



Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Engenharia Mecânica



FUNDAMENTOS DA EBULIÇÃO

Júlio César Passos

jpassos@emc.ufsc.br



Parte 1

A CURVA DE EBULIÇÃO



Sumário

Motivação

Dados históricos

A curva de ebulição

O experimento de Nukiyama

Visualização

Correlações para o h

Ebulição em convecção forçada

Ebulição convectiva em mini-canais

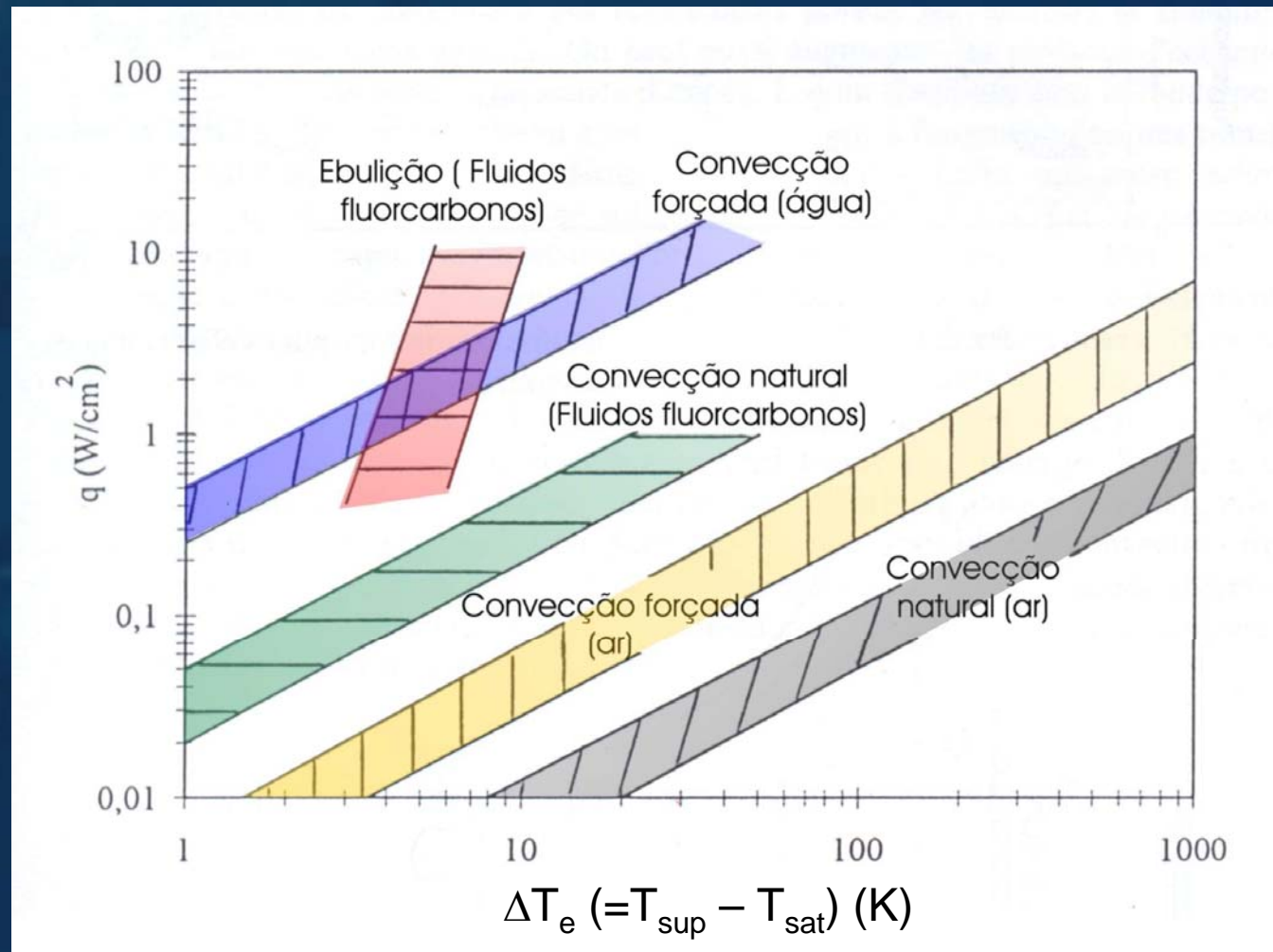
MOTIVAÇÃO (1)

Os processos de ebulição nucleada permitem transferir elevados fluxos de calor com baixas diferenças de temperatura ($T_p - T_{sat}$).

Aplicações

- Refrigeração e condicionamento de ar
- Aplicações que exijam evaporadores compactos
- Controle térmico em geral (ex. TGV, na França)
- Análise de segurança em reatores nucleares
- Ferramenta de apoio à inovação tecnológica

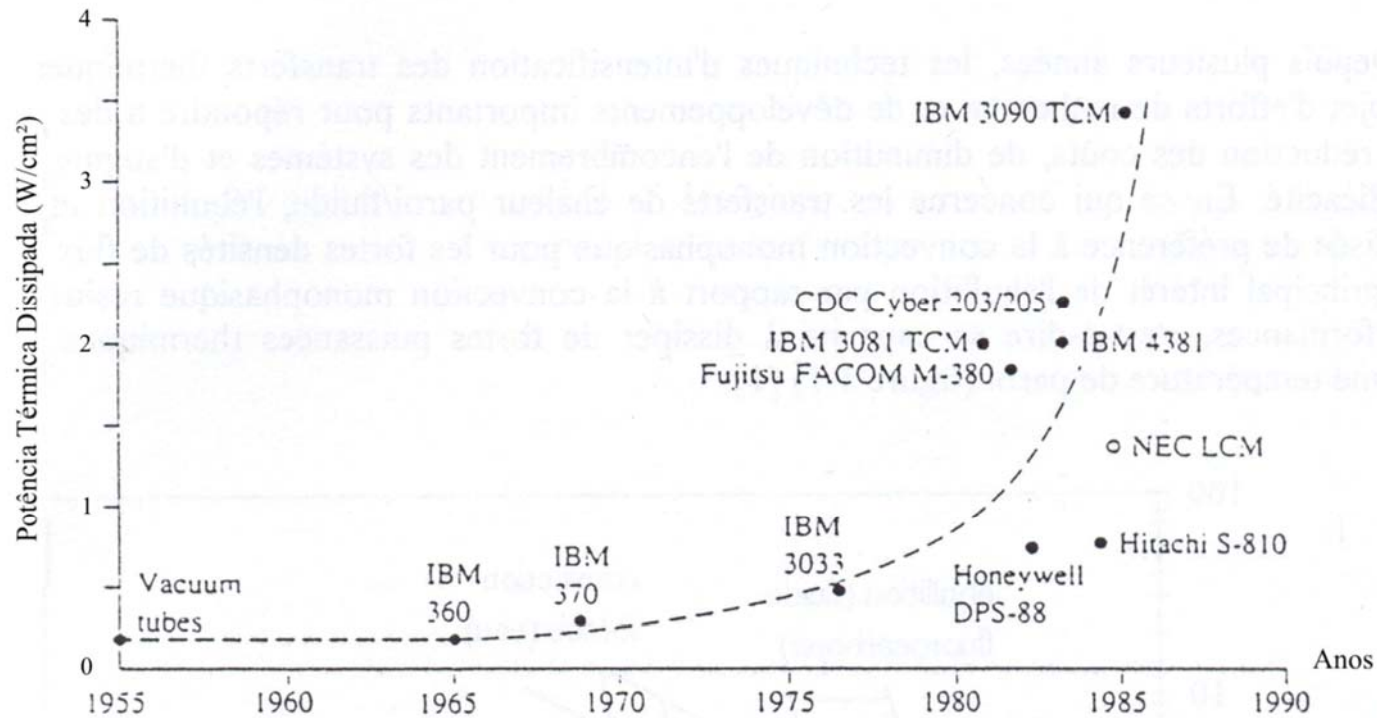
MOTIVAÇÃO (2)



A ebulição possibilita elevados fluxos de calor com pequenos ΔT_e

MOTIVAÇÃO (3)

Demanda crescente do fluxo de calor a ser dissipado



Dados Históricos

LEIDENFROST (Alemanha - 1756)

registra as suas observações sobre o comportamento de uma gota d'água cuja vaporização é retardada devido a um "colchão de vapor", que a mantém "isolada" da chapa aquecida.

JAKOB e FRITZ (Alemanha - 1931)

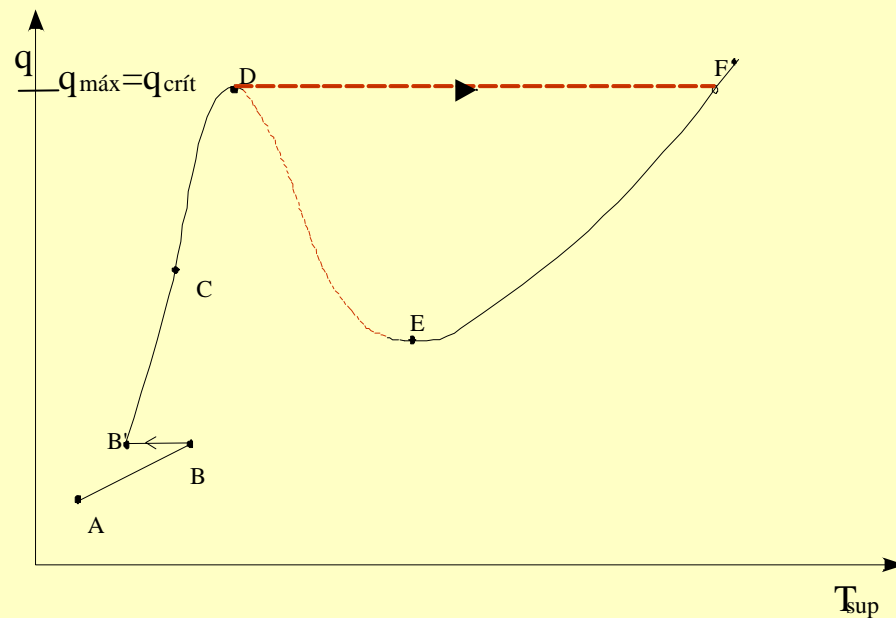
realizam os primeiros estudos sobre o efeito da rugosidade sobre o coeficiente de transferência de calor

NUKIYAMA (Japão - 1934)

apresenta a curva de ebulição e infere a existência do regime de ebulição de transição.

