

# EBULIÇÃO CONVECTIVA EM MICRO E MINI-CANAIS

## Participantes do Projeto:

Júlio César Passos (Orientador)

Evandro Rodrigo Dário (Mestrando)

Eduardo Victor Dias (Aluno de IC)

Gil Goss Júnior (Aluno de IC)

# Sumário

- **Introdução**
- **Objetivos e Aplicações**
- **Revisão Bibliográfica**
- **Bancada de testes**
- **Seção de testes**
- **Resultados**
- **Conclusões**
- **Referências**

# Objetivos e Aplicações

- **Estudo da transferência de calor e da queda de pressão no escoamento de n-Pentano no interior de um mini-canal anular com  $d_h = 0,5$  mm;**
  - **Comparação dos dados obtidos experimentalmente com modelos e correlações da literatura;**
  - **Visualização dos diferentes padrões de escoamento durante o escoamento bifásico.**

## Aplicações

- **Refrigeração de componentes eletrônicos;**
- **Condicionamento de ar automotivo;**
- **Resfriamento de células a combustível;**
- **Controle térmico espacial;**
- **Processos de engenharia de mini-canais.**

# Revisão Bibliográfica

## Coeficiente de transferência de calor por convecção (h)

- Utilização do diâmetro aquecido equivalente ao invés do diâmetro hidráulico.

$$D_{a,e} = \frac{d_2^2 - d_1^2}{d_1} = 1mm = 2D_h \quad \text{Bai et al (2001)}$$

- Escoamento Monofásico: modelo de Churchill e Ozoe (1973) para fluxo de calor constante na região de entrada combinada em tubos circulares;
- Escoamento Bifásico: modelos Gungor (1989) e de Kandlikar (1990) para mini-canais.

## Queda de pressão em escoamento monofásico

- Equação de Darcy-Weisbach:

$$\Delta p = f \frac{\rho V^2}{2} \frac{L}{D_h} \quad \text{onde:} \quad f = \frac{96}{\text{Re}_{D_h}}$$

# Bancada de testes

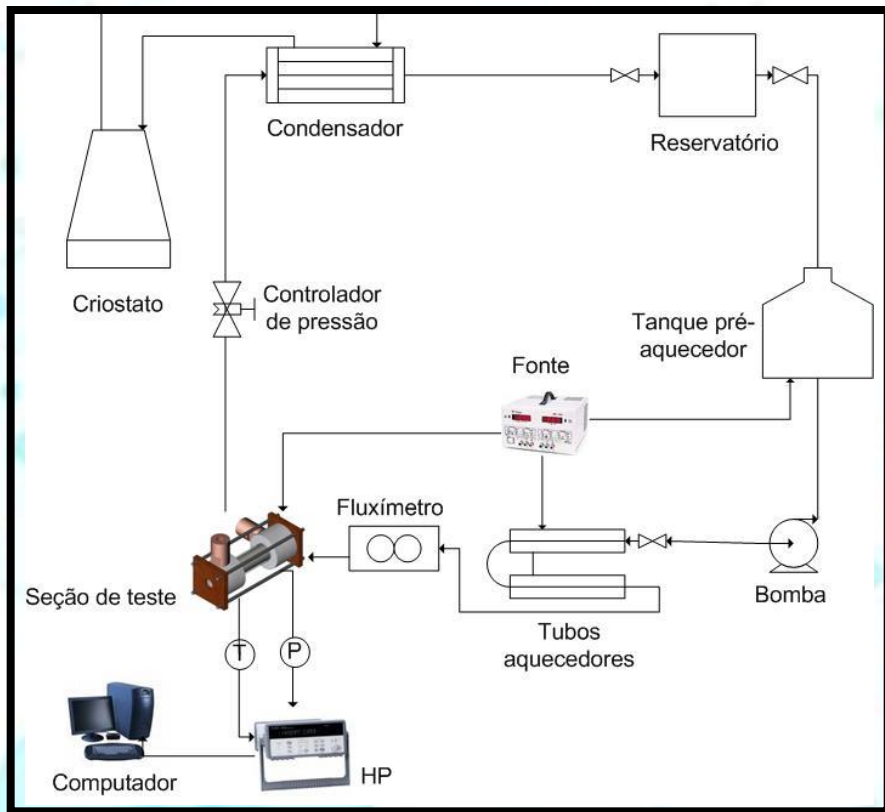


Figura 1 - Esquema da bancada de testes.



