

# Escoamentos Multifásicos

(FEN03711)

Gustavo Rabello Anjos

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
[gustavo.anjos@uerj.br](mailto:gustavo.anjos@uerj.br)

1o. período, 2015

# Tópicos da aula

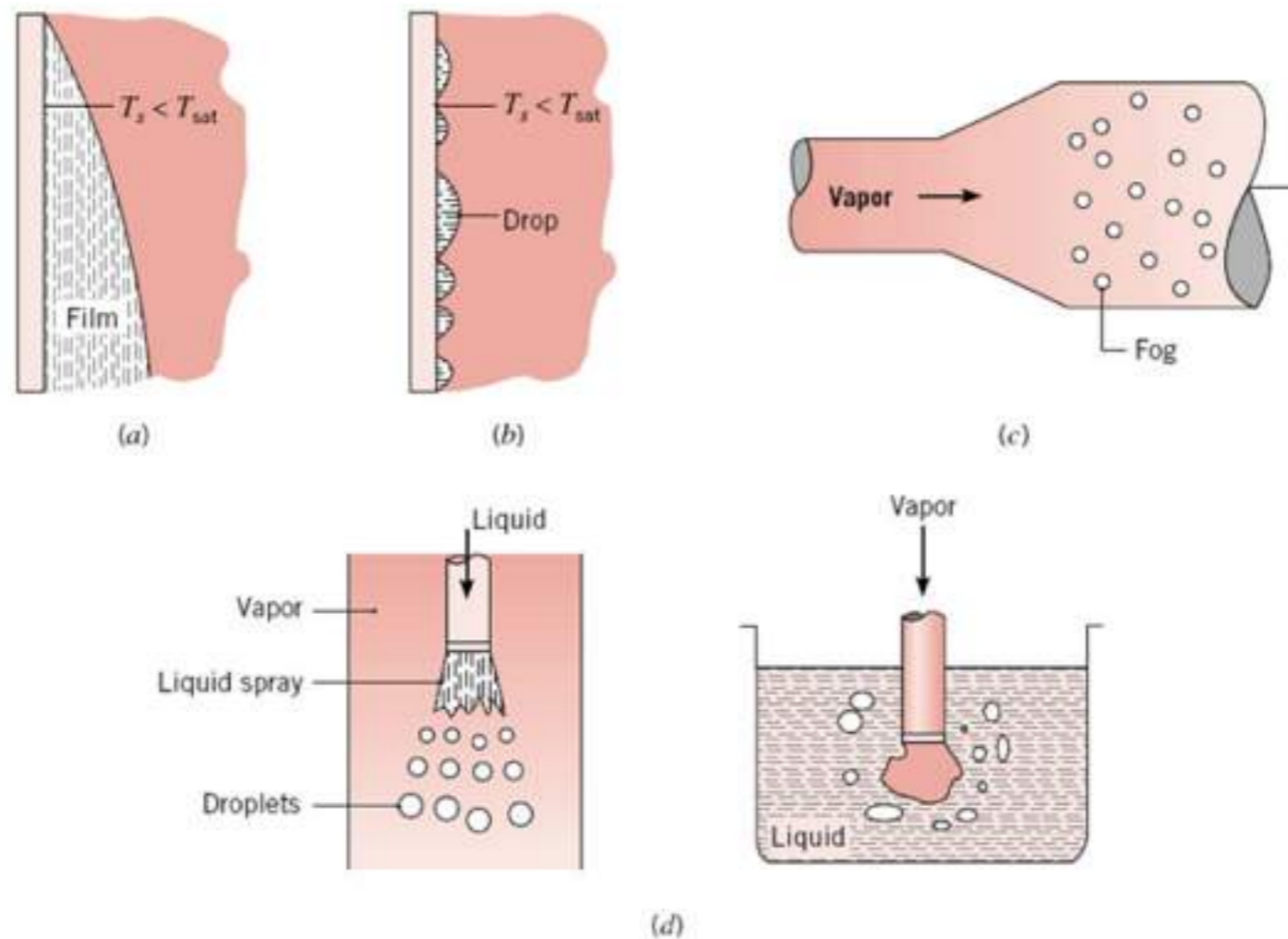
- Mecanismos de condensação;
- Condensação em placa vertical;
- Padrões de escoamento durante condensação dentro de tubos;
- Condensação dentro de tubos: escoamento estratificado;
- Formas de vaporização;
- Modos de ebulição;
- Padrões de escoamento durante vaporização dentro de tubos;

Condensação  
(condensation)

# Mecanismos de Condensação I

- ocorre quando a temperatura de vapor se reduz a valores menores que a sua temperatura de saturação;
- na indústria, este processo geralmente ocorre no contato do vapor e uma superfície sólida relativamente fria (temperatura abaixo da temperatura de saturação do fluido);
- na condensação, o fluido perde energia latente, transferindo-a à superfície, como consequência o condensado é formado;
- na condensação homogênea, o vapor condensa em gotículas que permanecem suspensas em uma fase gasosa (névoa);
- na condensação por contato direto, o vapor é condensado através do contato direto com um líquido frio (temperatura menor que a temperatura de saturação do vapor).

