



CAPÍTULO 5 – EBULIÇÃO E CONDENSAÇÃO

Prof. Dr. Santiago del Rio Oliveira

- Serão analisados processos que ocorrem em uma interface sólido-líquido ou interface sólido-vapor.
- Esses processos são conhecidos como ebulição (líquido para vapor) e condensação (vapor para líquido).
- Efeitos de calor latente associados com a mudança de fase são significativos.
- A ebulição é mantida pela transferência de calor a partir da superfície sólida.
- A condensação é mantida pela transferência de calor para a superfície sólida.
- Como envolvem movimentação de fluido, a ebulição e a condensação são classificadas como transferência de calor por convecção.

- Entretanto, na mudança de fase, a transferência de calor para ou a partir de um fluido pode ocorrer **sem influenciar na sua temperatura**.
- Na ebulição e condensação **altas taxas de transferência de calor** podem ser conseguidas com **pequenas diferenças de temperaturas**.
- Na ebulição e condensação são importantes: **calor latente** h_{fg} , **tensão superficial** na interface sólido-líquido σ , diferença de **massas específicas** $\rho_l - \rho_v$.
- A diferença $\rho_l - \rho_v$ induz uma **força de empuxo por unidade de volume** $g(\rho_l - \rho_v)$.

- Em função dos **efeitos combinados** de **calor latente** e do **escoamento induzido pelo empuxo**, as **taxas** e os **coeficientes** de transferência de calor na ebulição e na condensação são **muito maiores** do que aqueles da transferência de calor por convecção sem mudança de fase.
- Aplicações: **caldeiras** e **condensadores** de **ciclos de potência a vapor**, **evaporadores** e **condensadores** de **ciclos de refrigeração por compressão de vapor**.
- Os objetivos desse capítulo são:
 1. Entender como ocorre o processo de ebulição/condensação e as suas principais formas.
 2. Identificar adimensionais importantes para o processo.
 3. Conhecer expressões empíricas utilizadas para avaliar os coeficientes de convecção nestas situações.

5.1 PARÂMETROS ADIMENSIONAIS NA EBULIÇÃO E NA CONDENSAÇÃO

- Pela dificuldade em se desenvolver as equações que governam os processos de ebulição e de condensação, os **parâmetros adimensionais apropriados** podem ser obtidos usando o **teorema Pi de Buckingham**.
- Para ambos os processos, o **coeficiente convectivo** h depende:
 1. Da **diferença entre as temperaturas** na superfície e de saturação $\Delta T = |T_s - T_{sat}|$
 2. Da **força de corpo** originada na diferença de massas específicas entre as fases líquida e vapor $g(\rho_l - \rho_v)$
 3. Do **calor latente** h_{fg}
 4. Da **tensão superficial** σ

5. De um comprimento característico L

6. Das propriedades termofísicas do líquido ou do vapor ρ, c_p, k, μ

- Dessa forma: $h = f[\Delta T, g(\rho_l - \rho_v), h_{fg}, \sigma, L, \rho, c_p, k, \mu]$
- Através de análise dimensional obtém-se que:

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

- Definindo os grupos adimensionais:

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

- **Número de Jakob**,
$$Ja = \frac{c_p \Delta T}{h_{fg}} = \frac{\text{máxima energia sensível absorvida pelo fluido}}{\text{energia latente absorvida pelo fluido}}$$
- **Número de Bond**,
$$Bo = \frac{g(\rho_l - \rho_v)L^2}{\sigma} = \frac{\text{força de empuxo}}{\text{força de tensão superficial}}$$
- $$\frac{\rho g(\rho_l - \rho_v)L^3}{\mu^2}$$
, representa o efeito do movimento do fluido induzido pelo empuxo na transferência de calor.

5.2 MODOS DE EBULIÇÃO

- Quando a **evaporação** ocorre em uma **interface sólido-líquido**, ela é chamada **ebulição**.

- Esse processo ocorre quando a temperatura da superfície T_s é superior à temperatura de saturação T_{sat} correspondente à pressão no líquido.
- Calor é transferido da superfície sólida para o líquido e a forma apropriada da lei do resfriamento de Newton é:

