingir a temperatura que excede o ponto de fusão do sólido.

Correlações da ebulição em piscina

Ebulição nucleada

Convecção forçada na fase líquida $\overline{Nu}_L = C_{cf} Re_L^2 / 3 Pr^n$

Diâmetro das bolhas: força de empuxo = força de tensão superficial

$$D_b \propto \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}}$$

Velocidade característica: distancia percorrida pelo líquido para preencher o espaço deixado pela bolha pelo tempo de desprendimentos de bolhas

$$V \propto \frac{D_b}{t_b} \propto \frac{D_b}{\left(\frac{\rho_l h_{fg} D_b^3}{q_s'' D_b^2} \right)} \propto \frac{q_s''}{\rho_l h_{fg}}$$

Correlações da ebulição em piscina

Combinando as equações

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

Propriedades do líquido avaliados a T_{sat}

Caso Nu é baseado num comprimento arbitrário

$$Nu_L \propto Ja^2 Pr^{1-3n} Bo^{1/2}$$

Caso Nu é baseado no diâmetro da bolha

$$Nu_{D_b} \propto Ja^2 Pr^{1-3n}$$

SurfaceFluid Combination	$C_{s,f}$	n
Water–copper		
Scored	0.0068	1.0
Polished	0.0128	1.0
Water–stainless steel		
Chemically etched	0.0133	1.0
Mechanically polished	0.0132	1.0
Ground and polished	0.0080	1.0
Water–brass	0.0060	1.0
Water–nickel	0.006	1.0
Water–platinum	0.0130	1.0
<i>n</i> -Pentane–copper		
Polished	0.0154	1.7
Lapped	0.0049	1.7
Benzene–chromium	0.0101	1.7
Ethyl alcohol–chromium	0.0027	1.7

Correlações da ebulição em piscina

Fluxo térmico crítico na ebulição nucleada em piscina

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

Para grandes cilindros, esferas $C \approx 0.131$ com precisão média 16%

Para placas horizontais grandes $C = 0.149$

Fluxo térmico mínimo

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

$C = 0.09$, acurácia 50% para maioria dos líquidos e pressões moderadas

Correlações da ebulição em piscina

Ebulição em filme em piscina

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

Para grandes cilindros, esferas $C = 0.62$

Calor latente corrigido leva em consideração a energia sensível necessária para manter a temperatura no interior do filme acima T_{sat} :

$$h'_{fg} = h_{fg} + 0.80 c_{p,v} (T_s - T_{\text{sat}})$$

Propriedades do vapor estimadas na pressão do sistema e temperatura do filme

$$T_f = (T_s + T_{\text{sat}})/2$$

Ebulição com convecção forçada

Ebulição com convecção forçada

- Ebulição com convecção forçada é resultado de uma movimentação dirigida (ou global) do fluído, assim como em função dos efeitos do empuxo.
- Escoamentos
 - Externo
 - Interno (escoamento bifásico)

