

# Transferência de Calor com Mudança de Fase

## Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

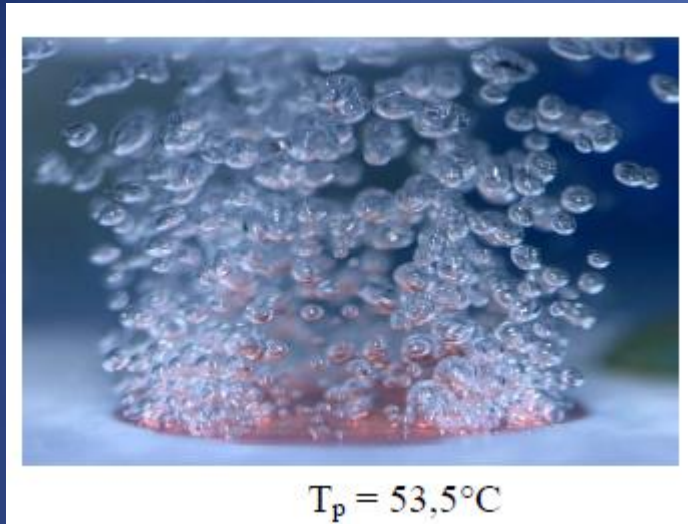
- Ebulição nucleada (*Nucleate Boiling*)
- Ebulição em piscina (*Pool Boiling*)
- Ebulição em filme (*Film Boiling*)
- Ebulição convectiva (*Flow Boiling or Convective Boiling*):
  - Convecção Forçada
  - Convecção Natural

Processos de transferência de calor muito importantes para a engenharia, principalmente em sistemas de instalações termonucleares.

Exemplos:

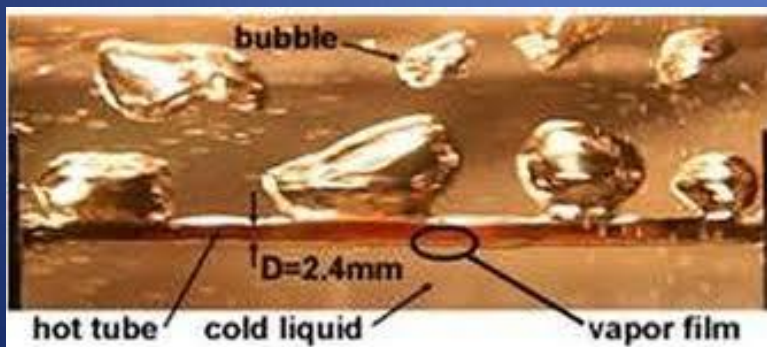
- Ebulição convectiva no núcleo de reatores tipo BWR;
- Ebulição nucleada e convectiva em núcleos de reatores PWR em casos de acidente;
- Ebulição nucleada e convectiva em geradores de vapor de reatores.
- Resfriamento de dispositivos eletrônicos, etc.

# Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

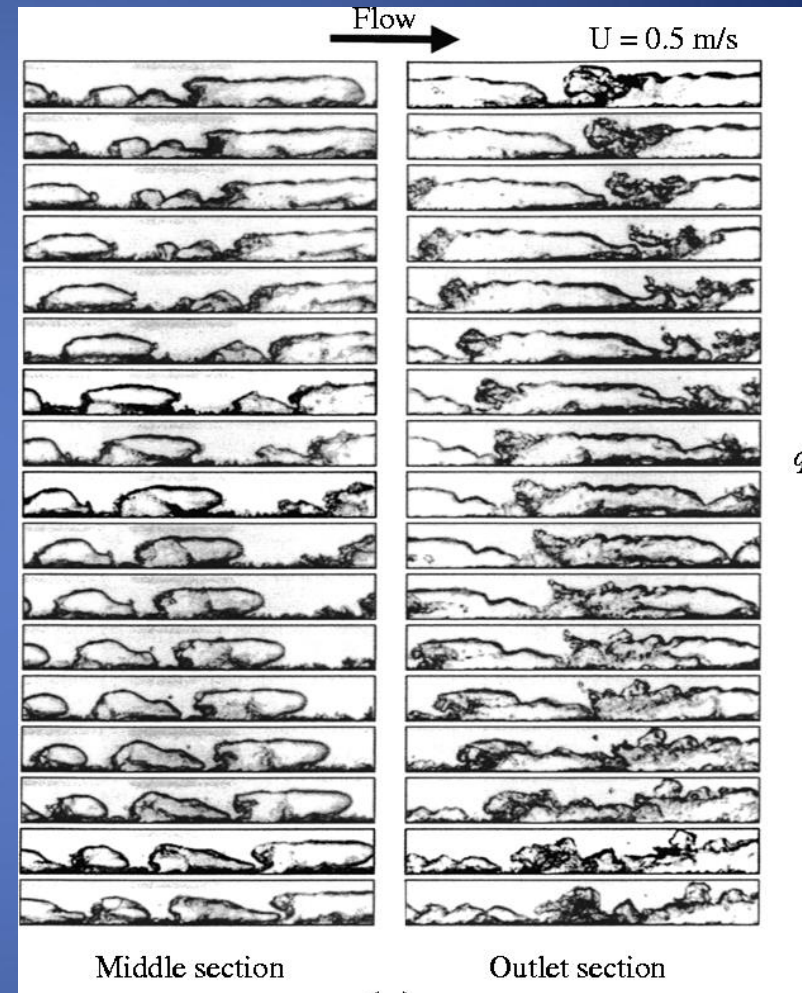


$T_p = 53,5^\circ\text{C}$

Ebulição nucleada em piscina



Ebulição em filme



Middle section

Outlet section

Ebulição Convectiva

# Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

## Mecanismos do fenômeno de ebulição

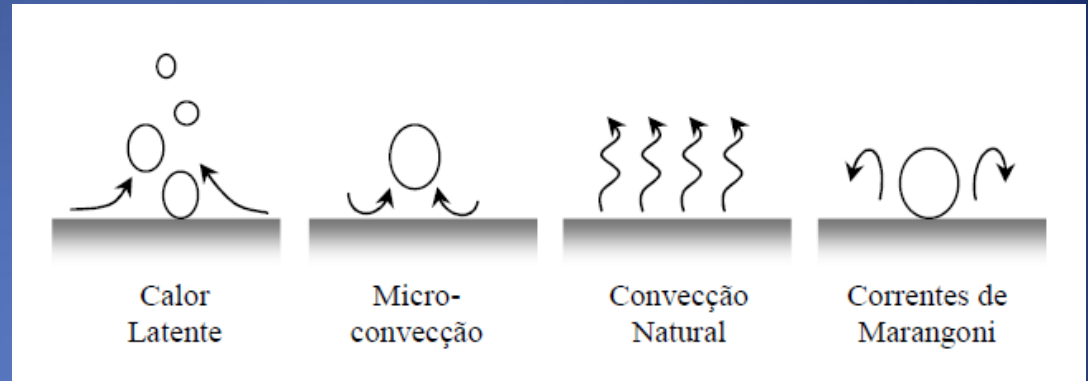
Processo de transferência de calor de uma superfície aquecida para um fluido em movimento ou não, com pequenos gradientes de temperatura entre o fluido (temperatura de saturação) e a temperatura da superfície, ocorrendo a mudança de fase do fluido junto da superfície.

Os processos de ebulição possibilitam a transferência de elevados fluxos de calor com pequenos diferenciais de temperatura. Esses processos de transferência de calor são mais intensos, principalmente, devido aos fenômenos de dinâmica de formação e “desprendimento” das bolhas de vapor, intensificando o processo de transferência de calor junto da parede aquecida.

Na literatura especializada identifica-se, basicamente, quatro mecanismos físicos responsáveis pelo processo de transferência de calor com mudança de fase:

## Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

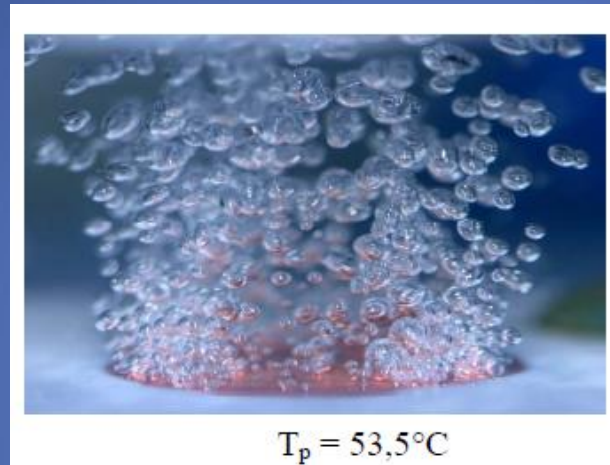
Mecanismos do fenômeno de ebulição.