Figura 2 - Fotografia da bancada.

# Seção de testes

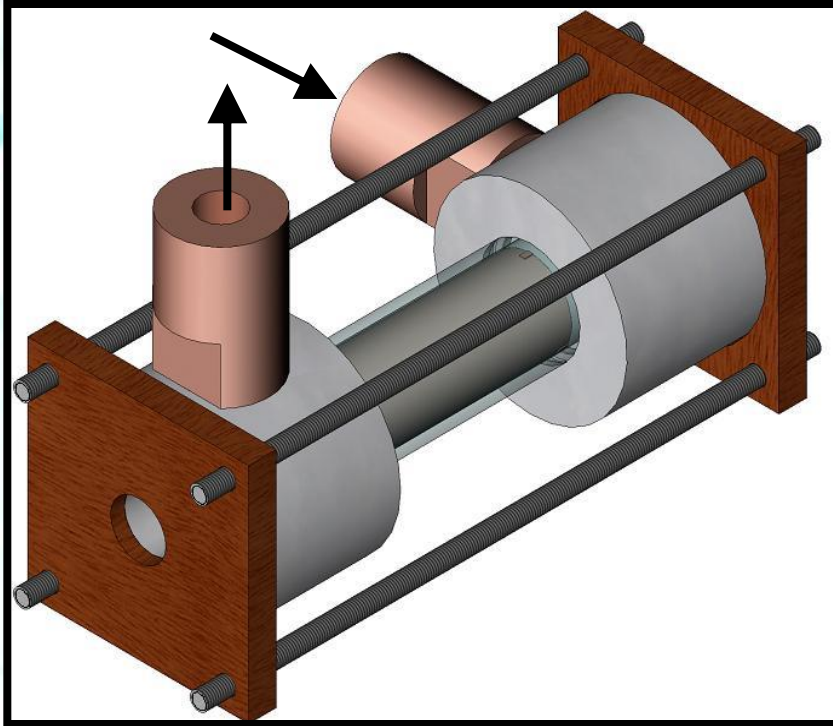


Figura 3 - Desenho da seção de teste.

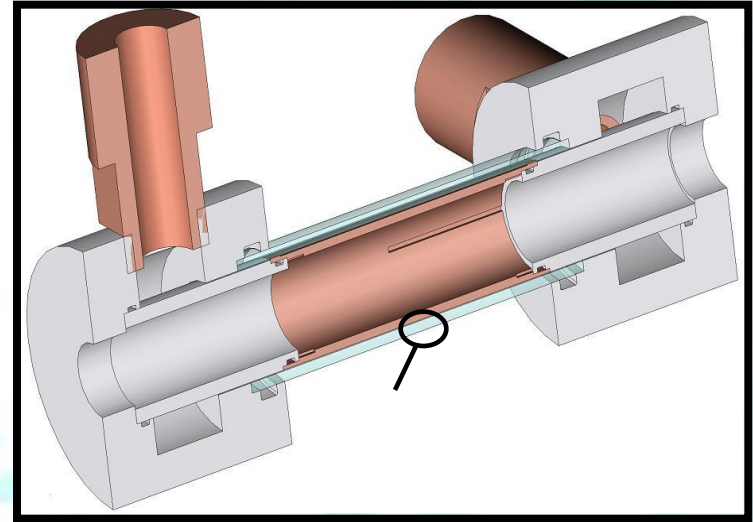


Figura 4 - Seção de teste em corte.