Ebulição com convecção forçada

Líquido com velocidade V em escoamento cruzado sobre um cilindro com diâmetro D

Baixa velocidade

Alta velocidade

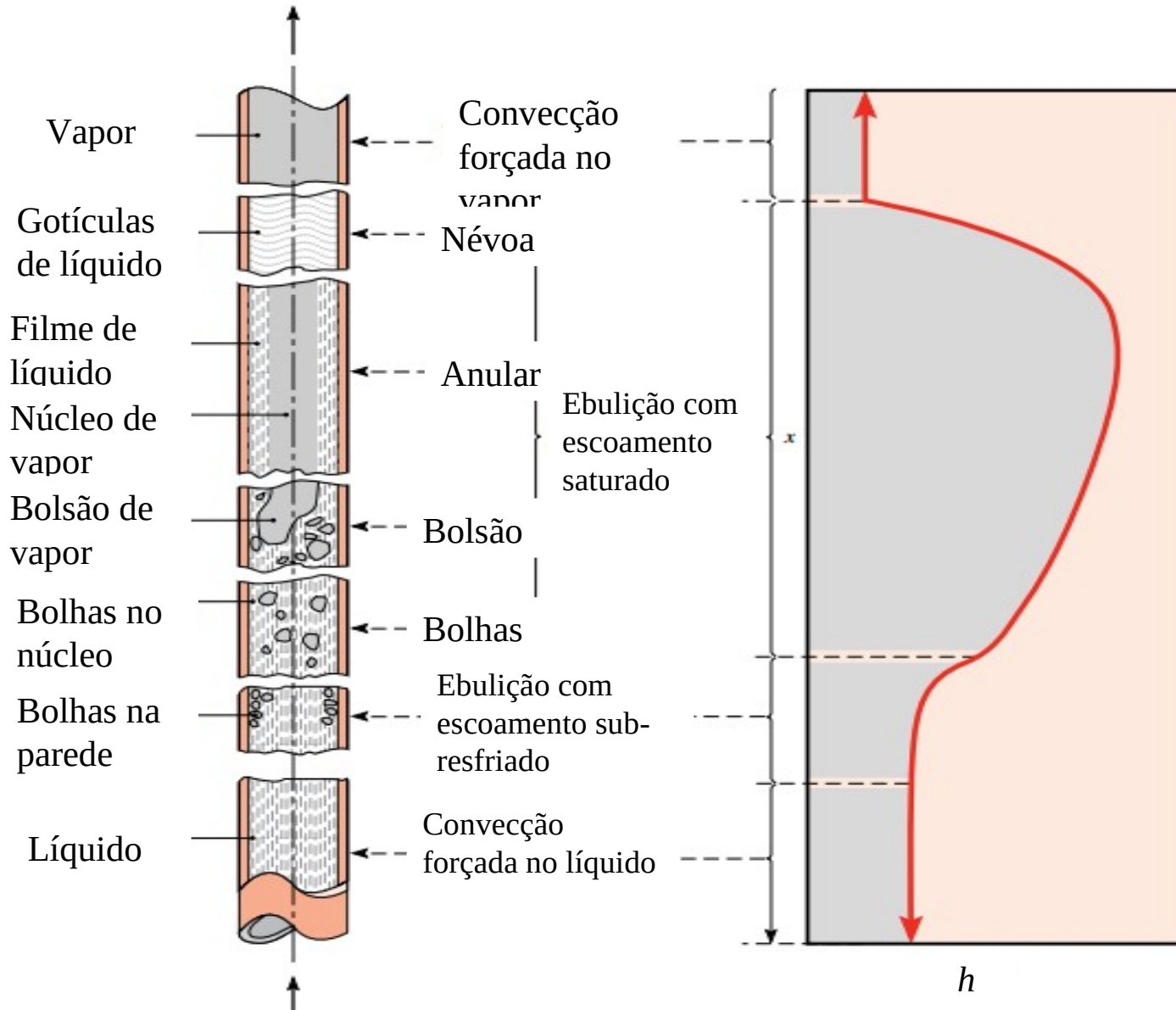
$$q''_{\max}/\rho_v h_{fg} V < [(0.275/\pi) (\rho_l/\rho_v)^{1/2} + 1]$$

$$\frac{q''_{\max}}{\rho_v h_{fg} V} = \frac{1}{\pi} \left[1 + \left(\frac{4}{We_D} \right)^{1/3} \right]$$

$$\frac{q''_{\max}}{\rho_v h_{fg} V} = \frac{(\rho_l/\rho_v)^{3/4}}{169\pi} + \frac{(\rho_l/\rho_v)^{1/2}}{19.2\pi We_D^{1/3}}$$

Número de Weber, We_D , razão entre as forças de inércia e as de tensão superficial

$$We_D \equiv \frac{\rho_v V^2 D}{\sigma}$$

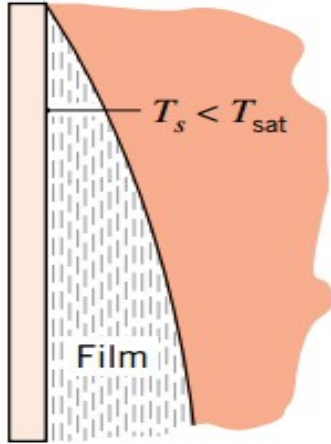


Condensação

Modos de condensação

- Condensação ocorre quando $T_{\text{vapor}} < T_{\text{sat}}$ (temperatura de saturação)
- A energia latente é liberada
- Calor transferido para superfície fria
- Formação de condensado

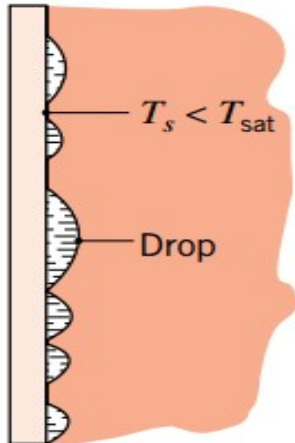
Modos de condensação



Condensação em filme:

Um filme de líquido cobre toda a superfície e escoa continuamente

Geralmente ocorre nas superfícies limpas e isentas de contaminação



Condensação em gotas:

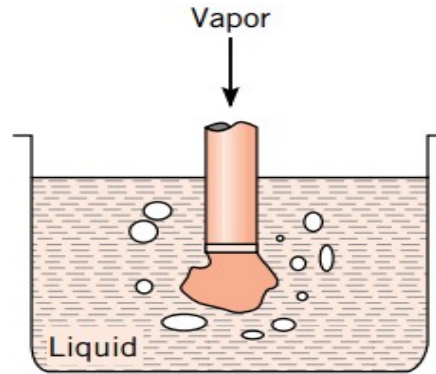
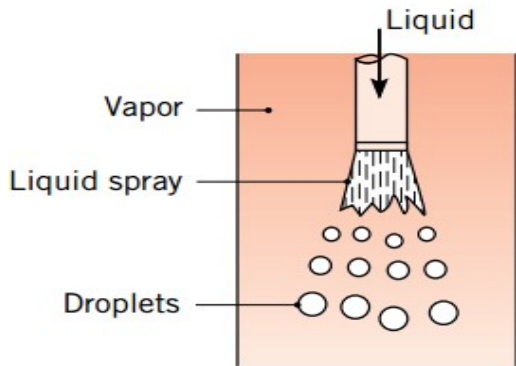
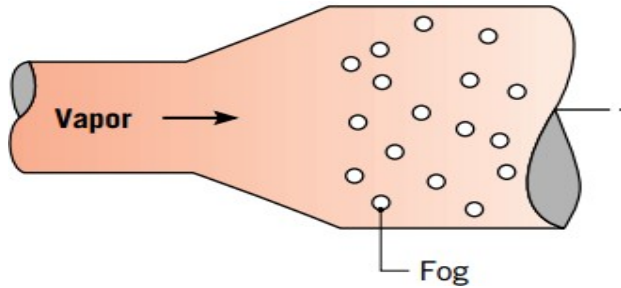
As gotas se formam em rachaduras, pequenas depressões e cavidades.

Gotas crescem e coalescem e deixam a superfície devido a gravidade

Modos de condensação

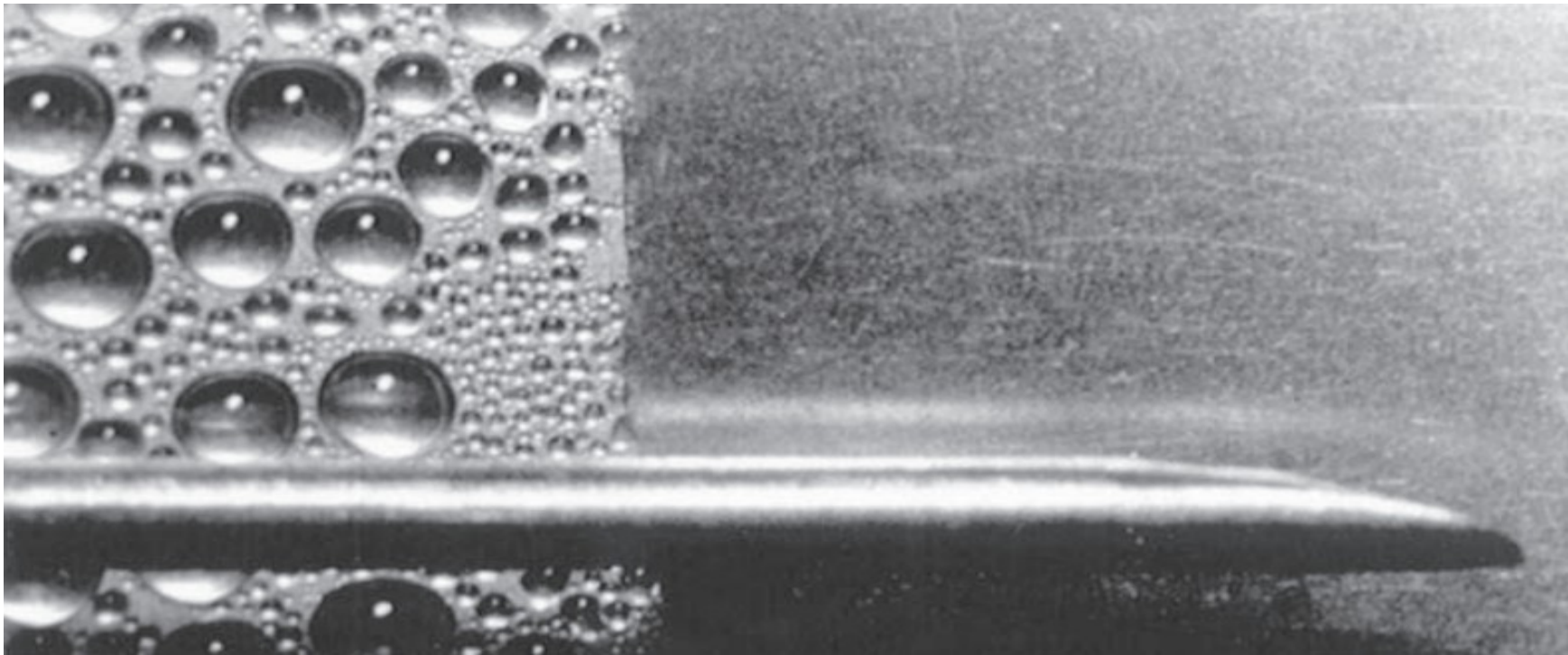
Condensação homogênea:

Vapor condensa em gotículas que permanecem suspensas em uma fase gasosa, formando uma névoa



Condensação por contato direto:

Vapor entra em contato direto com líquido frio



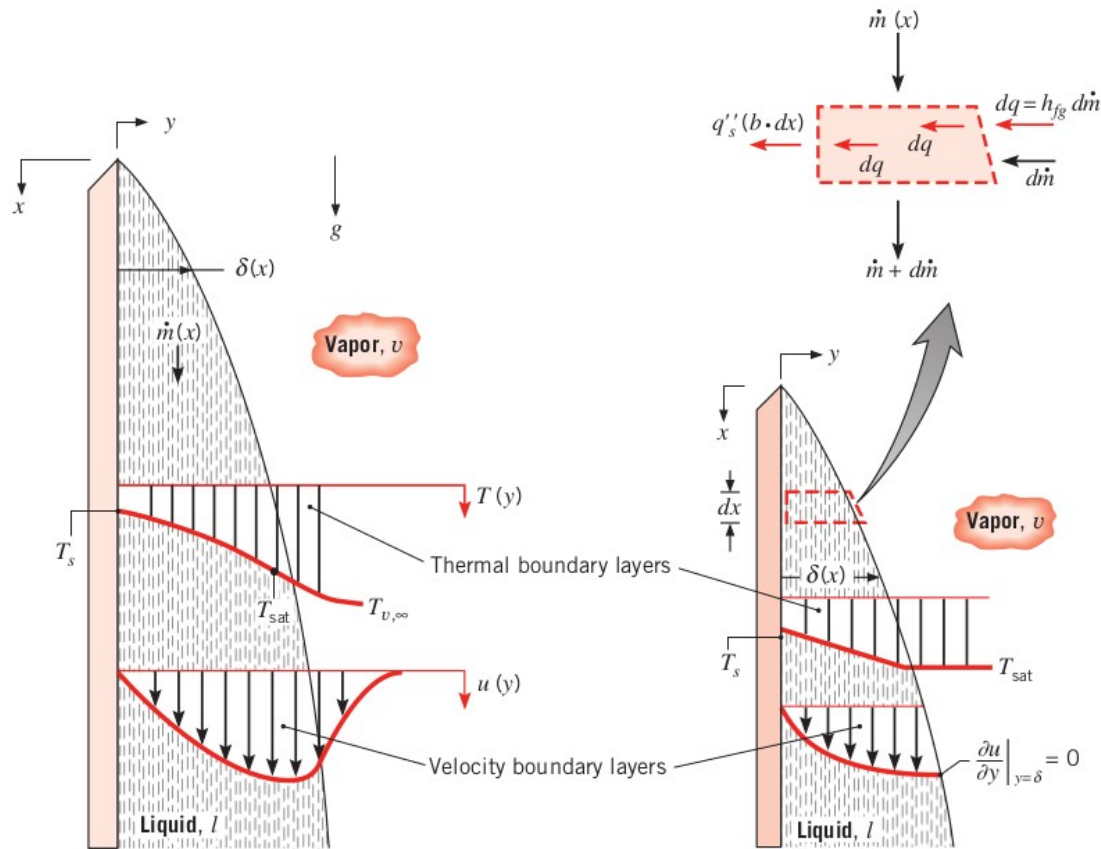
Condensação sobre uma superfície vertical em gotas e em filme.

- O condensado na parede representa uma resistência térmica
- A resistência térmica se aumenta com a espessura (no direção de escoamento)
- Desejável utilizar superfícies verticais de altura baixa ou cilindros horizontais em situações envolvendo condensação em filme



- Visando elevadas taxas de condensação e de transferência de calor – a formação de gotas é melhor comparando com o filme
- Maior parte de transferência de calor se dá através da gotas $< 100 \mu\text{m}$
- Podem ser alcançadas as taxas de transferência de calor superior (mais de uma ordem de grandeza)
- Prática usual: utilizar revestimentos (silicones, teflon, etc.) superficiais que induzam baixa molhabilidade e estimulam a condensação em gotas
- Oxidação, deposição ou remoção do revestimento diminuem a eficácia e retornam a condensação em filme

Condensação em filme laminar: Placa vertical



Suposições:

- Escoamento laminar
- Propriedades constantes
- Gás é um vapor puro a T_{sat}
- Transferência de calor ocorre somente pela condensação e não condução
- Tensão cisalhante na interface vapor-líquido é desprezível
- Transferências de momento e da energia são desprezíveis
- Transferência de calor no filme é por condução e $T(y)$ é linear

Condensação em filme laminar: Placa vertical

Equação do momento na direção x

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = -\frac{g}{\mu_l}(\rho_l - \rho_v)$$

CC:

