

# **TRANSMISSÃO DE CALOR II**

**Prof. Eduardo C. M. Loureiro, DSc.**

# EBULIÇÃO E CONDENSAÇÃO

## PARÂMETROS ADIMENSIONAIS NA EBULIÇÃO E CONDENSAÇÃO

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

O coeficiente convectivo,  $h$ , depende de :

$\Delta T =  T_s - T_{sat} $	diferença entre as temperaturas na superfície sólida e de saturação
$g(\rho_l - \rho_v)$	força de empuxo originada da diferença entre as densidades das fases líquida e vapor;
$h_{fg}$	calor latente de vaporização;
$\sigma$	tensão superficial;
$L$	um comprimento característico;
$\rho$	massa específica do líquido ou do vapor;
$c_p$	calor específico;
$k$	condutividade térmica;
$\mu$	viscosidade.

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



# EBULIÇÃO E CONDENSAÇÃO

## PARÂMETROS ADIMENSIONAIS NA EBULIÇÃO E CONDENSAÇÃO

O coeficiente convectivo,  $h$ , depende de :

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

Da análise dimensional:

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

ou:

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

onde:

$Nu = Nusselt$

$Ja = Jakob$

$Pr = Prandtl$

$Bo = Bond$



# EBULIÇÃO

## MODOS DE EBULIÇÃO

Quando a vaporização ocorre em uma interface sólido-líquido é chamada de **ebulição**.

Ocorre quando a temperatura da superfície sólida é superior à temperatura de saturação correspondente à pressão no líquido.

Calor é transferido da superfície sólida para o líquido:

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

excesso de temperatura

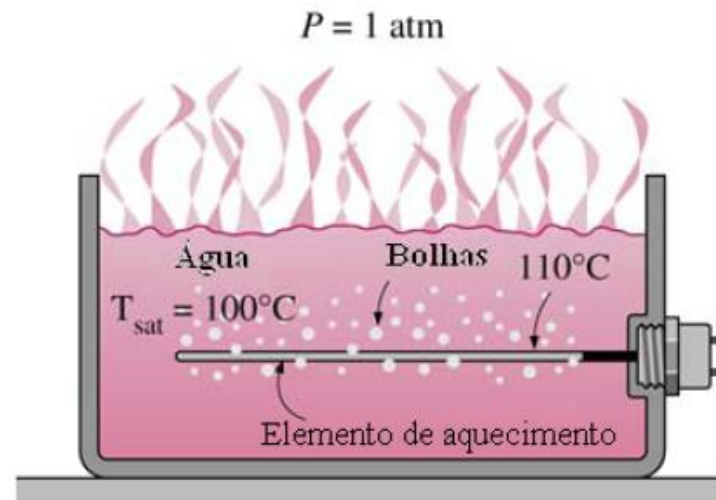
A ebulição caracteriza-se pela formação de bolhas que crescem e se desprendem da superfície. O crescimento e a dinâmica das bolhas de vapor dependem, **de forma complicada**, do excesso de temperatura, da natureza da superfície e de propriedades termofísicas do fluido. A dinâmica da formação de bolhas afeta o movimento do líquido próximo à superfície influenciando o coeficiente de transferência de calor.



# EBULIÇÃO

## MODOS DE EBULIÇÃO

Por exemplo, a 1 atm a água líquida em contato com uma superfície sólida a  $110^{\circ}\text{C}$  irá entrar em ebulição, pois a temperatura de saturação da água a 1 atm é  $100^{\circ}\text{C}$ . O processo de ebulição é caracterizado pela rápida formação de bolhas de vapor na interface sólido-líquido, que se descolam da superfície quando atingem um certo tamanho e tentam subir à superfície livre do líquido. É um fenômeno complicado devido ao grande número de variáveis envolvidas no processo e aos padrões complexos do movimento do fluido causado pela formação e crescimento das bolhas.

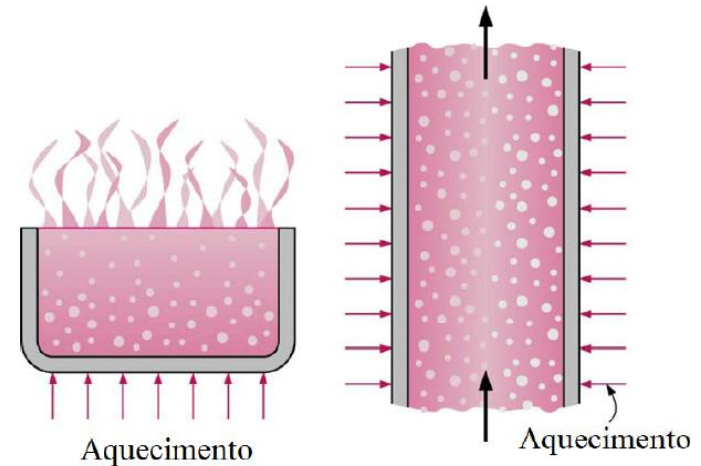


# EBULIÇÃO

## MODOS DE EBULIÇÃO

Na *ebulição em piscina* o líquido encontra-se quieto e o movimento próximo à superfície sólida é devido à convecção natural e à mistura induzida pelo surgimento e movimentação das bolhas de vapor.

Na *ebulição com convecção forçada*, ou ebulição de fluxo, o líquido é forçado a deslocar-se num tubo ou sobre uma superfície sólida por meios externos, tal como uma bomba.