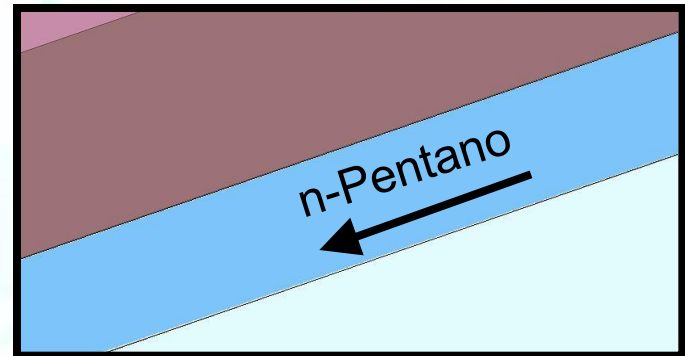


Figura 5 - Mini-canal ampliado.

# Resultados

- Coeficiente de transferência de calor por convecção em escoamento monofásico:

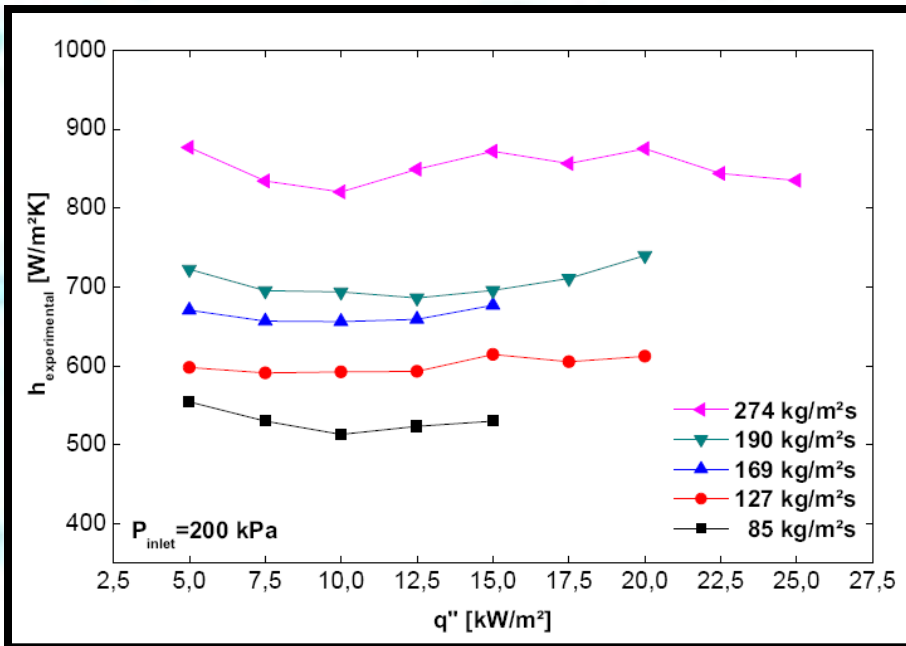


Figura 6 - Resultados experimentais de  $h \times q''$ .