$$u(0) = 0 \quad \partial u / \partial y|_{y=\delta} = 0$$

Integrando 2 vezes obtém-se o perfil da velocidade

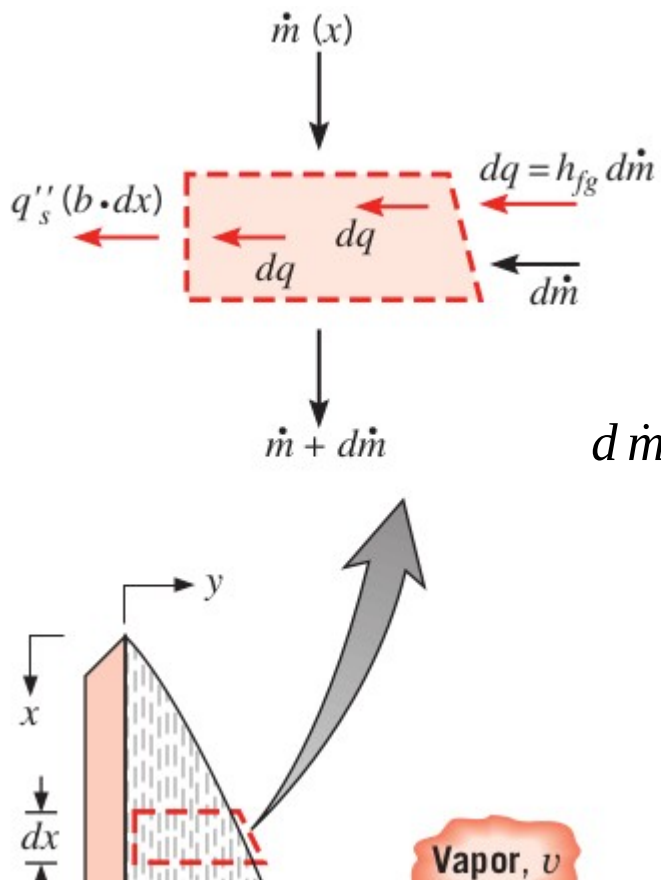
$$u(y) = \frac{g(\rho_l - \rho_v)\delta^2}{\mu_l} \left[\frac{y}{\delta} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{\delta} \right)^2 \right]$$

Vazão mássica por unidade de largura

$$\frac{m(x)}{b} = \int_0^{\delta(x)} \rho_l u(y) dy \equiv \Gamma(x)$$

$$\Gamma(x) = \frac{g\rho_l(\rho_l - \rho_v)\delta^3}{3\mu_l}$$

Condensação em filme laminar: Placa vertical



Determinação $\delta(x)$ e Γ : aplicamos a conservação da energia no elemento diferencial

$$q''_s = \frac{k_l(T_{\text{sat}} - T_s)}{\delta}$$

$$\frac{d\Gamma}{dx} = \frac{k_l(T_{\text{sat}} - T_s)}{\delta h_{fg}}$$

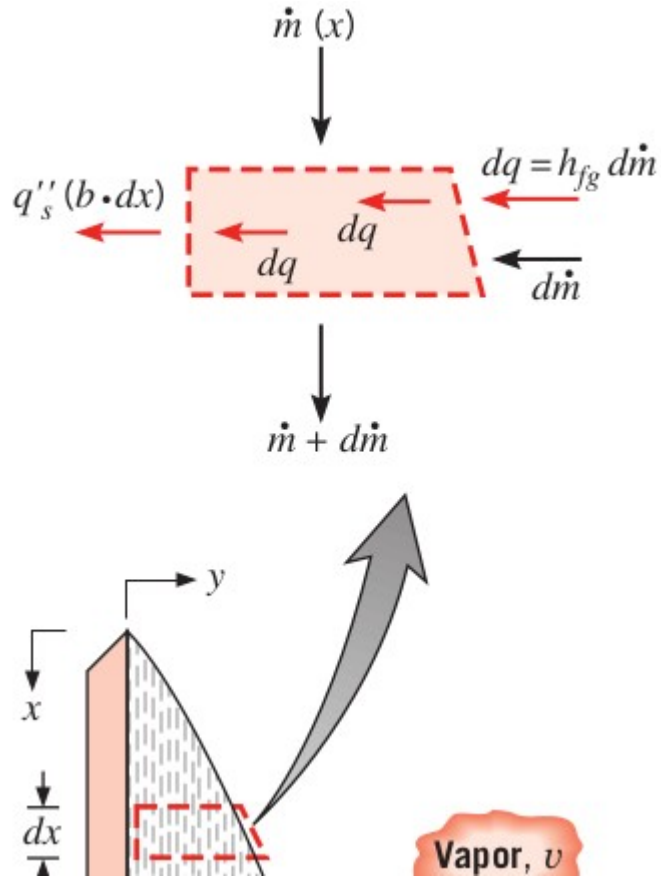
$$d\dot{m} = \frac{d\Gamma}{dx} = \frac{dq}{h_{fg}}$$

De outro lado

$$\Gamma(x) = \frac{g\rho_l(\rho_l - \rho_v)\delta^3}{3\mu_l}$$

$$\frac{d\Gamma}{dx} = \frac{g\rho_l(\rho_l - \rho_v)\delta^2}{\mu_l} \frac{d\delta}{dx}$$

Condensação em filme laminar: Placa vertical



Combinando

$$\delta^3 d\delta = \frac{k_l \mu_l (T_{\text{sat}} - T_s)}{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) h_{fg}} dx$$

