

Subcooled flow boiling of R-134a in vertical channels of small diameter

Claudi Martín-Callizo, Björn Palm, Wahib Owhaib

Gustavo Rudolf Haverroth

Sumário

- ◆ Escopo
- ◆ Introdução
- ◆ Bancada de teste
- ◆ Resultados experimentais
- ◆ Fechamento

Sumário

- ◆ **Escopo**
- ◆ Introdução
- ◆ Bancada de teste
- ◆ Resultados experimentais
- ◆ Fechamento

Escopo

- ◆ Estudo da transferência de calor na ebulição de um escoamento subresfriado de R134a dentro de tubos verticais
- ◆ Variáveis: fluxo de calor; fluxo de massa; grau de subresfriamento; pressão; diâmetro do tubo

Sumário

- ◆ Escopo
- ◆ **Introdução**
- ◆ Bancada de teste
- ◆ Resultados experimentais
- ◆ Fechamento

Introdução

- ◆ Baixo fluxo de calor ou alto grau de subresfriamento: Transferência regida pela convecção
- ◆ Alto fluxo de calor: Ebulição é o fenômeno mais representativo da transferência de calor
- ◆ Muitos problemas envolvem tanto problemas de baixo fluxo como de alto fluxo de calor

Introdução

- ◆ Convecção monofásica:

Correlações bem conhecidas

- ◆ Processo de ebulição:

Várias correlações diferentes com resultados igualmente diferentes.

- Shah (1977)
- Gungor e Winterton (1983)
- Liu e Winterton (1991)
- Yin et al (2000)
- Prodanovic (2002)

Prodanovic

- ◆ Ebulição parcial → Evaporação da micro camada
- ◆ Ebulição totalmente desenvolvida → agitação das bolhas
→ microconvecção

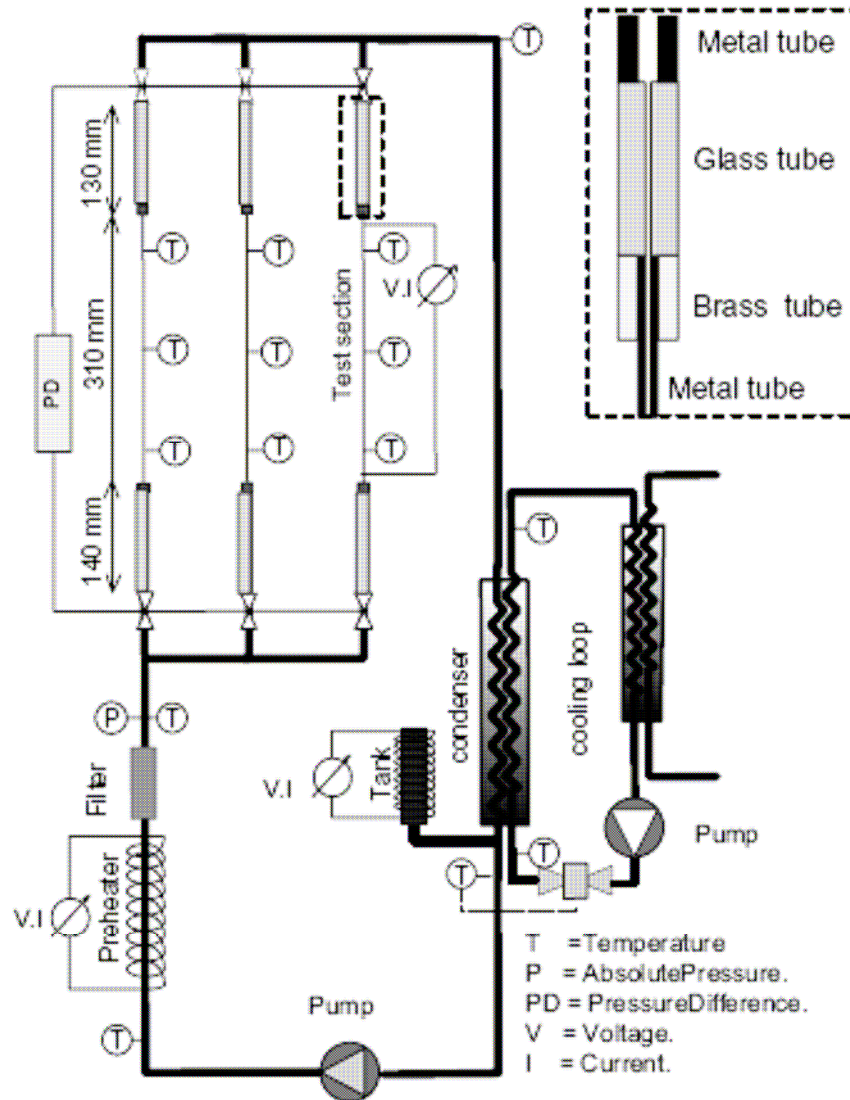
Peng et al

- ◆ Nucleação em micro canais exige um espaço mínimo:
espaço de evaporação
- ◆ Se inexistente, induz a *ebulição fictícia* antes da nucleação

Sumário

- ◆ Escopo
- ◆ Introdução
- ◆ **Bancada de teste**
- ◆ Resultados experimentais
- ◆ Fechamento

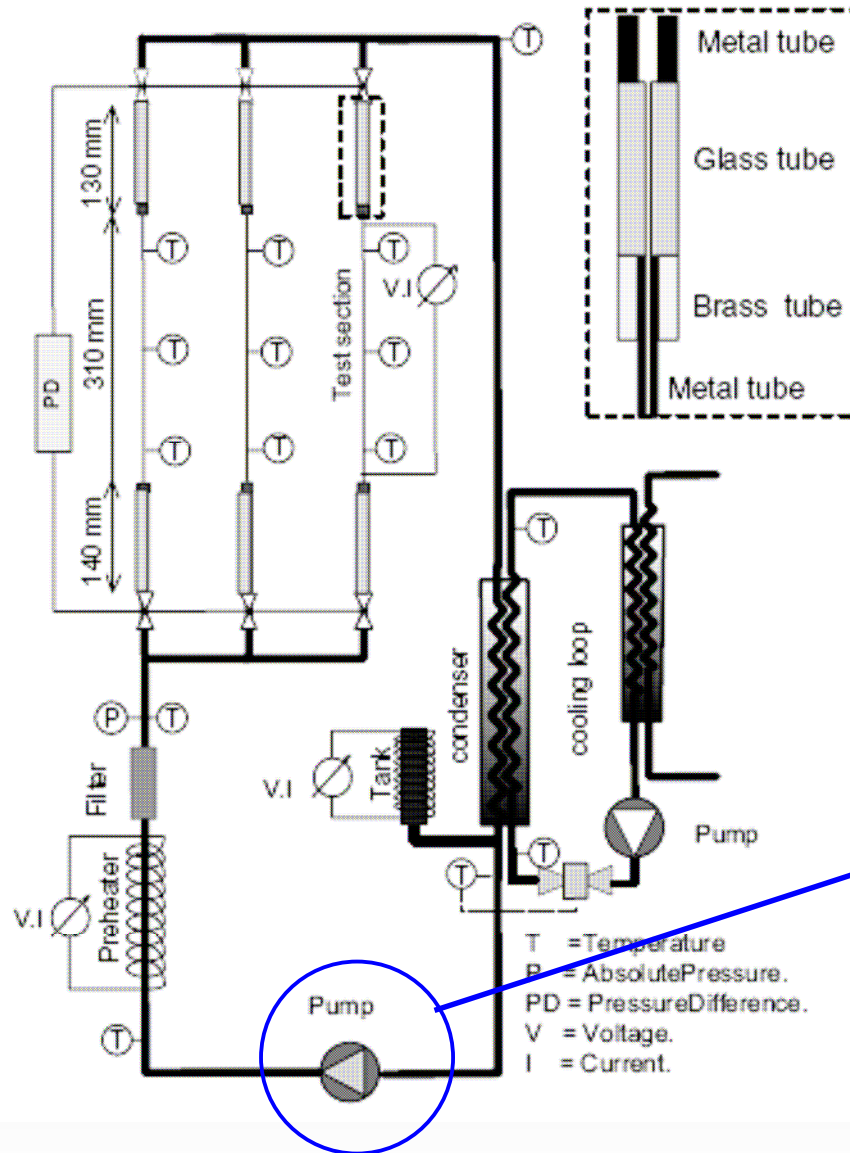
Equipamento



Ajustes independentes:

- pressão do experimento
- fluxo de calor
- fluxo de massa
- grau de resfriamento

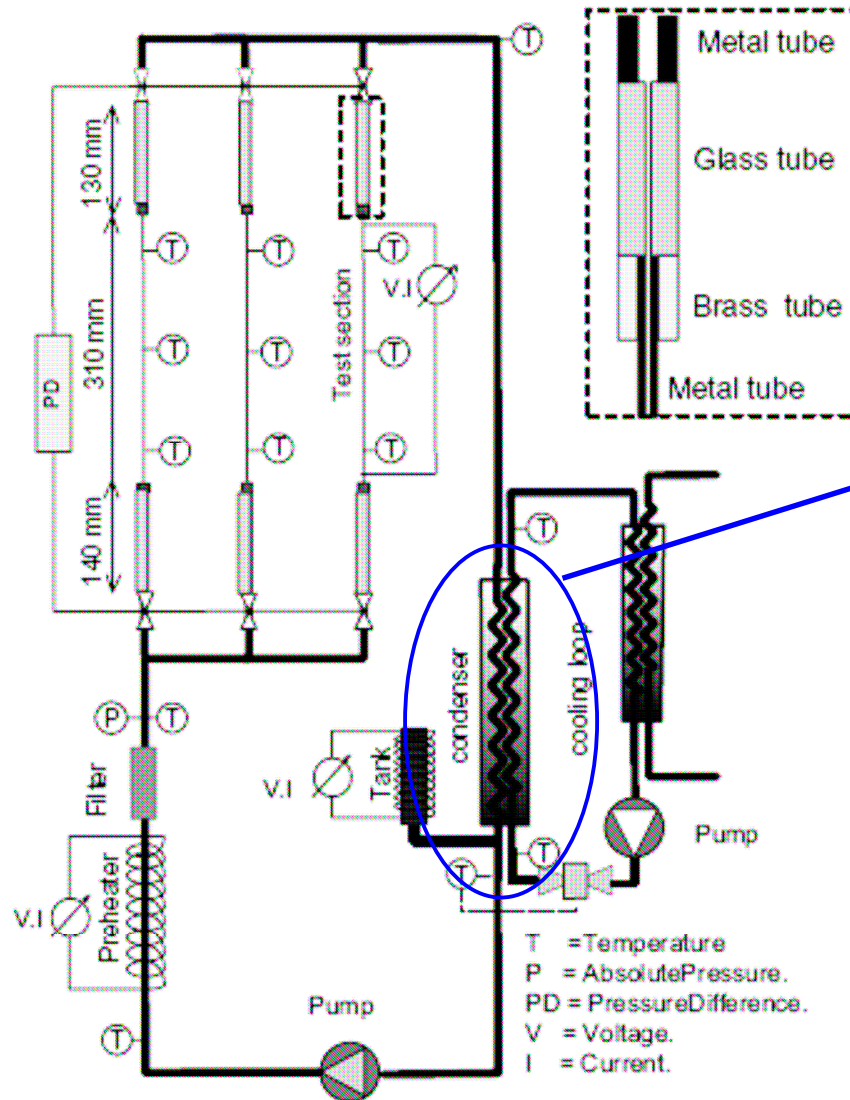
Equipamento



Bomba controlada com microprocessador.