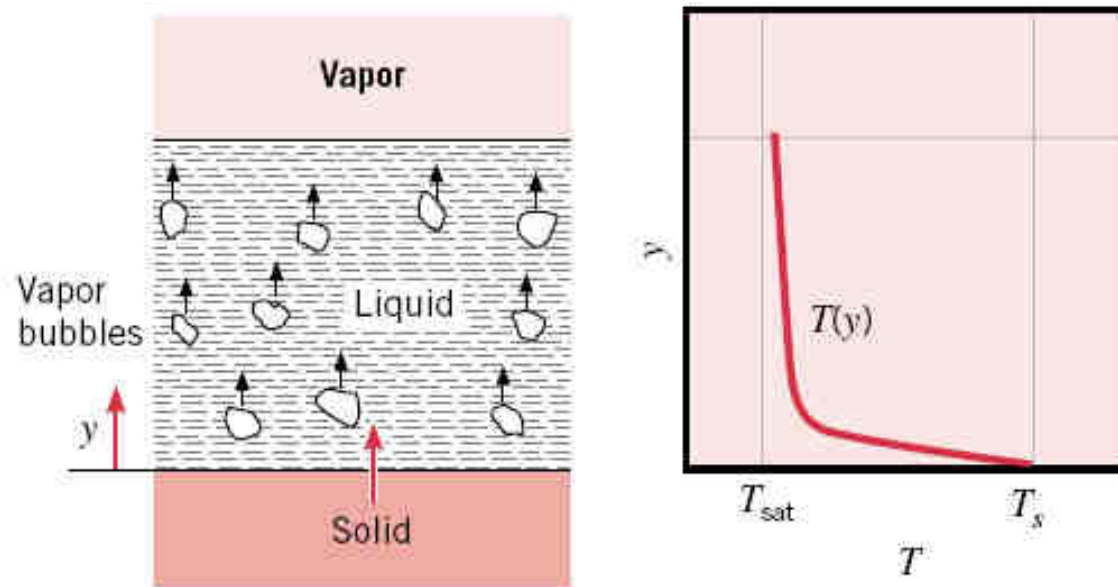
$$q_s'' = h(T_s - T_{sat}) = h\Delta T_e$$

- $\Delta T_e = T_s - T_{sat}$ é chamado de excesso de temperatura.
- O processo é caracterizado pela formação de bolhas de vapor que crescem e, em seguida, se desprendem da superfície.
- O crescimento e a dinâmica da bolha dependem: do excesso de temperatura, da natureza da superfície e das propriedades termofísicas do fluido.

- A dinâmica da formação da bolha de vapor **afeta o movimento do líquido próximo à superfície**, e consequentemente, o valor de h .
- Tipos de ebulição:
 1. **Ebulição em piscina**: o líquido encontra-se **quiescente** e o seu movimento próximo à superfície é devido à **convecção natural** e à **mistura** induzida pelo crescimento e o desprendimento das bolhas.
 2. **Ebulição com convecção forçada**: o movimento do fluido é induzido por **meios externos**, bem como pela **convecção natural** e pela **mistura** induzida pelas bolhas.
 3. **Ebulição sub-resfriada**: a temperatura do líquido encontra-se **abaixo da temperatura de saturação** e as bolhas formadas na superfície podem se **condensar** no líquido.
 4. **Ebulição saturada**: a temperatura do líquido **excede ligeiramente a temperatura de saturação** na ebulição saturada e as bolhas formadas na superfície são impelidas através do líquido pelas **forças de empuxo** e afloram na superfície livre.

5.3 EBULIÇÃO EM PISCINA

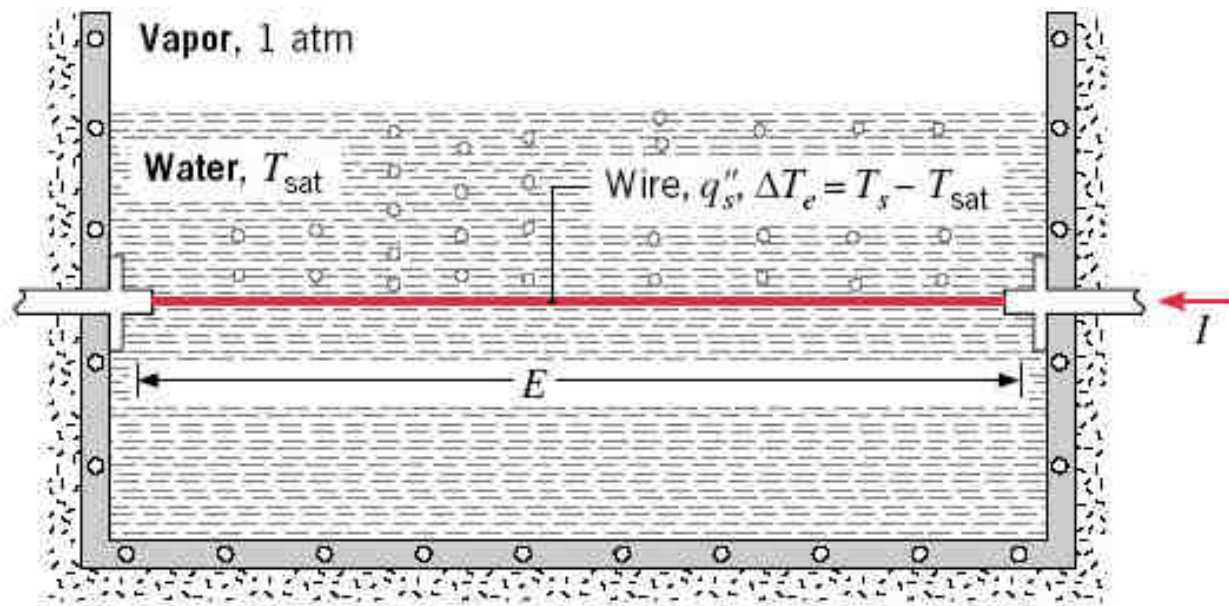
- Embora exista um **aumento brusco** na temperatura do líquido próximo a superfície do sólido, a temperatura na maior parte do líquido permanece **ligeiramente acima do valor de saturação** (ebulição em piscina saturada).