Integrando

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

Condensação em filme laminar: Placa vertical

Foi mostrado que a inclusão dos efeitos de advecção térmica melhora o resultado

$$h'_{fg} = h_{fg}(1 + 0.68 Ja)$$

O número de Nusselt médio

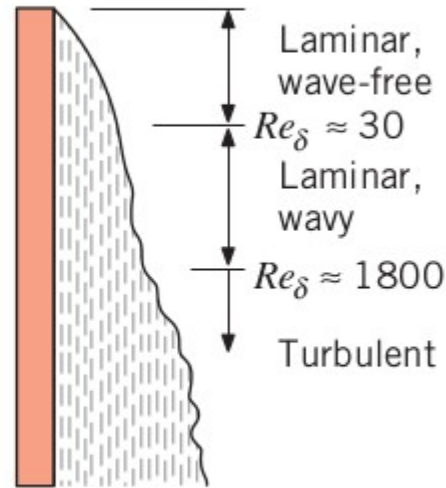
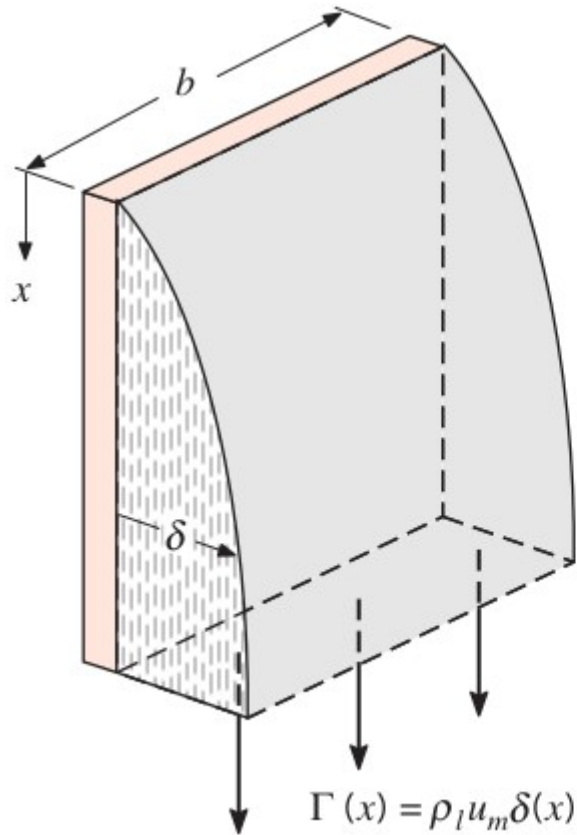
$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}_L L}{k_l} = 0.943 \left[\frac{\rho_l g (\rho_l - \rho_v) h'_{fg} L^3}{\mu_l k_l (T_{sat} - T_s)} \right]^{1/4}$$

As propriedades do líquido devem ser avaliadas na temperatura do filme

$$T_f = \frac{T_{sat} + T_s}{2}$$

A massa específica do vapor, ρ_v , e o calor latente de vaporização h_{fg} – a T_{sat}

Condensação em filme turbulento



(b)

Número de Reynolds

$$Re_\delta \equiv \frac{4\Gamma}{\mu_l}$$

$$Re_\delta = \frac{4m}{\mu_l b} = \frac{4\rho_l u_m \delta}{\mu_l}$$

$Re_\delta \leq 30$ – filme é laminar

$30 \leq Re_\delta \leq 1800$ – ondulações e marolas na superfície

$Re_\delta \geq 1800$ – filme turbulento

Condensação em filme turbulento

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}_L(\nu_l^2/g)^{1/3}}{k_l} = 1.47 Re_\delta^{-1/3} \quad Re_\delta \lesssim 30$$

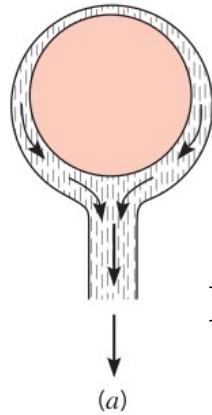
$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}_L(\nu_l^2/g)^{1/3}}{k_l} = \frac{Re_\delta}{1.08 Re_\delta^{1.22} - 5.2} \quad 30 \lesssim Re_\delta \lesssim 1800$$

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}_L(\nu_l^2/g)^{1/3}}{k_l} = \frac{Re_\delta}{8750 + 58 Pr_l^{-0.5}(Re_\delta^{0.75} - 253)} \quad Re_\delta \gtrsim 1800, Pr_l \geq 1$$

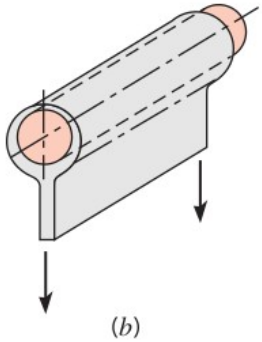
Condensação em filme; sistemas radiais

Para esfera ou tubo horizontal

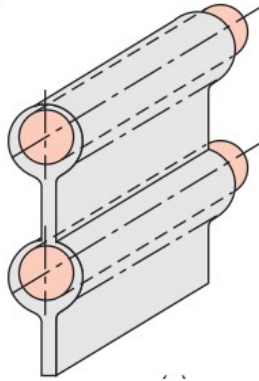
$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}_D D}{k_l} = C \left[\frac{\rho_l g (\rho_l - \rho_v) h'_{fg} D^3}{\mu_l k_l (T_{\text{sat}} - T_s)} \right]^{1/4}$$