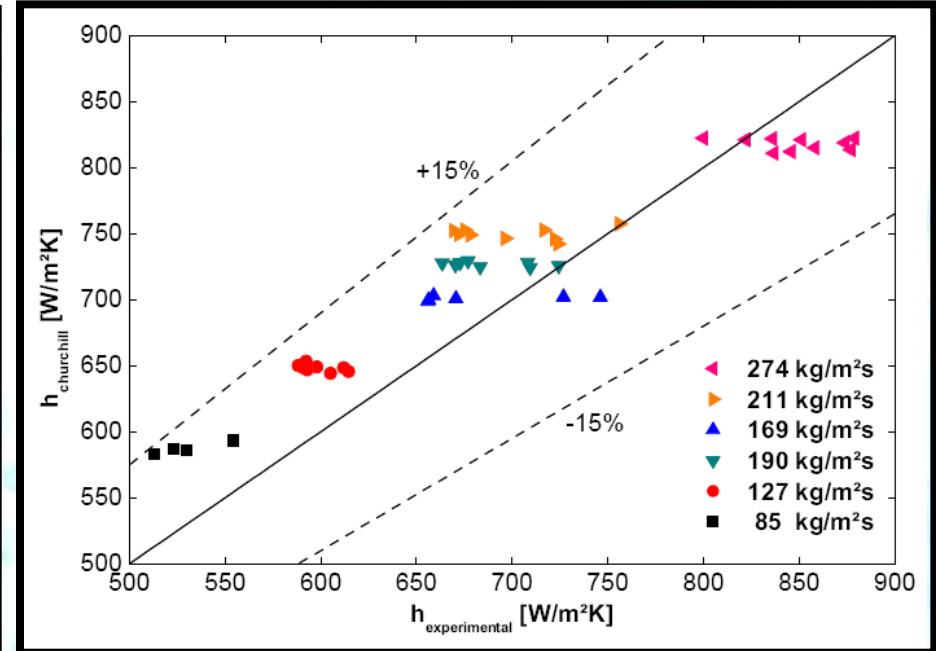


Figura 7 - Comparação entre  $h_{\text{exp}}$  e  $h_{\text{teór}}$  calculado com a correlação de Churchill e Ozoe (1973).

# Resultados

- Coeficiente de transferência de calor por convecção em escoamento bifásico:

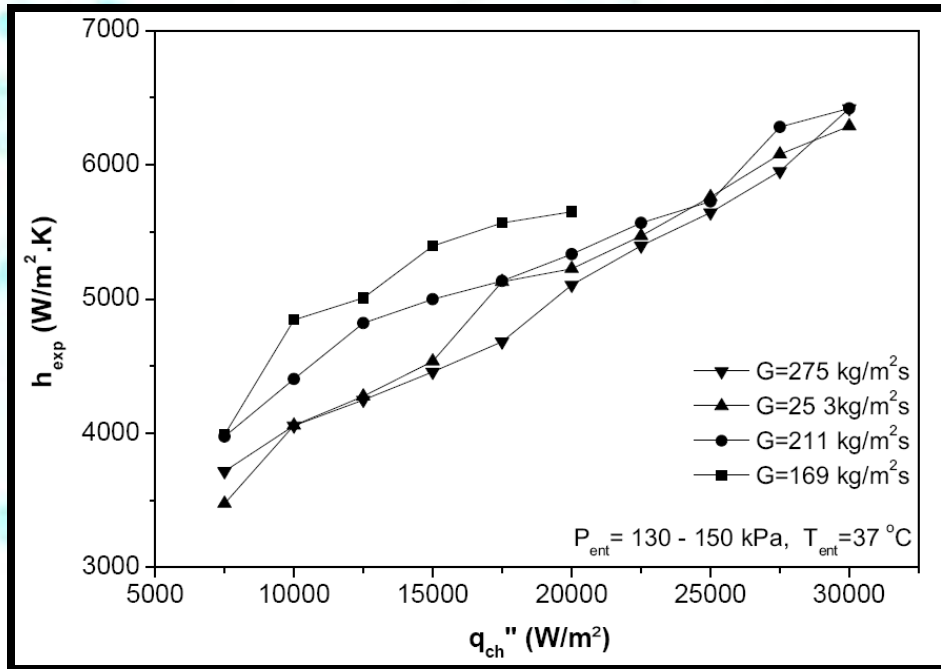


Figura 8 - Resultados experimentais de  $h \times q''$ .