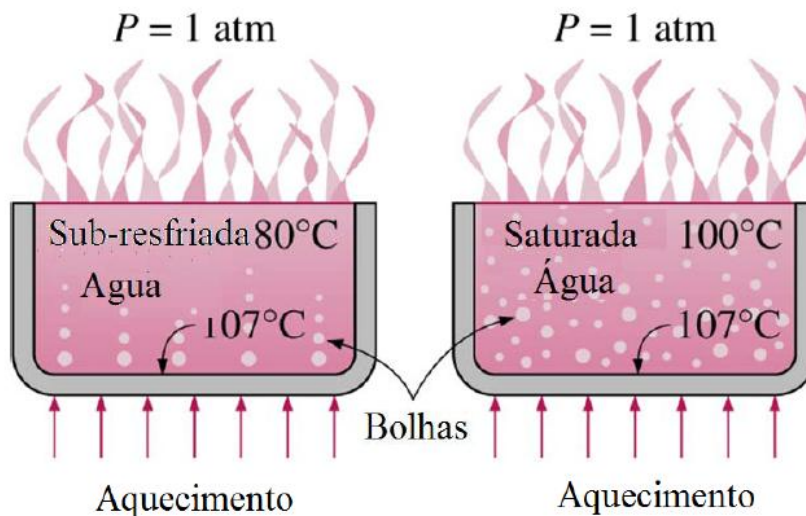
# EBULIÇÃO

## MODOS DE EBULIÇÃO

A ebulição pode ser ainda *sub-resfriada* ou *saturada*.

Na ebulição *sub-resfriada* a temperatura do líquido encontra-se abaixo da temperatura de saturação e as bolhas formadas na superfície sólida podem se condensar no líquido.

Na *ebulição saturada* a temperatura do líquido excede ligeiramente a temperatura de saturação. As bolhas formadas são então impelidas através do líquido pelas forças de empuxo, terminando por aflorar à superfície livre.



(a) Ebulição subresfriada (b) Ebulição saturada

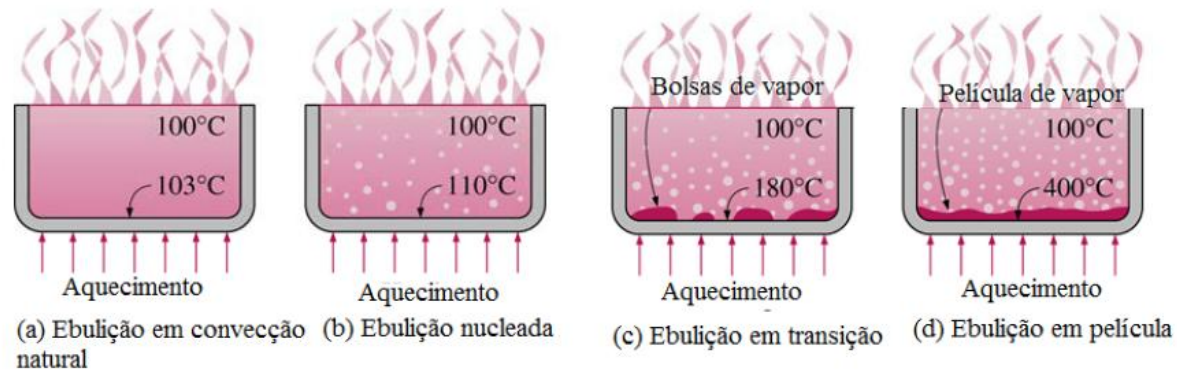


# EBULIÇÃO

## A CURVA DE EBULIÇÃO

A ebulição toma diferentes formas dependendo do excesso de temperatura. Existem quatro diferentes regimes de ebulição:

1. Ebulição com convecção natural
2. Ebulição nucleada
3. Ebulição de transição
4. Ebulição em película.



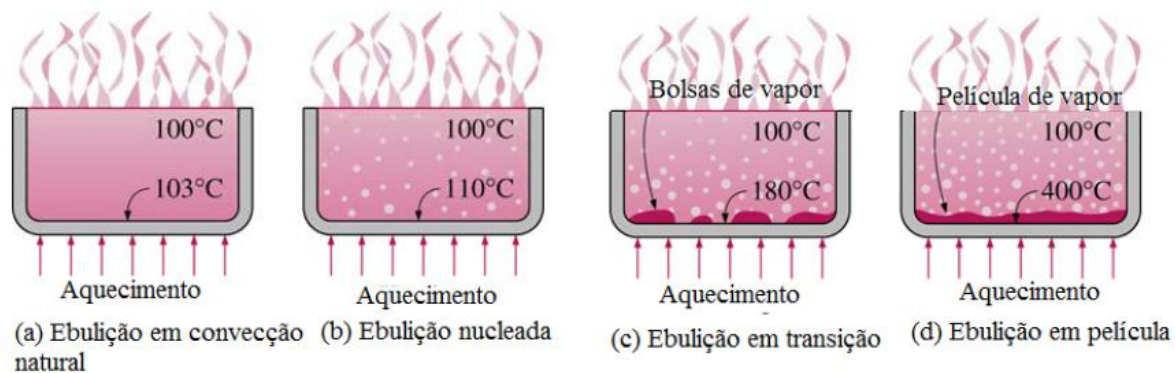
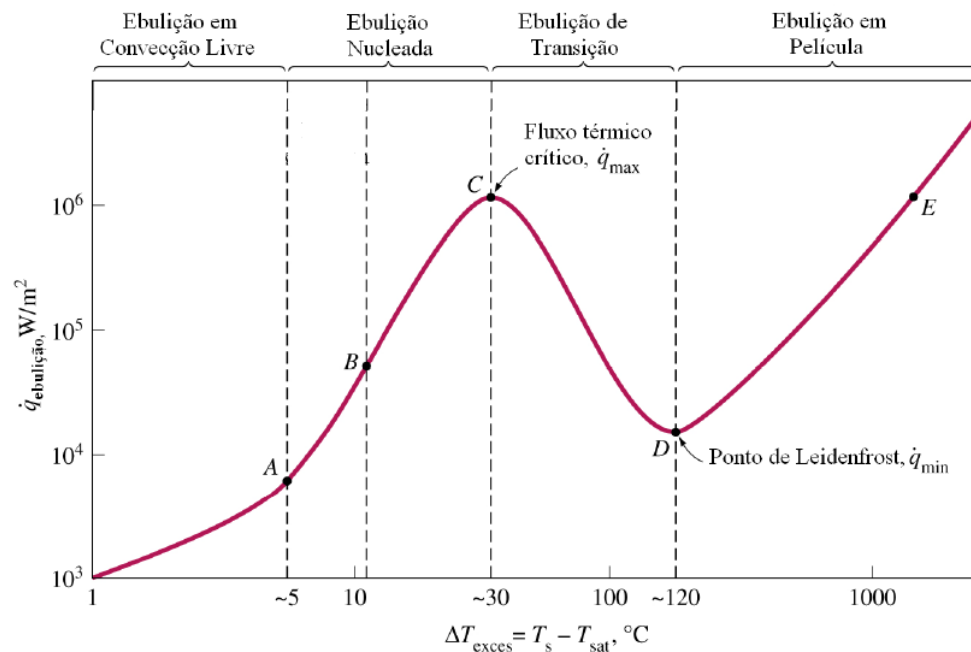