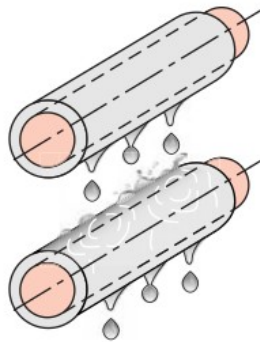
Esfera



Tubo único
horizontal



Fileira vertical
Lamina continua

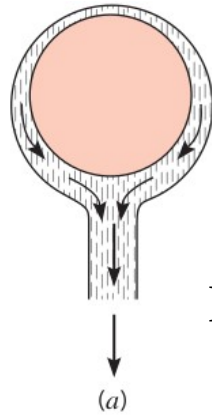


Fileira vertical
Gotejamento

$C = 0,826$ para esfera

$C = 0,729$ para tubo

Condensação em filme; sistemas radiais

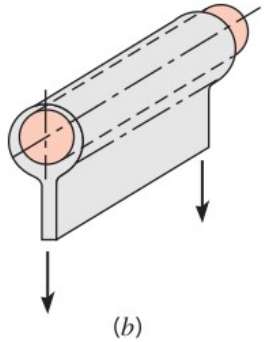


Esfera

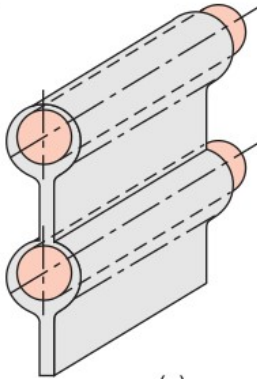
Quando a interface líquido-vapor é a curva – a tensão superficial determina a diferenças de pressões

$$\Delta p = p_v - p_l = \frac{\sigma}{r_c}$$

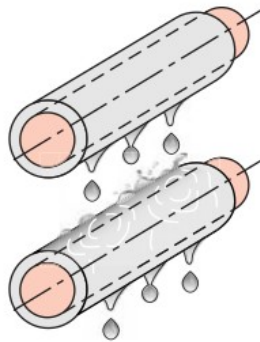
Quando r_c varia e $p_v = \text{const}$ a pressão do lado do líquido varia, influenciando a distribuição da velocidade e a taxa de transferência de calor.



Tubo único horizontal



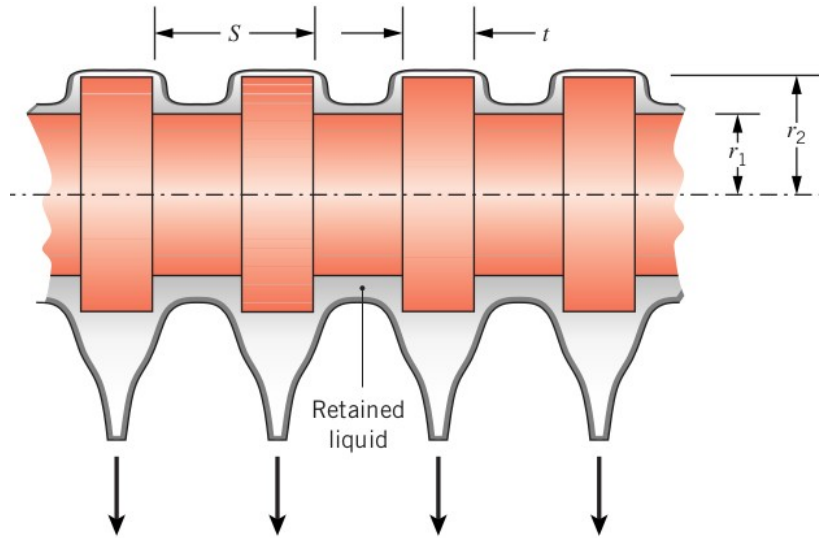
Fileira vertical
Lamina continua



Fileira vertical
Gotejamento

Para tubo com D relativamente grande e **sem aletas** $r_c \approx D/2$ em toda a parte exceto a lamina líquida afastando do tubo. Em quase toda parte $p_v \approx p_l$ e a tensão superficial não influencia a taxa de transferência de calor.