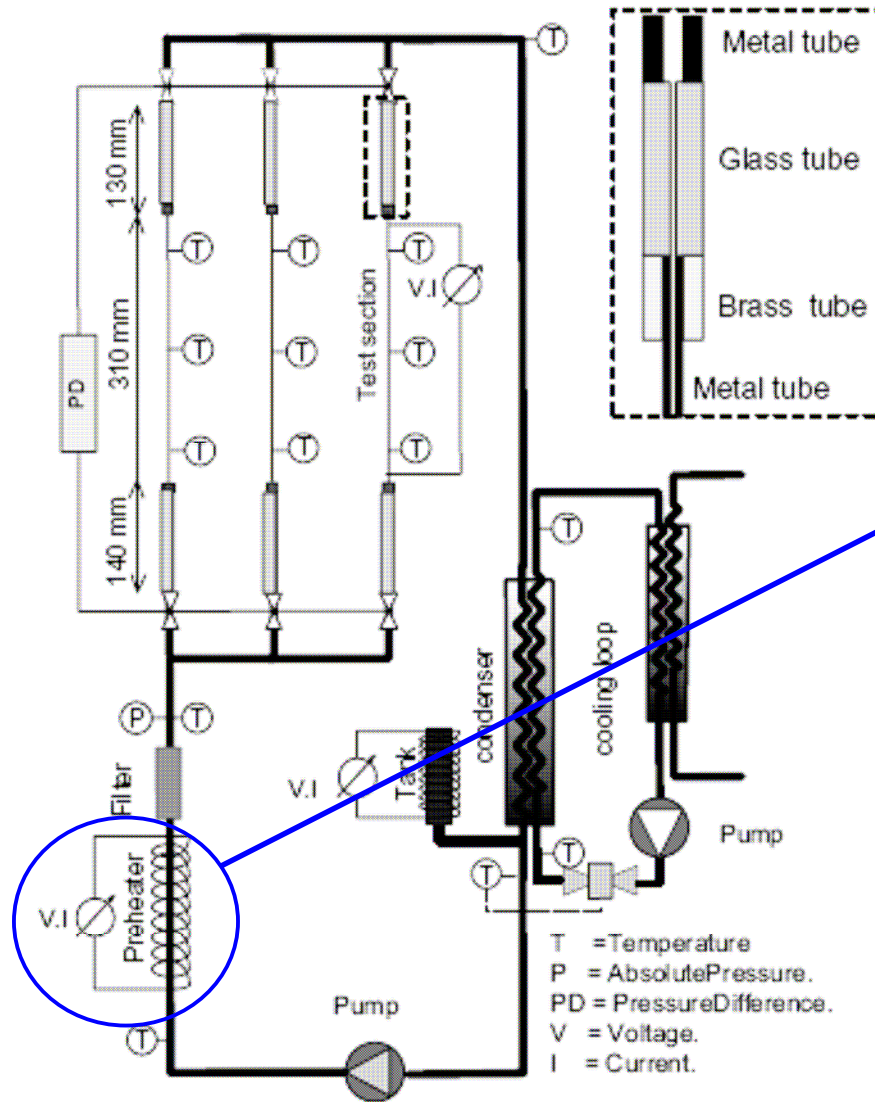
Serve como fluxímetro

Equipamento



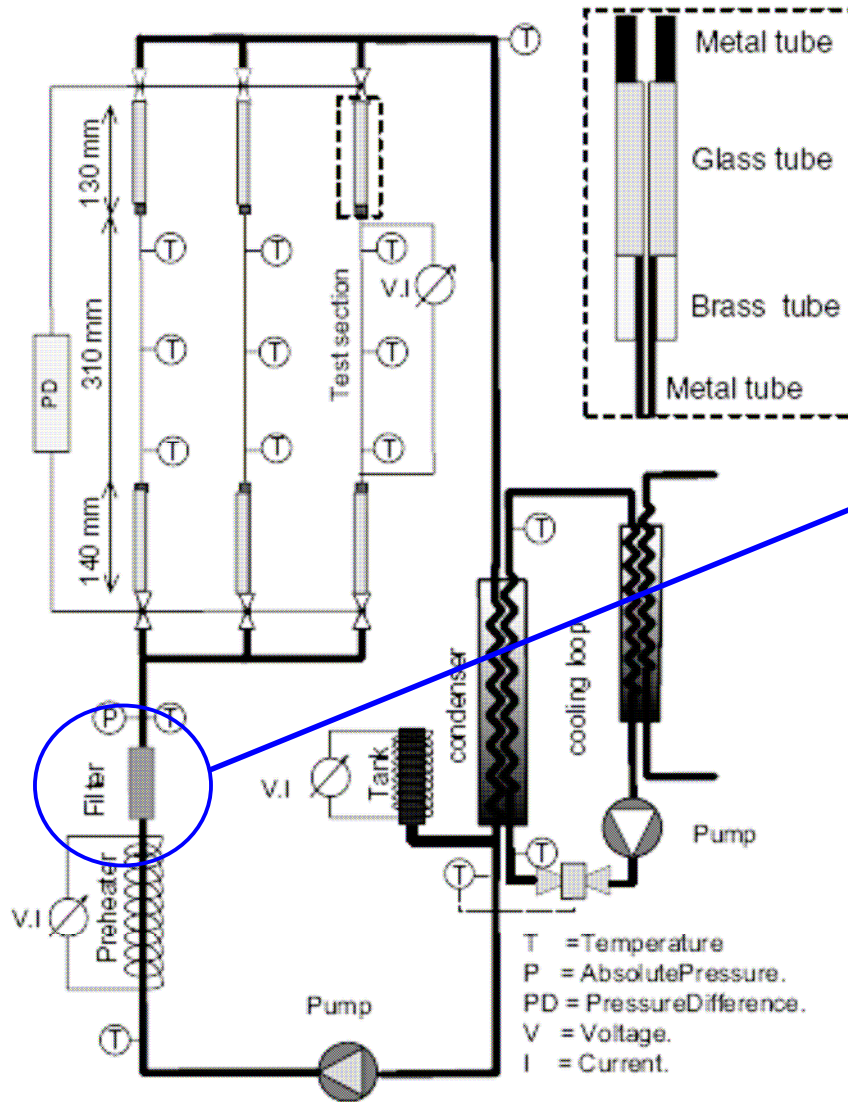
Pressão é controlado através do fluxo de água no condensador, controlando o nível de líquido.

Equipamento



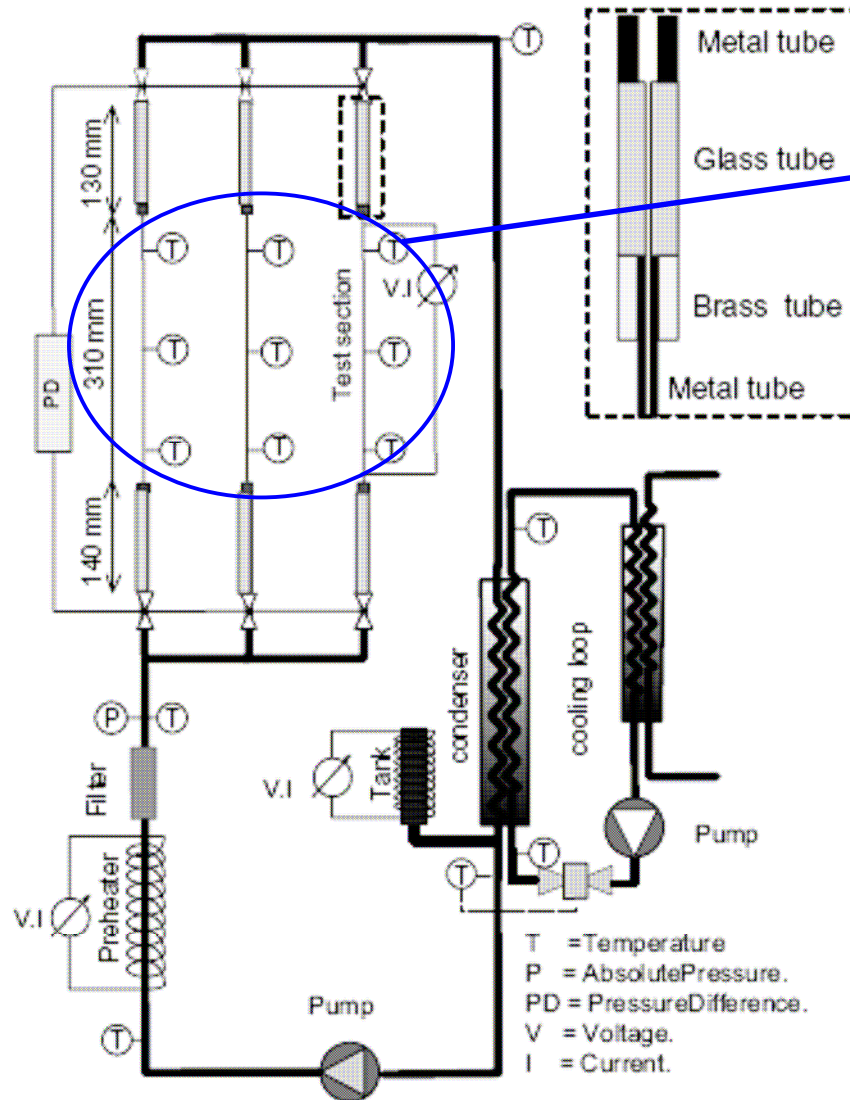
Controle do grau de subresfriamento de entrada através de um pré aquecedor.

Equipamento



Filtro de $7\mu\text{m}$ para evitar a entrada de partículas

Equipamento



Seção de teste com 3 tubos:

- 0,82 mm
- 1,22 mm
- 1,70 mm

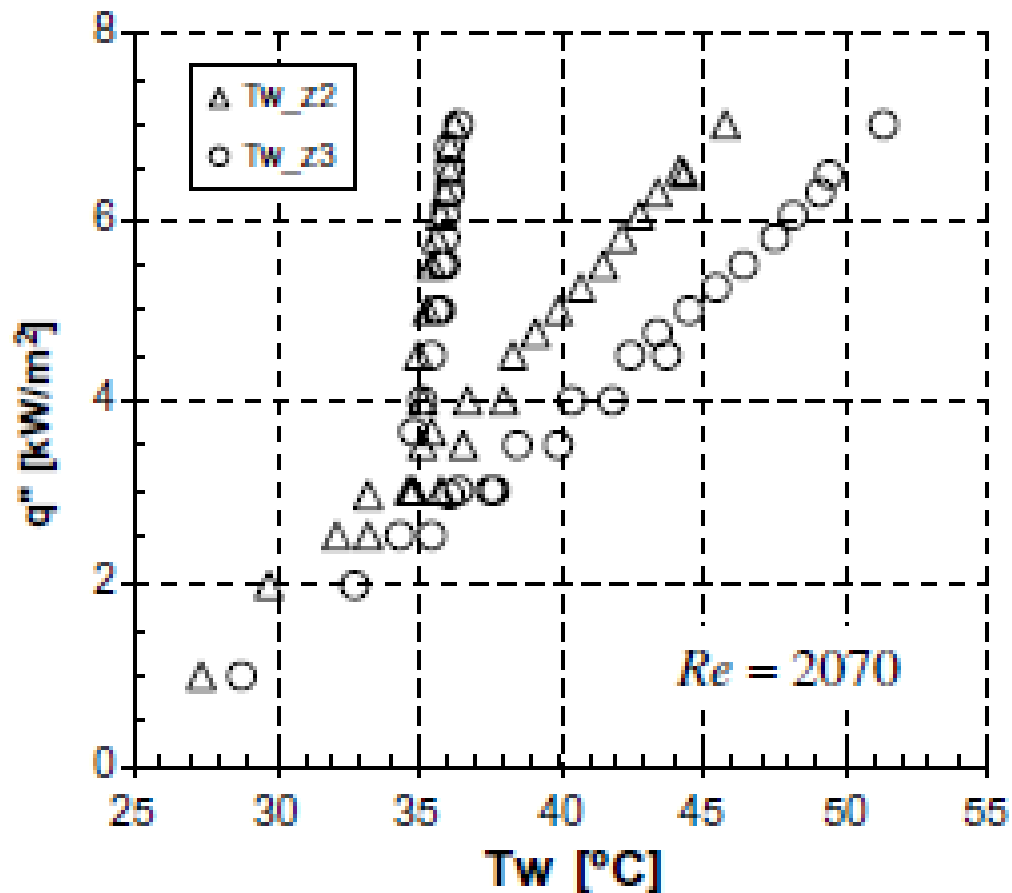
O comprimento total é de 310 mm, sendo 220 mm coberto por uma resistência.

As extremidades possuem um tubo de vidro de mesmo diâmetro

Sumário

- ◆ Escopo
- ◆ Introdução
- ◆ Bancada de teste
- ◆ **Resultados experimentais**
- ◆ Fechamento

Resultados



$$T_{\text{sat}} = 35^\circ\text{C}$$

$$? T_{\text{sub},i} = 10^\circ\text{C}$$

$$G = 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

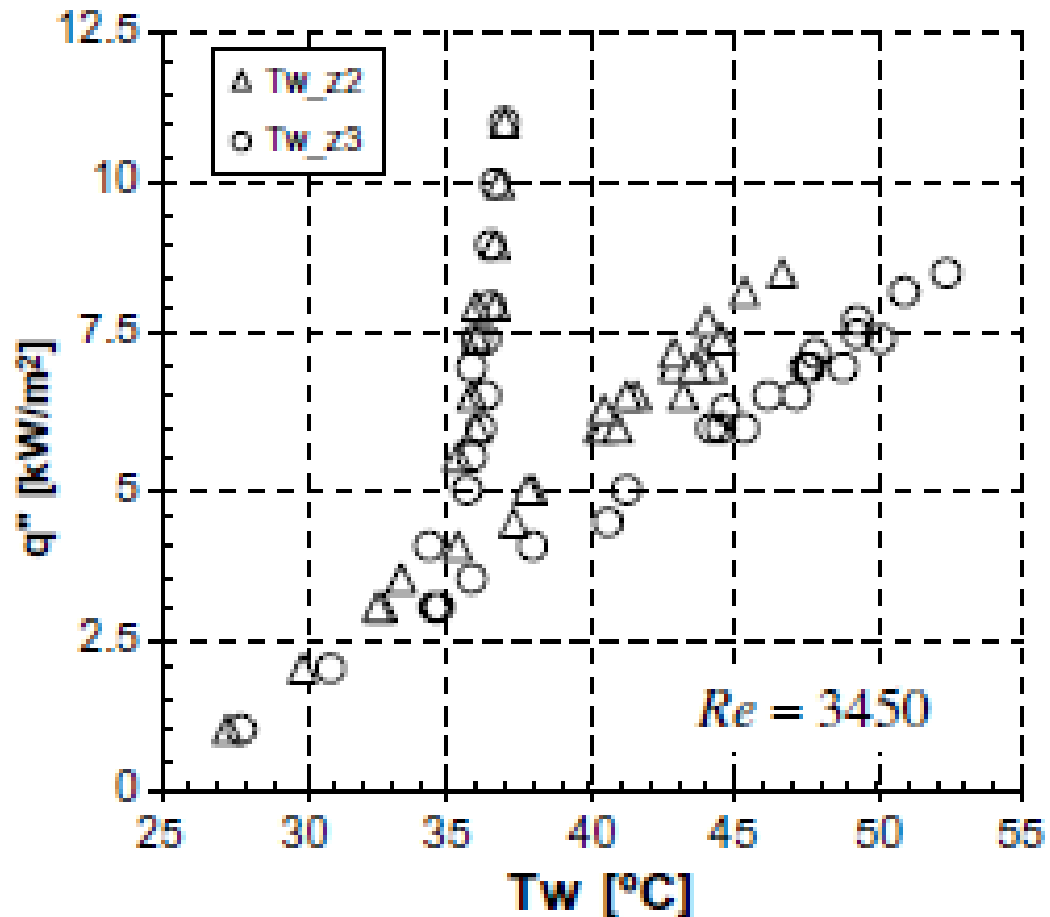
$$D = 1,22 \text{ mm}$$

$$Z_2 = 0,41 z_{\text{hs}}$$

$$Z_3 = 0,93 z_{\text{hs}}$$

- Inicialmente há apenas convecção
- Início da ebulição com aumento significativo da transferência de calor
- Crise de ebulição
- Evidencia de histerese

Resultados



$$T_{\text{sat}} = 35^{\circ}\text{C}$$

$$? T_{\text{sub},i} = 10^{\circ}\text{C}$$

$$G = 500 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$D = 1,22 \text{ mm}$$