A CURVA DE EBULIÇÃO

Fluxo de calor imposto

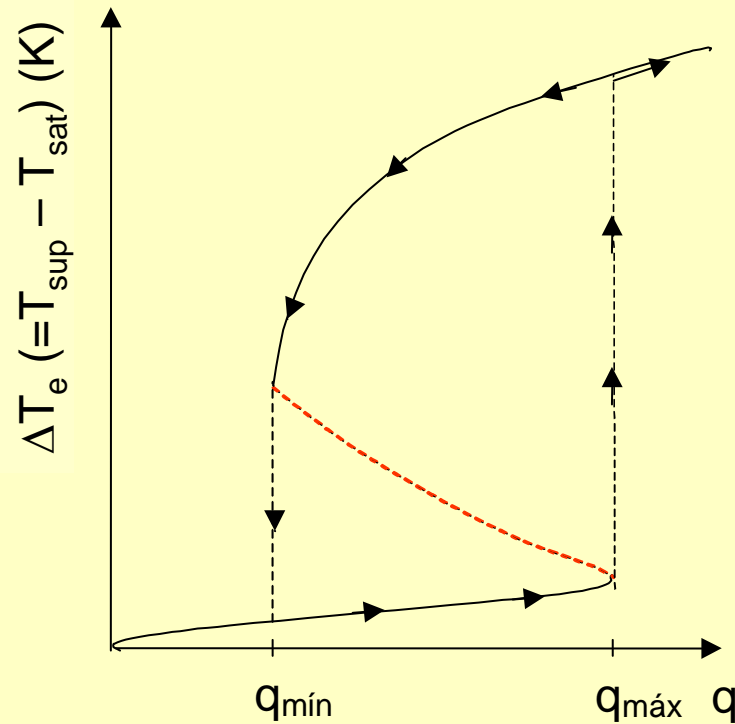


- AB - Convecção natural
- B'D - Ebulição nucleada
- EF - Ebulição em película
- DE - Regime de transição
- DF - Crise de ebulição

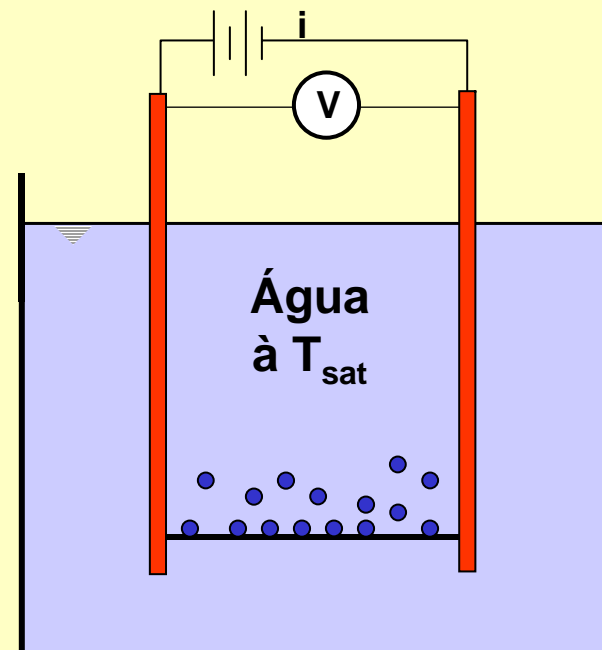
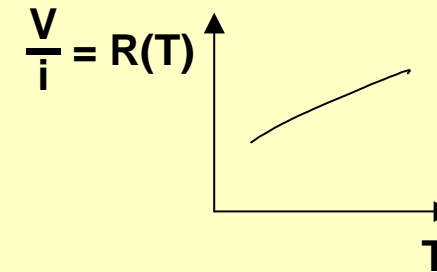
Curva de Nukiyama

A CURVA DE EBULIÇÃO

O Experimento de Nukiyama (1934)



ebulição em "piscina"

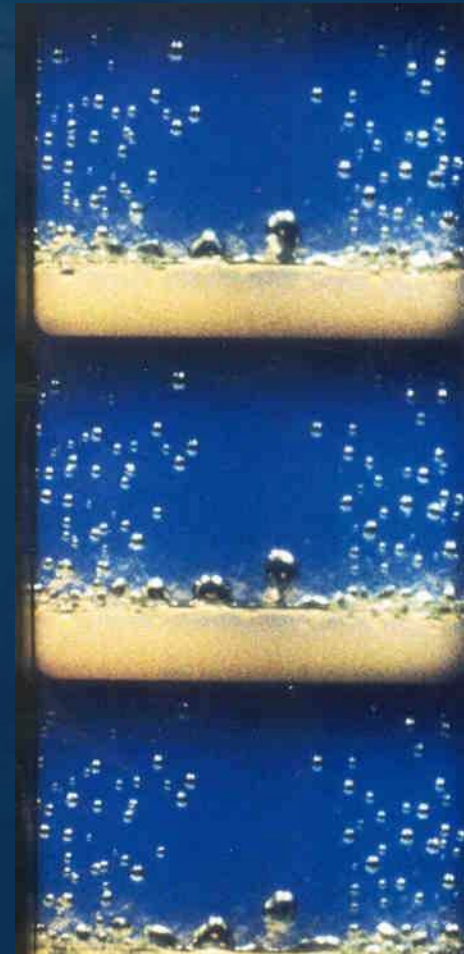


VISUALIZAÇÃO (1)

Ebulição
Nucleada



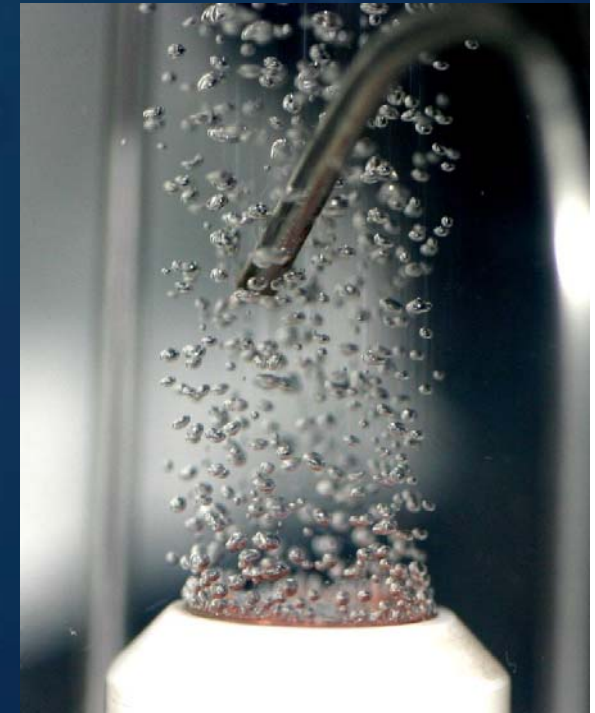
Ebulição de
Transição



Imagens extraídas do filme: "Les mécanismes de l'ébullition", com autorização do SFS-França

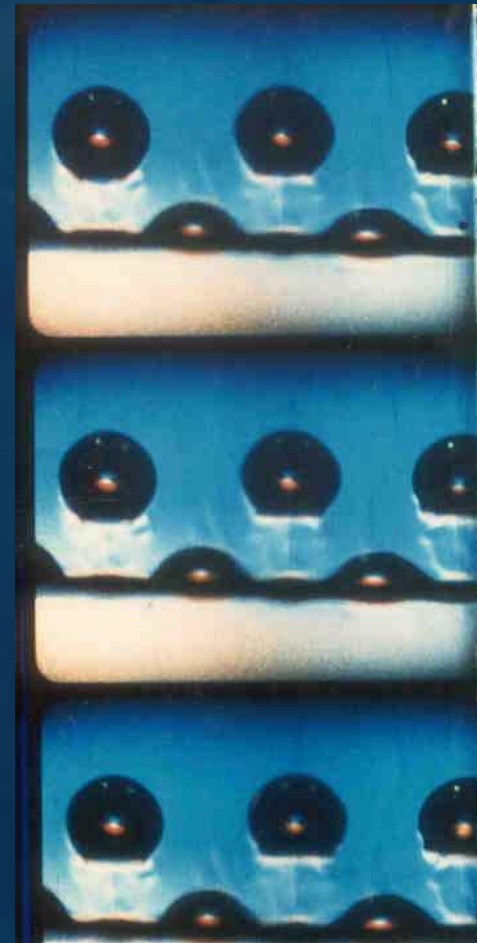
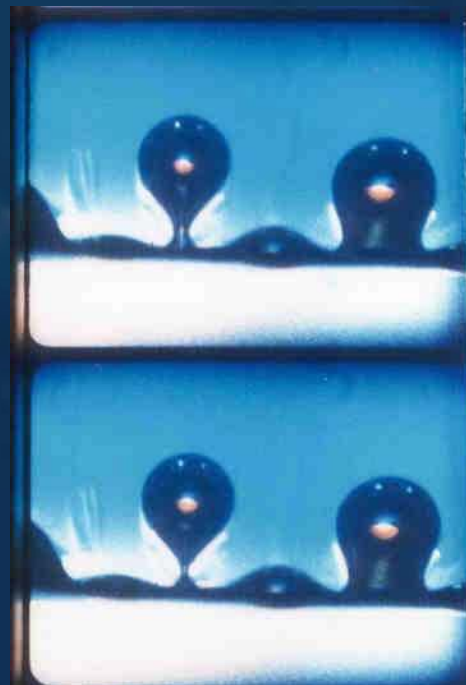
VISUALIZAÇÃO (2)

Regime de ebulição nucleada sobre disco de cobre



VISUALIZAÇÃO (3)

Ebulição
em Película

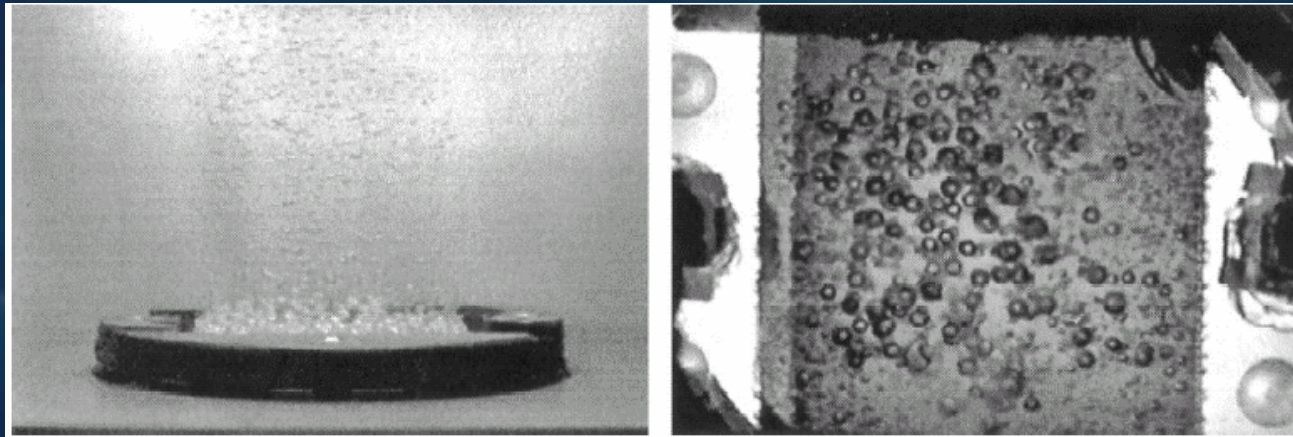


Instabilidades
de Taylor

Imagens extraídas do filme: “Les mécanismes de l’ébullition”, com autorização do SFS-França

VISUALIZAÇÃO (3)