- As bolhas geradas na **interface líquido-sólido** ascendem e afloram na interface **líquido-vapor**.

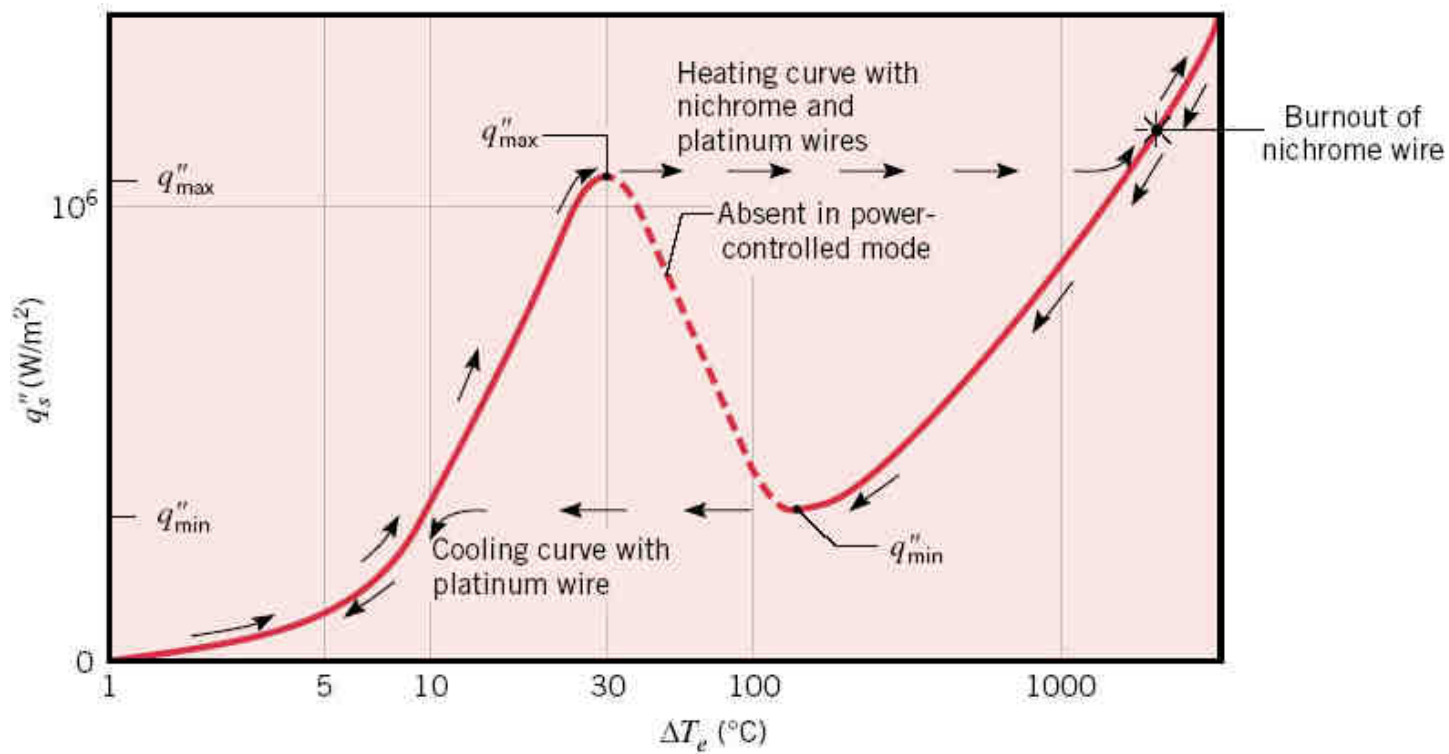
5.3.1 A curva de ebulição

- Utilizando o equipamento abaixo, Nukiyama identificou diferentes regimes de ebulição em piscina.



- Com valores de I e E determinou-se o fluxo térmico q_s'' de um fio horizontal de níquel-cromo para a água saturada.

- Ajustando a potência (fluxo térmico q_s'') obtém-se a temperatura do fio T_s (excesso de temperatura ΔT_e).
- Tem-se a **curva de ebulição para água saturada a pressão atmosférica.**