# EBULIÇÃO

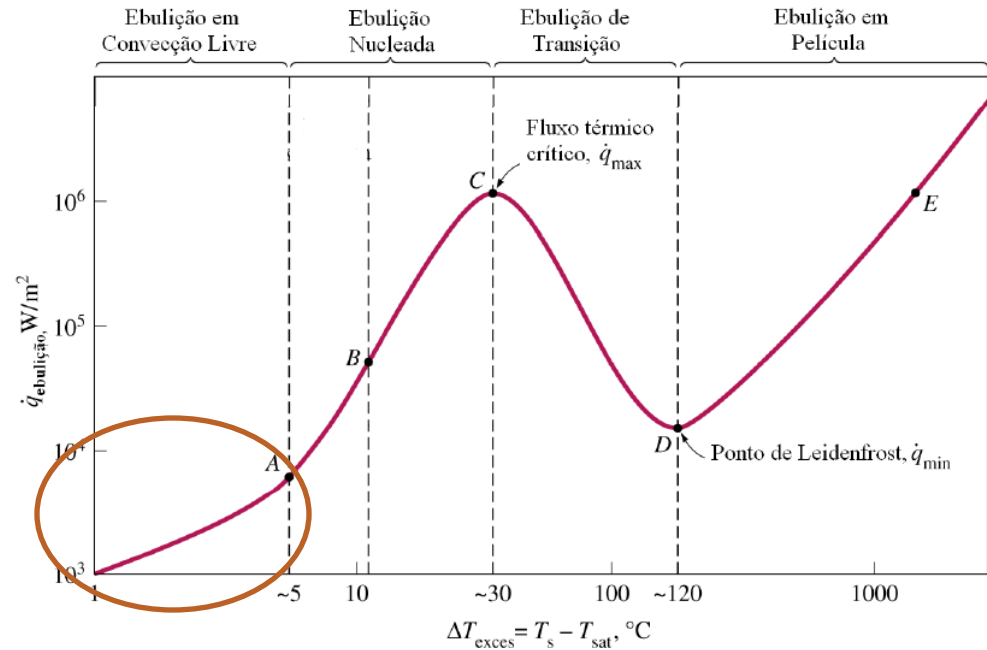
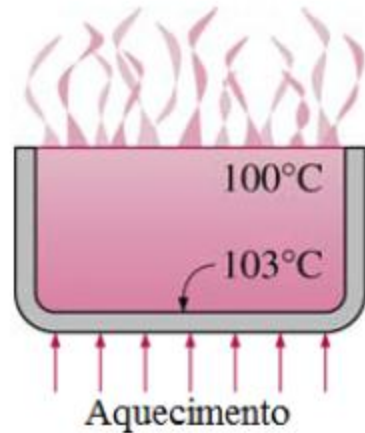
## A CURVA DE EBULIÇÃO

Os diferentes regimes estão identificados na curva de ebulição de acordo com o valor do excesso de temperatura.

A figura mostra a curva de ebulição para água a 1 atm.



# EBULIÇÃO

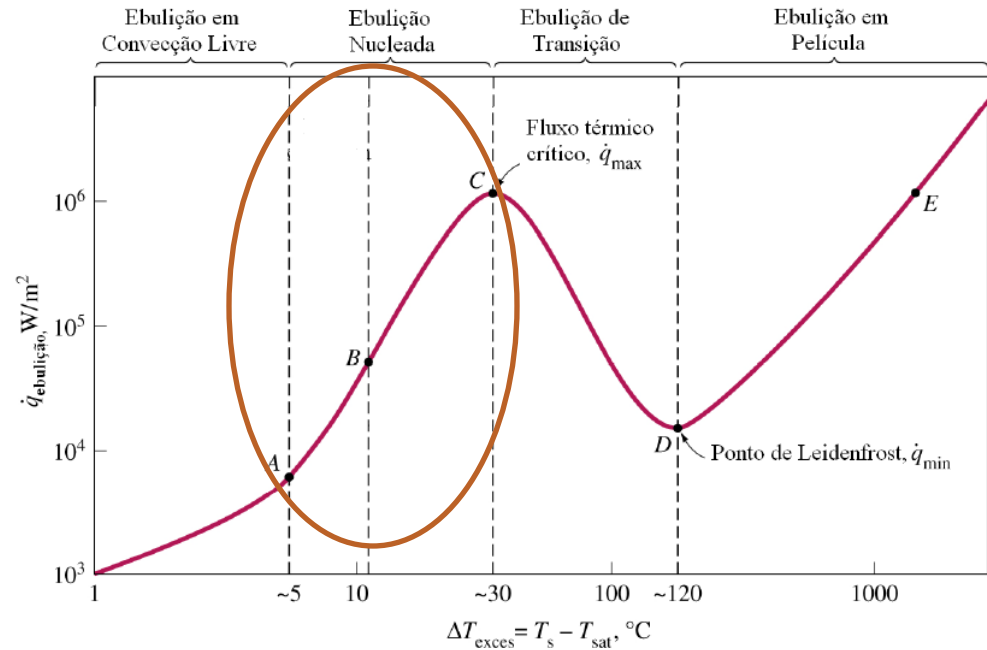
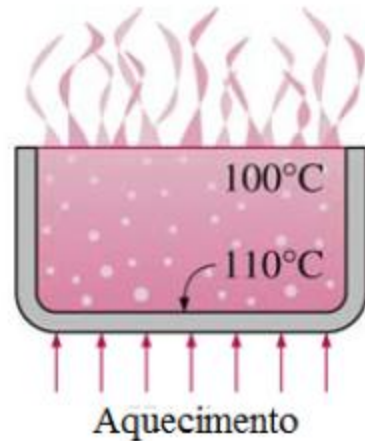