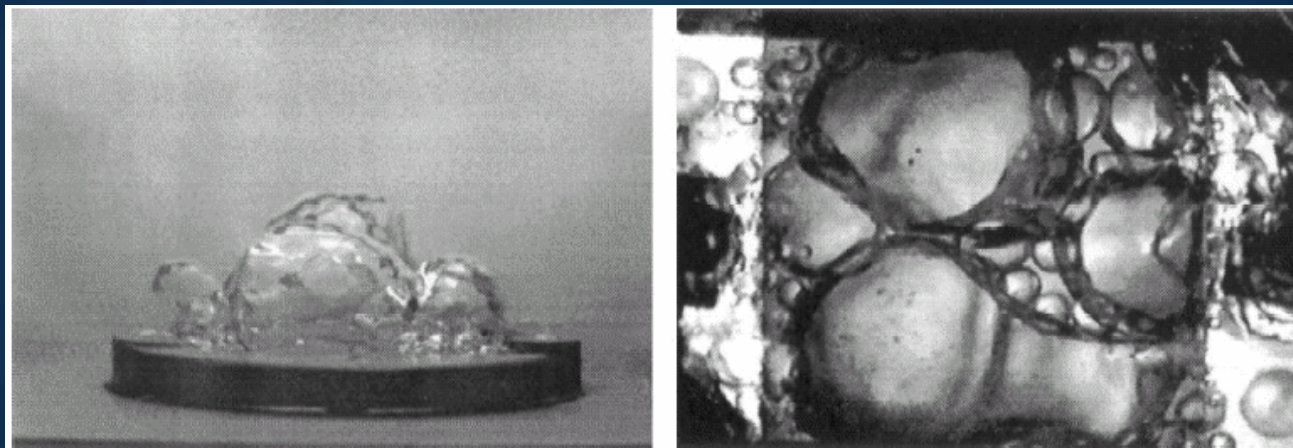
Efeito da aceleração da gravidade



$g = 9,8 \text{ m/s}^2$

P_{atm}

*in Snyder e Ghung
(2001)*



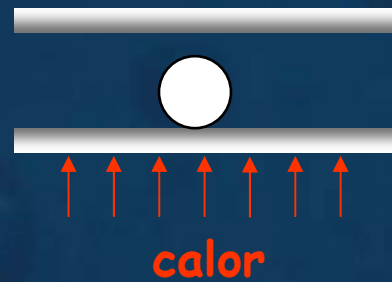
μg

P_{atm}

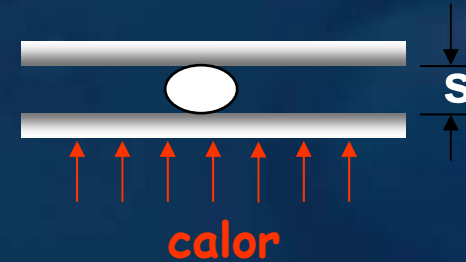
*in Snyder e Ghung
(2001)*



SIGNIFICADO DA EBULIÇÃO CONFINADA



Sem confinamento



Com confinamento



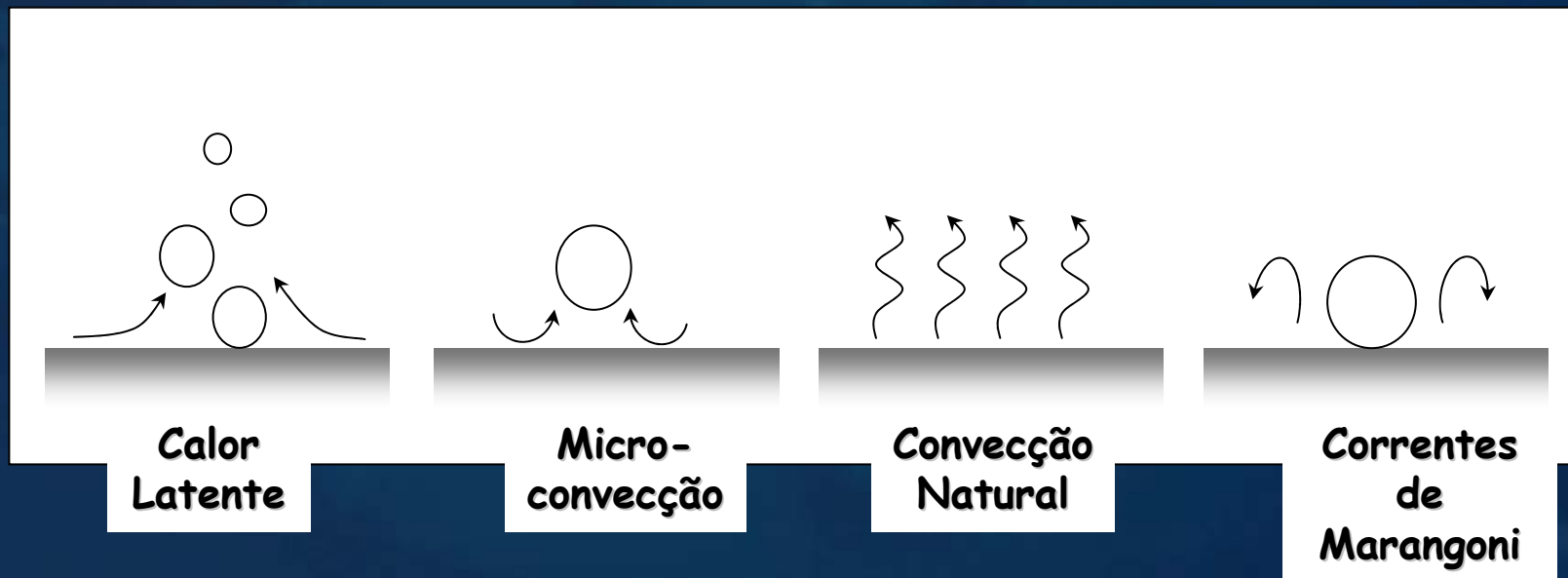
APLICAÇÕES DA EBULIÇÃO CONFINADA

- Tubos de calor
- Termossifões bifásicos
 - coletores solares
 - fornos de cocção
- Evaporadores
 - indústria de refrigeração
- Trocadores de calor compactos com superfícies intensificadoras

Revisão Bibliográfica

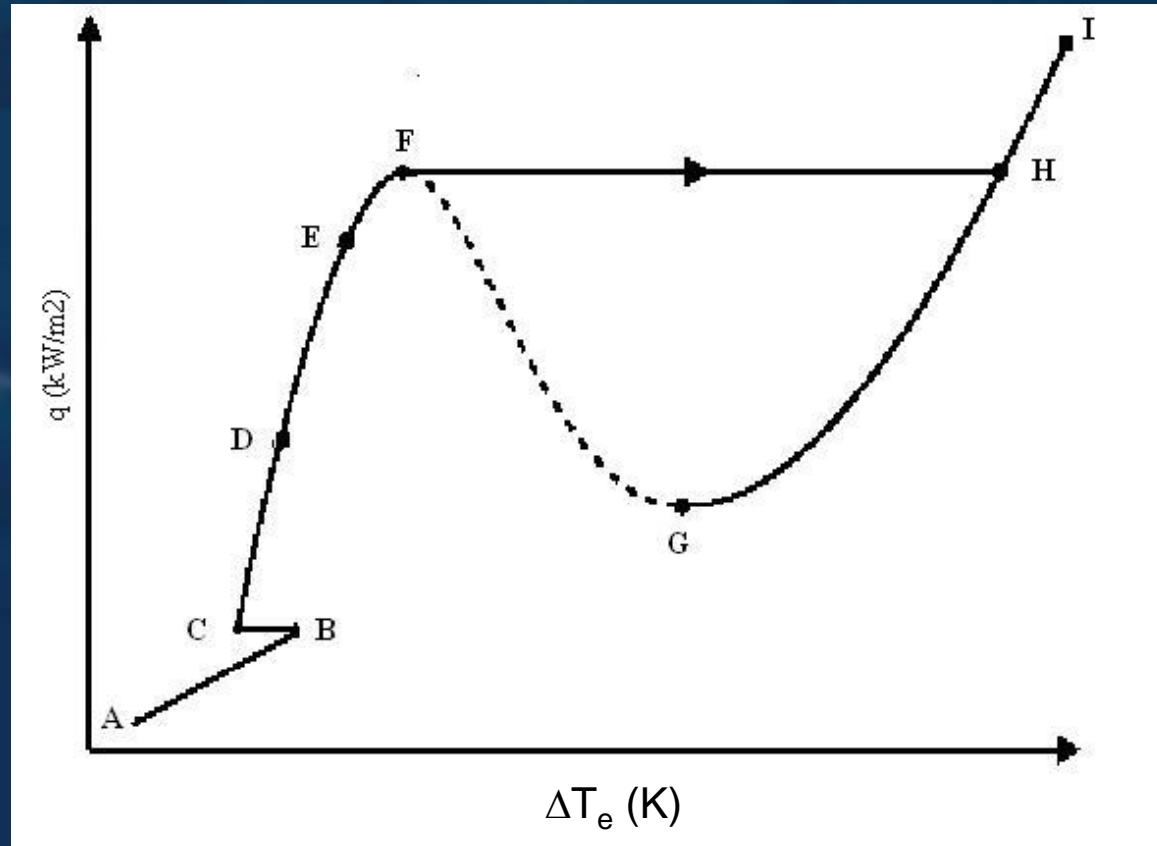
Mecanismos da Ebulição Nucleada

Quatro diferentes modos de transferência de calor



Mecanismos primários para ebulição nucleada saturada e totalmente desenvolvida: transferência por calor latente e micro-convecção.

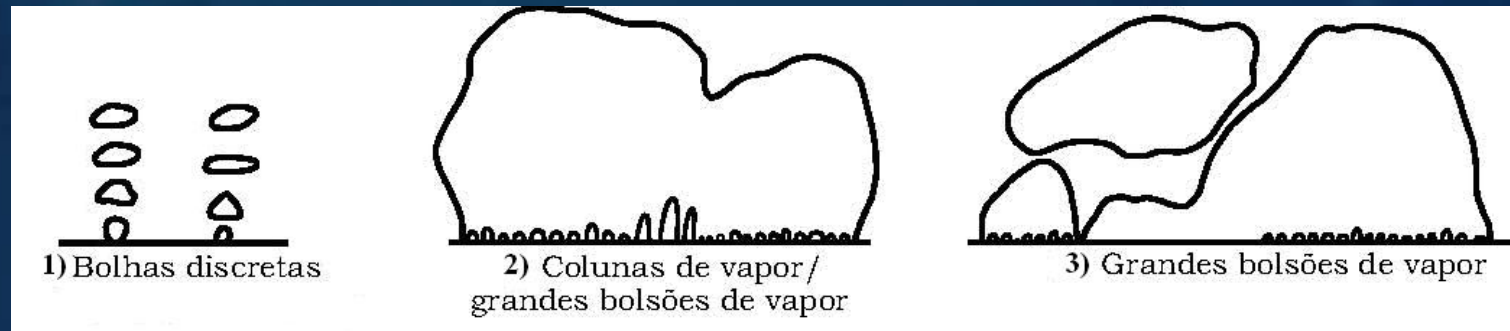
CURVA DE EBULIÇÃO OU DE NUKIYAMA



REGIMES DE EBULIÇÃO

Região CDEF - regime de ebulição nucleada:

- 1) Bolhas isoladas (região CD);
- 2) Colunas e bolsões de vapor (região DE);
- 3) Grandes cogumelos de vapor (região EF).



Tentativa de representação dos regimes observados na ebulição nucleada.

CORRELAÇÕES EMPÍRICAS PARA A EBULIÇÃO NUCLEADA

Rohsenow (1952)

$$h = \mu_l h_{lv} \left(\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right)^{0,5} \left(\frac{c_{pl}}{C_{sf} h_{lv} Pr_l^s} \right)^{\frac{1}{r}} \Delta T_e^2$$

$C_{sf} = 0,0074$ para o **n-Pentano/cobre**

= 0,0054 para o FC-72/cobre (Pioro, 1999)

= 0,0013 para a Água e o Cobre

Rohsenow considera o movimento causado pelo crescimento e partida das bolhas similar ao mecanismo de transferência de calor no transporte convectivo, onde Reynolds é calculado em função da velocidade ascensional e do diâmetro da bolha de vapor.



Stephan e Abdelsalam (1980)

$$h_{sa} = 207 \left(\frac{k_l}{d_b} \right) \left(\frac{qd_b}{k_l T_{sat}} \right)^{0,745} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0,581} Pr_l^{0,533} R_p^{0,133}$$

onde Pr_l , R_p e d_b representam o número de Prandtl do líquido, a rugosidade da superfície (μm) e o diâmetro da bolha dado por:

$$d_b = 0,0149\theta \left(\frac{2\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right)^{0,5}$$

Cooper (1984)

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

$b = 0,12 - 0,08686 \ln(R_p)$, p_r é a pressão reduzida e M o peso molecular do fluido.