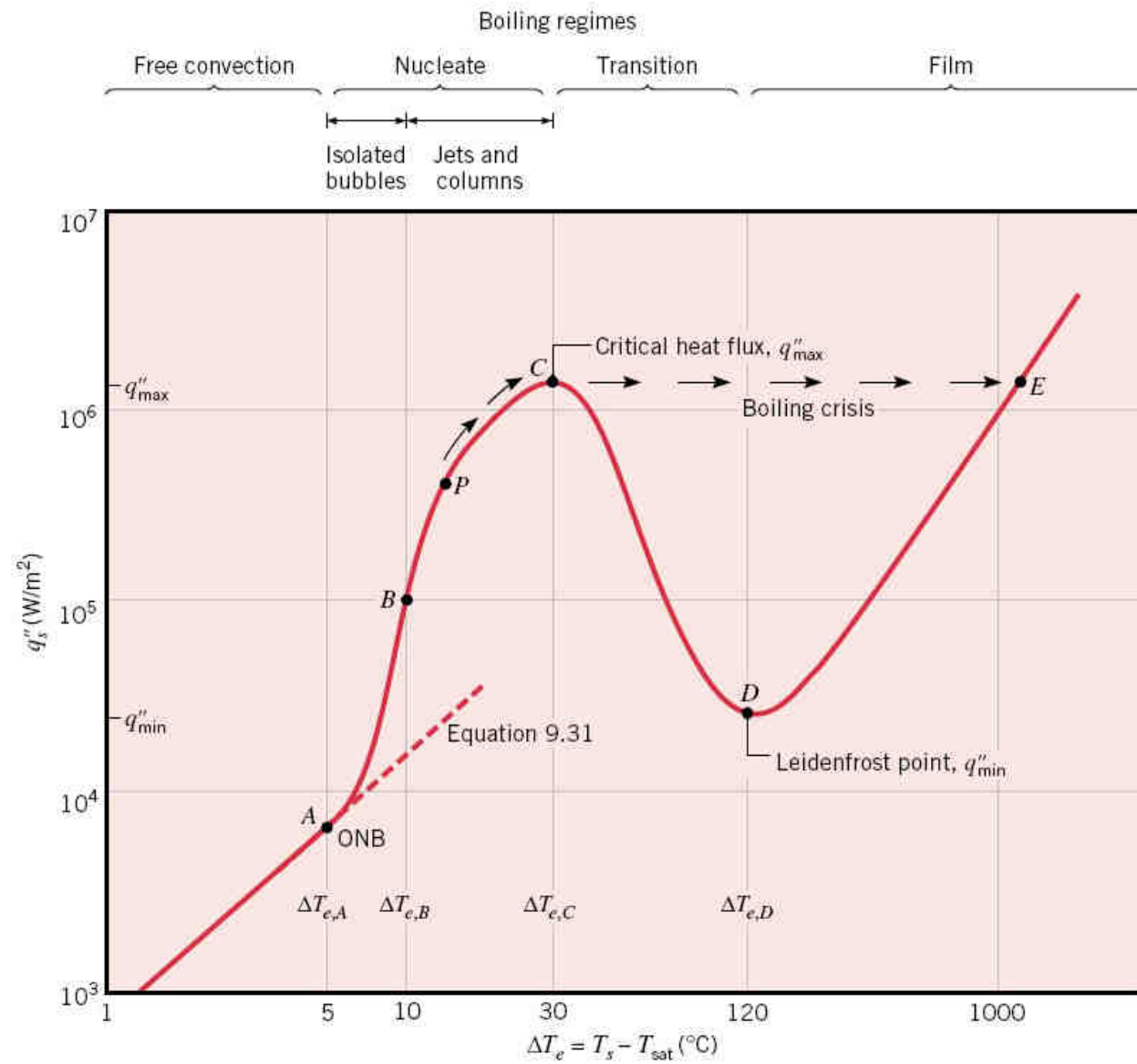


- Pela curva, com o aumento de q_s'' nota-se um aumento de ΔT_e (curva de aquecimento).
- Nukiyama observou que a ebulição (evidenciada pela presença de bolhas) não iniciou até que $\Delta T_e \approx 5^\circ\text{C}$.
- Aumentando a potência, foi notado grande aumento do fluxo térmico até que, subitamente, em q_{max}'' a temperatura do fio deu um salto e superou a temperatura de fusão do fio, rompendo-o.
- O experimento foi repetido com um fio de platina que possui ponto de fusão mais elevado (2045 K contra 1500 K) e foi possível manter fluxos térmicos acima de q_{max}'' sem a ocorrência de ruptura do fio.
- Reduzindo a potência, a variação de ΔT_e com q_s'' segue a curva de resfriamento acima.

- Quando o fluxo térmico atinge o ponto de mínimo $q''_{\min}$ uma **diminuição adicional de potência** causa uma **queda brusca do excesso de temperatura** e o processo original passa a seguir a curva de aquecimento original.
- Nukiyama notou um efeito de **histerese** na curva, atribuindo esse fato como uma consequência de método de aquecimento (potência controlada) com ΔT_e sendo uma **variável dependente**.
- Sua previsão foi confirmada anos mais tarde com um método de controle de ΔT_e como **variável independente**, obtendo a parte que faltava da curva de ebulição.

5.3.2 Modos de ebulição em piscina

- Abaixo pode ser visto a curva de ebulição para a **“água a 1 atm”**, embora tendências semelhantes caracterizem o comportamento de outros fluidos.