## EBULIÇÃO COM CONVECÇÃO NATURAL

A temperatura da superfície sólida deve estar um pouco acima da temperatura de saturação para garantir a formação de bolhas. À medida que o excesso de temperatura é aumentado, o início da formação de bolhas acabará acontecendo, mas abaixo do ponto A, na curva, o movimento do fluido é determinado pelos efeitos da convecção livre.



# EBULIÇÃO



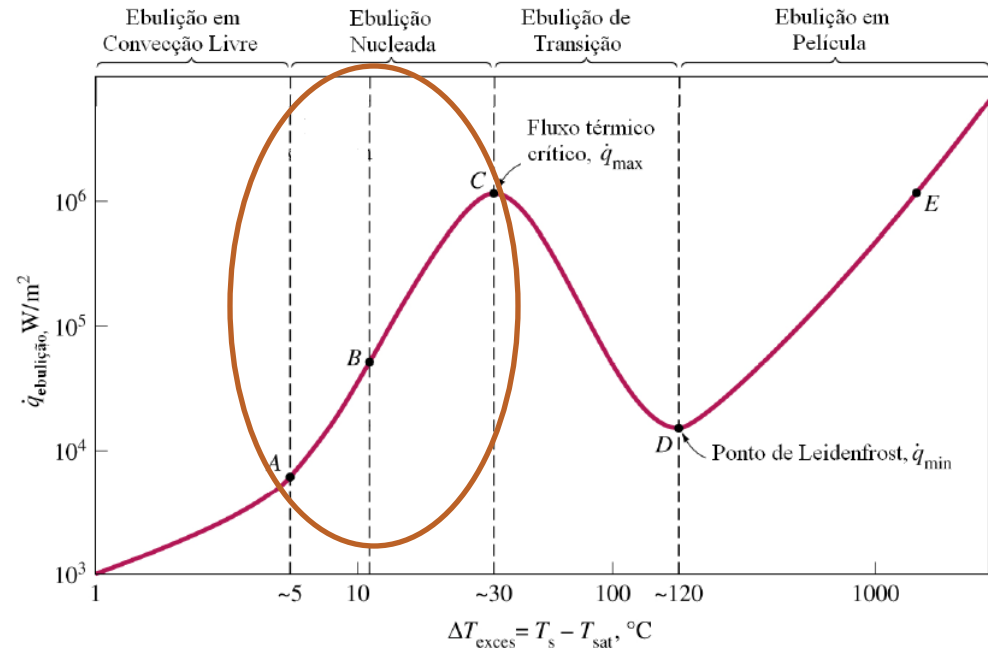
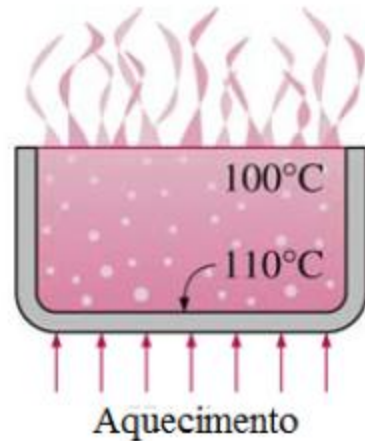
## EBULIÇÃO NUCLEADA

Existe no intervalo em destaque na figura (A – C). Podem ser diferenciados dois regimes de escoamento diferentes. Até o ponto B, *bolhas isoladas* se formam nos lugares de nucleação e se desprendem da superfície sólida. Este desprendimento induz uma considerável mistura no fluido próximo à superfície sólida, aumentando substancialmente  $h$  e  $q_s''$ .

Neste regime a maior parte de troca de calor se dá por transferência direta da superfície sólida para o líquido em movimento sobre ela e não através das bolhas de vapor ascendendo à superfície livre.



# EBULIÇÃO



## EBULIÇÃO NUCLEADA

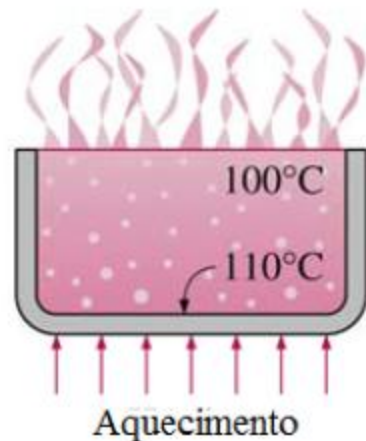
Quando  $\Delta T$  ultrapassa os  $10^\circ\text{C}$ , mais pontos de nucleação se tornam ativos e a maior formação de bolhas causa a interferência e coalescência entre elas. Nesta região (B – C) o vapor ascende como jatos ou colunas de bolhas que logo se unem para formar bolsões de vapor. A interferência entre as bolhas densamente aglomeradas inibe o movimento do líquido próximo à superfície sólida.