- Calor latente: refere-se à parcela de calor, devido à mudança de fase, transportada pelas bolhas de vapor quando estas deixam a superfície aquecida;
- Micro-convecção: resulta do calor transferido pelo líquido superaquecido na partida da bolha de vapor.
- Convecção natural: é o transporte de calor sensível dissipado das porções da superfície aquecida, sem bolhas de vapor, para o fluido devido ao movimento do líquido induzido pelos gradientes de densidade.
- Correntes de Marangoni: são causadas pelo gradiente de tensão superficial enquanto a bolha ainda está sobre a superfície aquecida; isto ocorre em função da redução das forças de atração entre as moléculas quando a temperatura da superfície aumenta, induzindo assim, um fluxo convectivo tangencial na interface direcionado da maior para a menor temperatura.

# Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

## Ebulição Nucleada e Ebulição em Piscina



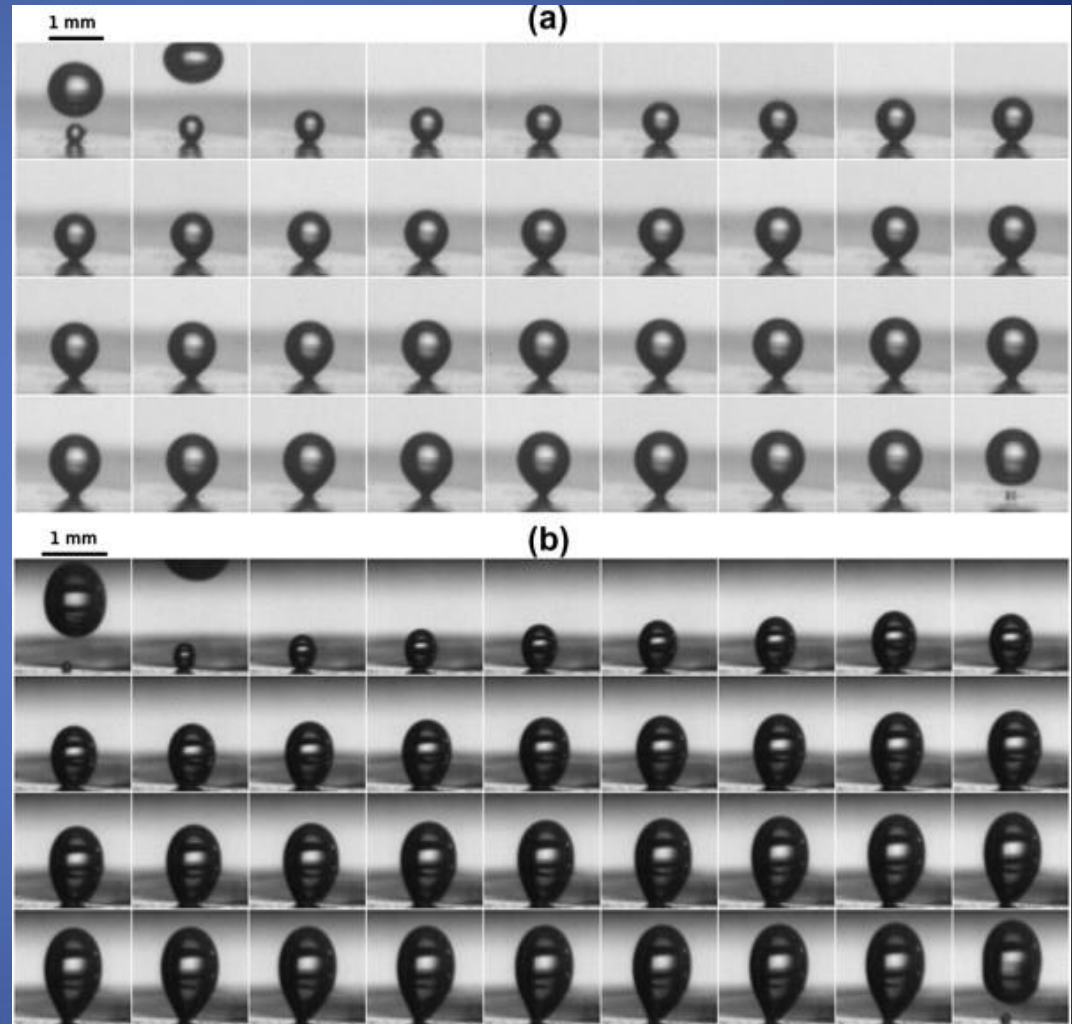
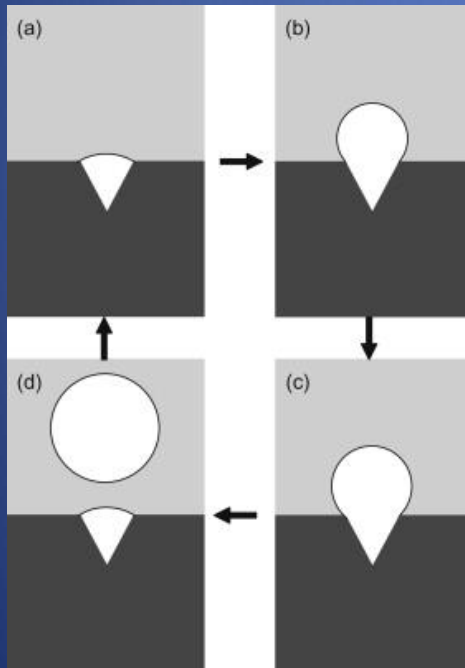
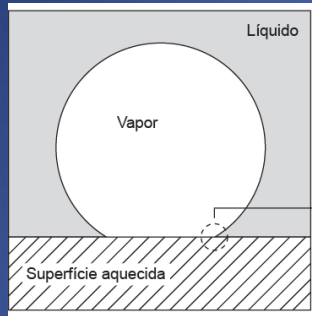
Ebulição nucleada ocorre quando há um processo de transferência de calor entre uma superfície aquecida e um fluido com temperatura média próxima da sua temperatura de saturação. Há um gradiente de temperatura entre a superfície aquecida e a temperatura de saturação do fluido dado por  $\Delta T = T_s - T_{\text{sat}}$ .

Ebulição nucleada: com ou sem convecção.

Ebulição em piscina: somente com o fluido estagnado.

# Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

## Processo de formação e crescimento das bolhas de vapor

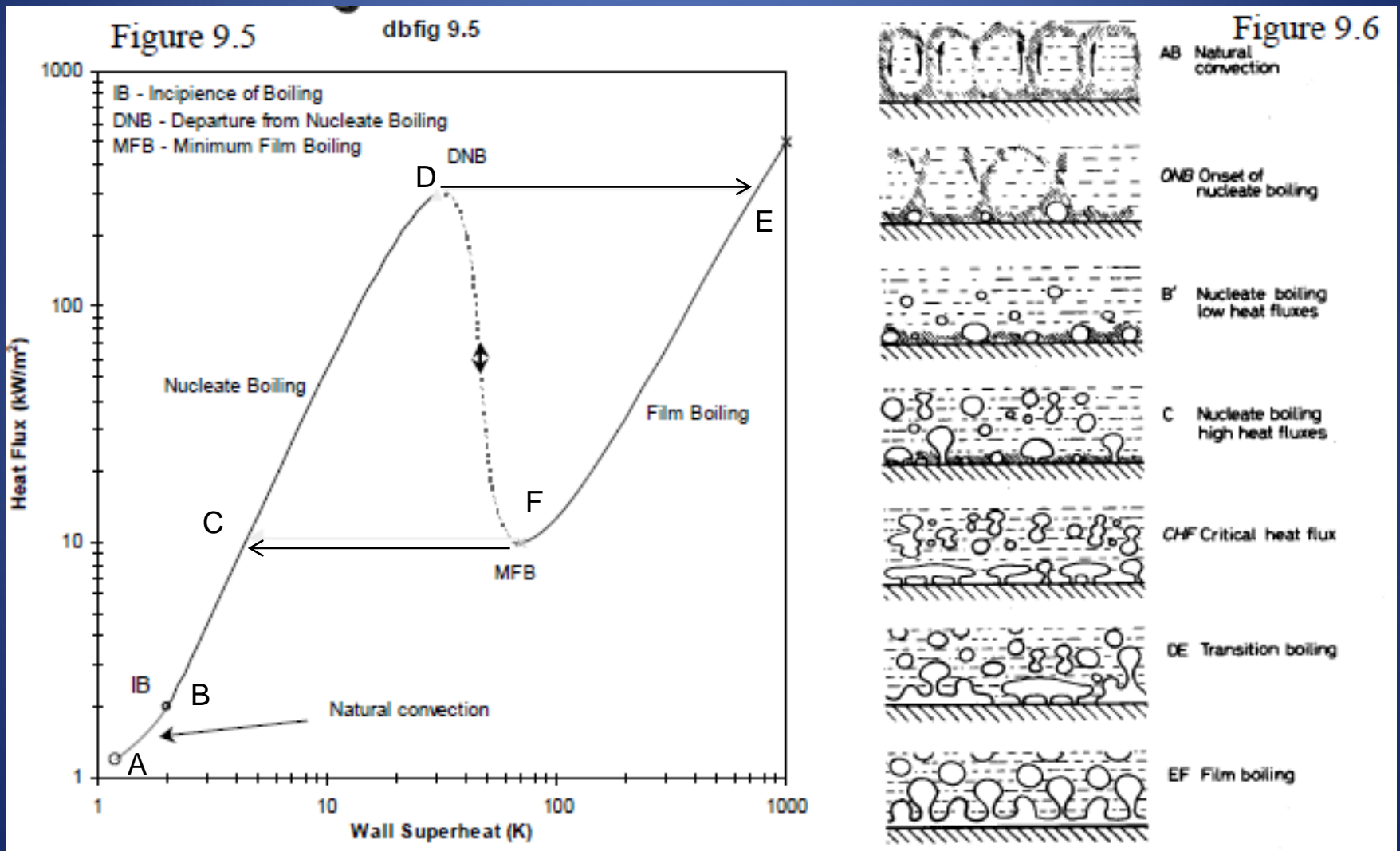


Modelo de cavidades cônicas

Processo de formação e crescimento das bolhas

# Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

## Curva de Ebulição



Para um fluxo de calor controlado na superfície



## Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

### Curva de Ebulição

AB - convecção natural; não há formação de bolhas;

B – início do processo de ebulição (ONB) “Onset Nucleate Boiling”;

BC – processo de ebulição nucleada com baixo e alto fluxo de calor;

C – ponto de máximo fluxo de calor transferido para o fluido (CHF) “Critical Heat Flux”;

EF – ebulição em filme; praticamente não há mais líquido em contato com a superfície;

DE e FC – transição de ebulição para filme e vice-versa;

F – mínimo fluxo de calor para ocorrência de filme.

## Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

### Fatores que podem influenciar o processo de ebulição nucleada

- Fluido de trabalho;
- Pressão;
- Estrutura física da superfície (iteração fluido/superfície e densidade de cavidades de nucleação);
- Modo de aquecimento;
- Ângulo de contato do fluido com a superfície;
- Orientação da superfície;
- Aceleração da gravidade.

## Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

### Modelos de transferência de calor com ebulição nucleada

#### Modelo de Rohsenow (1962):

Rohsenow propõe a primeira correlação para o coeficiente de transferência de calor com ebulição nucleada com base no mecanismo de agitação das bolhas, como em T.C. monofásica:

$$Nu = C Re^x Pr^y$$

O número de Nusselt foi definido como abaixo sendo que o termo entre colchetes representa o diâmetro de desprendimento da bolha (comprimento característico):

$$Nu = \frac{h_{NB}}{k} \left[ \frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_G)} \right]^{1/2}$$

## Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

O número de Reynolds é definido em termos da velocidade superficial do líquido:

$$\text{Re} = \frac{q}{\lambda_{LG} \rho_L} \left[ \frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_G)} \right]^{1/2} \frac{\rho_L}{\mu_L}$$

Sendo  $\lambda_{LG}$  o calor latente de evaporação do líquido.

Com base em dados experimentais, foi introduzido uma constante CSF para contabilizar a influência da interação fluido-superfície:

$$\text{Nu} = \frac{1}{C_{SF}} \text{Re}^{(1-n)} \text{Pr}^m$$

A correlação de Rohsenow pode ser expressa da seguinte forma:

$$\left[ \frac{C_{pL} \Delta T}{h_{LG}} \right] = C_{SF} \left\{ \frac{q}{h_{LG} \mu_L} \left[ \frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_G)} \right]^{1/2} \right\}^n \text{Pr}^{m+1}$$

## Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

Os valores de dos expoentes recomendados são:  $m = 0,7$  e  $n = 0,33$  para qualquer fluido, exceto para água, para a qual  $m = 0$ .

Os valores da constante  $C_{SF}$  varia de acordo com o fluido e a superfície. Vários experimentos foram realizados e alguns valores podem ser vistos na tabela abaixo:

Table 9.1 Values of  $C_{sf}$  for Rohsenow correlation.

<i>Liquid-surface combination</i>	$C_{sf}$
n-Pentane on polished copper	0.0154
n-Pentane on polished nickel	0.0127
Water on polished copper	0.0128
Carbon tetrachloride on polished copper	0.0070
Water on lapped copper	0.0147
n-Pentane on lapped copper	0.0049
n-Pentane on emery polished copper	0.0074
Water on scored copper	0.0068
Water on ground and polished stainless steel	0.0800
Water on PTFE pitted stainless steel	0.0058
Water on chemically etched stainless steel	0.0133
Water on mechanically polished stainless steel	0.0132

## Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

Outros pesquisadores desenvolveram modelos para determinação de correlações que expressam o processo de transferência de calor em todas as regiões da curva de ebulição nucleada.

A literatura especializada traz as diversas correlações e os modelos propostos para cada uma delas.

Outras correlações propostas:

Correlação de Stephan & Abdelsalam (1980):

$$h = 207 \left( \frac{k}{D_b} \right) \left( \frac{q D_b}{k T_{sat}} \right)^{0,745} \left( \frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0,581} \text{Pr}^{0,533} R_S^{0,133}$$

$$D_b = 0,0149 \theta \left( \frac{2\sigma}{g(\rho_L - \rho_G)} \right)^{0,5}$$

Sendo:

$D_b$  = diâmetro médio das bolhas

$R_S$  = rugosidade média da superfície

$\theta$  = ângulo de contato líquido/superfície

## Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

Correlação de Cooper (1984):

$$h = 55 p_r^b (-0,4343 \ln p_r)^{-0,55} M^{-0,5} q^{0,67}$$

Sendo:

$$b = 0,12 - 0,08686 \ln(p_r)$$

$p_r$  = pressão reduzida

$M$  = peso molecular do fluido

## Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

Exemplos dos eventos de ebulição nucleada por visualização:

Nucleate and Film Boiling from a Plain, 75- $\mu\text{m}$  Platinum Wire in Saturated FC-72 at Atmospheric Pressure

S. M. You, K. N. Rainey, and J. H. Kim  
Mechanical and Aerospace Engineering Department  
The University of Texas at Arlington

[http://www-heat.uta.edu/visualization/wire\\_boiling/wire\\_boiling.html](http://www-heat.uta.edu/visualization/wire_boiling/wire_boiling.html)



## Crise de Ebulição em Reatores LWR

Objetivo: identificar e explicar as bases físicas dos limites termohidráulicos associados ao funcionamento dos reatores LWR.

Ideia geral: Há tanto calor sendo fornecido para o fluido que o refrigerante perde a capacidade remoção de calor e as temperaturas na superfície do EC se elevam rapidamente, o que pode levar à fusão do revestimento da vareta combustível.