# Mecanismos de Condensação II - modos



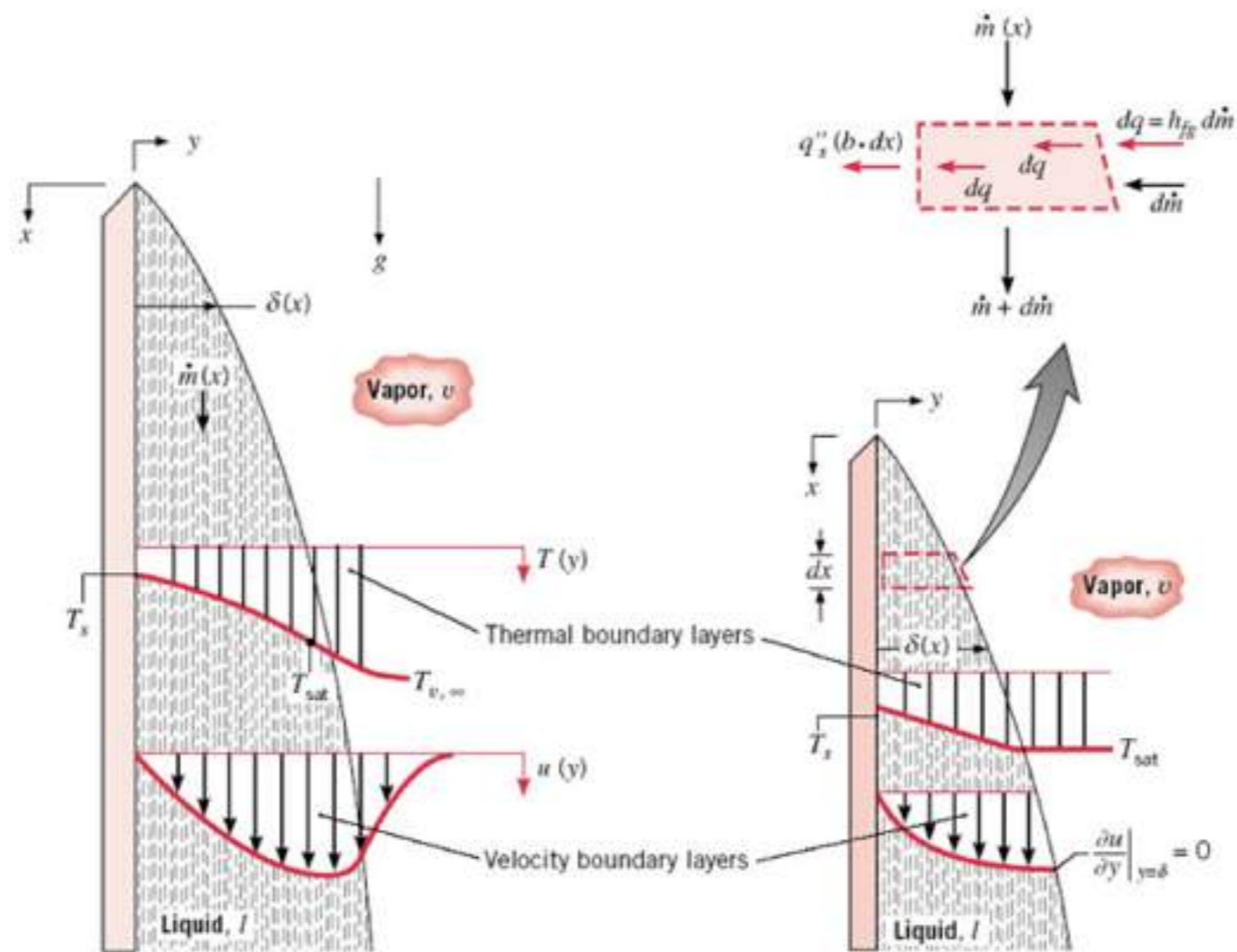
(a) Condensação em filme (b) Condensação em gotas (c) Condensação homogênea  
(d) Condensação por contato direto.

# Mecanismos de Condensação

## III - características

- condensação em filme (film condensation):
- condensação em gotas (dropwise condensation): característica de superfícies com baixa molhabilidade (superfícies hidrófobas);  
  
Ex.: silicone, teflon, ceras e ácidos graxos.
- o condensado representa uma resistência à transferência de calor entre o vapor e o condensado;
- a taxa de transferência de calor em gotas é maior do que a taxa de transferência de calor em filme;
- em aplicações industriais, é preferível obter condensação em gotas, porém esta condição é instável devido a efeitos de oxidação, deposição ou remoção.

# Condensação em placa vertical - convecção livre



(a) Sem aproximação (b) Com aproximação.

# Condensação em placa vertical - análise de Nusselt

- hipótese de escoamentos laminares e propriedades constantes no filme líquido;
- a fase gasosa é um vapor puro na temperatura de saturação;
- não há gradiente de temperatura no vapor. A transferência de calor para a interface líquido-vapor ocorre somente na direção do vapor para o condensado;
- a tensão de cisalhamento na interface líquido-vapor é desprezível;
- a transferência de calor através do filme ocorre apenas por condução, em virtude da hipótese de escoamento laminar (com baixas velocidades associadas ao filme).



# Condensação em placa vertical - análise de Nusselt

- equação de conservação de quantidade de movimento em (x):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = -\frac{g}{\mu_L}(\rho_L - \rho_G)$$

- integrando duas vezes e aplicando as c.c.  $u(0) = 0$  e  $du/dy|_{y=\delta} = 0$ :

$$u(y) = \frac{g(\rho_L - \rho_G)\delta^2}{\mu_L} \left[ \frac{y}{\delta} - \frac{1}{2} \left( \frac{y}{\delta} \right)^2 \right]$$