FLUXO DE CALOR CRÍTICO

Fluxo de Calor Crítico (CHF) \Rightarrow é o limite de operação em ebulição nucleada. Quando atingido ocorre a transição da ebulição nucleada para a ebulição em película.

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

- i) instabilidades de Taylor \Rightarrow na interface vapor-líquido, normal ao vetor aceleração da gravidade;
- ii) instabilidades de Helmholtz \Rightarrow na interface vapor-líquido de uma coluna de vapor vertical que serve de via de escape.

$$q_{máx,Z} = 0,131 \rho_v^{0,5} h_{lv} [\sigma g (\rho_l - \rho_v)]^{\frac{1}{4}}$$

FLUXO DE CALOR CRÍTICO

O MODELO DE ZUBER PARA A CRISE DE EBULIÇÃO

Colocação do problema

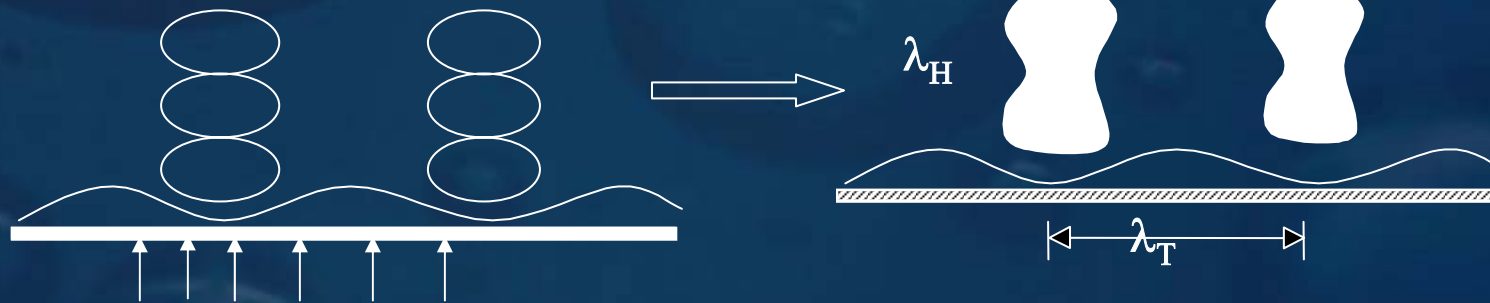
- ebulição em piscina ou em banho
- placa plana horizontal infinita
- superfície aquecida voltada para cima
- líquido à T_{sat}

O MODELO DE ZUBER PARA A CRISE DE EBULIÇÃO (2)

Postulado

Para a ebulição em “piscina” sobre placa plana, o fluxo de calor crítico resulta de instabilidades hidrodinâmicas de Taylor e de Helmholtz

O MODELO DE ZUBER PARA A CRISE DE EBULIÇÃO (2)



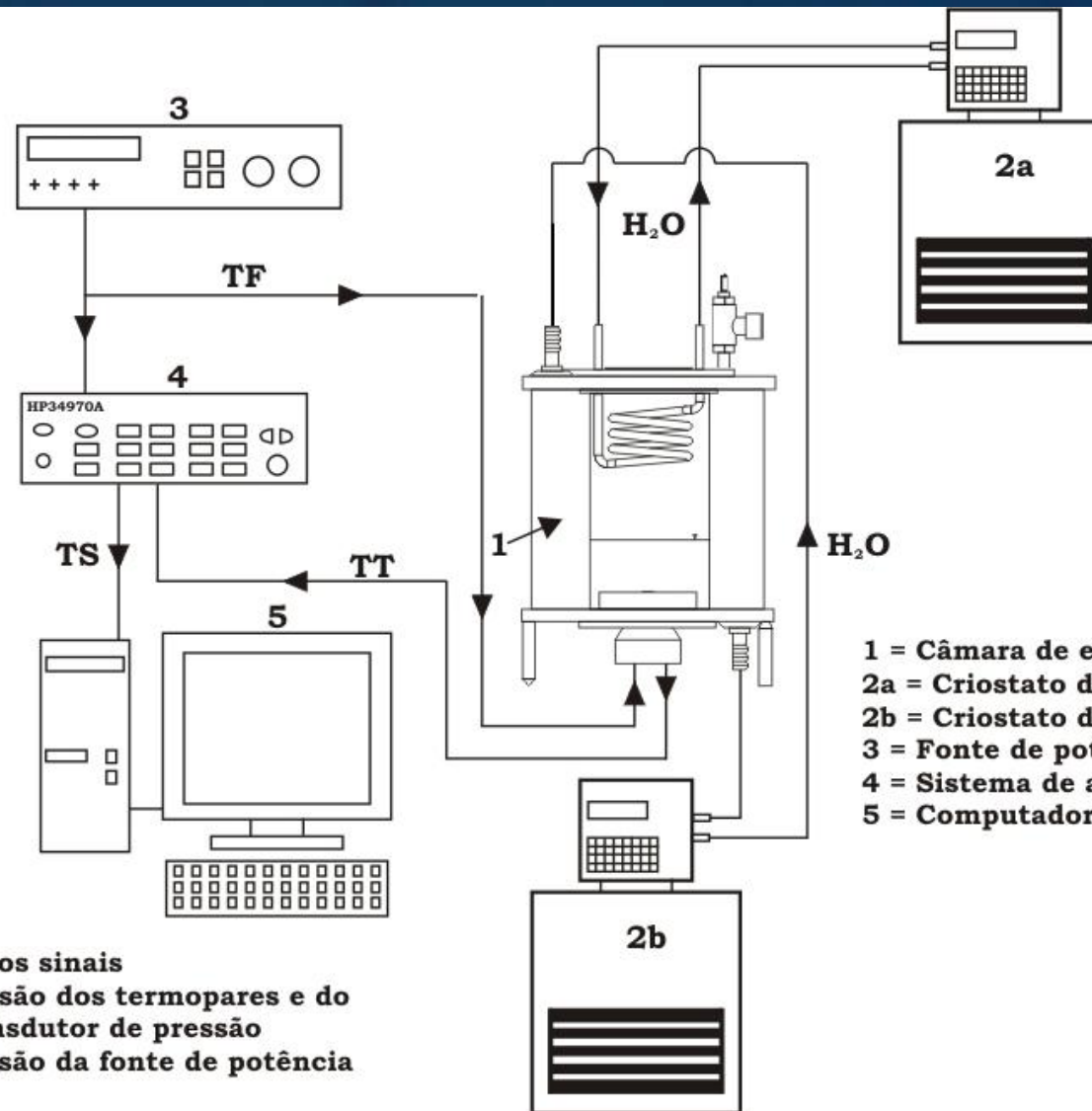
q

idéia chave

Colunas de vapor formadas por
uma sucessão de bolhas, próximo
do fluxo de calor crítico

Interação entre as
instabilidades de
Taylor e de Helmholtz

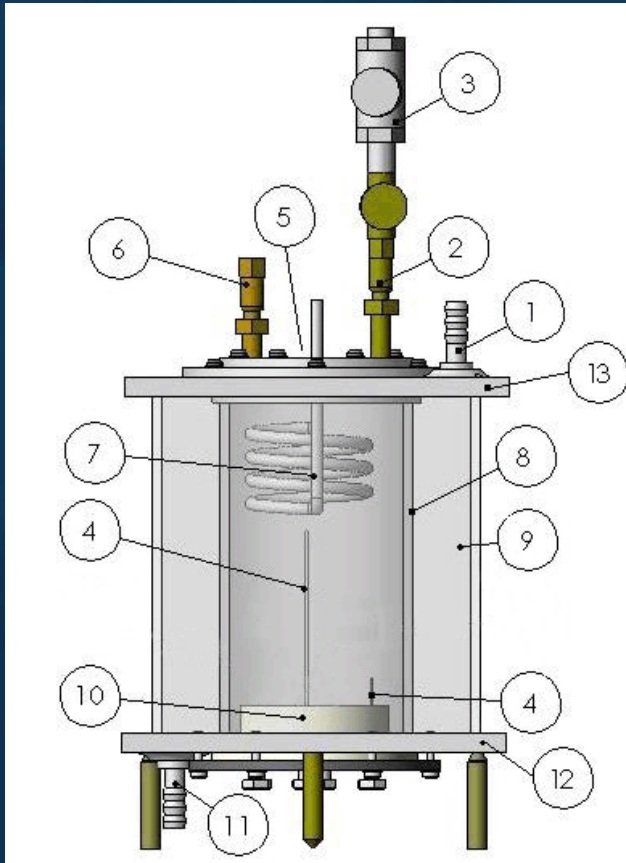
APARATO EXPERIMENTAL



- 1 = Câmara de ebulição
- 2a = Criostato da serpentina
- 2b = Criostato da circulação do líquido
- 3 = Fonte de potência
- 4 = Sistema de aquisição de dados
- 5 = Computador

TS = Todos sinais
 TT = Tensão dos termopares e do transdutor de pressão
 TF = Tensão da fonte de potência

BANCADA DE EBULIÇÃO CONFINADA

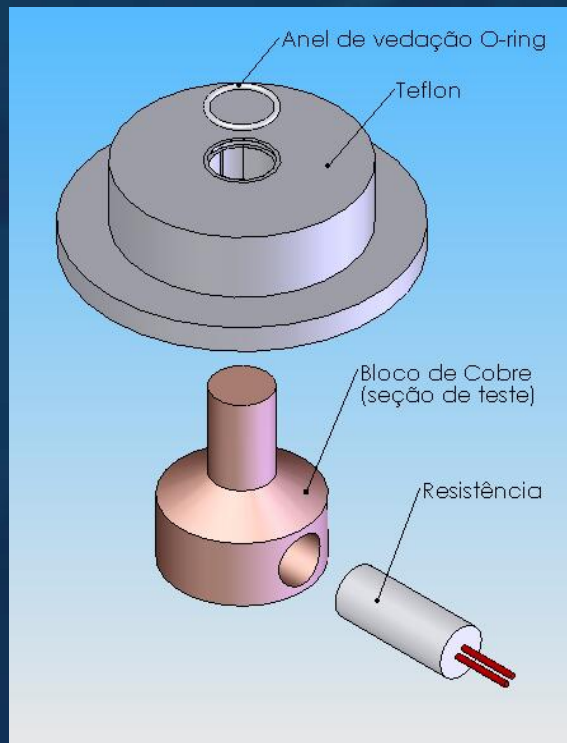


Esquema

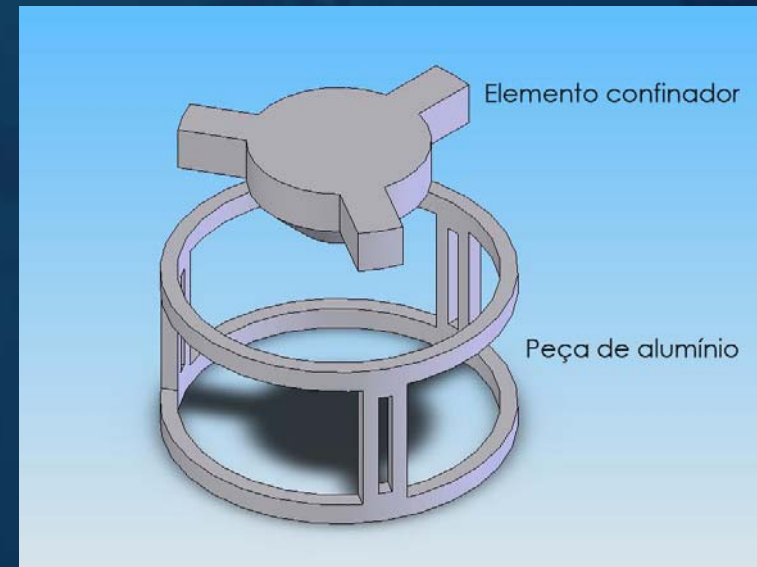


Fotografia da bancada

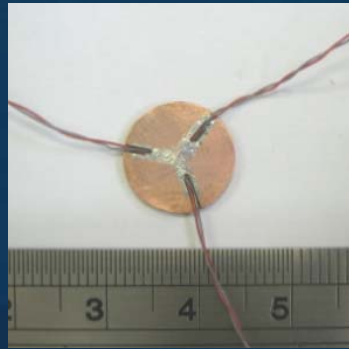
SEÇÃO DE TESTE



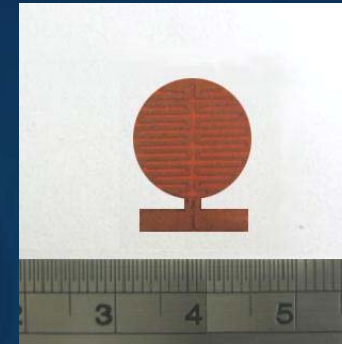
Vista explodida da seção de teste.