# Crise de Ebulição em Reatores LWR

## ONB – Onset of Nucleated Boiling

O início da ebulição do nucleada é considerado um limite para o resfriamento monofásico e não é um critério limitante no projeto de um elemento combustível. É o regime de transferência de calor no qual deve ser claramente identificado para uma adequada transferência de calor e escoamento, ou seja, fluxo monofásico versus fluxo bifásico. A ebulição nucleada ocorre em uma temperatura de parede acima de  $T_{sat}$ , por uma quantidade  $T_w - T_{sat}$ .

Portanto, sob condições ONB, a temperatura da superfície da parede de do combustível (Temperatura ONB) sobre a qual ebulição nucleada ocorrerá para uma dada pressão de refrigerante local e o fluxo de calor superficial pode ser expresso pelo correlação Eq. (1) desenvolvido por Bergles et all (1964).

$$T_w = T_{sat} + \frac{5}{9} \left( \frac{9.23q}{P^{1.156}} \right)^{\frac{P^{0.0234}}{2.16}} \quad (1)$$

where  $T_w$  is the fuel wall temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) at ONB conditions,  $T_{sat}$  is the local saturation temperature,  $P$  is the local pressure (bar) and  $q$  is the local heat flux ( $\text{W}/\text{cm}^2$ ).

## Crise de Ebulição em Reatores LWR

**DNB – Departure of Nucleate Boiling** é o fenômeno que ocorre no processo de ebulição onde a quantidade das bolhas na superfície aquecida tornam-se tão grandes que coalescem e formam uma película de vapor, isolando a superfície aquecida. A transferência de calor deve então ocorrer por uma combinação de condução e radiação através do filme de vapor. Nenhum destes dois processos envolvidos na ebulição do filme são muito eficazes, portanto, o fluxo de calor diminui consideravelmente, mesmo que a diferença de temperatura está aumentando. Nesta condição, a temperatura da superfície pode ficar muito alta e o derretimento pode ocorrer. O fluxo de calor imediatamente antes da ocorrência de DNB é chamado de fluxo de calor crítico (CHF).

A taxa de ebulição DNBR é a razão entre o fluxo de calor crítico  $q''_{crit}$ , (CHF) e o fluxo de calor local  $q''$ .

## Crise de Ebulição em Reatores LWR

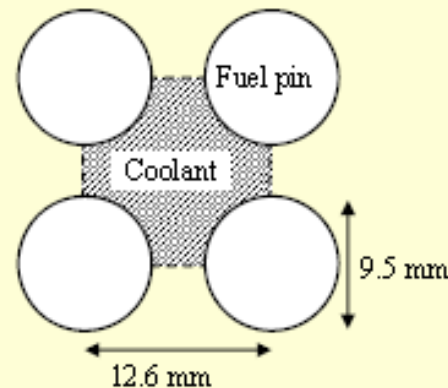
**MDNBR - Minimum Departure from Nucleate Boiling** é um critério de projeto central adotado para garantir a margem de segurança para evitar a ocorrência de fluxo de calor crítico e está relacionado ao DNBR, i. e., MDNBR é o valor mínimo de DNBR aceito no projeto do núcleo.

Em reatores de potência PWR, os critérios de MDNBR são cerca de 1.3, enquanto para pesquisa IEA-R1 reator foi adotado MDNBR = 2.0.

Isso significa que o núcleo do reator deve operar em condições que garantam uma margem de segurança mínima de 100% para a ocorrência de fluxo de calor crítico.

# Thermal-hydraulics of PWR Core

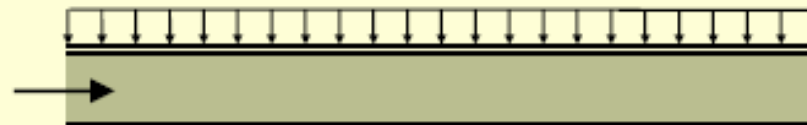
Channel geometry



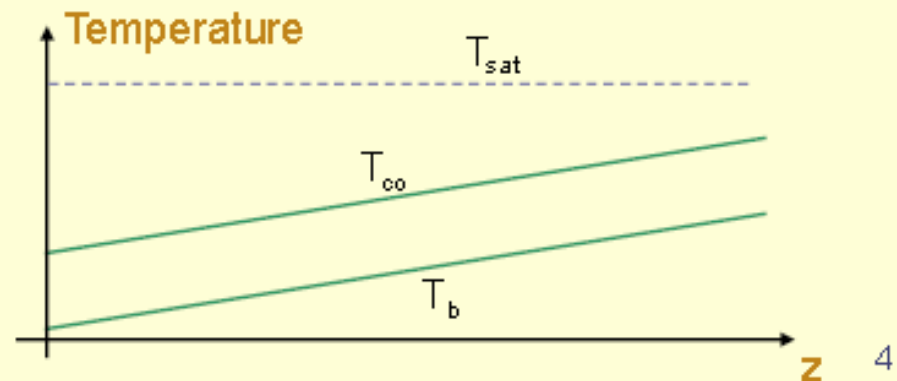
Assumed axially uniform for simplicity

$q''$

Average channel



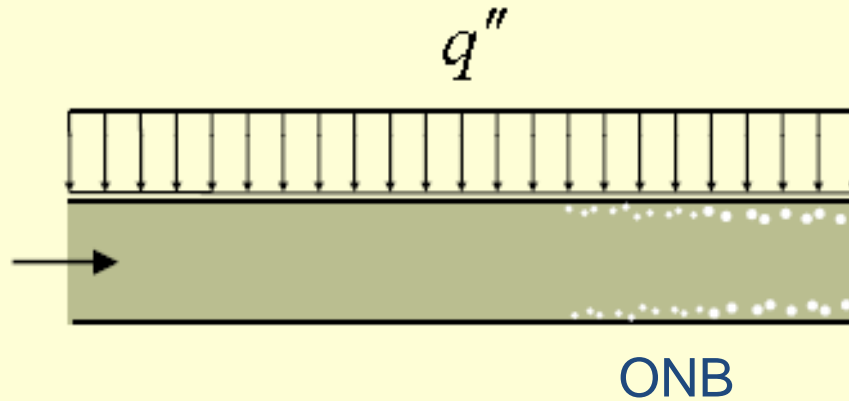
No boiling in the average channel



4

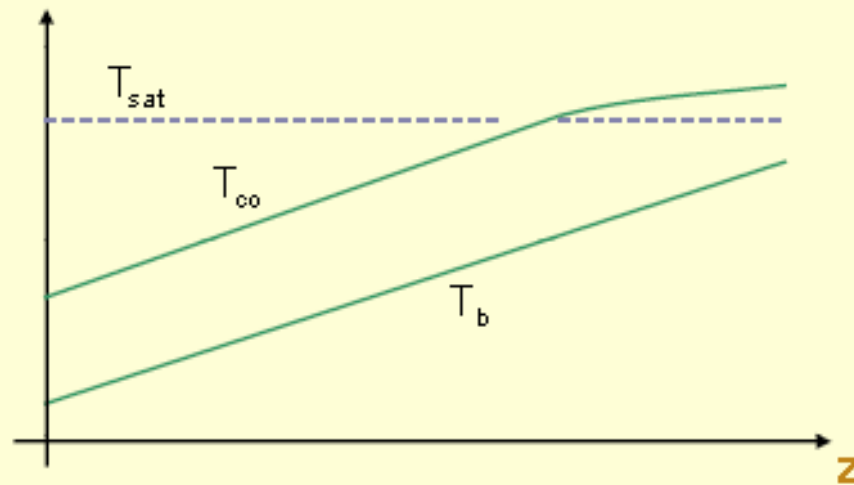
# Thermal-hydraulics of PWR Core (2)