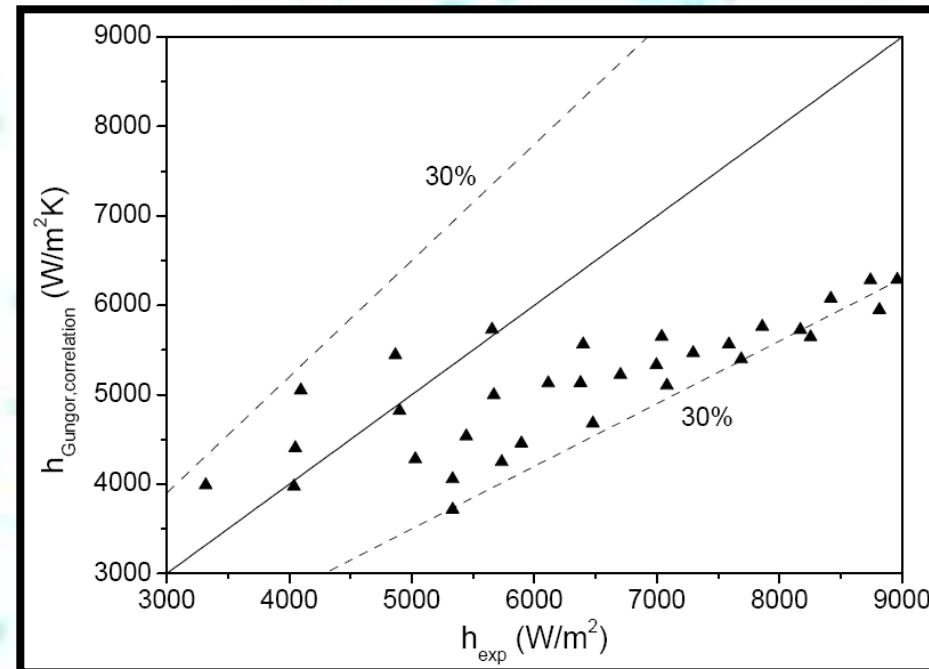


Figura 9 - Comparação entre  $h_{exp}$  e  $h_{teór}$ , calculado através do modelo de Gungor(1989).



# Resultados

- Coeficiente de transferência de calor por convecção em escoamento bifásico:

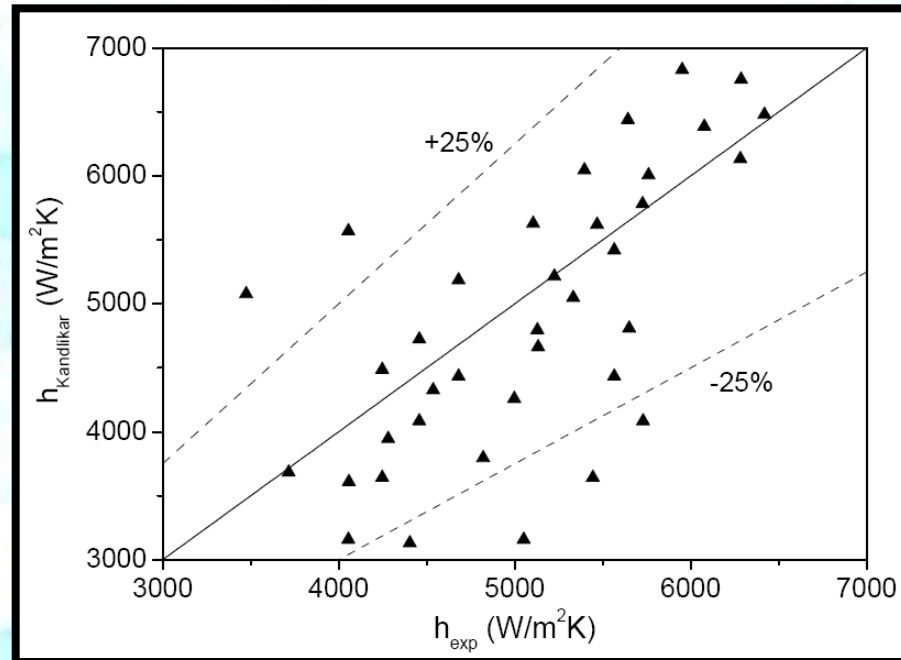


Figura 10 - Comparação entre  $h_{\text{exp}}$  e  $h_{\text{teór}}$ , calculado através do modelo de Kandlikar (2001).