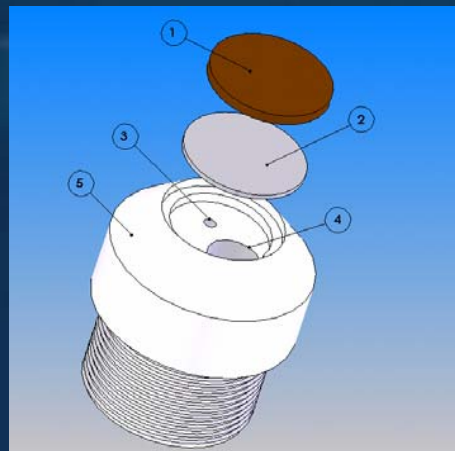
Conjunto confinador.



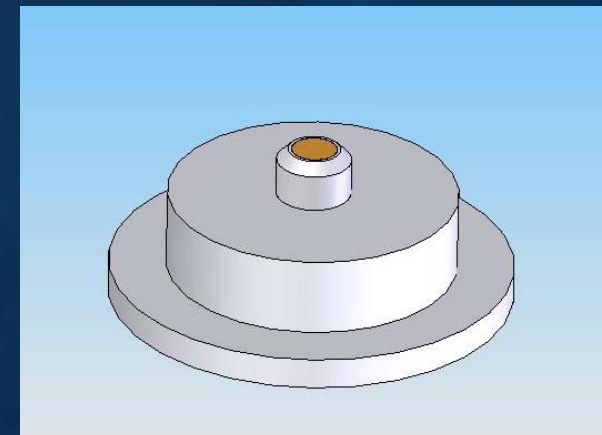
Disco de cobre com os três termopares soldados.



Fotografia da resistência elétrica.

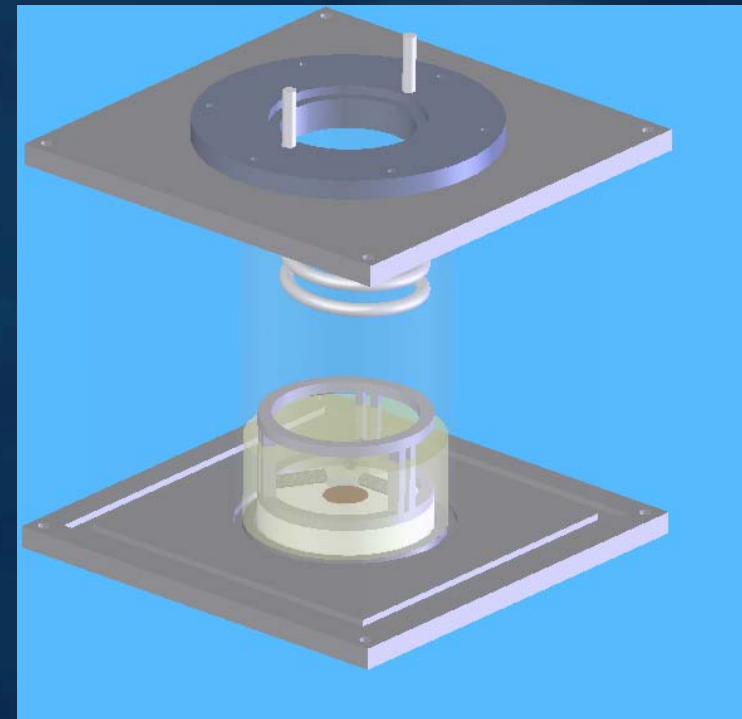
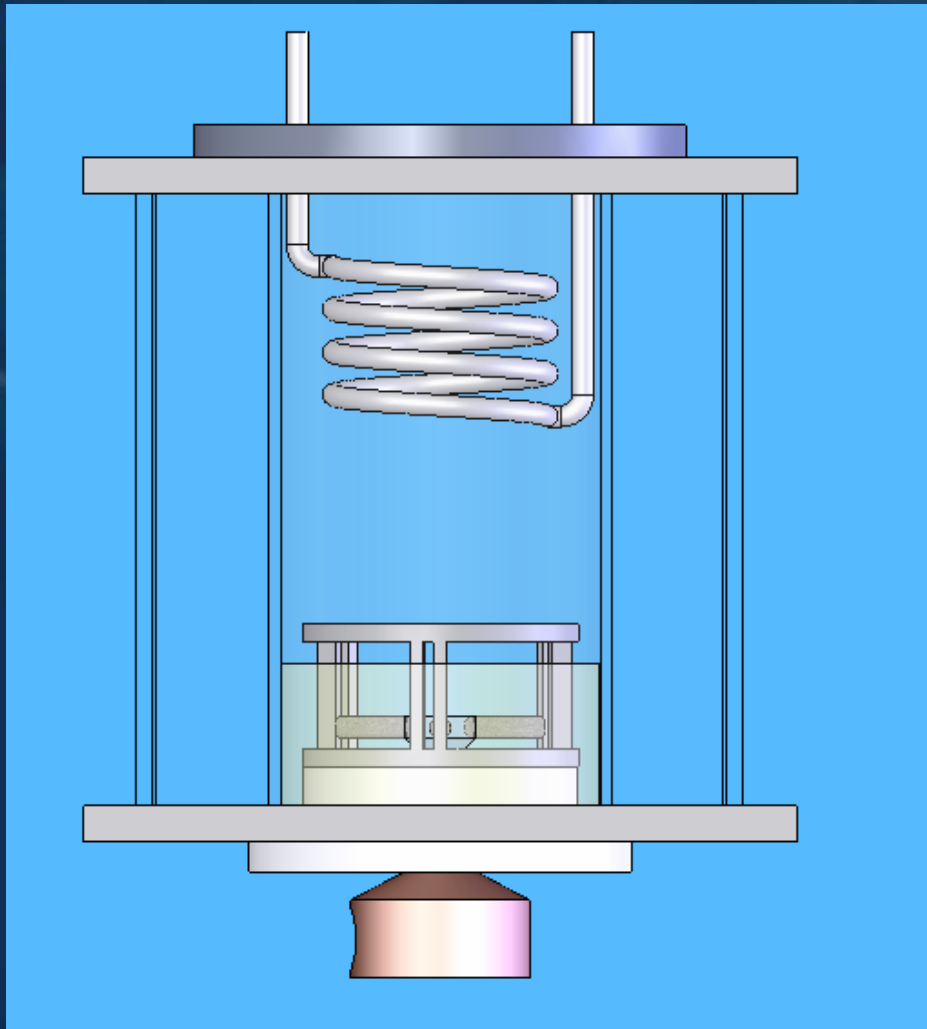


Vista explodida da segunda seção de teste.



Montagem da segunda seção de teste.

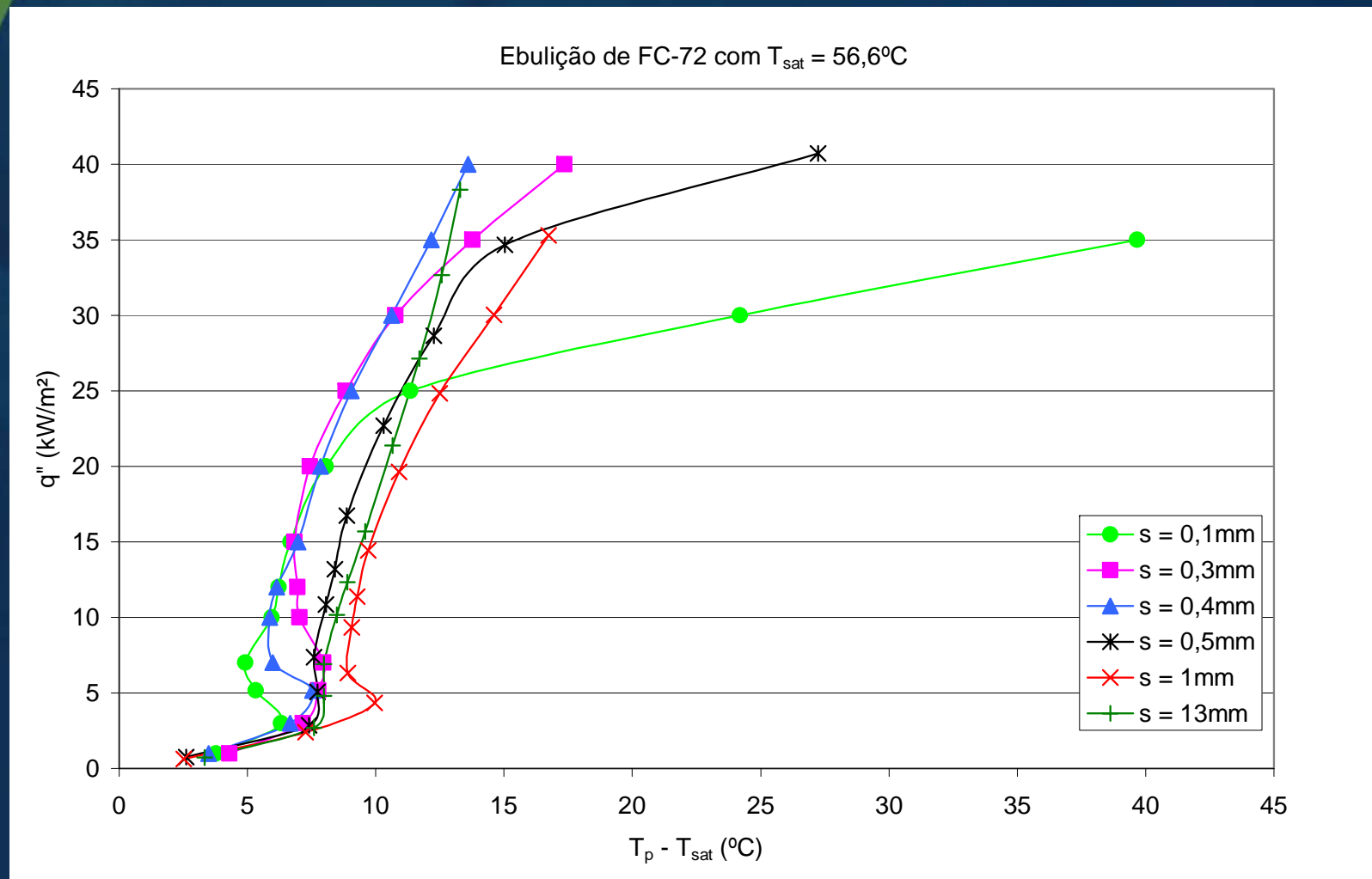
BANCADA PARA ESTUDO DA EBULIÇÃO CONFINADA



RESULTADOS EXPERIMENTAIS

LEPTEN/BOILING - UFSC

EFEITO DO CONFINAMENTO

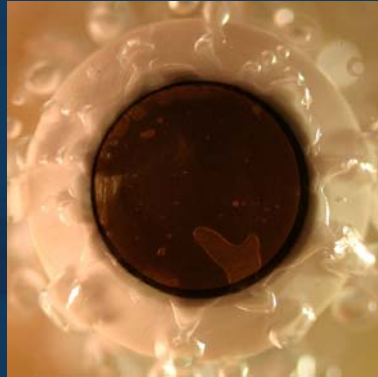


FC-72, em função de s , para superfície aquecida voltada para baixo (Cardoso, 2005).