Hot channel



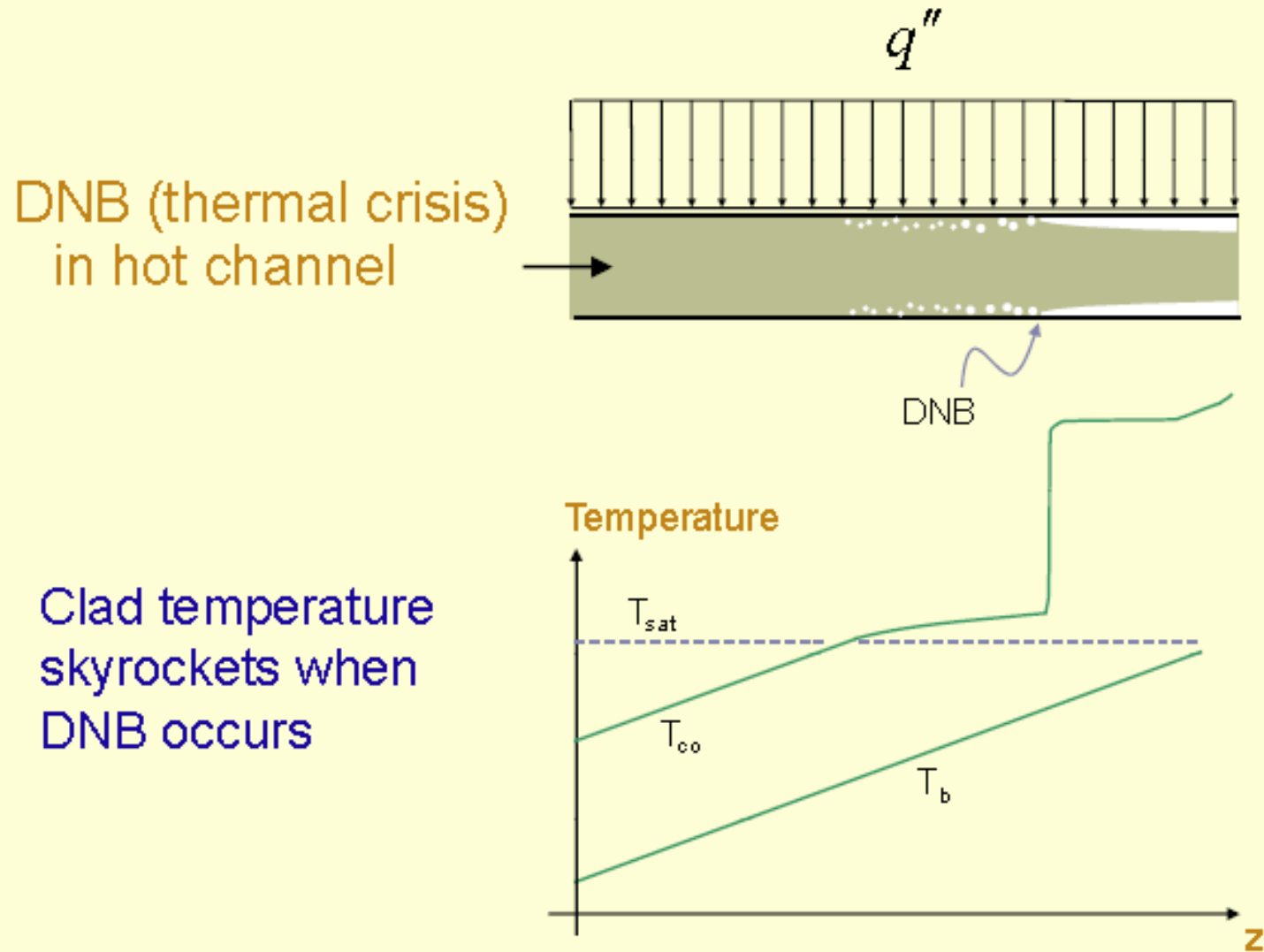
ONB

Temperature



Subcooled boiling in the hot channel

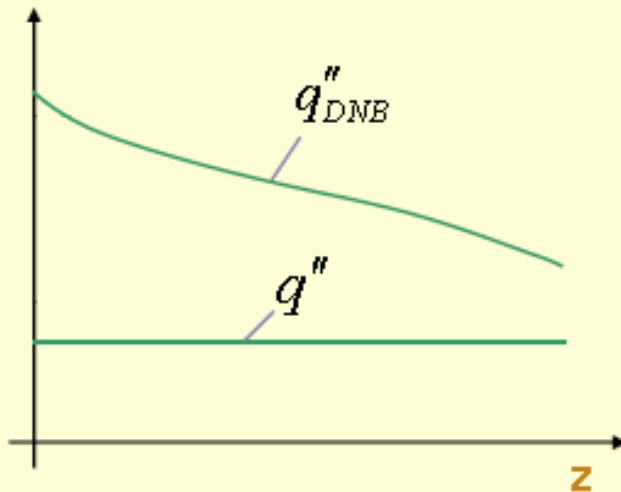
# Thermal-hydraulics of PWR Core (3)



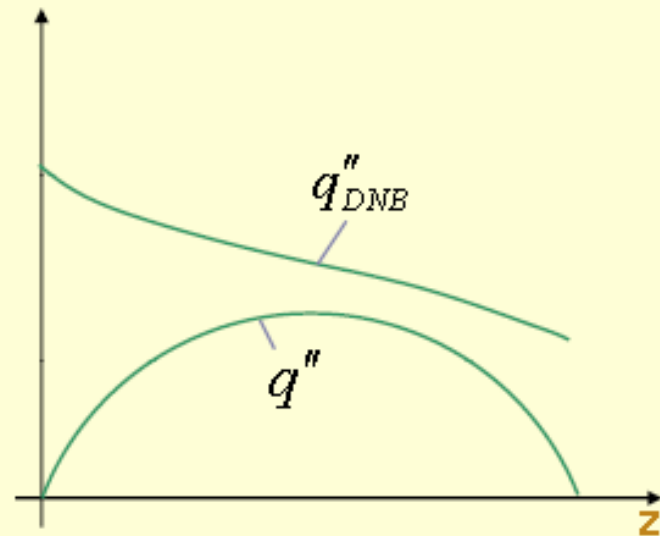
# Thermal-hydraulics of PWR Core (4)

Heat flux to cause DNB depends on  $T_b$ ,  $G$  and  $P \rightarrow q''_{DNB}(T_b, G, P)$

Heat flux



Heat flux



$$\text{DNBR}(z) \equiv \frac{q''_{DNB}}{q''}$$

**MDNBR**  $\equiv$  min. DNBR  $>$  1.3 in the US



# Thermal-hydraulics of PWR Core (5)

Correlation (Tong 68) to calculate  $q''_{DNB}$

$$q''_{DNB} = K_{Tong} \frac{G^{0.4} \mu_f^{0.6} h_{fg}}{D_e^{0.6}}$$

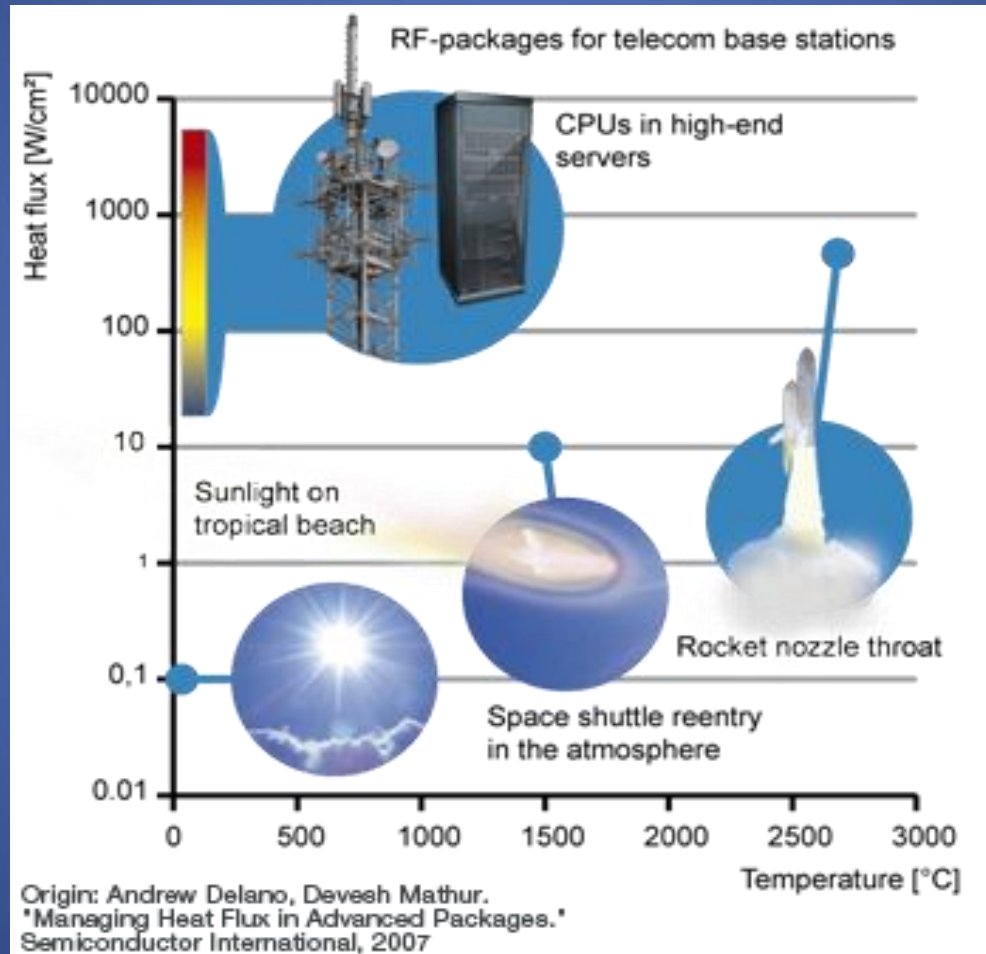
Where:

$$K_{Tong} = [1.76 - 7.433x_e + 12.222x_e^2]$$

$$x_e = -\frac{c_{p,l}(T_{sat} - T_b)}{h_{fg}} < 0 \text{ in a PWR}$$

# Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

## Fluxo Crítico de Calor (CHF): exemplos



## Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

### Fluxo Crítico de Calor (CHF)

É o limite de operação em ebulição nucleada.

Neste ponto ocorre a transição da ebulição nucleada para ebulição em filme e o fluxo de calor transferido para o fluido diminui.

Modelo de instabilidade hidrodinâmica (Zuber, 1958): a crise de ebulição resulta da interação de:

- instabilidades de Taylor na interface vapor-líquido, normal ao vetor aceleração da gravidade;
- instabilidades de Helmholtz, na interface vapor-líquido de uma coluna de vapor vertical que serve de via de escape para o vapor.

Limite máximo do fluxo de calor para um sistema operando em regime de ebulição nucleada:

$$q_{\max} = 0,131 \rho_G^{0,5} h_{LG} [\sigma g (\rho_L - \rho_G)]^{1/4}$$

## Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

### Fluxo Crítico de Calor (CHF)

Correlação de *Vishnev* (1974): efeito da orientação da superfície. Se a superfície aquecida está voltada para baixo.

$$\frac{q_{\max}}{q_{CHF,0}} = \frac{(190 - \theta)^{0,5}}{190^{0,5}}$$

$$\theta = 90^\circ \text{ (superfície na vertical)}$$

$$\theta = 180^\circ \text{ (superfície voltada para baixo)}$$

Correlação de *Misale e outros* (2009): efeito de confinamento. Superfícies confinadas horizontais (placas) ( $S$  = efeito da superfície [mm]).

$$q_{\max} = 0,185\psi(S) \left\{ \rho_G^{0,5} h_{LG} [\sigma g (\rho_L - \rho_G)]^{1/4} \right\}$$

$$\psi(S) = \frac{1}{1 + 71,43e^{-1,32S}}$$

## Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

### Modelos de transferência de calor com ebulição convectiva

Processo de transferência de calor de uma superfície aquecida para um fluido em escoamento, com pequenos gradientes de temperatura entre o fluido (temperatura de saturação) e a temperatura da superfície, ocorrendo a mudança de fase do fluido junto da superfície.

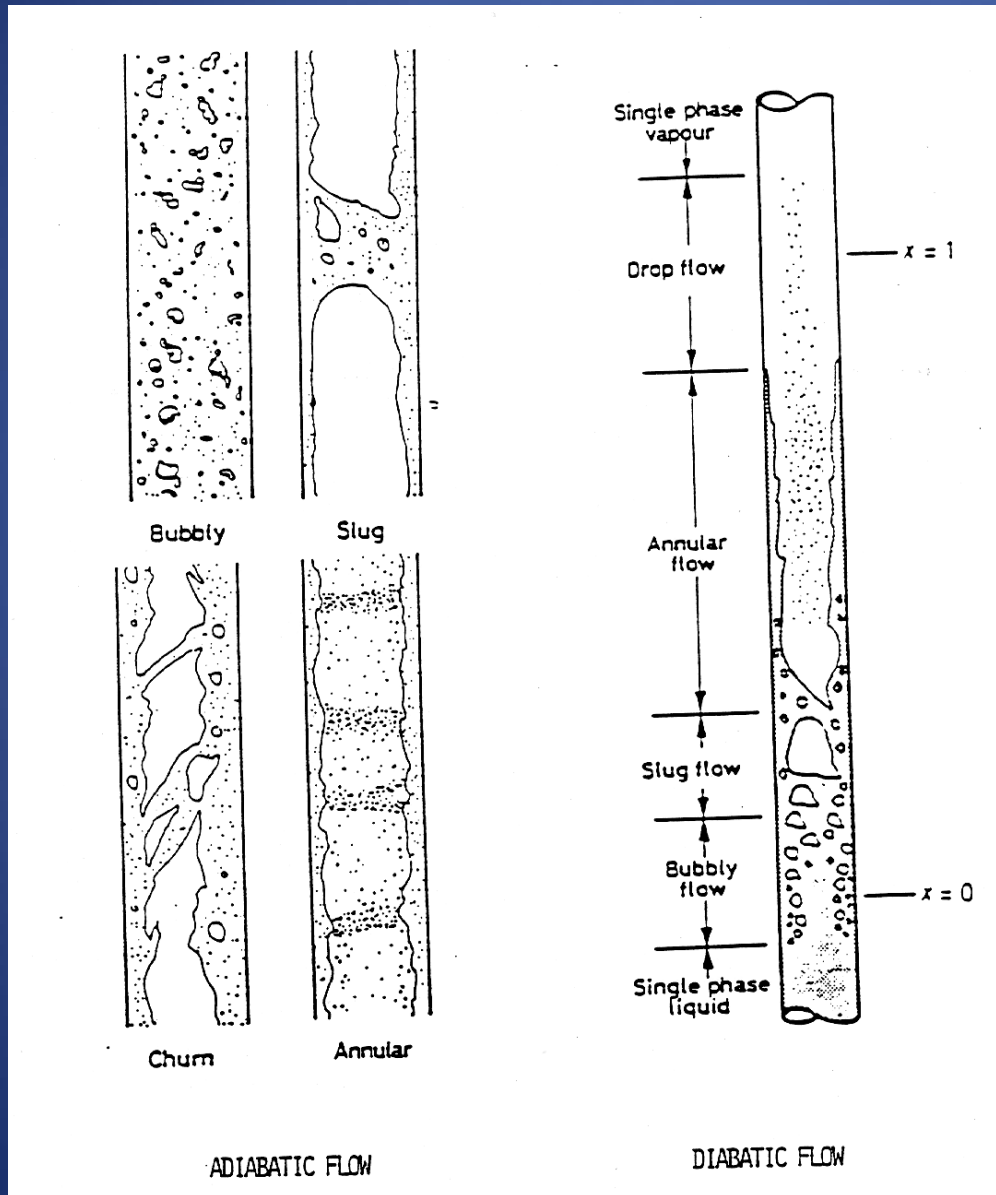
Os processos de ebulição convectiva possibilitam, da mesma forma que na ebulição nucleada, a transferência de elevados fluxos de calor com pequenos diferenciais de temperatura.

A ebulição ocorre na parede do tubo e há uma mudança nos padrões de escoamento em função do aumento de vapor na mistura líquido/vapor.

A abordagem se torna mais complexa em função das diferenças entre as propriedades e da interação entre líquido e do vapor.

# Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

## Modelos de transferência de calor com ebulição convectiva



Formação de padrões de escoamento que afetam o processo de transferência de calor.