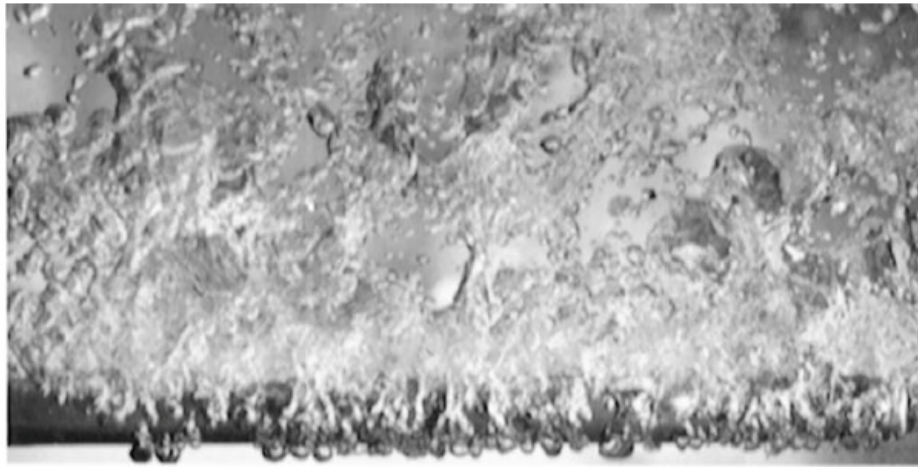
- **Ebulição com convecção natural:** ocorre quando $\Delta T_e \leq \Delta T_{e,A}$, onde $\Delta T_{e,A} \approx 5 \text{ } ^\circ\text{C}$.
- Nesta etapa, o excesso de temperatura é **insuficiente para provocar o aparecimento de bolhas**.
- Em função de o escoamento ser laminar ou turbulento, h varia com ΔT_e elevado a 1/4 ou 1/3 e q_s'' varia com ΔT_e elevado a 5/4 ou 4/3.
- Aproxima-se de um processo de **convecção natural mais intenso**.
- Valores do coeficiente convectivo podem ser calculados com o uso das **correlações próprias da convecção natural**.
- **Ebulição nucleada:** ocorre quando $\Delta T_{e,A} \leq \Delta T_e \leq \Delta T_{e,C}$, onde $\Delta T_{e,C} \approx 30 \text{ } ^\circ\text{C}$.

- **Bolhas isoladas:**

1. Bolhas se formam na superfície e ascendem no fluido.
2. Aumentam os valores de h e q_s'' .
3. Esse aumento é devido a mistura no fluido próximo à superfície.
4. A troca de calor se dá por transferência direta da superfície para o líquido.

- **Jatos ou colunas:**

1. A formação de bolhas se torna mais intensa e o vapor ascende como jatos de bolhas ou colunas de bolhas.
2. A interferência entre as bolhas aglomeradas inibe o movimento do líquido próximo a superfície.
3. No ponto **P** o **coeficiente de transferência de calor atinge seu máximo**, embora q_s'' continue a aumentar.

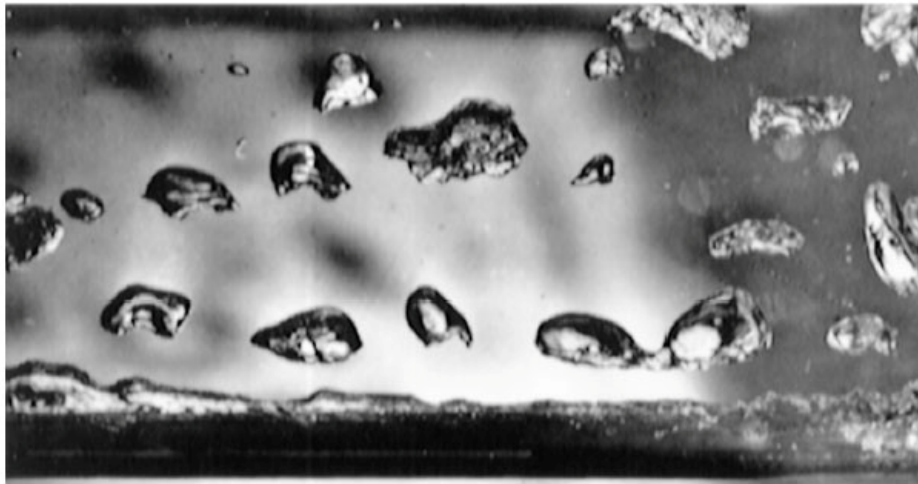


Ebulição nucleada no regime de jatos de bolhas ou colunas de bolhas

- No ponto C $q''_{s,c} = q''_{\max}$ é o **fluxo térmico máximo** (fluxo térmico crítico) que para a água a 1 atm é superior a 1 MW/m².
- No **ponto de máximo**, um quantidade considerável de vapor está sendo formada, tornando difícil para o líquido **molhar continuamente a superfície**.
- **Ebulição no regime de transição:** ocorre quando $\Delta T_{e,C} \leq \Delta T_e \leq \Delta T_{e,D}$, onde $\Delta T_{e,D} \approx 120$ °C.

- A formação de bolhas é tão **rápida** que um **filme de vapor** se forma sobre a superfície do fio.
- As condições **oscilam** entre a ebulição nucleada e a ebulição em filme.
- Nessa etapa h e q_s'' **diminuem** com o **aumento** de ΔT_e por instabilidade.
- Em processos de aquecimento com **fluxo de calor controlado** essa região não se apresenta.
- **Ebulição em filme:** ocorre quando $\Delta T_e \geq \Delta T_{e,D}$, onde $\Delta T_{e,D} \approx 120^\circ\text{C}$.
- Ocorre para temperaturas acima do **ponto de Leidenfrost**, na qual o fluxo térmico atinge seu **mínimo**, $q_{s,D}'' = q_{\min}''$.
- Nessa etapa se forma uma **manta de vapor** sobre a superfície.