EFEITO DO CONFINAMENTO

FC-72

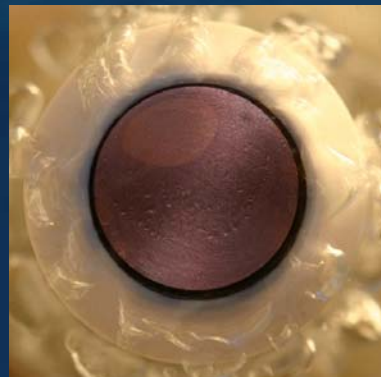
20kW/m²



$s = 0,1\text{mm}$
 $T_p = 65,60^\circ\text{C}$



$s = 13\text{mm}$
 $T_p = 66,15^\circ\text{C}$



$s = 0,1\text{mm}$
 $T_p = 88,57^\circ\text{C}$



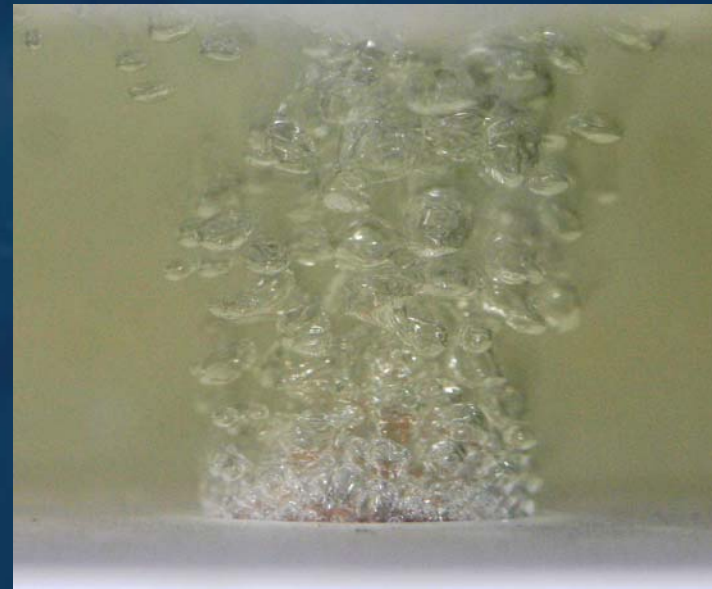
$s = 13\text{mm}$
 $T_p = 68,38^\circ\text{C}$

30kW/m²

EBULIÇÃO NÃO CONFINADA

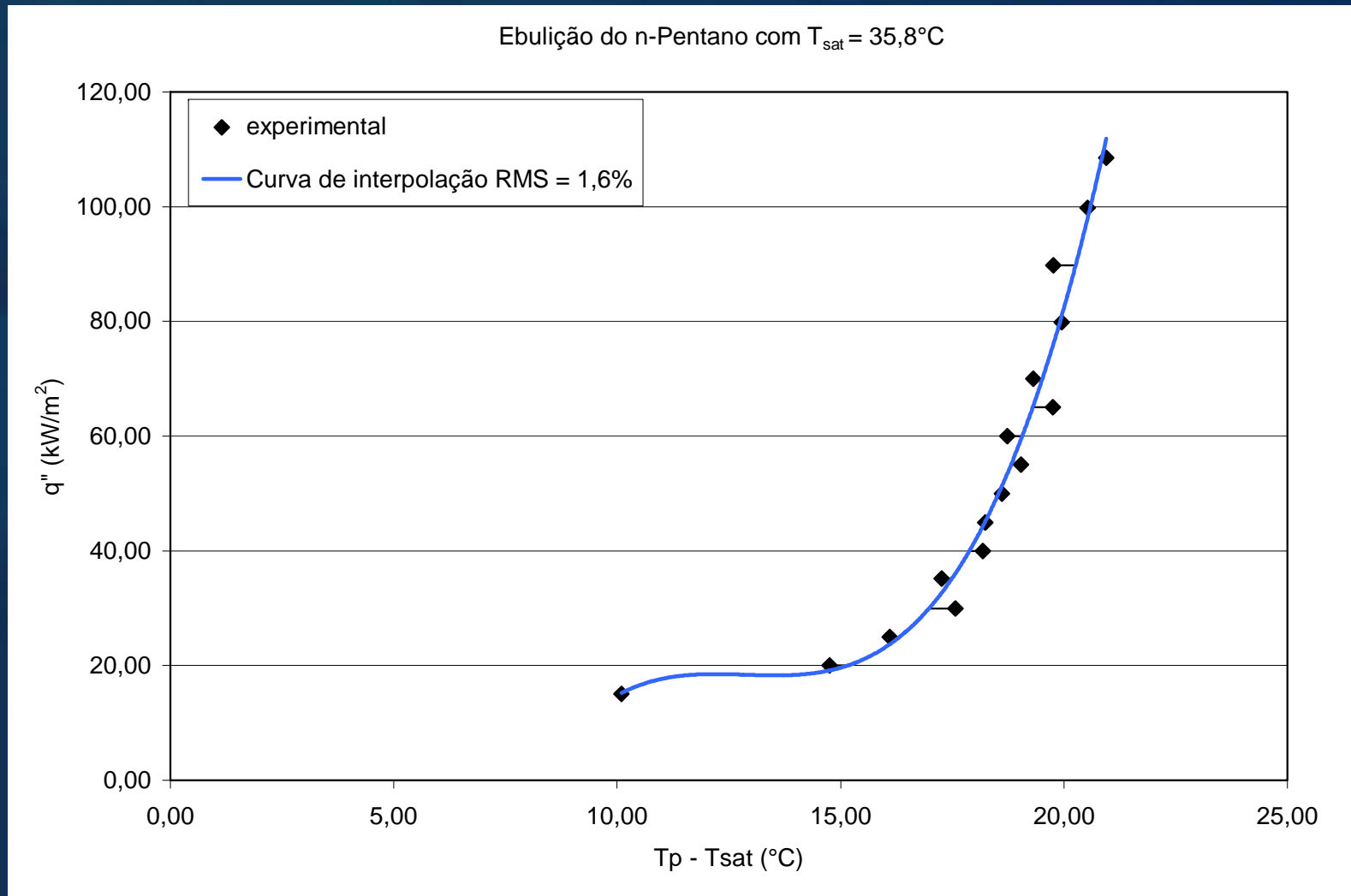


$$T_p = 53,98^\circ\text{C}$$
$$q = 40\text{kW/m}^2$$



$$T_p = 56,33^\circ\text{C}$$
$$q = 100\text{kW/m}^2$$

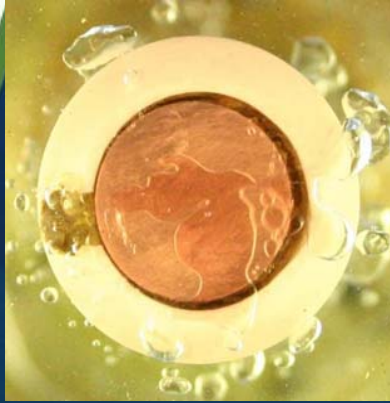
Ebulição do n-Pentano, à $T_{\text{sat}} = 35,8^\circ\text{C}$ e $p = 1\text{bar}$



Curva parcial de ebulição para n-Pentano, à pressão de 1bar e temperatura de saturação.

VISUALIZAÇÃO DA EBULIÇÃO (1)

$q = 20 \text{ kW/m}^2$



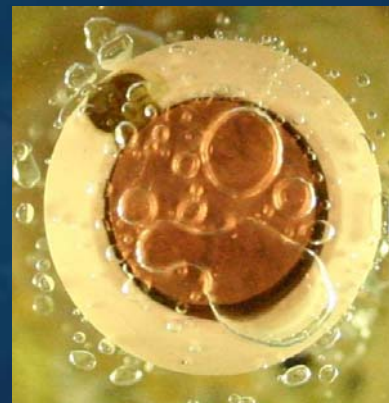
$s = 0,2 \text{ mm}$

$T_w = 63,1^\circ\text{C}$



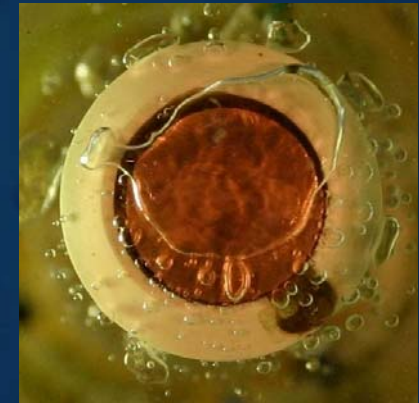
$s = 0,5 \text{ mm}$

$T_w = 64,4^\circ\text{C}$



$s = 1 \text{ mm}$

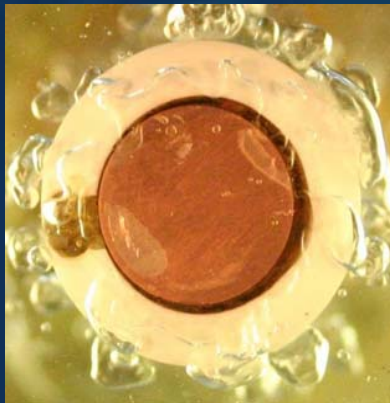
$T_w = 65,0^\circ\text{C}$



$s = 13 \text{ mm}$

$T_w = 65,9^\circ\text{C}$

$q = 40 \text{ kW/m}^2$



$s = 0,2 \text{ mm}$

$T_w = 75,5^\circ\text{C}$



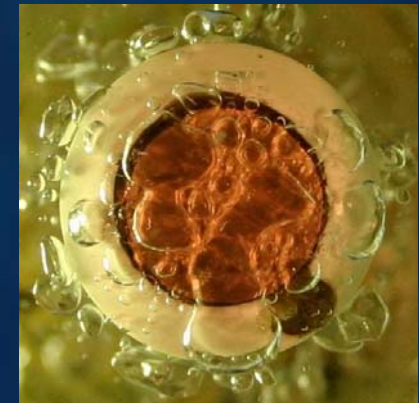
$s = 0,5 \text{ mm}$

$T_w = 68,1^\circ\text{C}$



$s = 1 \text{ mm}$

$T_w = 69,3^\circ\text{C}$



$s = 13 \text{ mm}$

$T_w = 69,7^\circ\text{C}$

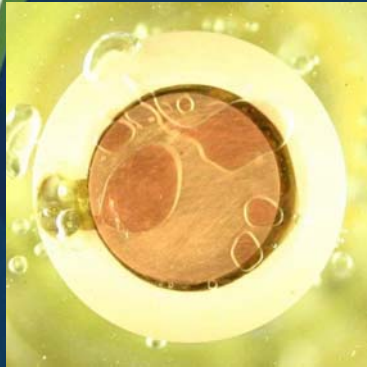
em função de q'' para n-Pentano

in Passos et al. (2005) ETFS, Elsevier, Vol. 30, pp. 1-7.