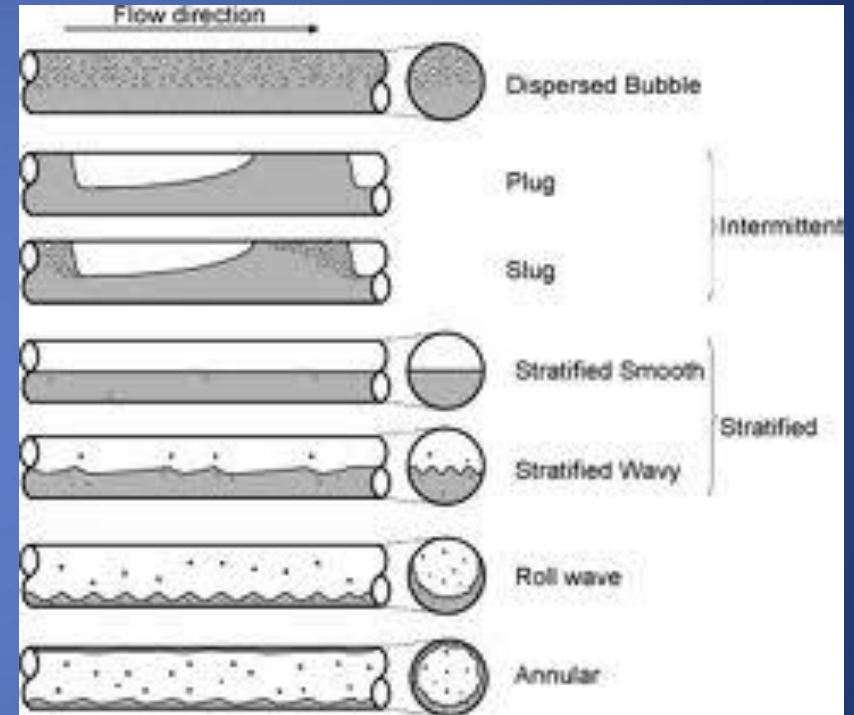
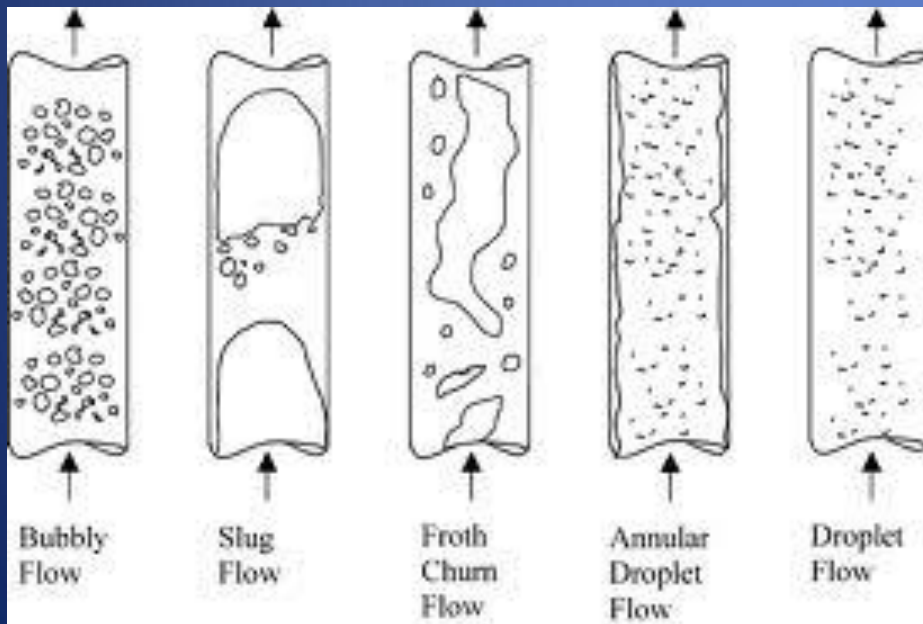
Padrões específicos para orientação vertical e horizontal.

$x$  = título termodinâmico da mistura  
 $x = 0$  (saturação)  
 $x = 1$  (vapor)

# Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

## Padrões de escoamento para escoamento adiabático

### Padrões em tubos verticais



### Padrões em tubos horizontais

## Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

### Modelos de transferência de calor com ebulição convectiva

Aparecimento de uma nova variável que influencia o processo de transferência de calor em cada um dos padrões de escoamento e na determinação da perda de carga: a “fração de vazio ( $\alpha$ )”.

Fração de vazio (*void fraction*) pode ser compreendida como sendo a relação entre o volume de gás (vapor) e o volume total da mistura gás (vapor)/líquido, ou seja:

$$\alpha = \frac{\text{Volume gás}}{\text{Volume mistura}}$$

Os padrões de escoamento podem ser caracterizados pela fração de vazio.

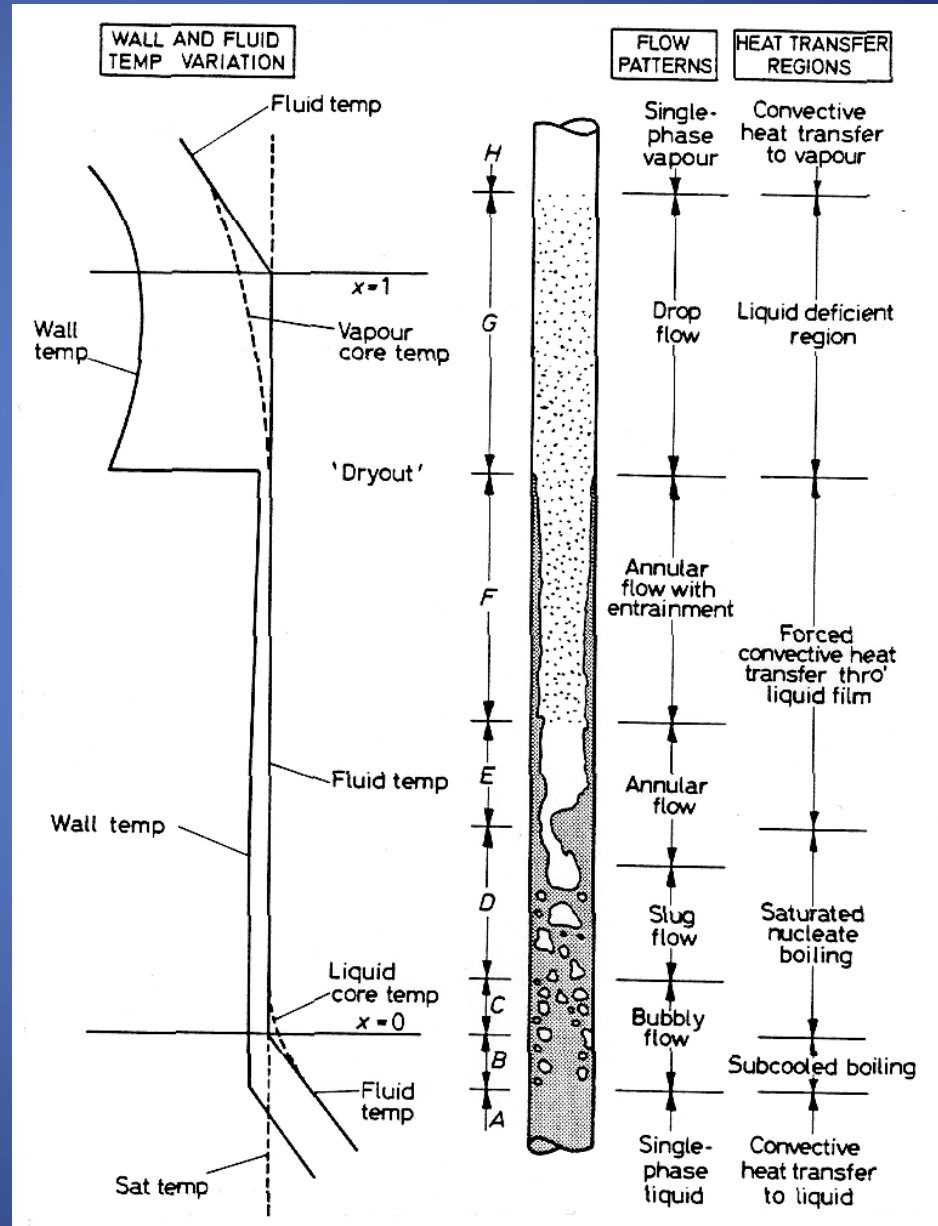


# Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

## Curva de ebulição convectiva



uh.edu



## Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

### Curva de ebulição convectiva:

- escoamento monofásico: líquido próximo da saturação;
- Ebulição subresfriada: líquido na parede está saturado e no núcleo não. Início do aparecimento de bolhas, ONB (não-equilíbrio termodinâmico,  $x < 1$ );
- $x = 0$  e  $\alpha = 0$ ;
- Ebulição nucleada e início do processo de ebulição convectiva;
- Ebulição convectiva em filme;
- *Dryout* ou *Burnout* ou *CHF*: fluxo de calor crítico, máximo fluxo de calor;
- $x = 1$  e  $\alpha = 1$ ;
- escoamento em gotas: últimas gotas de líquido evaporam;
- $x > 1$  (não-equilíbrio termodinâmico).

## Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

Condição necessária para ocorrência da ebulição convectiva:

Correlação de Davis e Anderson (1966)

$$(T_S - T_{sat}) = \left[ \frac{8\sigma T_{sat} q''}{\lambda_{LG} \rho_G k} \right]^{1/2}$$

Sendo  $\lambda_{LG}$  o calor latente de evaporação do líquido.

# Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

## Coeficiente de transferência de calor em ebulição convectiva

### Correlação de Chen (1963):

$$h_B = h_{NB} + h_{CB}$$

$h_B$  = coeficiente global de transferência de calor em ebulição convectiva;

$h_{NB}$  = coeficiente de transferência de calor em ebulição nucleada;

$h_{CB}$  = coeficiente de transferência de calor em ebulição convectiva.

$$h_{NB} = Sh_{FZ}$$

$h_{FZ}$  = Coeficiente de Forster-Zuber

Sendo S um fator de supressão; S varia de 1 a 0 na medida em que o título aumenta.

$$h_{FZ} = \frac{0,00122 \Delta T_{sat}^{0,24} \Delta P_{SAT}^{0,75} C_{pL}^{0,45} \rho_L^{0,49} k_L^{0,79}}{\sigma^{0,5} \lambda^{0,24} \mu_L^{0,29} \rho_G^{0,24}}$$

## Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

### Coeficiente de transferência de calor em ebulição convectiva

Para o termo de convecção convectiva:

$$h_{CB} = Fh_L$$

$h_L$  = coeficiente de transferência de calor em convecção monofásica dado pela equação de Dittus-Boelter;

F = fator multiplicador de transf. Calor em ebulição convectiva (Chen).

$$Nu = 0,23 Re^{0,8} Pr^{0,4}$$

$$Nu = \frac{h_L D}{k_L}$$

$$Re = \frac{G(1-x)D}{\mu_L}$$

$$Pr = \frac{\mu_L C_{pL}}{k_L}$$

## Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

### Fluxo Crítico de Calor em Ebulição Convectiva:

Da mesma maneira que na ebulição em piscina, o ponto de máximo fluxo de calor transferido deve ser bem conhecido e modelado.

O fluxo crítico de calor possui duas características distintas em função das condições em que ocorre:

1 – Numa condição em que o título é baixo (ebulição subresfriada) esse fenômeno possui forte semelhança com o fluxo crítico de calor em ebulição nucleada. Os mecanismos que regem o fenômeno são semelhantes.

2 – Numa condição em que o título é alto o fenômeno possui forte semelhança com o processo de ebulição num regime anular (ebulição em um filme anular de líquido) com a secagem do filme líquido.

## Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

### Fluxo Crítico de Calor em Ebulição Convectiva:

1 – Mecanismos de ebulição convectiva na região de subresfriamento:

- Baixo título e semelhança com ebulição nucleada em piscina;

Hewitt (1978) propõe uma série de mecanismos que regem esse fenômeno;

- Crescimento e desprendimento de pequenas bolhas junto à parede. Isso termina por formar uma camada fina de pequenas bolhas muito compactas que impedem o remolhamento da parede pelo líquido. Esse mecanismo não está claramente explicado;
- Superaquecimento das cavidades. Sugere-se que, para altos fluxos de calor, durante o processo de formação e desprendimento da bolha de vapor no interior da cavidade, há a secagem total da cavidade, impedindo-a de ser remolhada novamente;
- No caso de um tubo horizontal, se há formação de uma bolha alongada e ela vai para a parede superior e chega a tocá-la, o filme intermediário evapora totalmente, impedindo o remolhamento da parede.

## Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

### Fluxo Crítico de Calor em Ebulição Convectiva:

Embora os estudos ainda estejam em desenvolvimento, é provável que os três mecanismos ocorram, sendo que o primeiro seja bastante usual, o segundo ocorra para altos fluxos de calor e o terceiro para escoamento horizontal com baixas vazões.

#### 2 – Mecanismos de ebulição convectiva na região de título alto:

- Observações mostram que o fluxo crítico de calor nessas condições ocorrem para  $x > 10\%$ . Nesta condição o padrão de escoamento é filme anular;
- Efeitos de arrasto de gotículas de líquido pelo vapor, deposição dessa gotículas e evaporação do filme de líquido fazem com que a vazão mássica do filme vá gradualmente tendendo a zero.



## Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

### Fluxo Crítico de Calor em Ebulição Convectiva:

Evidências das influências desses mecanismos foram encontradas por:

- Hewitt e Hall Taylor (1970): experiências feitas com evaporação de filme líquido em tubo vertical com meio poroso drenando o filme. O fluxo crítico de calor foi observado no ponto em que a parede estava totalmente seca.
- Bennett e outros (1967): experiências feitas em tubo vertical com seções de aquecimento discretas ao longo do tubo.
- Modelos físicos do escoamento. Evidências mostradas pelo sucesso dos modelos semiempíricos propostos (Whalley, 1987).

## Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

### Fluxo Crítico de Calor em Ebulição Convectiva:

Correlações propostas com base em análise paramétrica:

Modelo: tubo vertical com fluxo ascendente e fluxo de calor uniforme na parede.

- O fluxo crítico de calor varia linearmente como grau de subresfriamento ( $\Delta h_S$ ), ou seja,  $(h_S - h)$  [J/kg];
- O fluxo crítico de calor aumenta com o fluxo mássico do fluido e com o diâmetro do tubo;
- O fluxo crítico de calor tende a zero com o aumento do comprimento do tubo;
- Para o caso da água o fluxo crítico de calor tende a ocorrer no limite de 70 bar. O mesmo foi observado para ebulição em piscina.

## Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

### Fluxo Crítico de Calor em Ebulição Convectiva:

O balanço de energia para o modelo proposto, fornece:

$$\pi D L_B q''_C = \frac{\pi D^2}{4} G \lambda_{LG} x_C$$

ou

$$L_B q''_C = \frac{D G \lambda_{LG}}{4} x_C$$

Correlação de condição local: o fluxo crítico de calor é função de condições locais.

Exemplo: Correlação de MacBeth (1963).

$$q''_C = A \lambda_{LG} G^{1/2} (1 - x)$$

## Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

### Fluxo Crítico de Calor em Ebulição Convectiva:

Correlação de Bowring (1972) (água):

$$q''_c = \frac{A + B\Delta h_s}{C + L}$$

Sendo A, B, e C, funções de P,  $\lambda$ , D e G. Também pode ser escrita nos termos das condições locais.

Correlação de Groenveld (1982) (água):

$$q''_c = f(p, G, x)$$

Formulada em tabelas envolvendo os parâmetros p, G e x com fatores de correção para D e L.

## Principais Modos de Transferência de Calor com Mudança de Fase

### Fluxo Crítico de Calor em Ebulição Convectiva:

Correlação de Ahmad (1973) (outros fluidos):

$$\left( \frac{q''_c}{G\lambda_{LG}} \right)_{\text{Água}} = \left( \frac{q''_c}{G\lambda_{LG}} \right)_{\text{Fluido}}$$

Com base em grupos adimensionais semelhantes para água e outros fluidos

Correlação de Katto e Ohne (1984) (outros fluidos): contempla os efeitos de subresfriamento.

$$\frac{q''_c}{G\lambda_{LG}} = X + XK \frac{\Delta_s}{\lambda_{LG}}$$

com

$$X, K = f\left( \frac{L}{D}, \frac{\rho_L}{\rho_G}, \frac{\sigma\rho_L}{G^2 L} \right)$$