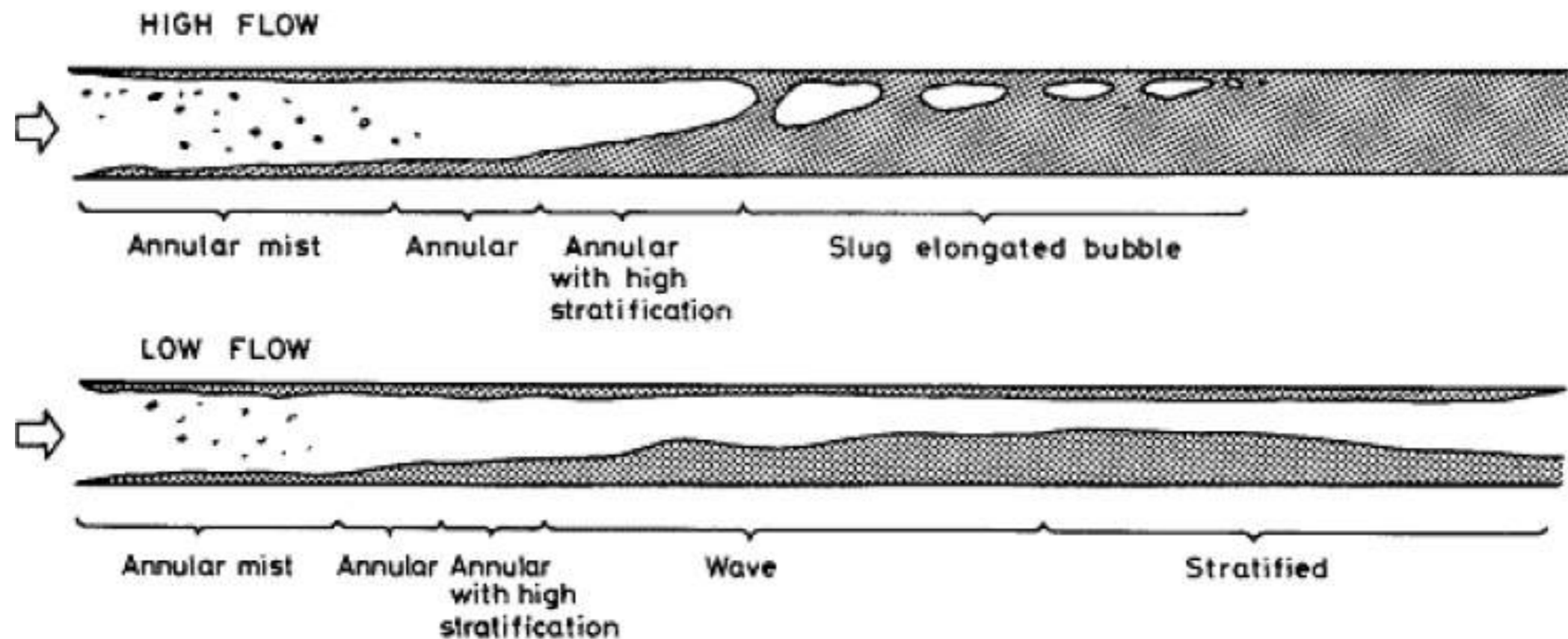
- vazão mássica de condensado por unidade de largura:

$$\frac{\dot{m}}{L} = \frac{g\rho_L(\rho_L - \rho_G)\delta^3}{3\mu_L}$$

- espessura do condensado (camada limite térmica):

$$\delta(x) = \left[ \frac{4k_L\mu_L(T_{sat} - T_s)x}{g\rho_L(\rho_L - \rho_G)h_{LG}} \right]^{1/4}$$

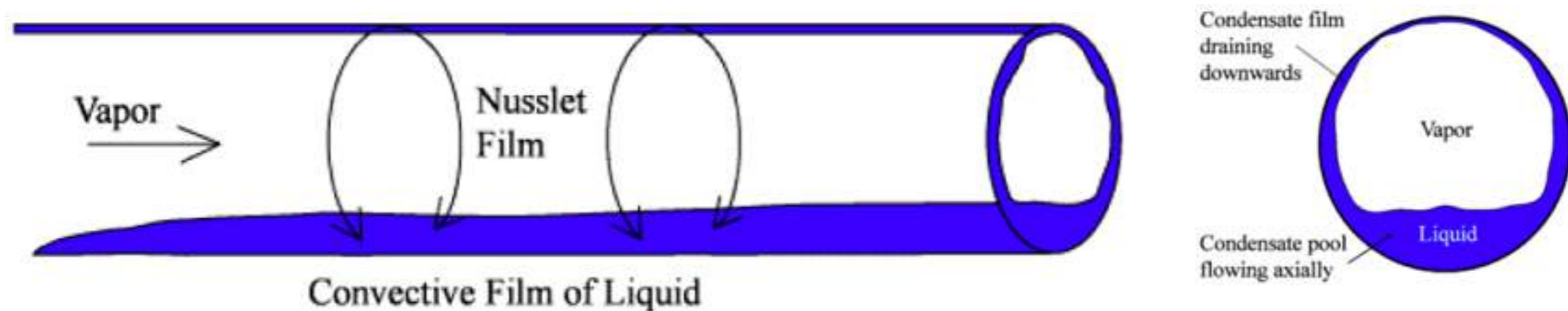
# Padrões de escoamento durante condensação dentro de tubos



Padrões de escoamento típicos durante processo de condensação dentro de tubos.

# Escoamento estratificado durante condensação dentro de tubos

**Condensação em escoamento completamente estratificado:** existe uma grande semelhança entre este padrão de escoamento e seu equivalente para escoamentos adiabático. Neste, entretanto, o condensado molha a superfície do tubo em todo o seu perímetro.