O fluxo térmico máximo também chamado de **fluxo térmico crítico** para água a 1 atm é superior a  $1 \text{ MW/m}^2$ .

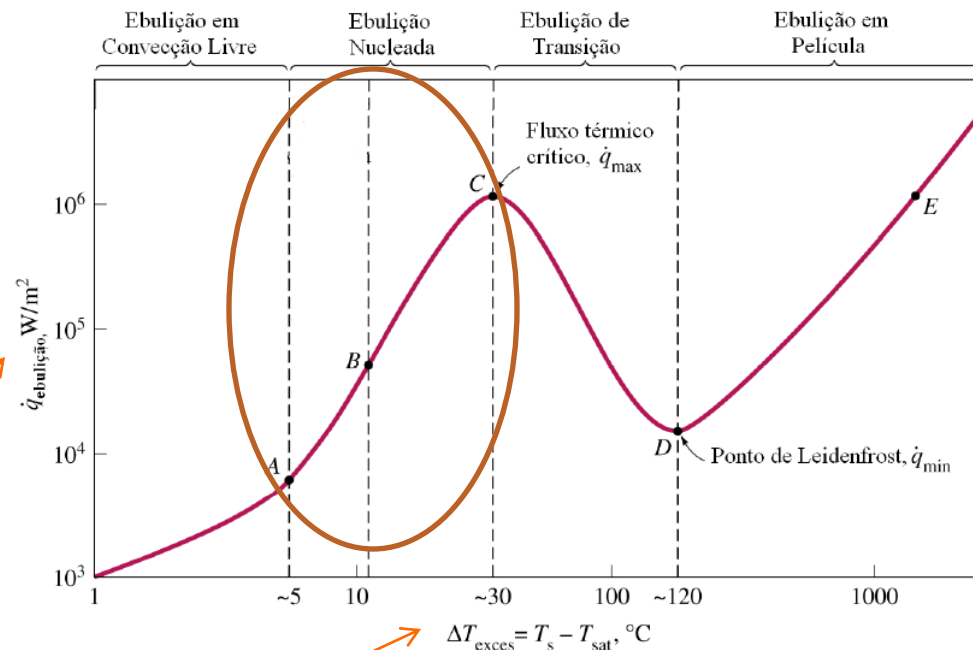
No ponto deste máximo, uma quantidade considerável de vapor está sendo formada, tornando difícil para o líquido molhar continuamente a superfície sólida.



# EBULIÇÃO



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

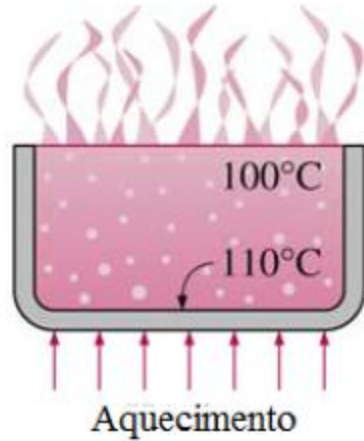


## EBULIÇÃO NUCLEADA

Como elevadas taxas de troca de calor e coeficientes convectivos estão associados a pequenos valores do excesso de temperatura, é desejável operar muitos equipamentos no regime de ebulição nucleada.

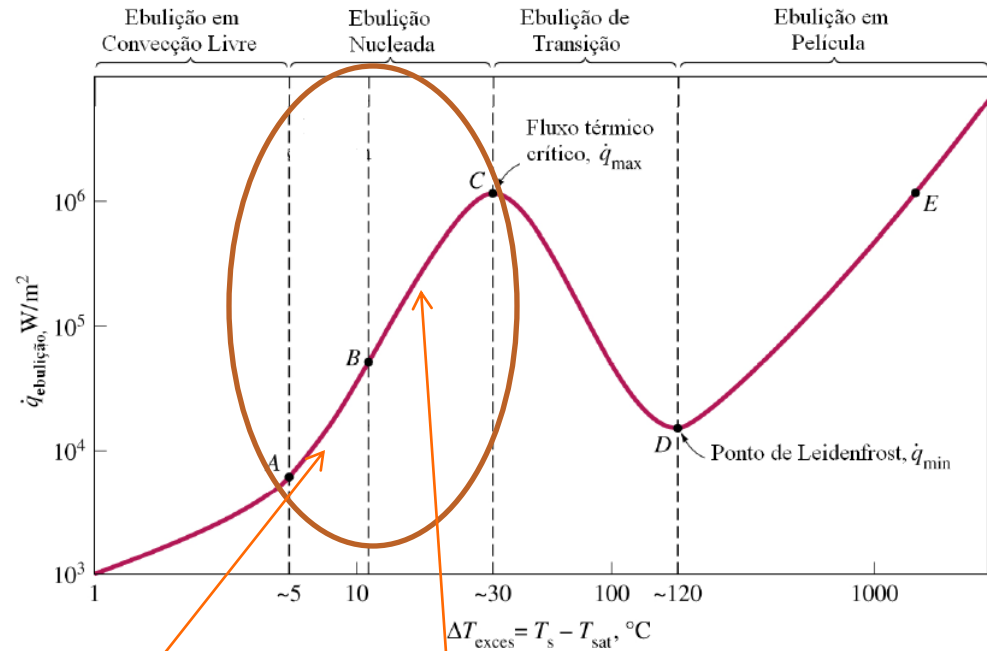
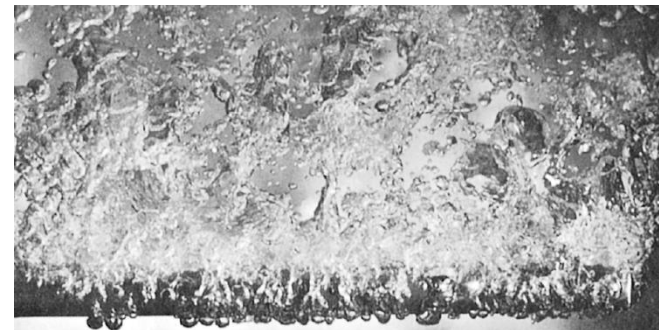
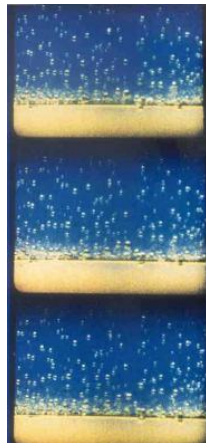
Dividindo o fluxo térmico pelo excesso de temperatura, fica claro que coeficientes convectivos superiores a  $10^4$   $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$  são característicos desta região. Esses valores são bem maiores do que aqueles dos processos convectivos sem mudança de fase.