# Resultados

- Queda de pressão em escoamento monofásico:

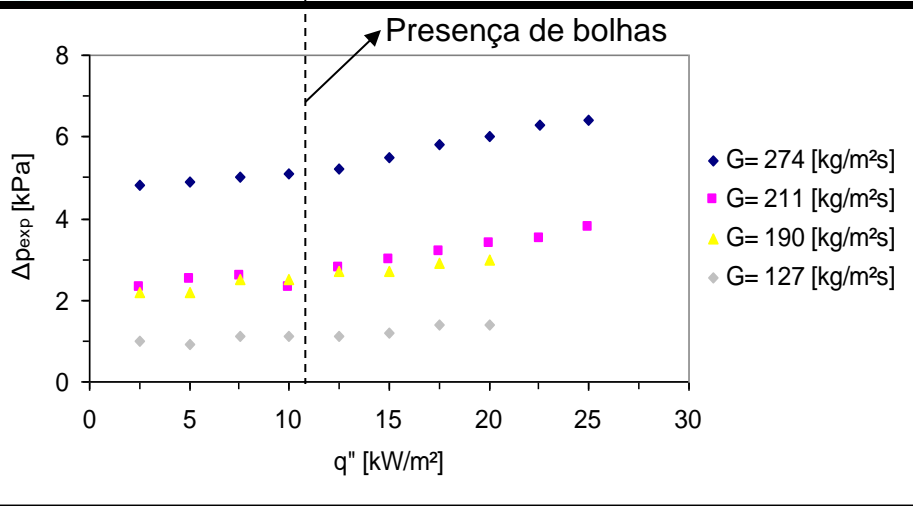


Figura 11 - Dados experimentais para a queda de pressão potada em função de  $q''$ .

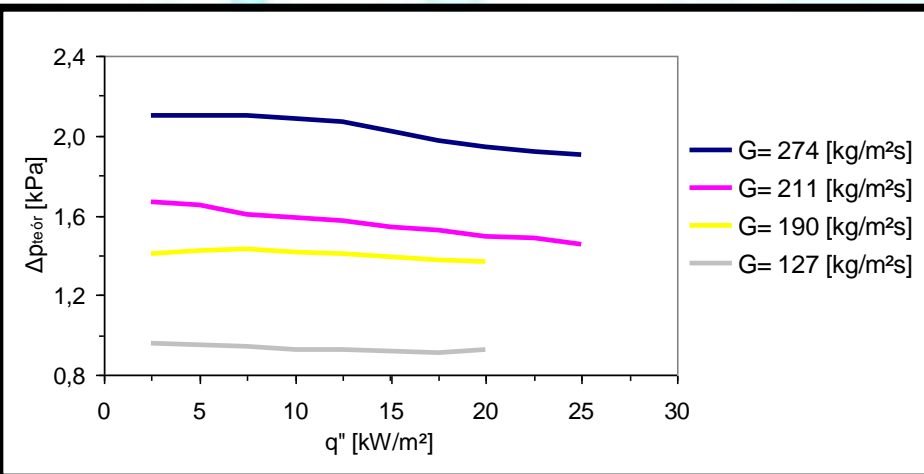


Figura 12 - Queda de pressão calculada através da equação de Darcy-Weisbach.

# Visualização

Direção do escoamento



$$T_{\text{ent}} = 36,5^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{sub}} = 6 \text{ a } 10^{\circ}\text{C}$$

- $G = 169 \text{ kg/m}^2\text{s}$ :