$$Z_2 = 0,41 z_{\text{hs}}$$

$$Z_3 = 0,93 z_{\text{hs}}$$

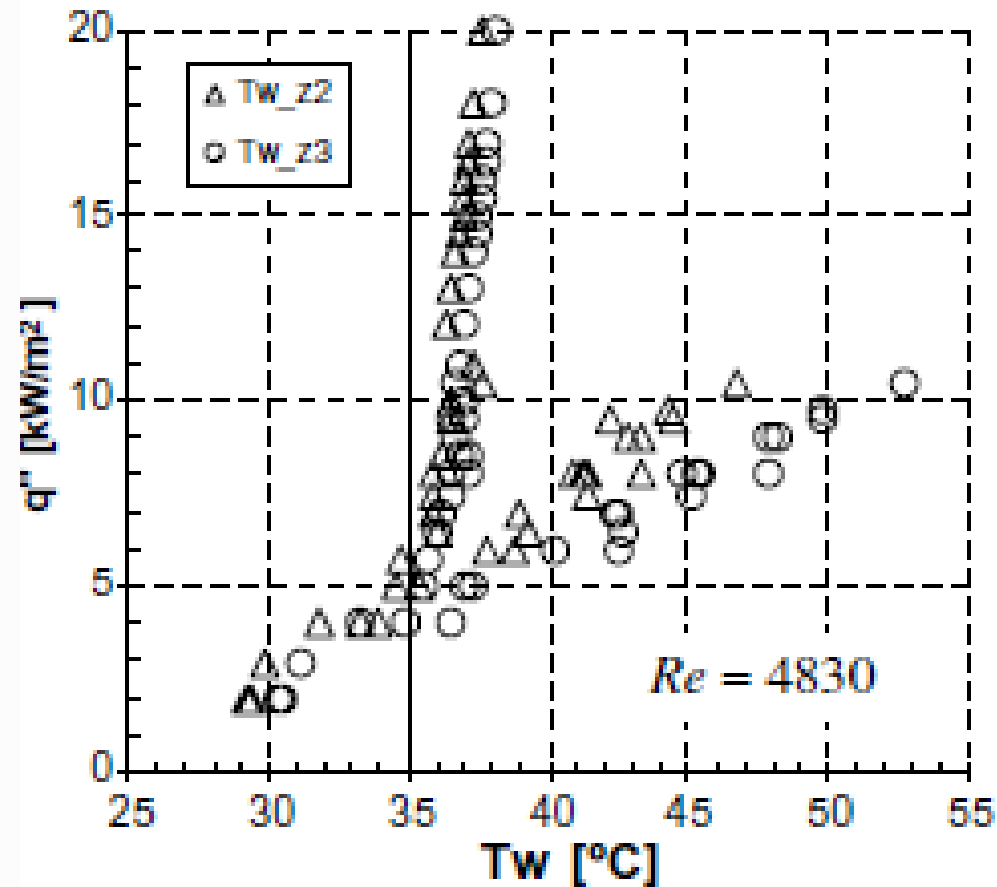
- Inicialmente há apenas convecção

- Início da ebulição com aumento significativo da transferência de calor

- Crise de ebulição

- Evidencia de histerese

Resultados



$$T_{sat} = 35^\circ\text{C}$$

$$? T_{sub,i} = 10^\circ\text{C}$$

$$G = 700 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$D = 1,22 \text{ mm}$$

$$Z_2 = 0,41 z_{hs}$$

$$Z_3 = 0,93 z_{hs}$$

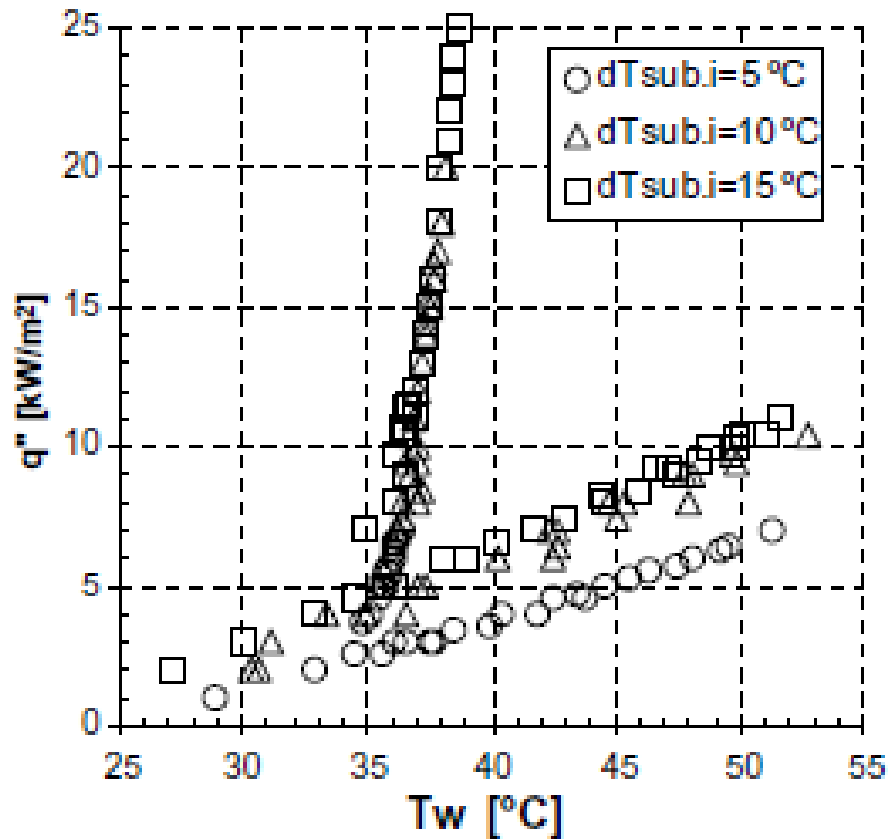
- Inicialmente há apenas convecção

- Início da ebulição com aumento significativo da transferência de calor

- Crise de ebulição

- Evidencia de histerese

Resultados



$$Z_3 = 0,93 z_{hs}$$

Durante o teste foi variado o fluxo de calor, sendo mantido constantes o fluxo de massa e temperatura de entrada

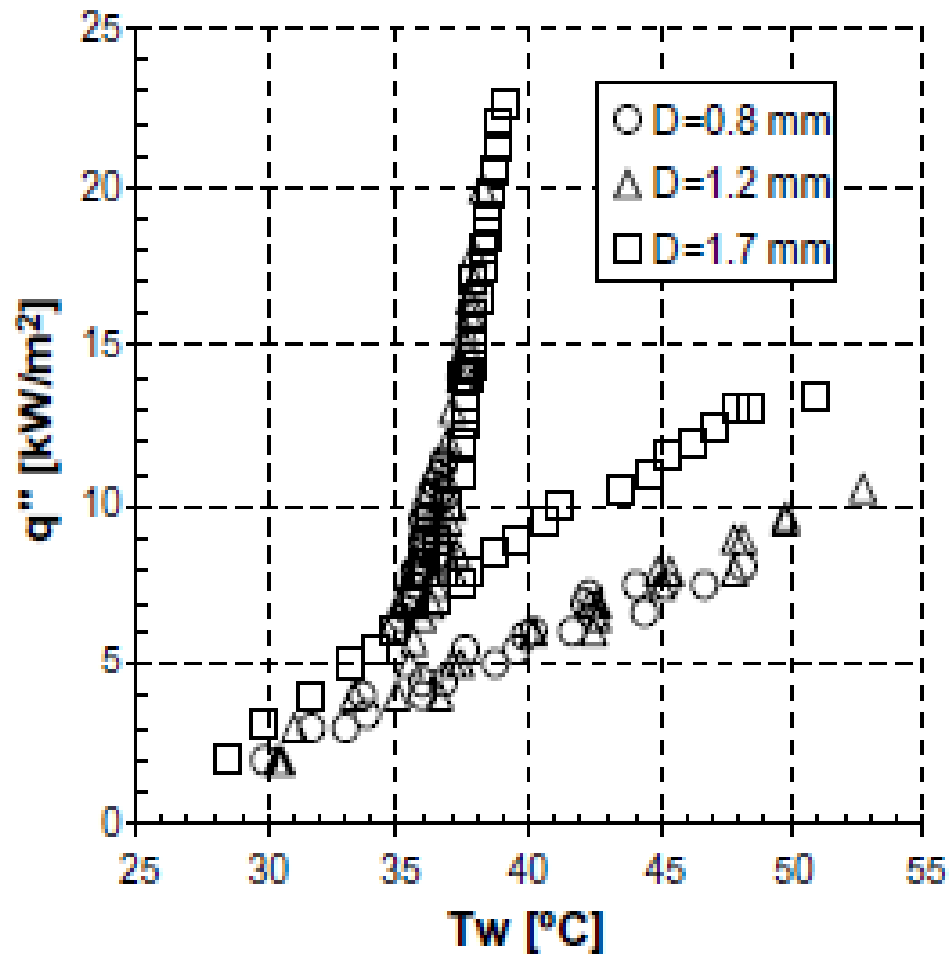
$$T_{sat} = 35^\circ\text{C}$$

$$? T_{sub,i} = 5, 10 \text{ e } 15^\circ\text{C}$$

$$G = 700 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$D = 1,22 \text{ mm}$$