Condensação em filme; sistemas radiais



Cantos vivos causam grandes variações na curvatura

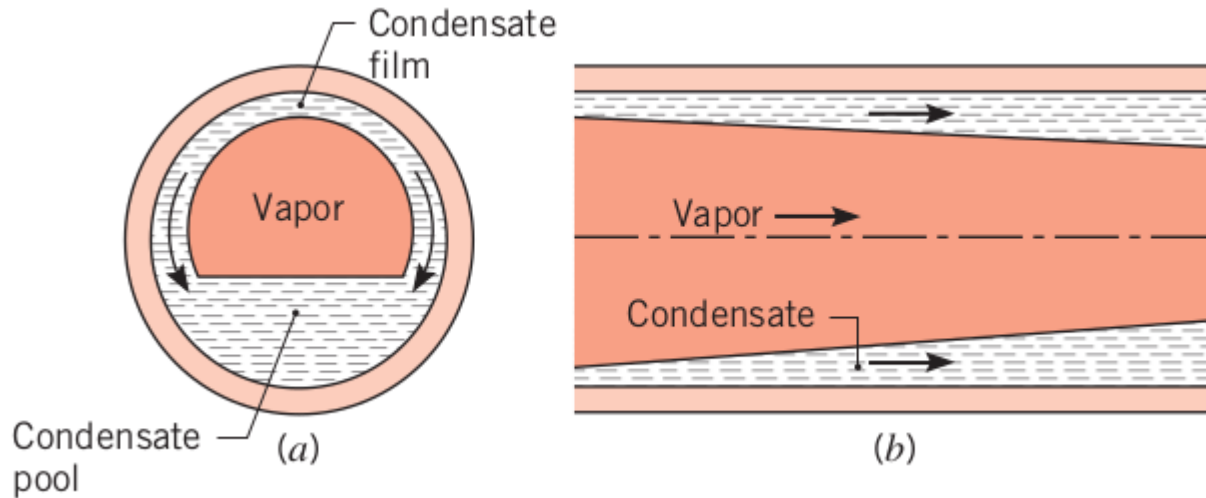
As forças de tensão superficial aumentam a taxa de transferência de calor próximas as extremidades pela:

- Redução da espessura do filme
- Diminuição de taxas de transferência de calor na região entre aletas em função da retenção de condensado

Introduzem a razão de melhora mínima

$$\varepsilon_{ft,min} = \frac{q_{ft,min}}{q_{uft}} = \frac{tr_2}{Sr_1} \left[\frac{r_1}{r_2} + 1.02 \frac{\sigma r_1}{(\rho_l - \rho_v)gt^3} \right]^{1/4}$$

Condensação no interior dos tubos horizontais



Depende:

- Velocidade do vapor
- Fração mássica do vapor x
- Propriedades do fluído

O fluído condensa na regiões superiores da parede e escoar para região inferior onde se forma uma poça de líquido

Condensação no interior dos tubos horizontais

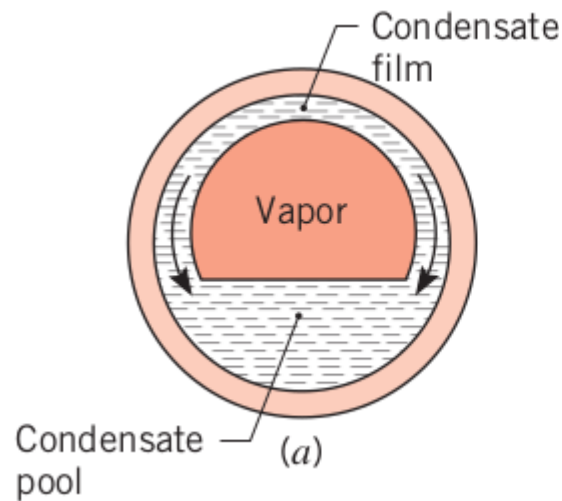
Velocidade baixas

$$Re_{v,i} = \left(\frac{\rho_v u_{m,v} D}{\mu_v} \right)_i < 35,000$$

A mesma equação pode ser usada com $C = 0,555$

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

$$h'_{fg} = h_{fg} + 0.375 c_{p,l} (T_{\text{sat}} - T_s)$$



Condensação no interior dos tubos horizontais

Velocidade elevadas: escoamento bifásico torna se turbulento e anular

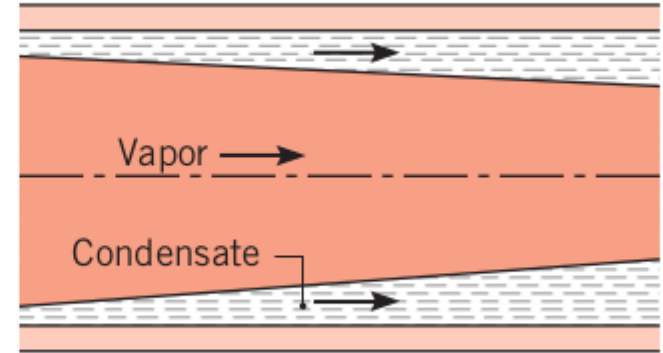
$$Nu_D = \frac{hD}{k_l} = 0.023 Re_{D,l}^{0.8} Pr_l^{0.4} \left[1 + \frac{2.22}{X_{tt}^{0.89}} \right]$$

$$Re_{D,l} = 4m(1 - X)/(\pi D \mu_l),$$

$$X \equiv m_v/m$$

Parâmetro Martinelli

$$X_{tt} = \left(\frac{1 - X}{X} \right)^{0.9} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_l}{\mu_v} \right)^{0.1}$$



(b)