$$q'' = 12,5 \text{ kW/m}^2$$

$$P_{\text{ent}} = 132 \text{ kPa}; P_{\text{saída}} = 126 \text{ kPa}$$

$$x_{z=L} = 0,069 \text{ Re}_l = 1548$$



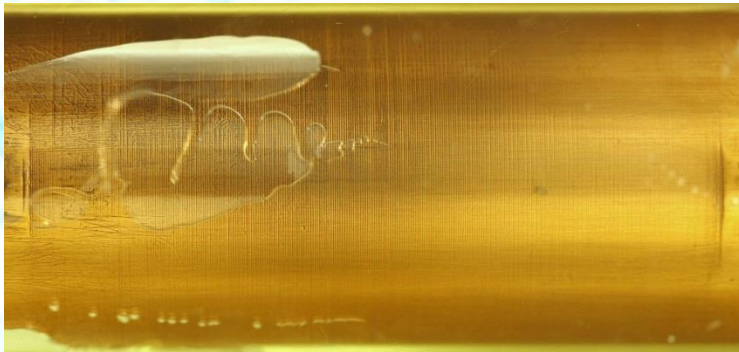
$$q'' = 20 \text{ kW/m}^2$$

$$P_{\text{ent}} = 131 \text{ kPa}; P_{\text{saída}} = 123 \text{ kPa}$$

$$x_{z=L} = 0,106 \text{ Re}_l = 952$$

# Visualização

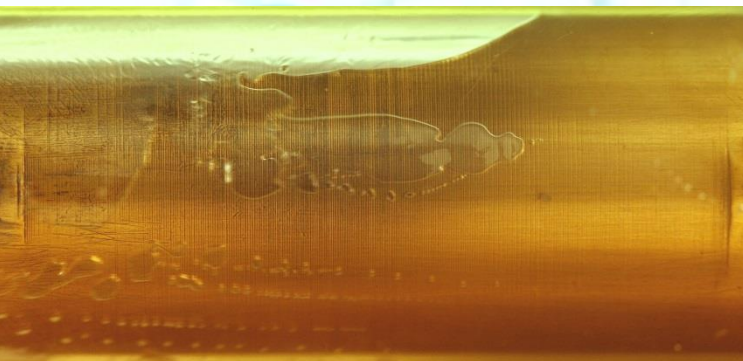
- $G=253 \text{ kg/m}^2\text{s}$ :



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

$$P_{\text{ent}} = 137 \text{ kPa}; P_{\text{saída}} = 127 \text{ kPa}$$

$$x_{z=L} = 0,073 \quad Re_l = 1460$$



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

$$P_{\text{ent}} = 155 \text{ kPa}; P_{\text{saída}} = 143 \text{ kPa}$$

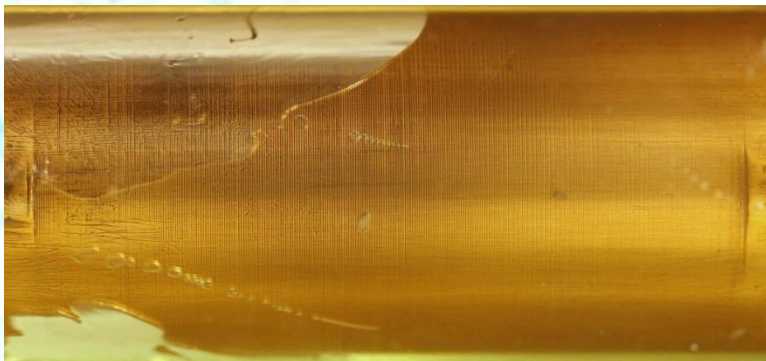
$$x_{z=L} = 0,11 \quad Re_l = 1442$$

$$q'' = 25 \text{ kW/m}^2$$
$$P_{\text{ent}} = 145 \text{ kPa}; P_{\text{saída}} = 134 \text{ kPa}$$

$$x_{z=L} = 0,091 \quad Re_l = 1450$$

# Visualização

- $G=274 \text{ kg/m}^2\text{s}$ :