Resultados



$$Z_3 = 0,93 z_{hs}$$

Durante o teste foi variado o fluxo de calor, sendo mantido constantes o fluxo de massa e temperatura de entrada

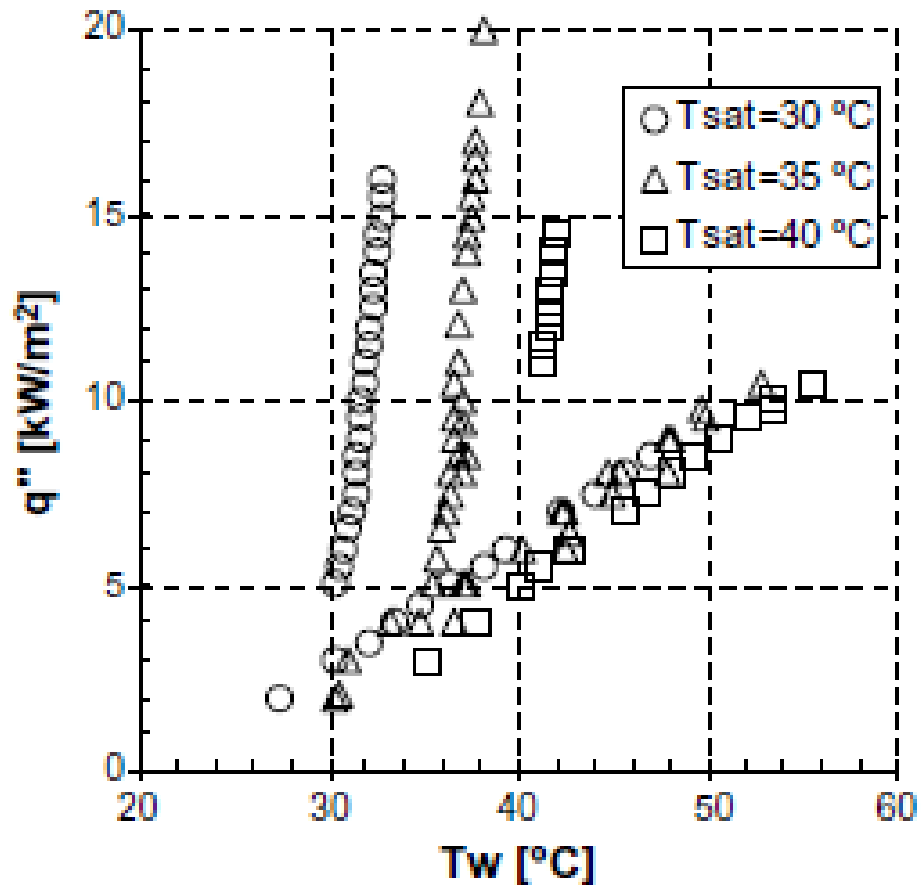
$$T_{sat} = 35^\circ\text{C}$$

$$? T_{sub,i} = 10^\circ\text{C}$$

$$G = 700 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$D = 0,83, 1,22 \text{ e } 1,70 \text{ mm}$$

Resultados



$$Z_3 = 0,93 z_{hs}$$

Durante o teste foi variado o fluxo de calor, sendo mantido constantes o fluxo de massa e temperatura de entrada

$$T_{sat} = 30, 35 \text{ e } 40^\circ\text{C}$$

$$? T_{sub,i} = 10^\circ\text{C}$$

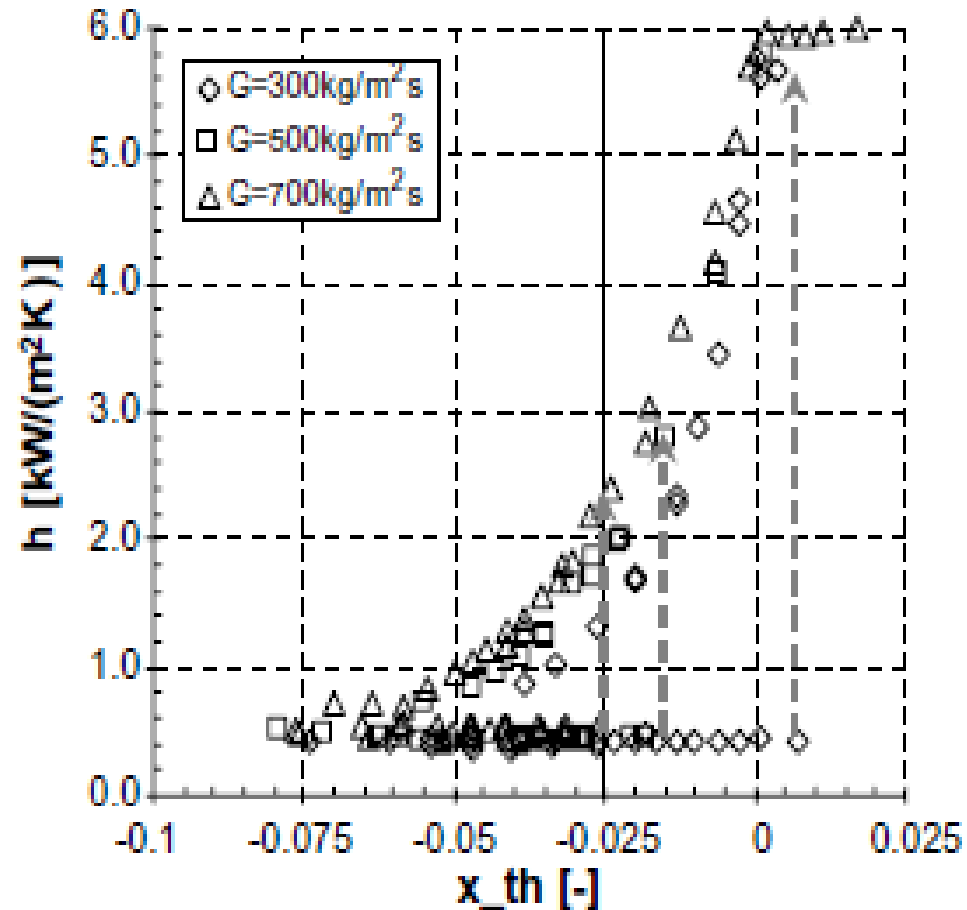
$$G = 700 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$D = 1,22 \text{ mm}$$

Observações

- ◆ Com todos os outros parâmetros fixos, fluxo de massa e subresfriamento de entrada parecem não influenciar a máxima temperatura de parede ou a T_{ONB}
- ◆ Porém ambos parâmetros afetam a mínima temperatura onde a ebulição é mantida. Quanto menor o fluxo de massa e o subresfriamento, menor a temperatura de parede.
- ◆ O autor não obteve uma conclusão sobre a influência do diâmetro do tubo máxima temperatura de parede.
- ◆ q'' aumenta com o aumento de fluxo de massa, grau de subresfriamento, diâmetro do tubo e pressão de saturação
- ◆ q'' obtido é consideravelmente maior que o obtido pelas correlações de Bergels e Rohsenow (1964) e Sato e Matsumura (1964)