Quando a velocidade do núcleo de vapor é baixa, então a velocidade de escoamento do filme é laminar e a direção do escoamento é da parte de cima do tubo para baixo, devido aos efeitos gravitacionais. Quando a tensão de cisalhamento do vapor é suficiente e a transição para turbulência é passada, então um filme de líquido em regime turbulento é atingido, com escoamento predominantemente axial.

# Escoamento estratificado durante condensação dentro de tubos

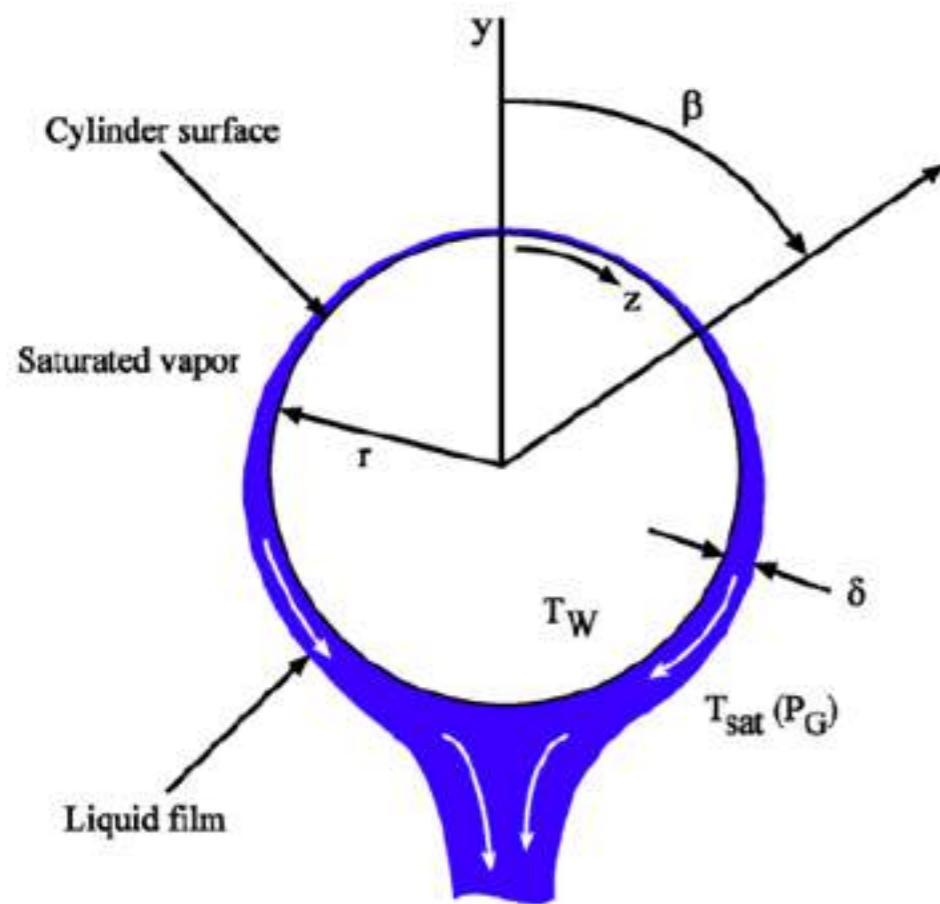
**Chato (1962):** a área da seção transversal da camada de líquido estratificada na parte inferior do tubo pode ser determinada a partir da fração de vazios local  $\epsilon$ . Então, o ângulo de líquido estratificado  $\theta_{estrat}$  pode ser determinado geometricamente. O coeficiente de transferência local para este título de vapor  $\alpha(x)$  é obtido por divisão dos respectivos coeficientes de transferência de calor em relação à sua fração de ocupação do perímetro:

$$\alpha(x) = \frac{\theta_{estrat}}{\pi} \alpha_f + \frac{\pi - \theta_{estrat}}{\pi} \alpha_{estrat}$$

onde  $\theta_{estrat}$  é o ângulo medido da parte superior do tubo até a camada estratificada, sendo igual a  $\pi$  quando não há camada estratificada no escoamento.  $\theta_{estrat}$  é expresso em radianos.  $\alpha_f$  é o coeficiente médio de transferência de calor para o filme (próximo slide). O coeficiente de calor para parte inferior do tubo é  $\alpha_{estrat}$ . Considerando que  $\alpha_{estrat}$  é desprezível se comparado a  $\alpha_f$ , o segundo termo pode ser desprezado enquanto  $\alpha_f$  é determinado como:

$$\alpha_f = \Omega \left[ \frac{\rho_L (\rho_L - \rho_G) g k_L^3 h_{LG}}{\mu_L d_i (T_{sat} - T_{wall})} \right] \quad \Omega = \beta \theta_{estrat} / \pi$$

# Padrões de escoamento durante condensação dentro/fora de tubos



Análise de Nusselt:

$$u(y) = \frac{(\rho_L - \rho_G)g \sin \beta}{\mu_L} \left[ y\delta - \frac{y^2}{2} \right]$$

$$\dot{m}(\beta) = \int_0^\delta \rho_L u(y) dy = \frac{\rho_L(\rho_L - \rho_G)g \sin \beta \delta^3}{3\mu_L}$$

$$\alpha(f) = 0.693 \left[ \frac{\rho_L(\rho_L - \rho_G)g \sin \beta k_L^3}{\dot{m}(\beta)\mu_L} \right]$$

Evaporação  
(evaporation, boiling)

# Formas de vaporização: definição

**Vaporização:** é a passagem do estado líquido para o estado de vapor. Mas, existem três formas em que essa mudança de estado pode ocorrer, pois sua velocidade pode variar, dependendo da quantidade de energia fornecida. Essas três formas são a evaporação, a ebulição e a calefação.