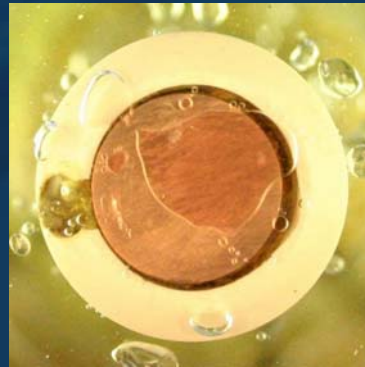


VISUALIZAÇÃO DA EBULIÇÃO (1)

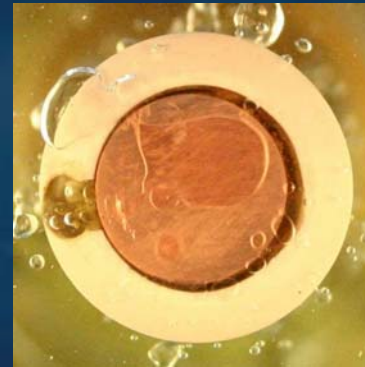
Efeito do aumento do fluxo de calor, $s=0,2 \text{ mm}$



$T_w=61,0^\circ\text{C};$
 $q= 7\text{kW/m}^2$



$T_w=61,2^\circ\text{C};$
 $q= 10\text{kW/m}^2$



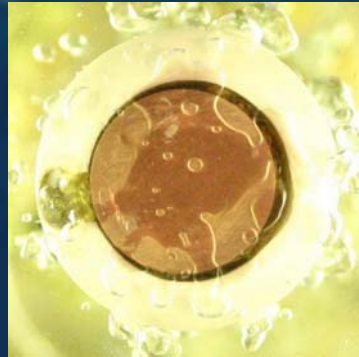
$T_w=61,7^\circ\text{C};$
 $q= 12\text{kW/m}^2$



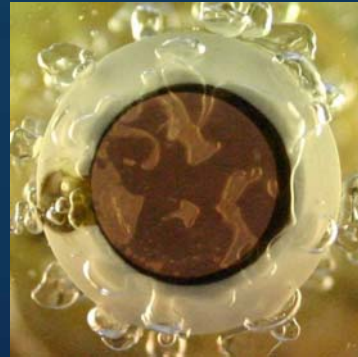
$T_w=62,3^\circ\text{C};$
 $q= 15\text{kW/m}^2$



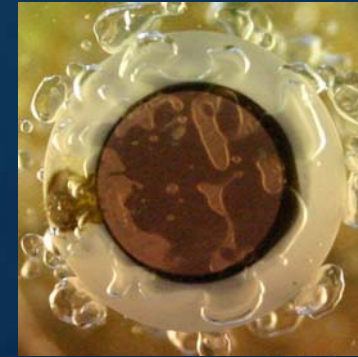
$T_w=63,2^\circ\text{C};$
 $q= 20\text{kW/m}^2$



$T_w=64,3^\circ\text{C};$
 $q= 25\text{kW/m}^2$



$T_w=65,9^\circ\text{C};$
 $q= 30\text{kW/m}^2$



$T_w=68,5^\circ\text{C};$
 $q= 35\text{kW/m}^2$

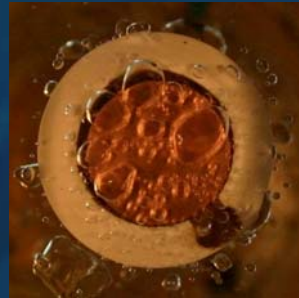


$T_w=74,7^\circ\text{C};$
 $q= 40\text{kW/m}^2$

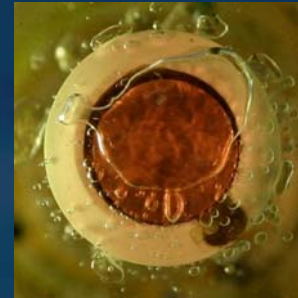


EFEITO DO FLUXO DE CALOR, $s=13$

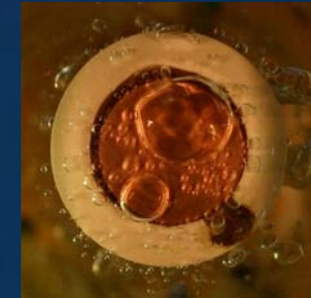
$q= 20\text{kW/m}^2$



$T_w=65,9^\circ\text{C}$



$T_w=65,9^\circ\text{C}$



$T_w=65,8^\circ\text{C}$

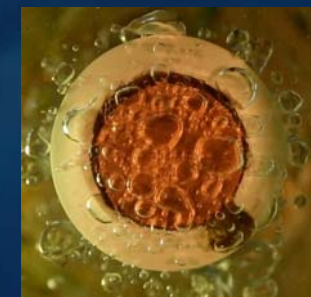
$q= 30\text{kW/m}^2$



$T_w=67,4^\circ\text{C}$

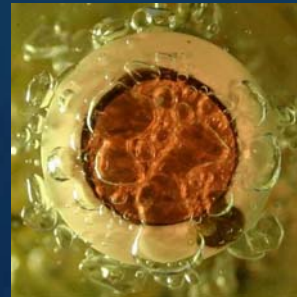


$T_w=67,6^\circ\text{C}$

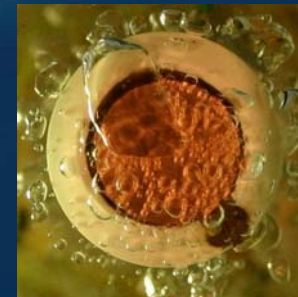


$T_w=67,7^\circ\text{C}$

$q= 40\text{kW/m}^2$



$T_w=69,7^\circ\text{C}$



$T_w=69,6^\circ\text{C}$



$T_w=69,8^\circ\text{C}$

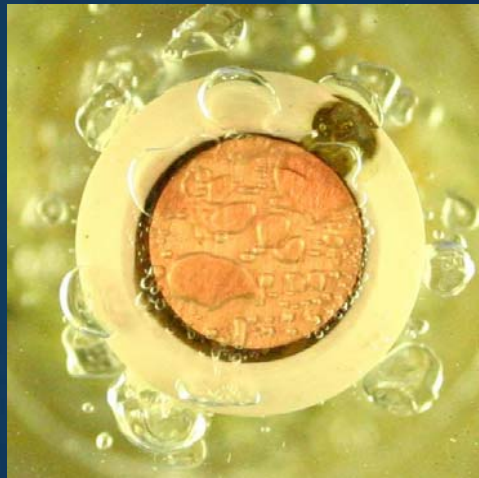


Visualização (4)

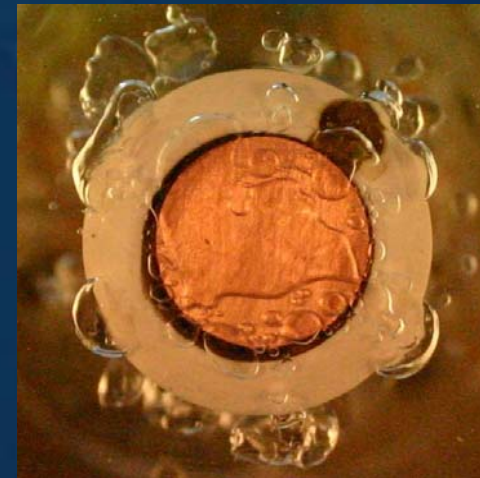
$q=30\text{kW/m}^2$, $s=0,5\text{ mm}$



$T_w=66,1^\circ\text{C}$



$T_w=66,2^\circ\text{C}$



$T_w=66,2^\circ\text{C}$

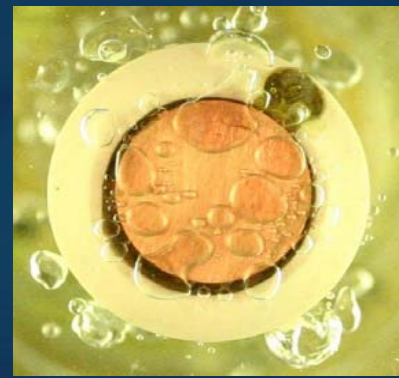


VISUALIZAÇÃO DA EBULIÇÃO (1)

$q=20 \text{ kW/m}^2$



$s=0,2 \text{ mm}$
 $T_w=63,1^\circ\text{C}$



$s=0,5 \text{ mm}$
 $T_w=64,4^\circ\text{C}$



$s=1 \text{ mm}$
 $T_w=65,5^\circ\text{C}$

$q=40 \text{ kW/m}^2$



$s=0,2 \text{ mm}$
 $T_w=75,5^\circ\text{C}$



$s=0,5 \text{ mm}$
 $T_w=68,1^\circ\text{C}$



$s=1 \text{ mm}$
 $T_w=69,3^\circ\text{C}$

in Passos et al. (2005) ETFS, Elsevier, Vol. 30, pp. 1-7.



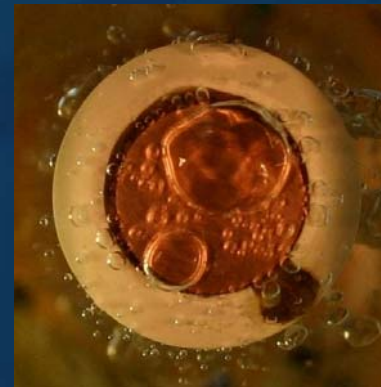
VISUALIZAÇÃO DA EBULIÇÃO (2)

Efeito do confinamento

$$q=20 \text{ kW/m}^2$$



$s=0,2 \text{ mm}$
 $T_w=63,2^\circ\text{C}$



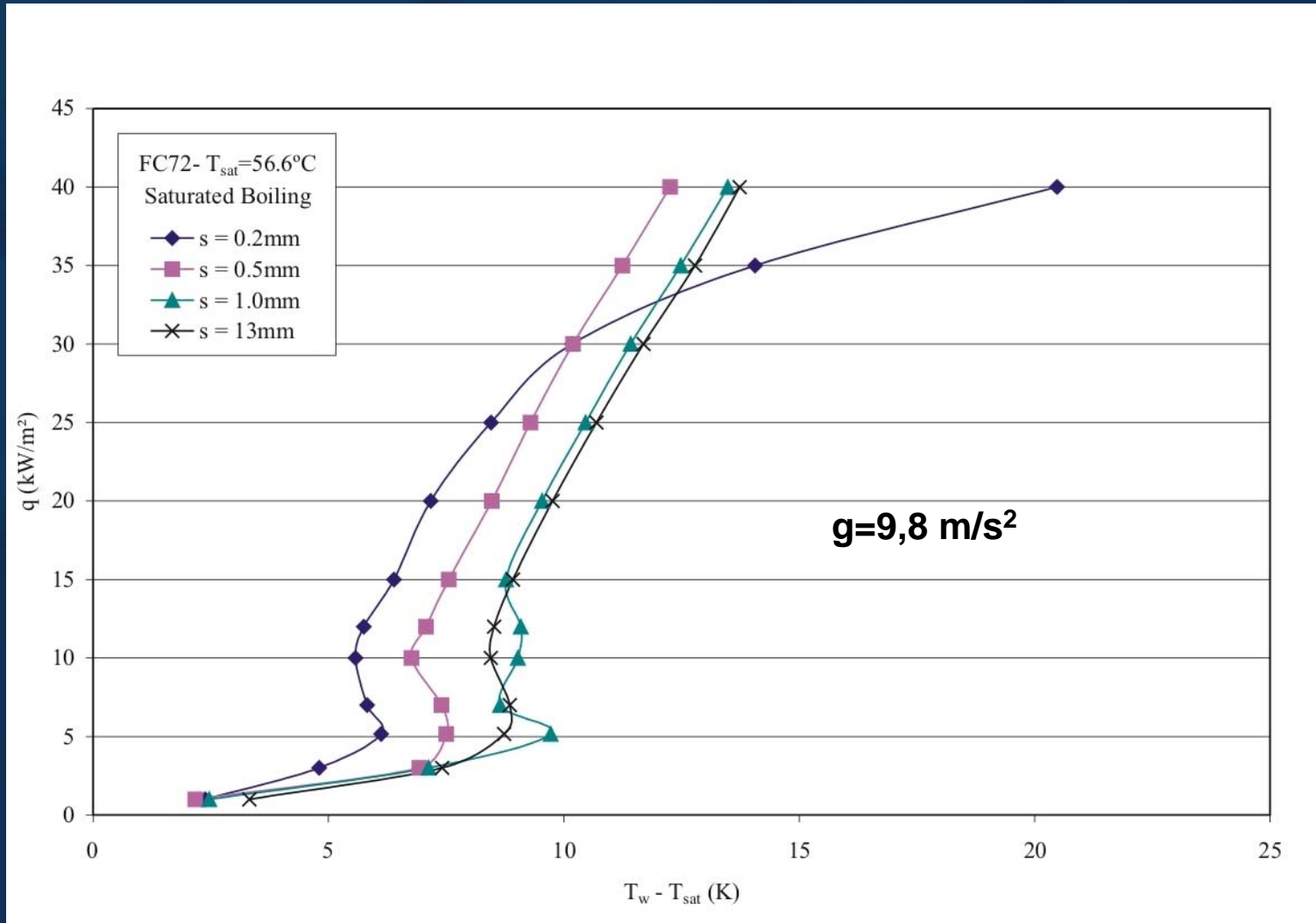
$s=13 \text{ mm}$
 $T_w=65,8^\circ\text{C}$