# EBULIÇÃO

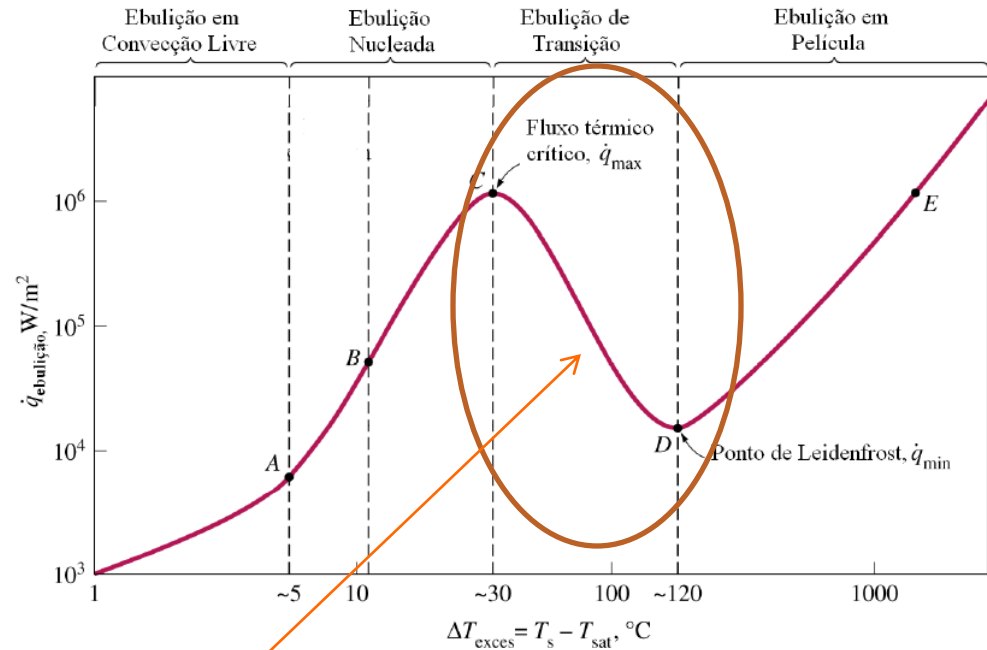


$$q_s'' = h(T_s - T_{sup}) = h\Delta T_e$$

## EBULIÇÃO NUCLEADA



# EBULIÇÃO



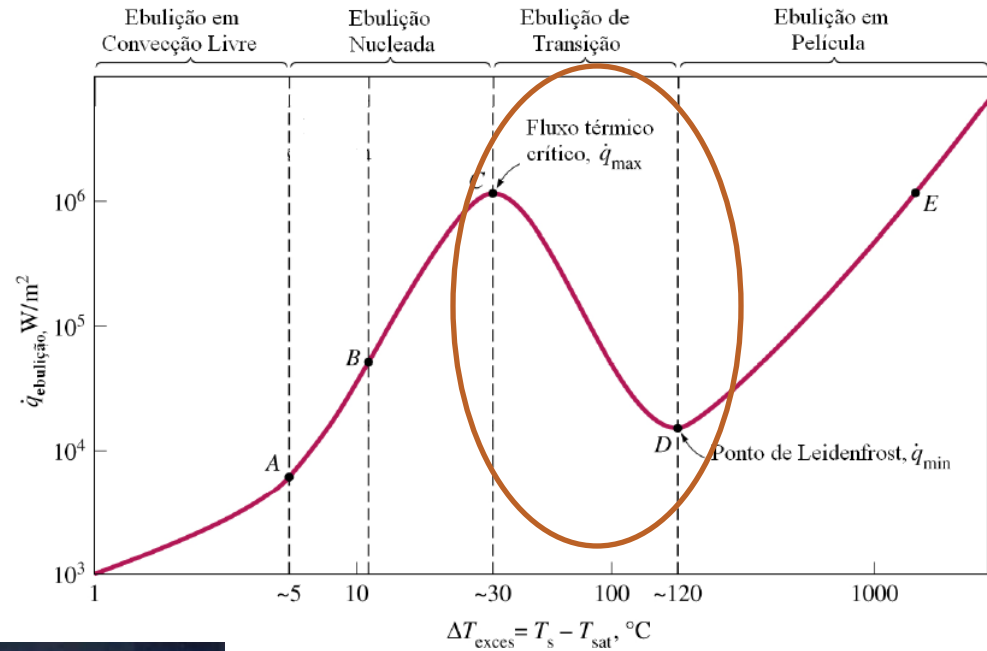
## EBULIÇÃO NO REGIME DE TRANSIÇÃO

A região em destaque na figura é conhecida como região de ebulição no regime de transição, ebulição em filme instável ou ebulição em filme parcial. Agora a formação das bolhas é tão rápida que um filme ou manta de vapor começa a se formar sobre a superfície sólida.