**Evaporação:** Esse termo é usado quando a vaporização ocorre à temperatura ambiente, em qualquer temperatura e pressão, de forma bem lenta, predominantemente na superfície do líquido, sem o aparecimento de bolhas ou agitação do líquido.

**Ebulição:** A ebulição ocorre a uma determinada temperatura, que é específica para cada substância pura e que pode variar de acordo com a pressão atmosférica local. Ela se dá quando aquecemos o sistema, é uma passagem do líquido para o vapor de forma mais rápida e é bem perceptível, pois ocorre em toda a extensão do líquido, com agitação e formação de bolhas.

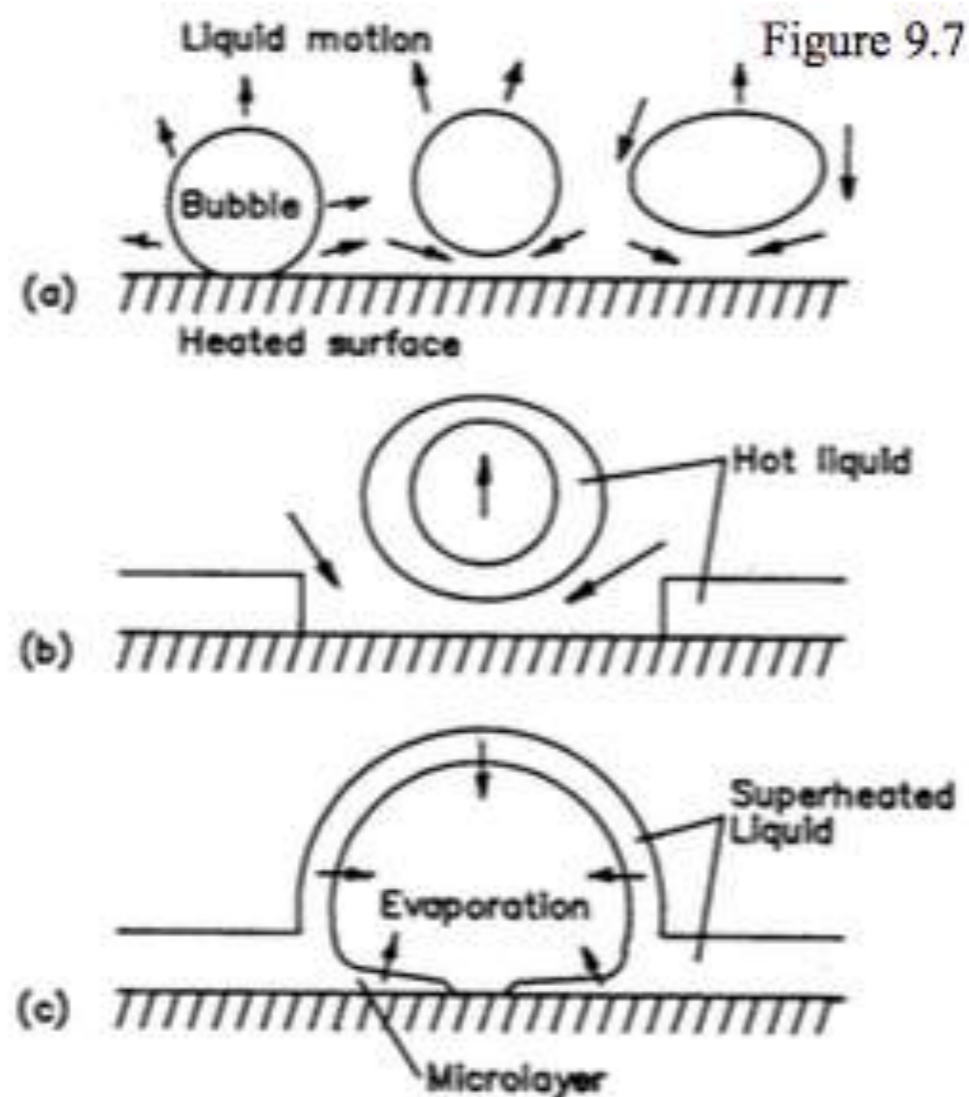
**Calefação:** É o tipo de evaporação mais rápida, é a passagem abrupta para o estado de vapor que ocorre quando o líquido se aproxima de uma superfície muito quente.

# Modos de ebulição I

- **piscina de ebulição** (pool boiling): é caracterizado por sistema com líquido em repouso, e sua movimentação próxima à superfície é devida às correntes de convecção livre e mistura devido ao aumento, seguido de desprendimento, de bolhas de vapor na superfície.
- **ebulição em convecção forçada** (forced convection boiling): é caracterizado por sistema com líquido escoando (velocidade diferente de zero), convecção livre e movimentação de bolhas na superfície.
- **ebulição subresfriada** (subcooled boiling): quando a maior parte do líquido em contato com a superfície aquecida encontra-se abaixo da temperatura de saturação. Neste modo, o líquido subresfriado condensa as bolhas que se formam devido ao processo de nucleação (aparecimento de bolhas) e o desprendimento delas.
- **ebulição saturada** (saturated boiling): neste modo, o líquido está com a temperatura ligeiramente superior à temperatura de saturação. Não há condensação de bolhas.