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

$$P_{\text{ent}} = 139 \text{ kPa}; P_{\text{saída}} = 128 \text{ kPa}$$

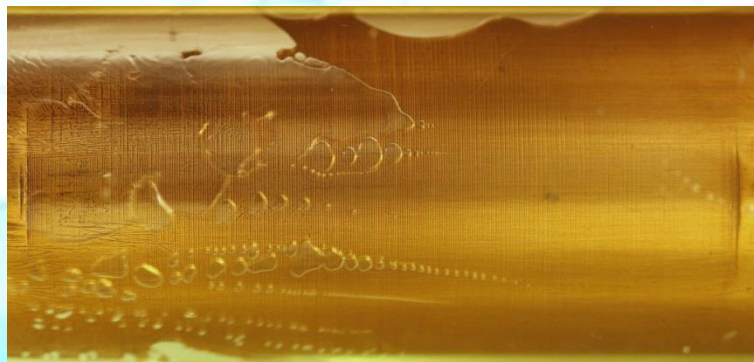
$$x_{z=L} = 0,066 \quad Re_l = 1621$$



$$q'' = 25 \text{ kW/m}^2$$

$$P_{\text{ent}} = 147 \text{ kPa}; P_{\text{saída}} = 136 \text{ kPa}$$

$$x_{z=L} = 0,084 \quad Re_l = 1585$$



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

$$P_{\text{ent}} = 156 \text{ kPa}; P_{\text{saída}} = 144 \text{ kPa}$$

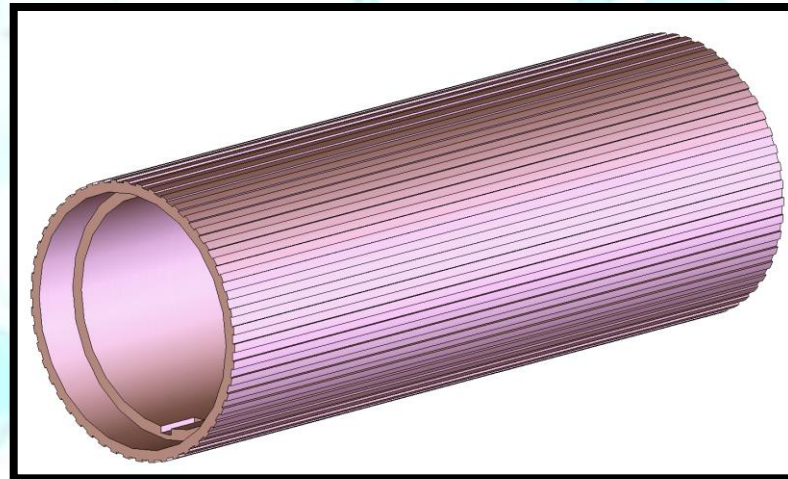
$$x_{z=L} = 0,101 \quad Re_l = 1586$$

# Conclusões

- O CTCC, monofásico, aumenta com o aumento da velocidade mássica e é pouco dependente do fluxo de calor;
- Em escoamentos bifásicos, o  $h$  apresenta forte dependência do fluxo de calor e não varia muito com a velocidade mássica;
- O  $h$  previsto pela correlação de Churchill e Ozoe (1973), para a convecção monofásica, apresentou variação média de 6,9% quando comparado com os valores experimentais;
- Os modelos de Gungor (1989) e Kandlikar (2001), para a ebulição convectiva, apresentaram, para o CTCC, variação média de 28% e 14%, respectivamente, na comparação com os dados experimentais;
- A perda de carga prevista por modelos da literatura apresentou valores da queda de pressão, no mini-canal, inferiores a 50% daqueles obtidos experimentalmente.

# Perspectivas

- **Estudo da perda de carga em escoamento bifásico;**
- **Visualização do escoamento bifásico utilizando-se uma câmera de alta velocidade;**
- **Utilização de outra seção de testes, contendo 47 mini-canais paralelos com seção transversal retangular;**



Tubo com 47 mini-canais.

- **Adaptar a bancada para estudar o comportamento de outros fluidos de trabalho, como o CO<sub>2</sub>.**

# Referências

BAI, B.F., HUANG, R., GUO, L.J., XIAO, Z.J., 2003, Physical model of critical heat flux with annular flow in annulus tubes (Chinese). J. Eng. Thermophys. 24, 251–254.

CHURCHILL, S. W., OZOE, H., 1973, Correlations for forced convection with uniform heating in flow over a plate and in developing and fully developed flow in a tube, J. Heat Transfer, Vol. 95, pp. 78-84.

GUNGOR, K.E., WINTERTON, R.H.S., 1989, A general correlation for flow boiling in tubes and annuli, Int. J. Heat Mass Transfer 29 pp. 351–358.

KANDLIKAR, S.G., 2001. Two-phase flow patterns, pressure drop and heat transfer during boiling in minichannel and microchannel flow passages of compact heat exchangers. In: Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industries, Begell House, New York, pp. 319–334.

GOSS, G.J, DIAS, E.V., 2007, Comportamento térmico e Hidráulico do escoamento de n-Pentano no Interior de um Mini-canal, Prêmio Petrobrás de Tecnologia, Relatório de Pesquisa, LEPTEN-EMC-UFSC, 40 pág.