- A partir do ponto de Leidenfrost, q_s'' aumenta com ΔT_e devido as trocas de calor por **condução** e **radiação**.
- q_s'' atinge o valor de $q_{\max}''$ e até o supera, mas com valores de ΔT_e elevados.



Ebulição em filme

- **Ponto de Leidenfrost**: é o ponto onde existe uma troca de calor mínima local.
- Há a formação de uma camada de vapor sobre a superfície quente que **dificulta a troca de calor**.

- A partir dele, existe uma inflexão da curva de ebulição e q_s'' volta a aumentar.
- Separa a região de transição da região de filme.



- Como $T_{s,E}$ pode exceder o ponto de fusão do sólido, pode ocorrer a **destruição ou a fadiga do sistema**.
- O ponto C é o **ponto de queima ou crise de ebulição**, e o conhecimento preciso do **fluxo térmico crítico (FTC)**, $q_{s,C}'' = q_{\max}''$ é importante no **projeto de superfícies de transferência de calor**.

5.4 CORRELAÇÕES DA EBULIÇÃO EM PISCINA

- Abaixo de $\Delta T_{e,A}$ correlações de convecção natural são adequadas (capítulo 9).

5.4.1 Ebulição nucleada em piscina

- Exige a estimativa do número de sítios de nucleação na superfície e a frequência de formação de bolhas em cada sítio.
- Yamagata et al. (1955) mostrou que q_s'' é proporcional a ΔT_e^3 .
- A correlação de Rohsenow (1952) é amplamente utilizada para ebulição nucleada:

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

Valores de $C_{s,f}$ e n para várias combinações superfície-fluido.

Combinação superfície-fluido	$C_{s,f}$	n
Água cobre		
Riscada	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	0,0060	1,0
Água-platina	0,0130	1,0
n-Pentano-cobre		
Polida	0,0154	1,7
Esmerilhada	0,0049	1,7
Benzeno-cromo	0,0101	1,7
Álcool etílico-cromo	0,0027	1,7

- Erros na avaliação de q_s'' podem chegar a $\pm 100\%$, sendo que os erros podem ser reduzidos por um fator igual a 3 para estimar ΔT_e .

5.4.2 Fluxo térmico crítico na ebulição nucleada em piscina

- É importante o conhecimento do **fluxo térmico crítico** $q_{s,C}'' = q_{\max}''$.
- Pode-se operar um processo de ebulição próximo a esse ponto, mas deve-se evitar dissipar calor além desse limite.
- Kutateladze (1948) e Zuber (1958) obtiveram a seguinte expressão:

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

- Essa expressão **independe do material da superfície**.

- $C = 0,131$ para cilindros horizontais e esferas (constante de Zuber) e $C = 0,149$ para grandes placas horizontais.
- As propriedades devem ser avaliadas na temperatura de saturação.
- A equação acima se aplica quando o comprimento característico da superfície aquecida, L , é grande em relação ao diâmetro das bolhas, D_B .
- Quando o aquecedor é pequeno, de tal forma que o número de confinamento $Co = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)L}} \geq 0,2$ deve-se utilizar um fator de correção proposto por Lienhard (1987).
- Cichelli e Bonilla (1945) mostraram que o fluxo térmico crítico depende fortemente da pressão.

5.4.3 Fluxo térmico mínimo

- Localizado no ponto de Leidenfrost, e determina o **início da ebulição em filme estável**.
- Representa o **valor mínimo do fluxo de calor** na qual se obtém um filme de vapor estável.
- Se o fluxo térmico cair para um valor abaixo desse mínimo, o filme irá colapsar, causando o resfriamento da superfície e o restabelecimento de uma condição de ebulição nucleada.
- Zuber (1958) obteve a seguinte expressão para uma **grande placa horizontal**:

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

- As propriedades são avaliadas na **temperatura de saturação**.

- $C = 0,09$ para a maioria dos fluidos à pressões moderadas.

5.4.4 Ebulição em filme em piscina

- Um **filme contínuo de vapor** cobre a superfície e não há contato entre a fase líquida e a superfície.

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

- $C = 0,62$ para **cilindros horizontais** e $C = 0,67$ para **esferas**.
- As propriedades do vapor são estimadas na temperatura de filme $T_f = (T_s + T_{sat})/2$.
- A massa específica do líquido é avaliada na **temperatura de saturação**.

- $h'_{fg} = h_{fg} + 0,80c_{p,v}(T_s - T_{sat})$ é o **calor latente corrigido**.
- Para $T_s \geq 300 \text{ }^\circ\text{C}$ deve-se levar em conta a **transferência de calor por radiação** através do filme de vapor. A radiação atua para aumentar a espessura do filme.
- Para **ebulição em torno de tubos horizontais**, Bromley (1950) propôs a seguinte equação transcendental para o **coeficiente médio de transferência de calor**:

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

- Se $\bar{h}_{rad} < \bar{h}_{conv}$ uma **forma mais simples** pode ser usada:

$$\bar{h} = \bar{h}_{conv} + \frac{3}{4} \bar{h}_{rad}$$

- O **coeficiente radiativo efetivo** $\bar{h}_{rad}$ é determinado por:

$$\bar{h}_{rad} = \frac{\varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sat}^4)}{T_s - T_{sat}}$$

5.4.5 Efeitos paramétricos na ebulição em piscina

- A influência do **campo gravitacional** sobre a ebulição deve ser considerada em aplicações que envolvem **viagens espaciais** e **máquinas rotativas**.
- Se um líquido em um sistema de ebulição em piscina estiver a uma **temperatura menor do que a temperatura de saturação** diz-se que o líquido está **sub-resfriado**, onde $\Delta T_{sub} = T_{sat} - T_{liq}$.
- No **regime de convecção natural**, o fluxo térmico aumenta em função de $(T_s - T_{liq})^{5/4}$ ou $(\Delta T_e + \Delta T_{sub})^{5/4}$.