# Modos de ebulição II - regimes

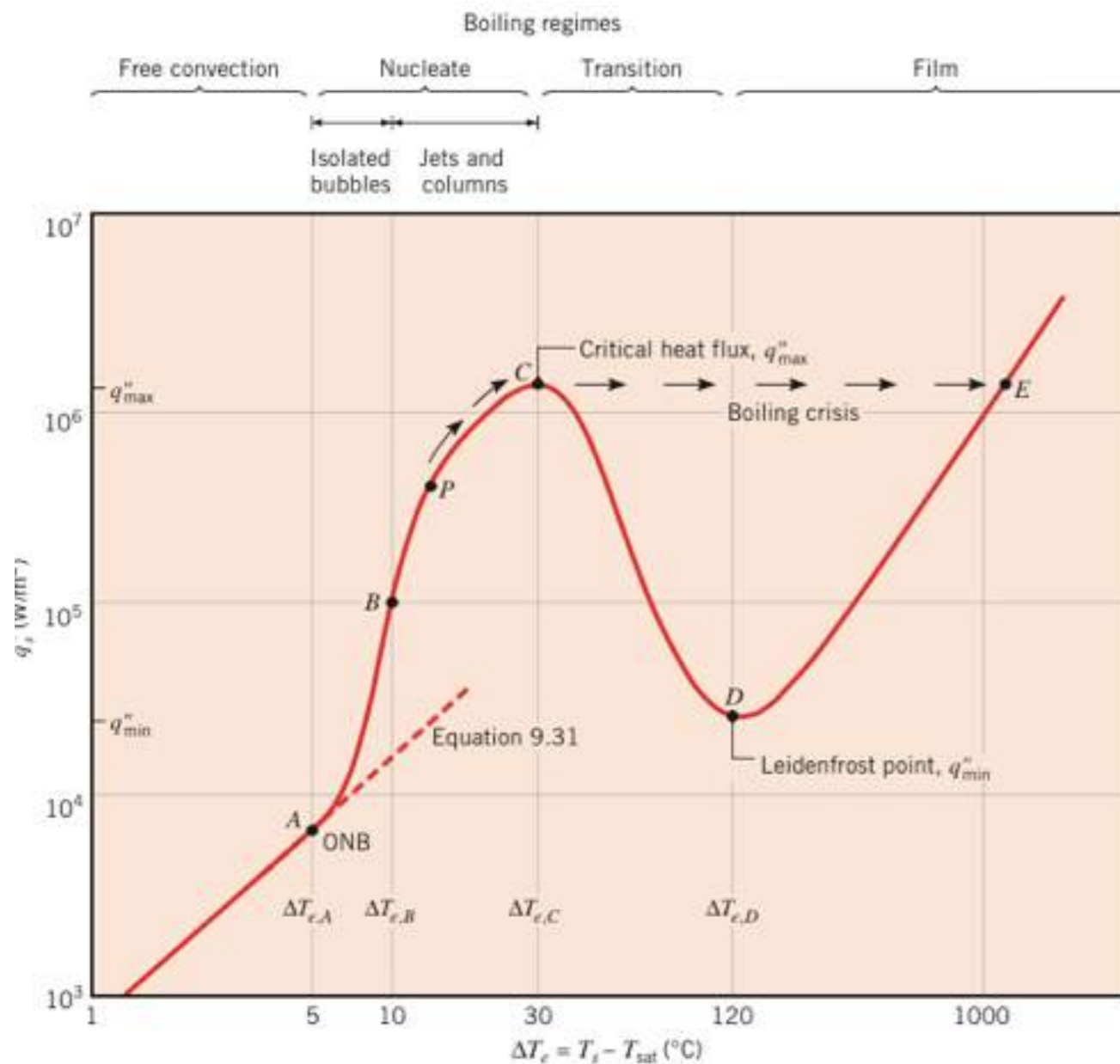


(a) **mecanismos de agitação de bolhas**: convecção intensa no líquido adjacente à superfície aquecida através do aumento e desprendimento de bolhas na superfície, que transforma o processo de convecção natural (efeitos de gravidade) em convecção forçada (velocidade elevada).

(b) **mecanismos de troca líquido-vapor**: condução transiente da superfície aquecida para o líquido, formando uma camada de líquido aquecida. Consequentemente, os efeitos de gravidade nas bolhas que se formam "arrancam" esta camada aquecida de líquido e a transportam.

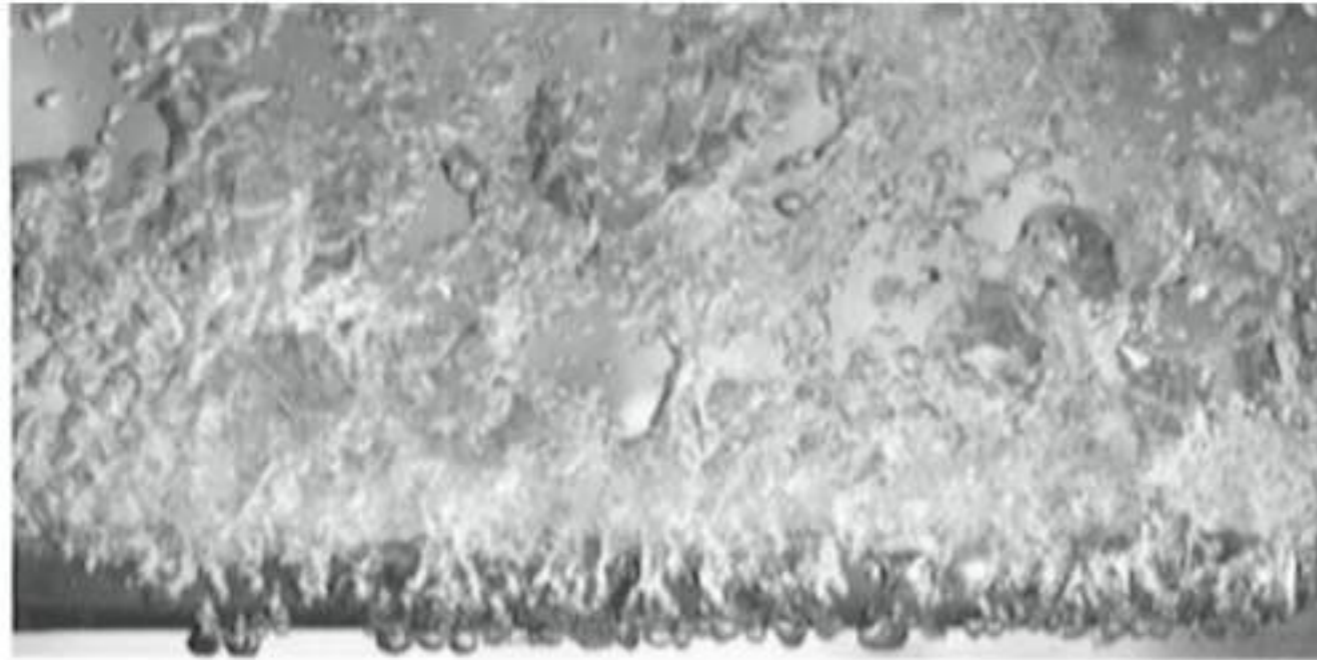
(c) **mecanismos de evaporação**: bolhas de vapor crescem em uma camada de líquido superaquecida adjacente à superfície aquecida. Macroevaporação ocorre na parte superior da bolha cercada pela camada limite térmica, enquanto a microevaporação ocorre em uma camada localizada na parte inferior da bolha, em contato com a superfície aquecida. Esta camada é chamada de camada micro (microlayer).