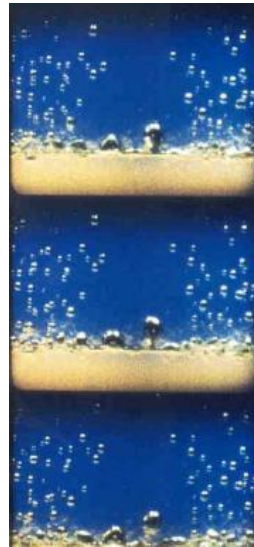
Em qualquer ponto sobre a superfície sólida as condições oscilam entre a ebulição em filme e a ebulição nucleada, mas a superfície total coberta pelo filme de vapor aumenta com o aumento do excesso de temperatura. Como a condutividade térmica do vapor é muito menor que a do líquido, o coeficiente  $h$  e o fluxo de calor diminuem com o aumento do excesso de temperatura.



# EBULIÇÃO

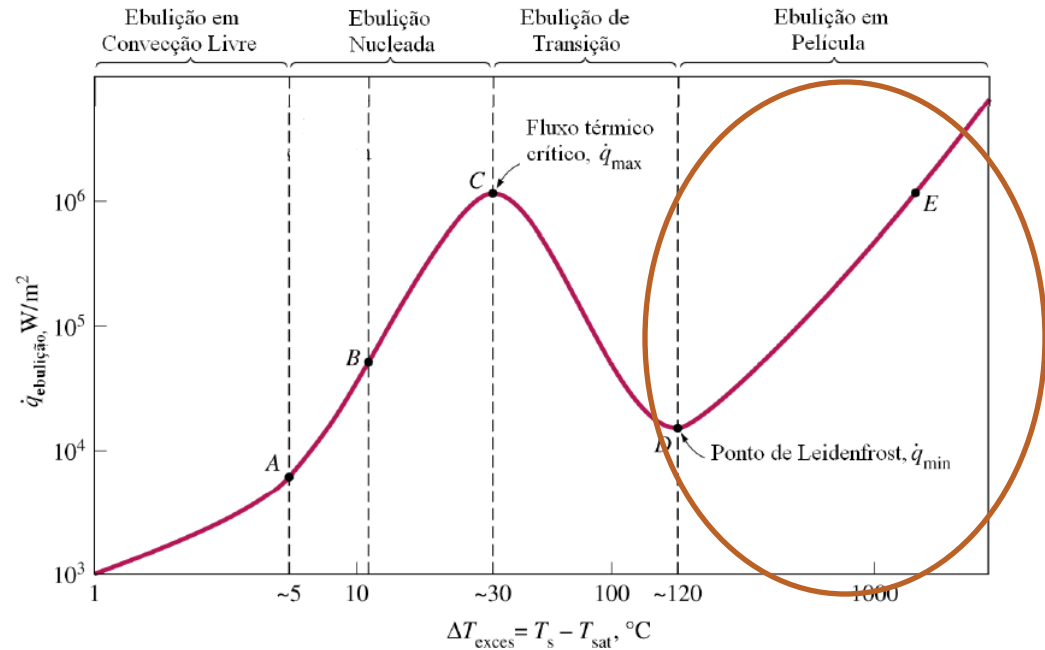
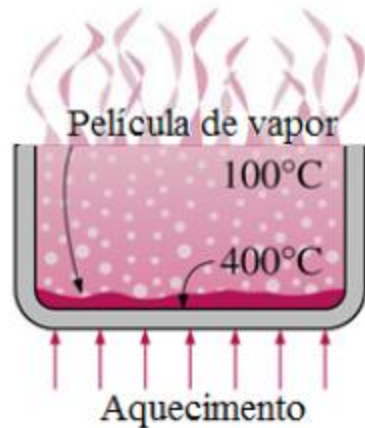


## EBULIÇÃO NO REGIME DE TRANSIÇÃO





# EBULIÇÃO



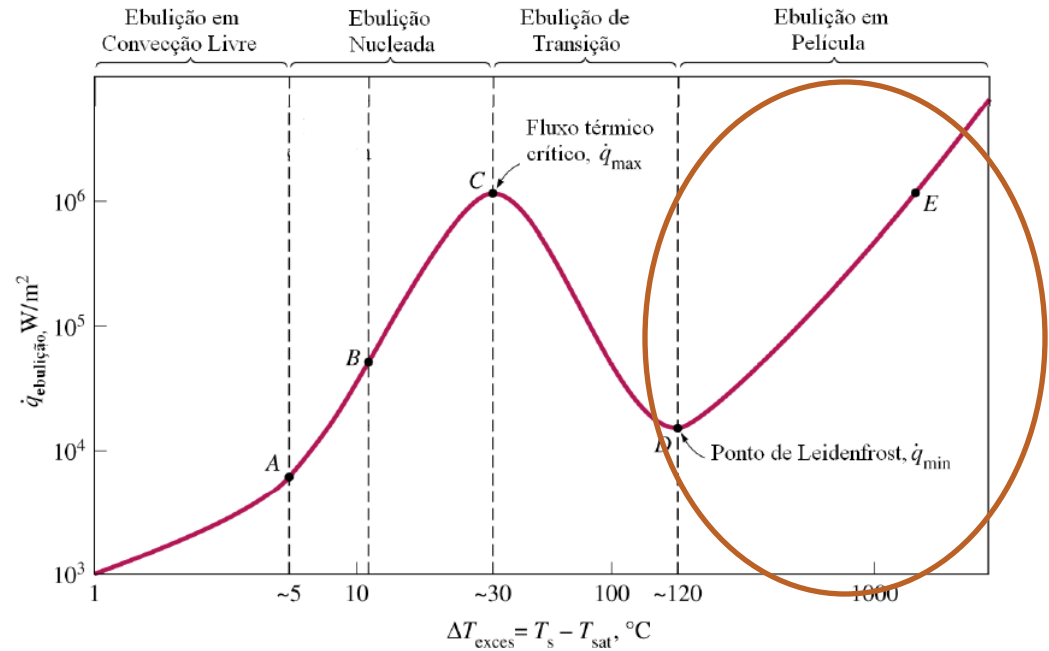
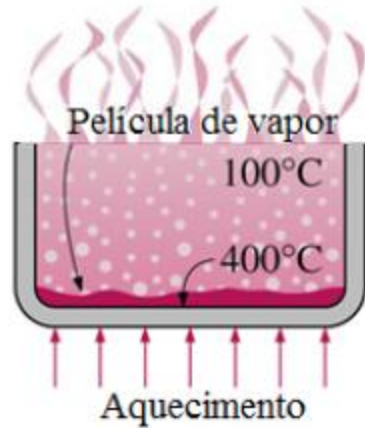
## EBULIÇÃO EM FILME (OU EM PELÍCULA)