- Na ebulição nucleada, a **influência do sub-resfriamento é desprezível**, embora os fluxos térmicos máximo e mínimo, $q''_{\max}$ e $q''_{\min}$, aumentem linearmente com ΔT_{sub} .
- Na ebulição em filme, o fluxo térmico aumenta fortemente com o aumento de ΔT_{sub} .
- A influência da **rugosidade da superfície** (usinagem, introdução de ranhuras, entalhe ou jateamento de areia) sobre os **fluxos térmicos máximo e mínimo** e sobre a **ebulição em filme** é desprezível.

5.5 EBULIÇÃO COM CONVECÇÃO FORÇADA

- Na ebulição em piscina, o escoamento ocorre principalmente em função do **movimento das bolhas** induzido pelo **empuxo** originado na superfície aquecida.

- Na ebulição com convecção forçada, o escoamento é devido a uma **movimentação dirigida do fluido**, bem como em função dos **efeitos do empuxo**.
- As condições dependem da **geometria**, podendo envolver **escoamento externo ou interno**.

5.5.1 Ebulição com convecção forçada em escoamento externo

- Para um líquido com velocidade V em **escoamento cruzado** sobre um cilindro com diâmetro D , Lienhard e Eichhorn (1976) desenvolveram a seguir as seguintes expressões:

- **Baixa velocidade:**
$$\frac{q_{\max}''}{\rho_v h_{fg} V} = \frac{1}{\pi} \left[1 + \left(\frac{4}{\text{We}_D} \right)^{1/3} \right]$$

- **Alta velocidade:** $\frac{q_{\max}''}{\rho_v h_{fg} V} = \frac{(\rho_l / \rho_v)^{3/4}}{169\pi} + \frac{(\rho_l / \rho_v)^{1/2}}{19,2\pi We_D^{1/3}}$
- $We_D = \frac{\rho_v V^2 D}{\sigma}$ é o **número de Weber** (razão entre força de inércia e força de tensão superficial).
- Escoamento de **alta velocidade:** $\frac{q_{\max}''}{\rho_v h_{fg} V} < \left[\left(\frac{0,275}{\pi} \right) \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{1/2} + 1 \right]$
- Escoamento de **baixa velocidade:** $\frac{q_{\max}''}{\rho_v h_{fg} V} > \left[\left(\frac{0,275}{\pi} \right) \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{1/2} + 1 \right]$

5.5.2 Escoamento bifásico

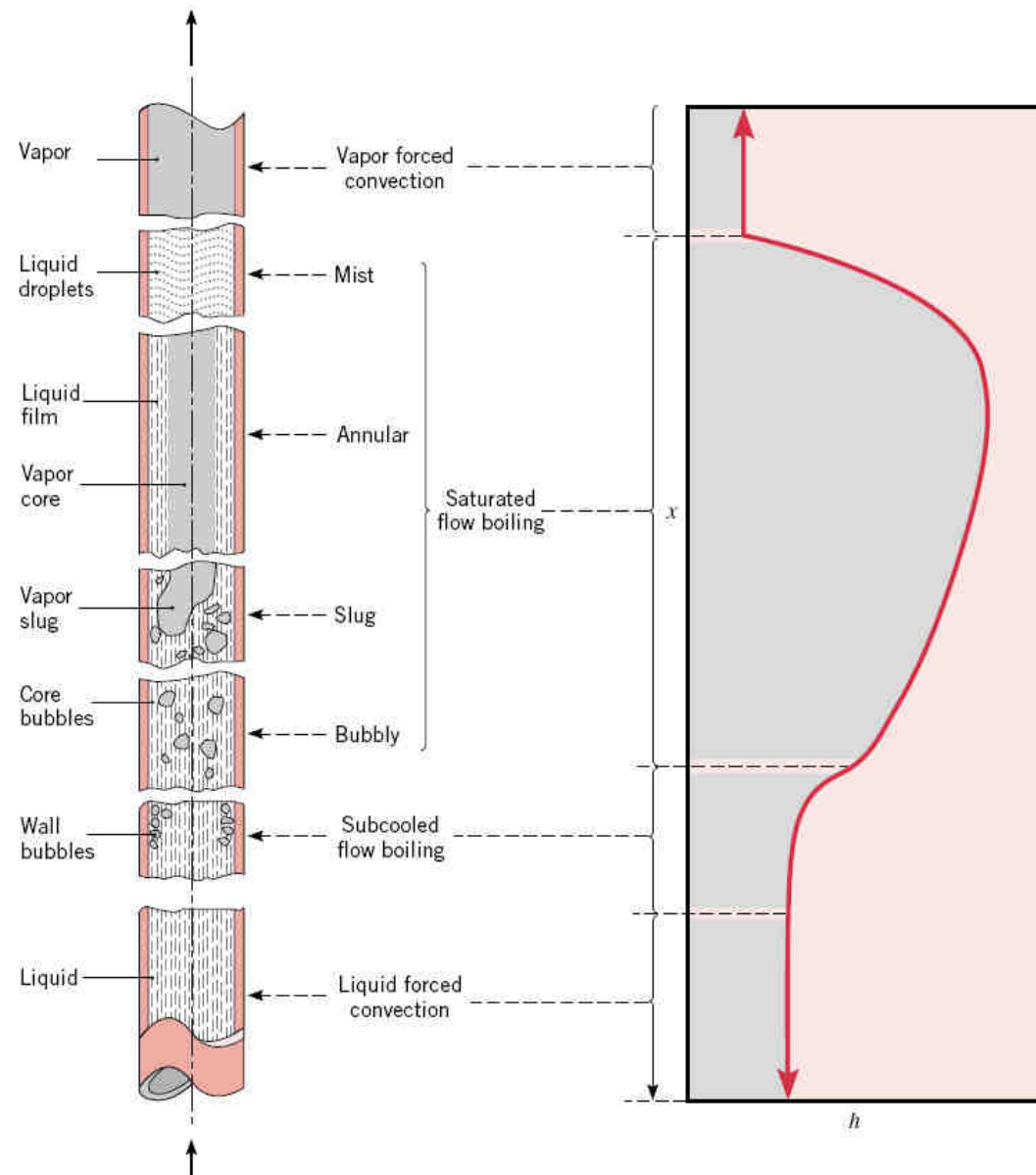
- Está associada à **formação de bolhas na superfície interna** de um tubo aquecido através do qual um líquido escoar.