Resultados



$$Z_3 = 0,93 z_{hs}$$

$$x_{th}(z) = \frac{q'' \pi D (z - z_{sat})}{AGi_{lg}}$$

Monofásico = convecção
Alta dependência de G

Para x_{th} pequenos, ainda
há alta dependência de G

Com o aumento de x_{th} , a
influência de G tende a
diminuir

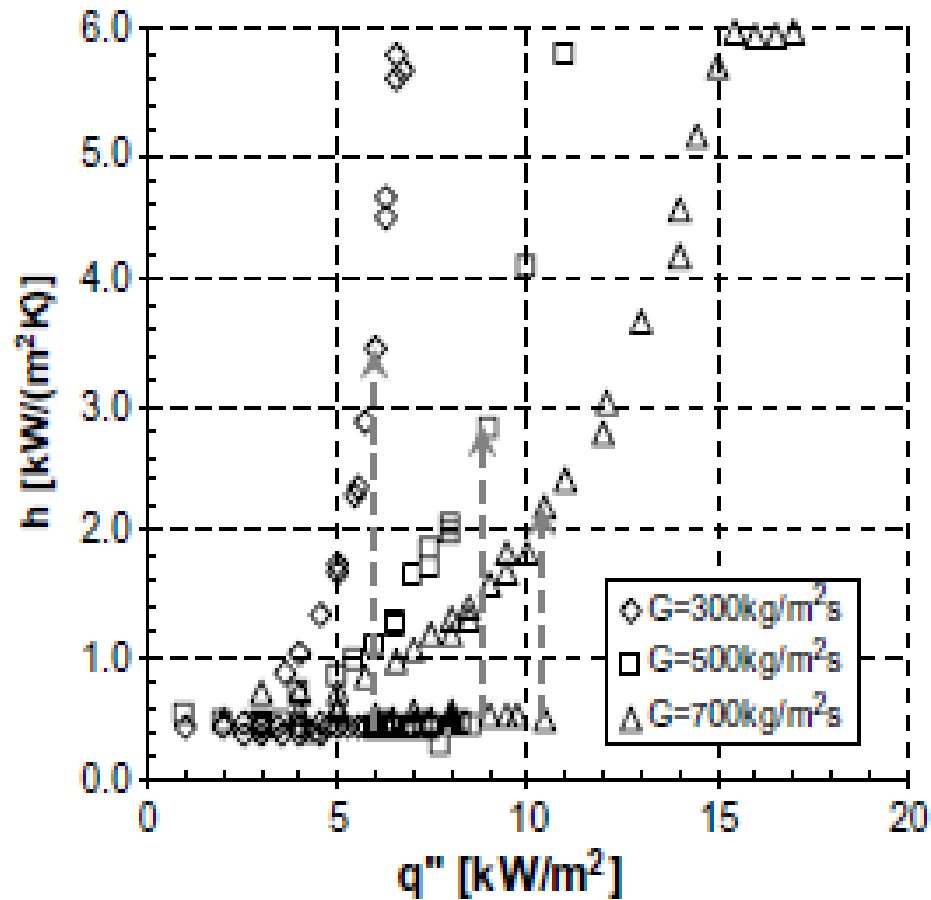
$$T_{sat} = 35^\circ\text{C}$$

$$G = 300, 5000 \text{ e } 700 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$$

$$? T_{sub,i} = 10^\circ\text{C}$$

$$D = 1,22 \text{ mm}$$

Resultados



$$Z_3 = 0,93 z_{hs}$$

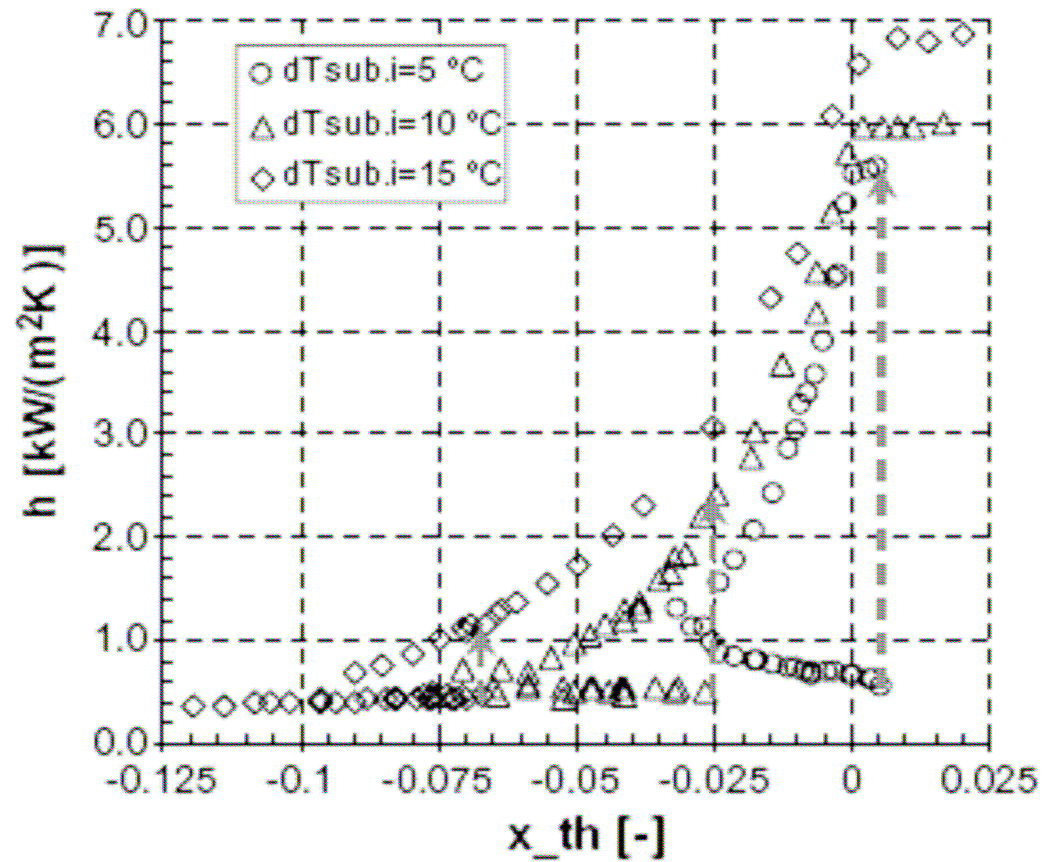
$$T_{\text{sat}} = 35^\circ\text{C}$$

$$? T_{\text{sub},i} = 10^\circ\text{C}$$

$$G = 300, 500 \text{ e } 700 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$D = 1,22 \text{ mm}$$