No caso da água a 1 atm, a ebulição em película acontece quando o excesso de temperatura é superior a 120°C. No ponto D o fluxo térmico atinge um mínimo e a superfície sólida está coberta por uma manta de vapor. A transferência de calor da superfície sólida para o líquido acontece por condução e por radiação através do vapor.

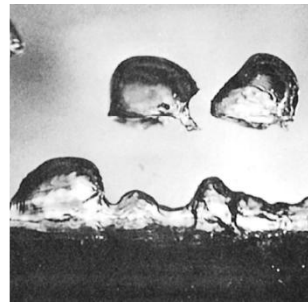
Foi Leidenfrost que, em 1756, observou que gotículas de água sustentadas pelo filme de vapor evaporam lentamente ao se moverem ao longo de uma chapa quente.

À medida que a temperatura da superfície é aumentada, a radiação através do filme de vapor se torna significativa e o fluxo térmico volta a aumentar com o aumento do excesso de temperatura.

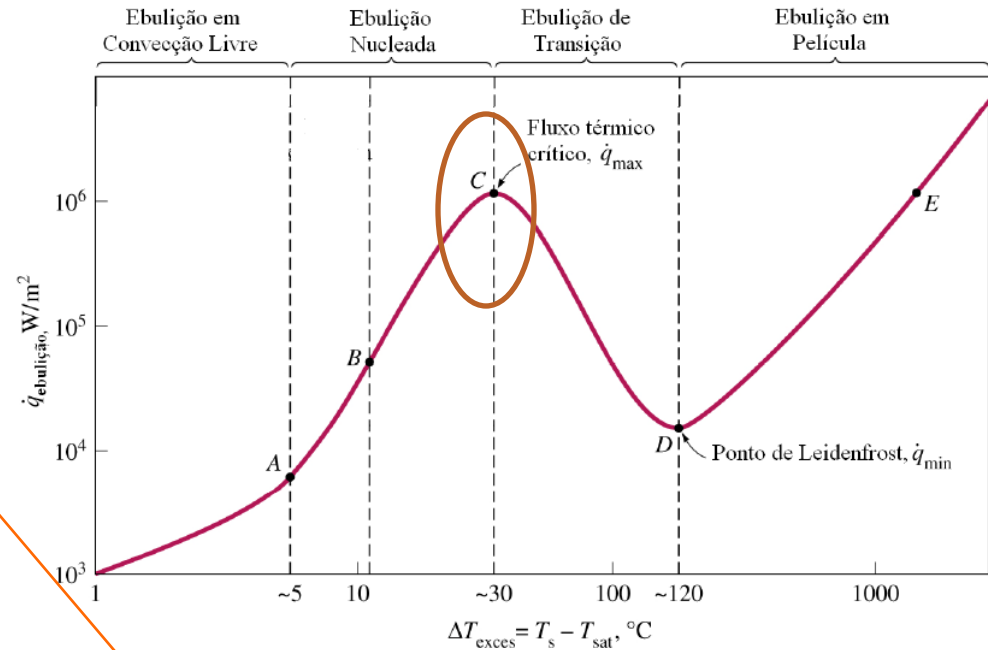
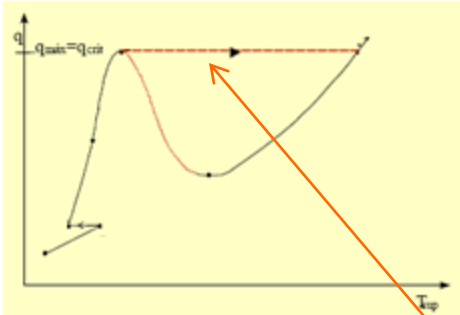
# EBULIÇÃO



## EBULIÇÃO EM FILME (OU EM PELÍCULA)



# EBULIÇÃO



## FLUXO TÉRMICO CRÍTICO

Aumentando o excesso de temperatura (e assim aumentando  $T_s$ ) o fluxo de calor aumenta seguindo a curva de ebulição até o ponto C. Qualquer aumento no fluxo térmico além do ponto C pode produzir um afastamento marcante da curva de ebulição, onde as condições na superfície sólida podem mudar abruptamente de  $\Delta T_{e,C}$  para  $\Delta T_{e,E} = T_{s,E} - T_{sat}$ . Como a temperatura da superfície sólida em E ( $T_{s,E}$ ) pode exceder o ponto de fusão do sólido, pode ocorrer a destruição ou a fadiga do sistema.

Por este motivo, o ponto C é chamado de *ponto de queima* ou de *crise de ebulição*, e o conhecimento preciso do *fluxo térmico crítico* é importante.

Nós podemos desejar operar uma superfície de transferência de calor em condições próximas a esse valor, mas raramente desejaremos ultrapassá-lo.