- O crescimento e o desprendimento das bolhas são fortemente influenciados pela **velocidade do escoamento**.
- É necessário definir a **fração mássica de vapor média**: $\bar{X}(x) = \frac{q_s'' \pi D x}{\dot{m} h_{fg}}$
- As seguintes correlações podem ser utilizadas para a **região de ebulição com escoamento saturado em tubos circulares lisos** ($0 < \bar{X} \leq 0,8$):

$$\frac{h}{h_{mf}} = 0,6683 \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0,1} \bar{X}^{0,16} (1 - \bar{X})^{0,64} f(\text{Fr}) + 1058 \left(\frac{q_s''}{\dot{m}'' h_{fg}} \right)^{0,7} (1 - \bar{X})^{0,8} G_{s,f}$$

$$\frac{h}{h_{mf}} = 1,136 \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0,45} \bar{X}^{0,72} (1 - \bar{X})^{0,08} f(\text{Fr}) + 667,2 \left(\frac{q_s''}{\dot{m}'' h_{fg}} \right)^{0,7} (1 - \bar{X})^{0,8} G_{s,f}$$

- $\dot{m}'' = \dot{m}/A_{tr}$ é a vazão mássica por unidade de área transversal.
- Ao utilizar as duas equações anteriores, o maior valor de h deve ser utilizado.
- $Fr = \frac{(\dot{m}''/\rho_l)^2}{gD}$ é o número de Froude da fase líquida.
- $f(Fr)$ é unitário para tubos verticais e para tubos horizontais com $Fr \geq 0,04$.
- Para tubos horizontais com $Fr \leq 0,04$, $f(Fr) = 2,63Fr^{0,3}$.
- Todas as propriedades são avaliadas na temperatura de saturação.



- O coeficiente $G_{s,f}$ depende da **combinação superfície-líquido**, podendo ser visualizados na tabela abaixo:

Valores de $G_{s,f}$ para várias combinações superfície-líquido.

Fluido em tubo de cobre comercial	$G_{s,f}$
Água	1,00
Querosene	0,488
Refrigerante R-134a	1,63
Refrigerante R-152a	1,10
Para tubos de aço inoxidável, use $G_{s,f} = 1$	

- h_{mf} está associado à região de **convecção forçada no líquido** e é obtido pela equação abaixo com as propriedades avaliadas em T_{sat} :

$$\text{Nu}_D = \frac{(f/8)(\text{Re}_D - 1000)\text{Pr}}{1 + 12,7(f/8)^{1/2}(\text{Pr}^{2/3} - 1)}$$

- f pode ser obtido do diagrama de Moody ou para **tubos lisos** pela equação:

$$f = (0,790 \ln \text{Re}_D - 1,64)^{-2}$$

$$3000 \leq \text{Re}_D \leq 5 \times 10^6$$

- As correlações para h/h_{mf} se aplicam para **números de confinamento** $\text{Co} \leq 1/2$:

$$\text{Co} = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)D}}$$

5.5.3 Escoamento bifásico em microcanais

- O tamanho das bolhas pode ocupar uma porção significativa do diâmetro do tubo e o número de confinamento pode se tornar muito grande.
- Nesse caso, há diferentes tipos de regime de escoamento, havendo a necessidade de se recorrer a uma modelagem mais sofisticada.