# Modos de ebulição III - experimento de Nukiyama - água saturada em pressão atmosférica

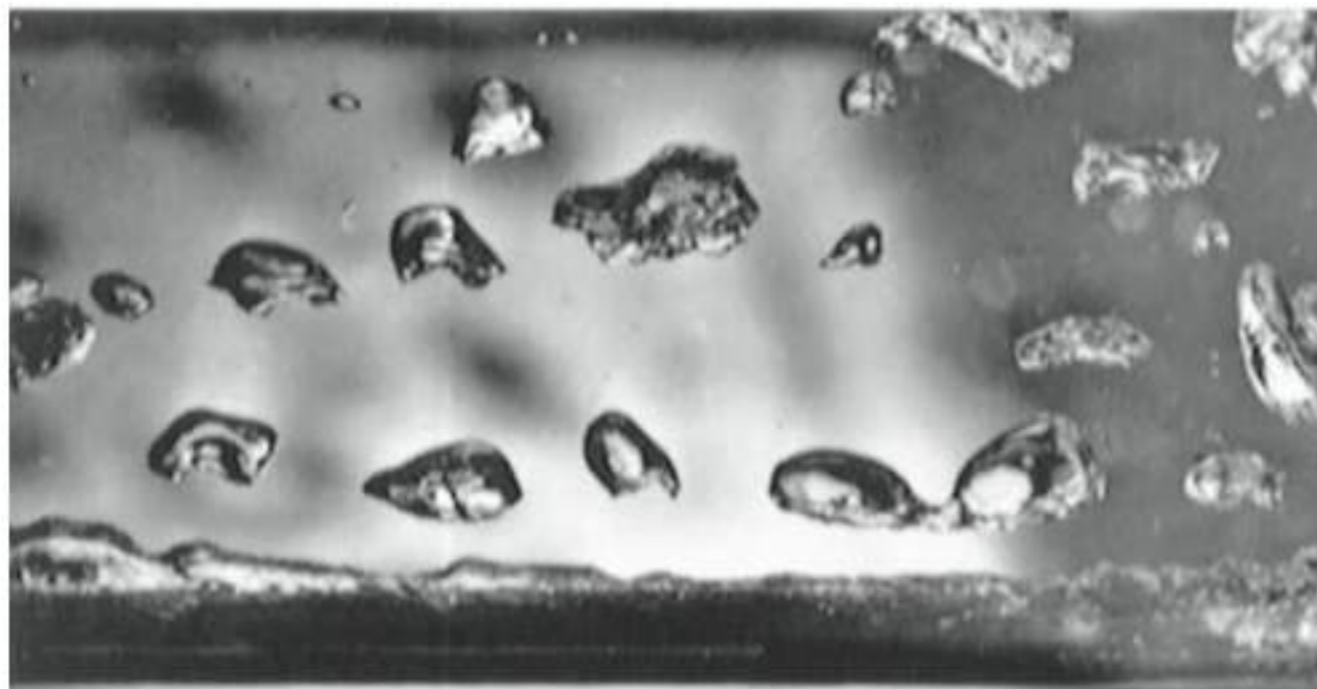


- convecção livre: existente a temperaturas menores que 5 graus acima da  $T_{sat}$  (até ponto A). A temperatura da superfície precisa estar a uma temperatura levemente superior a temperatura de saturação para manter a formação de bolhas. Algumas poucas bolhas apareceram, porém instáveis. A movimentação do fluido é dada por convecção livre.
- nucleação: ocorre o aparecimento frequente de bolhas quando a temperatura está entre 5 e 30 graus acima da  $T_{sat}$ . Em AB o regime é definido como bolhas isoladas. Com o aumento de temperatura, regime BC, o vapor se desprende como jatos (ou colunas). No ponto C (fluxo de calor crítico) o fluxo para água equivalendo a  $1\text{MW/m}^2$ .
- transição: a formação de vapor é suficientemente grande que grande parte do líquido não consegue entrar em contato com a superfície aquecida. Como o vapor apresenta resistência térmica superior a do líquido, o fluxo térmico  $q''$  é reduzido até D (ponto leidenfrost - gotas de água no ferro de passar roupas).
- filme: em DE, observa-se que a quantidade de vapor é superior ao regime de transição e a transmissão de calor se dá por condução e radiação através da fase gasosa. Em E, o ponto de derretimento do sólido é atingido, interrompendo o experimento.