Resultados



$$Z_3 = 0,93 z_{hs}$$

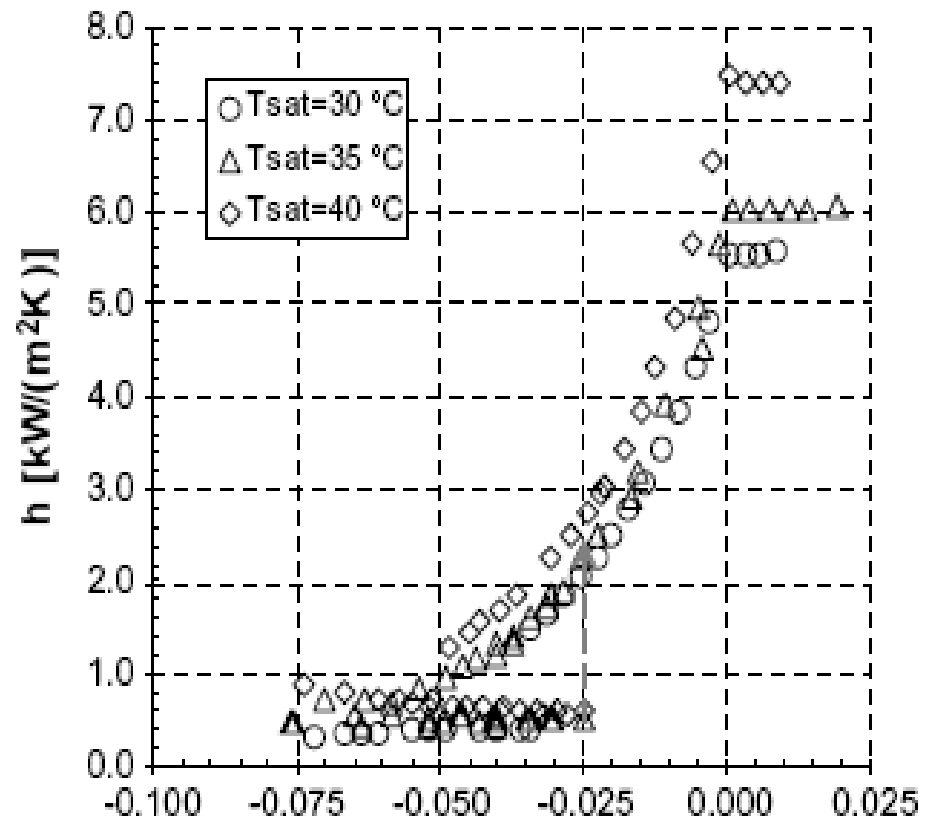
$$T_{sat} = 35^\circ\text{C}$$

$$? T_{sub,i} = 5, 10 \text{ e } 15^\circ\text{C}$$

$$G = 700 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$$

$$D = 1,22 \text{ mm}$$

Resultados



$T_{\text{sat}} = 30, 35 \text{ e } 40^\circ\text{C}$

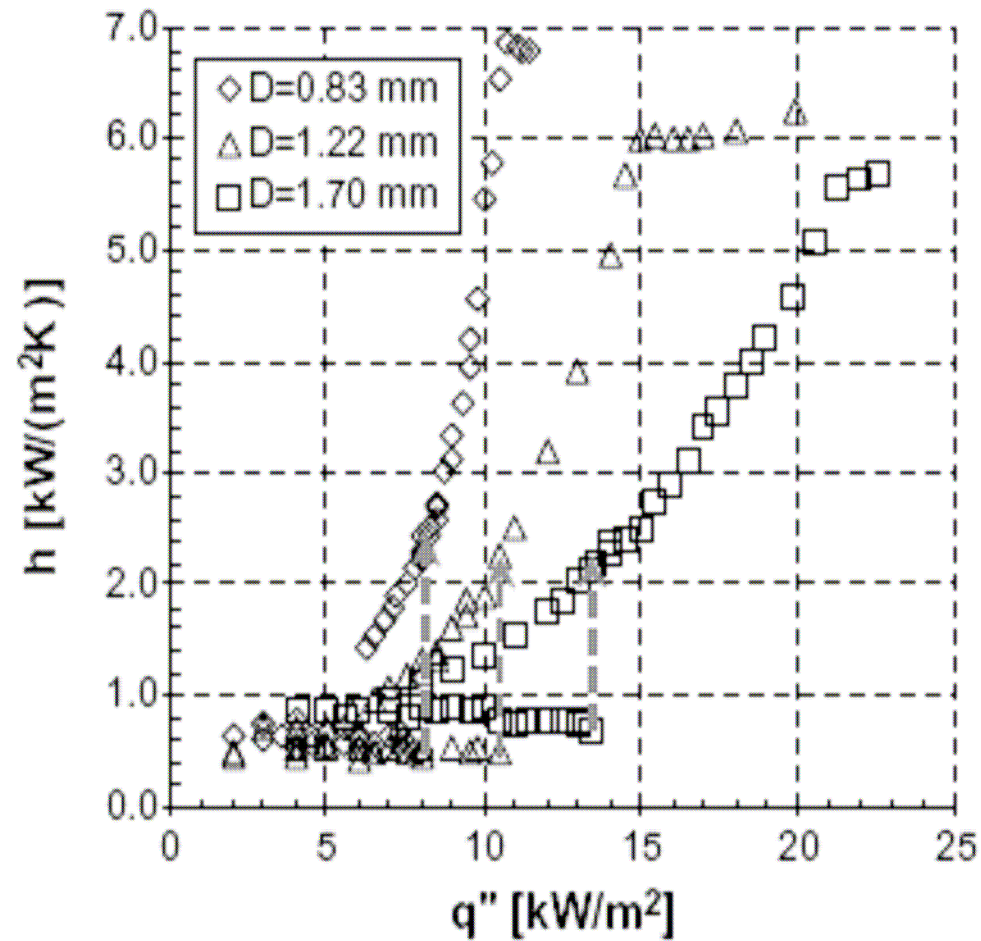
$G = 700 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$

? $T_{\text{sub},i} = 10^\circ\text{C}$

$D = 1,22 \text{ mm}$

$$Z_3 = 0,93 z_{\text{hs}}$$

Resultados



$$Z_3 = 0,93 z_{hs}$$

$$T_{\text{sat}} = 35^\circ\text{C}$$

$$? T_{\text{sub},i} = 10^\circ\text{C}$$

$$G = 700 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$$

$$D = 0,83, 1,22 \text{ e } 1,70 \text{ mm}$$

Observações

- ◆ Para um maior subresfriamento, um fluxo de calor maior é necessário para atingir um certo x_{th} em uma determinada posição
- ◆ Para uma mesma temperatura do fluido, a superfície é mais ativa a nucleação e o coeficiente de transferência de calor é maior quanto maior o fluxo de calor
- ◆ O aumento da pressão aumenta transferência de calor. Pode ser relacionado à ativação adicional de pequenas nucleações.
- ◆ Quanto menor o diâmetro interno do tubo, maior o coeficiente de transferência de calor para um dado fluxo de massa.

Sumário

- ◆ Escopo
- ◆ Introdução
- ◆ Revisão teórica
- ◆ Bancada de teste
- ◆ Resultados experimentais
- ◆ **Fechamento**

Fechamento

- ◆ Com os experimentos realizados foi possível entender a influencia dos parâmetros sobre a curva de ebulição
- ◆ Resultados experimentais muito diferentes dos obtidos pelas correlações usadas: Shah (1977), Gungor e Winterton (1983) e Kadlikar (1998)
- ◆ Diferença para a correlação de Shah:

G (kg/m ² s)	MAD (%)	$\Delta T_{\text{sub},i}$ (°C)	MAD (%)	D (mm)	MAD (%)	T_{sat} (°C)	MAD (%)
300	-44.7	5	-36.9	0.83	-27.4	30	-12.5
500	-22.3	10	-13.7	1.22	-13.7	35	-13.7
700	-13.7	15	-8.1	1.70	-5.9	40	-24.7

$$\text{MAD} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{h_{\text{pred}} - h_{\text{exp}}}{h_{\text{exp}}} \right) \cdot 100$$