Para fluxos de calor moderados, ocorre a intensificação do processo de transferência de calor.

in Passos et al. (2005) ETFS, Elsevier, Vol. 30, pp. 1-7.



CURVA DE EBULIÇÃO PARCIAL





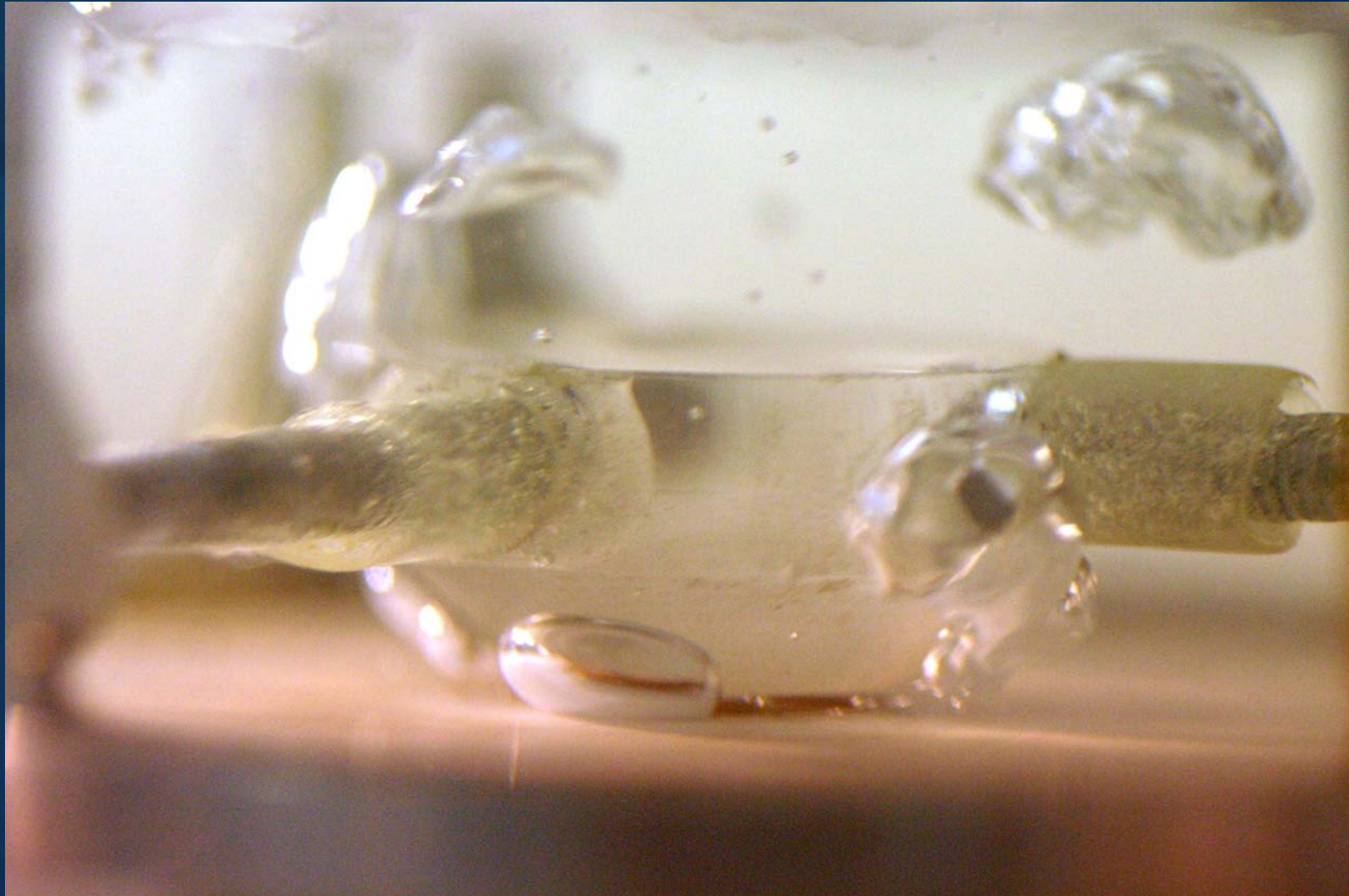
VISUALIZAÇÃO (3)

$q=45\text{kW/m}^2$ (Fluido de trabalho n-Pentano)



VISUALIZAÇÃO (3)

$q=180\text{kW/m}^2$ (Fluido de trabalho n-Pentano)



PUBLICAÇÕES

- Passos, J.C., Hirata, F.R., Possamai, L.F.B., Balsamo, M. and Misale, M., 2004, "Confined Boiling of FC72 and FC87 on a Downward Facing Heating Copper Disk", Int. Journal of Heat and Fluid Flow, Elsevier, Vol. 25, pp.313-319.
- Passos, J.C., Possamai, L.F.B., Hirata, F.R., 2005, "Confined and Unconfined FC72 and FC87 Boiling on a Downward-Facing Disc", Applied Thermal Engineering, Elsevier, Vol. 25, pp. 2543-2554.
- Passos, J.C., Silva, E.L., Possamai, L.F.B., 2005, "Visualization of FC72 Confined Nucleate Boiling", Experimental Thermal and Fluid Science, Elsevier, Vol. 30, pp. 1-7.

EBULIÇÃO EM CONVECÇÃO FORÇADA

A- Ebulição Nucleada

B- Ebulição em Película

Ebulição em convecção forçada

$p = 1,5 \text{ bar}$;

$\Delta t_e = 24,7^\circ\text{C}$

$G = 218 \text{ kg/m}^2\text{s}$

$q = 121 \text{ kW/m}^2$

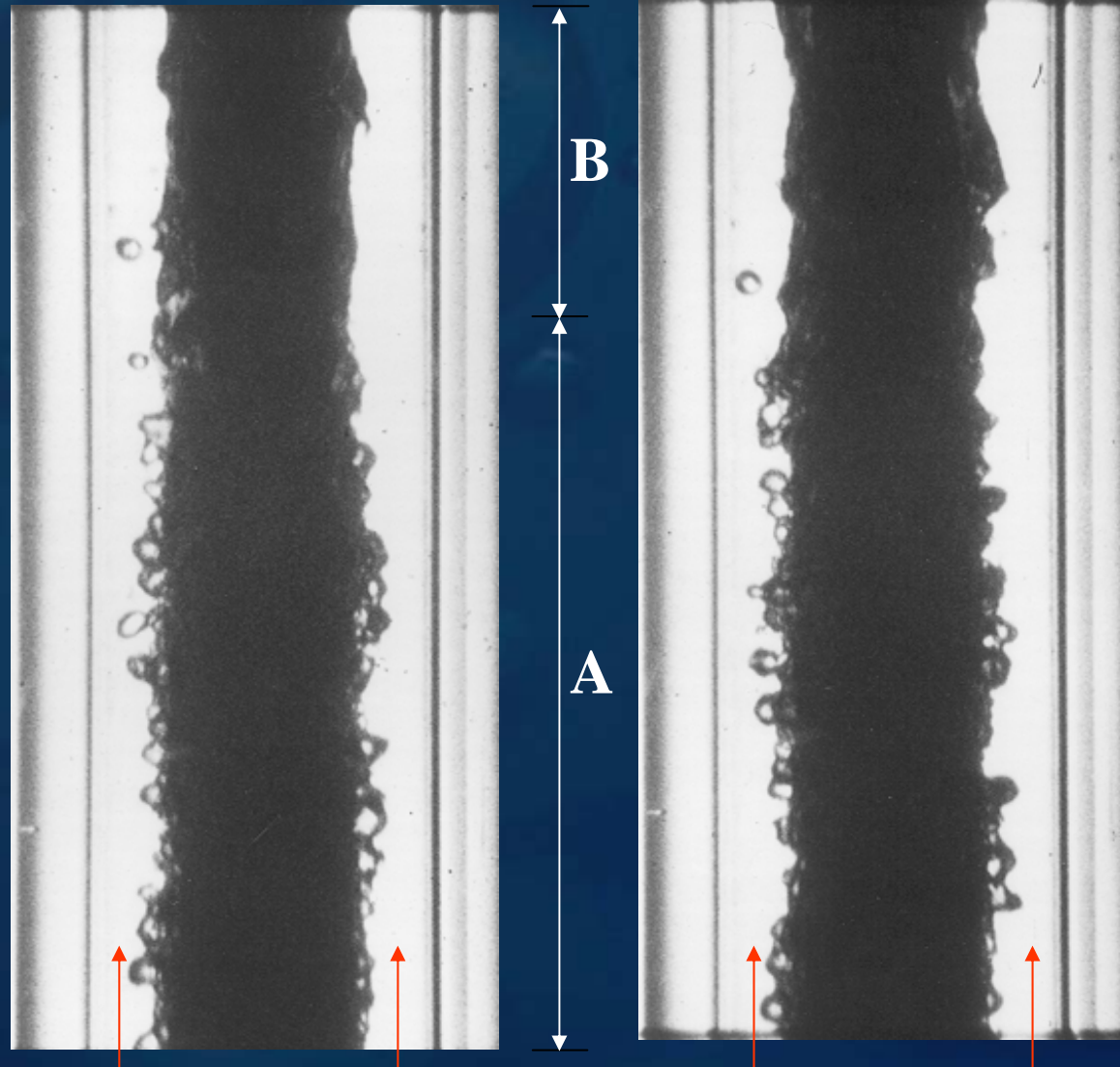
(= 41 % $q_{\text{crít}}$)

Câmera rápida:

1000 quadros/s

Imagens extraídas

de Passos (1989, 1990)





ORGANIZAÇÃO DE CONFERÊNCIAS

www.boiling2009.com.br

7ª Conferência Internacional sobre
Transferência de Calor por Ebulição

Florianópolis, 3-7 de Maio de 2009.



ORGANIZAÇÃO DE CONFERÊNCIAS

www.ebecem.com.br

1ª Encontro Brasileiro sobre Ebulição,
Condensação e Escoamento Multifásico

Florianópolis, 28-29 de Abril de 2008.