# Modos de ebulição IV - experimento de Nukiyama - metanol

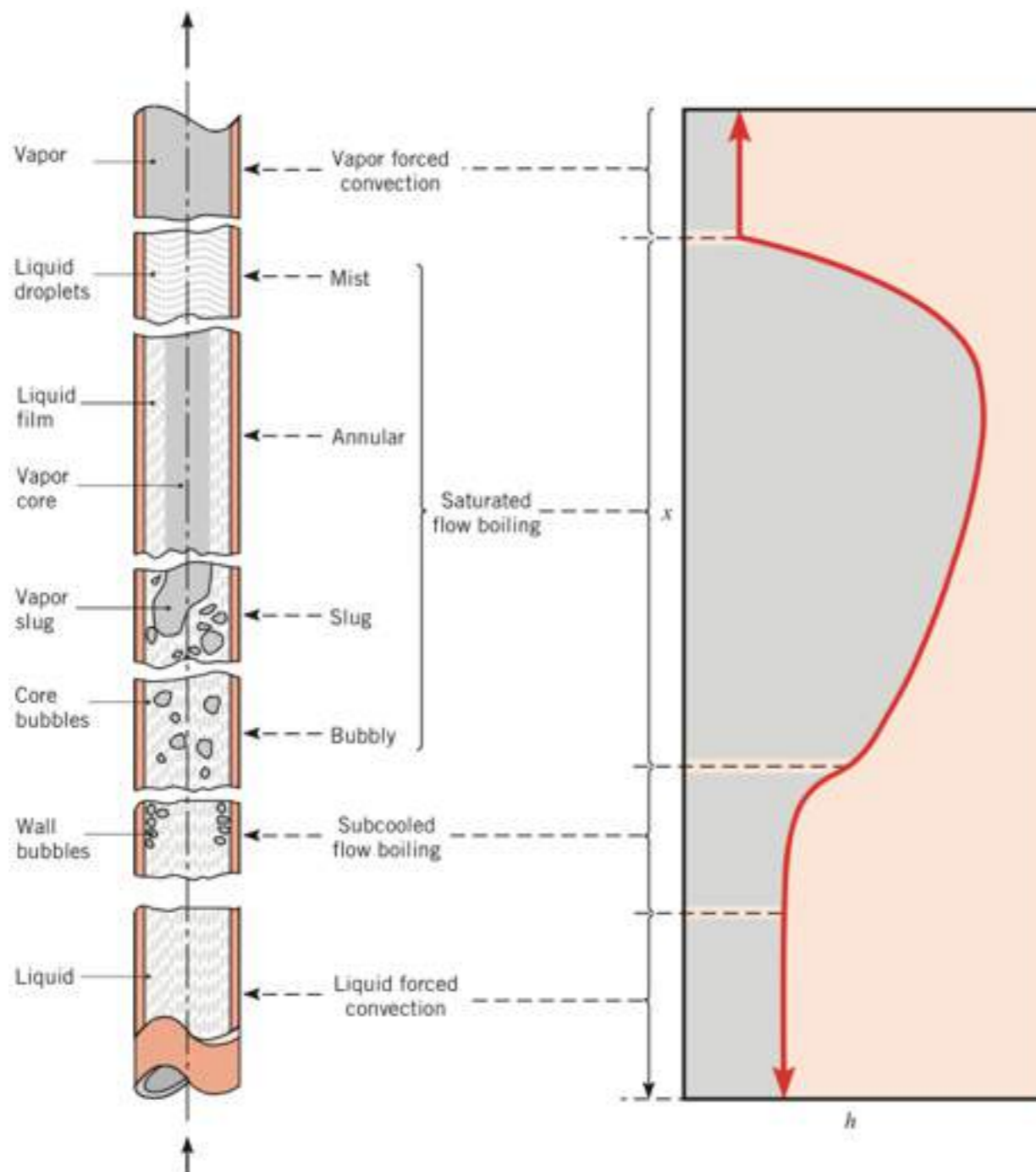


(a) **ebulição em nucleação:**  
regimes de jatos e colunas



(b) **ebulição em filme**

# Padrões de escoamento durante vaporização dentro de tubos



- convecção forçada: não há presença de bolhas pois o aquecimento das camadas de líquido adjacentes à superfície não é suficiente para mudança de fase;
- escoamento em ebulição subresfriada (subcooled flow boiling): vaporização é iniciada e pequenas bolhas próximas à superfície aquecida aparecem. Este regime é caracterizado por grandes gradientes de temperatura radiais;
- escoamento em ebulição saturada (saturated flow boiling): bolhas podem ser encontradas em qualquer localização radial. No primeiro estágio (bubbly flow regime), as bolhas aparecem isoladas. No segundo estágio (slug flow) as bolhas apresentam tamanho proporcional ao diâmetro do tubo, separadas por slugs de líquidos. No terceiro estágio (annular flow) o líquido é empurrado para próximo da parede e um núcleo de vapor é formado no interior do tubo. No quarto estágio (mist flow) o núcleo de vapor apresenta gotas de líquidos misturados. Quando as gotas e a parte líquida é completamente vaporizada, entra-se no regime de convecção forçada de vapor. Nele, o coeficiente de convecção  $h$  é reduzido devido à baixa condutividade térmica do vapor, quando comparado a do líquido.