

" ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TROCA DE CALOR
POR EBULIÇÃO NUCLEADA "

ALFREDO JOSÉ ALVIM DE CASTRO

IPEN-CNEN/S.P.

PEDRO CARAJILESCOV

ITA-CTA-SÃO JOSÉ DOS CAMPOS-S.P.

RESUMO

Este trabalho, destina-se ao estudo dos fatores que afetam o superaquecimento superficial no regime de ebulição nucleada sub-resfriada. Para este fim, foi projetado e construído um "apparatus" experimental no Laboratório de Termociências da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. A ebulição nucleada é analisada em uma seção de testes anular com escoamento de água ascendente. São realizados experimentos variando os seguintes parâmetros: pressão, velocidade e temperatura de entrada do fluido na seção de testes.

Os resultados obtidos demonstram que os parâmetros de maior influência sobre o processo de troca de calor por ebulição nucleada sub-resfriada são a pressão, o fluxo de calor e quantidade de ar dissolvido na água.

O desempenho do "apparatus" experimental é avaliado através dos resultados obtidos e dos problemas surgidos durante os experimentos.

I) INTRODUÇÃO

A ebulição nucleada consiste no regime de troca de calor de maior interesse para o projeto térmico de reatores nucleares, por permitir que altos fluxos de calor sejam atingidos de maneira estável, para moderados super-aquecimentos da superfície.

Diversos fatores afetam o processo de ebulição nucleada, podendo ser mencionadas a pressão do sistema, a velocidade de escoamento do fluido, o grau de sub-resfriamento (definido como sendo a diferença entre a temperatura de saturação do fluido, à pressão do sistema, e a sua temperatura de mistura), o acabamento da superfície de aquecimento, assim como as características de molhamento do fluido em relação ao material da superfície.

A ebulição nucleada tem sido pesquisada por diversos autores. Entre esses trabalhos, alguns merecem destaque pela contribuição que representam para o projeto térmico de equipamentos. Mac Adams et al⁽¹⁾ estudaram ebulição nucleada sub-resfriada com água pura, em uma seção de testes anular; com um tubo de aço inoxidável aquecido eletricamente. Os dados obtidos por Mac Adams são representados por

$$(T_w - T_{sat}) = (\Delta T_{sat}) = \psi (q'')^{0,259}, \quad (1)$$

onde:

- T_w - temperatura da parede de aquecimento, dado em °C;
- T_{sat} - temperatura de saturação do fluido à pressão do sistema, dado em °C;
- $(T_w - T_{sat})$ - grau de super-aquecimento da superfície, dado em °C;
- q'' - fluxo de calor, dado em MW/m²;
- $\psi=22,62$ - coeficiente da equação para uma concentração de 300 cm³ de ar em 1 m³ de água;
- $\psi=28,92$ - coeficiente da equação para uma concentração de 60 cm³ de ar em 1 m³ de água.

A equação (1) representa os dados satisfatoriamente para:

- V_{st} - velocidade na seção de testes de 0,3 a 11,0 m/s;
 ΔT_{sub} - 11,0 a 83,0 °C;
 Faixa de pressão - 2 a 6 bar.

Jens e Lottes⁽²⁾, a partir de experimentos com escoamento ascendente em tubos verticais de níquel e aço inoxidável, desenvolveram a equação

$$\Delta T_{sat} = 25 (q'')^{0,25} \cdot e^{-P/62}, \quad (2)$$

onde P é a pressão do fluido em bar, q'' em MW/m² e ΔT_{sat} em °C.

A equação (2) é válida nas seguintes faixas de valores:

- $q'' < 12,5 \text{ MW/m}^2$;
 $G - 11 \text{ a } 1,05 \times 10^4 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, onde G representa vazão mássica por unidade de área;
 $T_f - 115 \text{ a } 340 \text{ }^\circ\text{C}$, onde T_f representa a temperatura de mistura do fluido;
 Faixa de pressão - 7 a 172 bar.

Thom et al⁽³⁾, através de estudos de ebulição nucleada sub-resfriada para água, em tubos e canais anulares de aço inoxidável, obtiveram a correlação

$$\Delta T_{sat} = 22,65 (q'')^{0,5} \cdot e^{-(P/87)}, \quad (3)$$

onde P é dada em bar, q'' é dado em MW/m² e ΔT_{sat} é obtido em °C.

A correlação de Thom foi desenvolvida para parâmetros nas faixas :

- P - 50 a 130 bar;
 V_{st} - 1,50 a 6,00 m/s;
 ΔT_{sub} - 20 a 100 °C;
 q'' - até 1,60 MW/m².

Infelizmente, muito pouco tem sido feito no Brasil neste campo. O presente trabalho representa um esforço para a obtenção de dados experimentais em escoamentos com ebulição nucleada. Desta forma, foi projetado e construído um "apparatus" experimental na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro para o estudo dos fatores que afetam este fenômeno.

II) "APPARATUS" EXPERIMENTAL

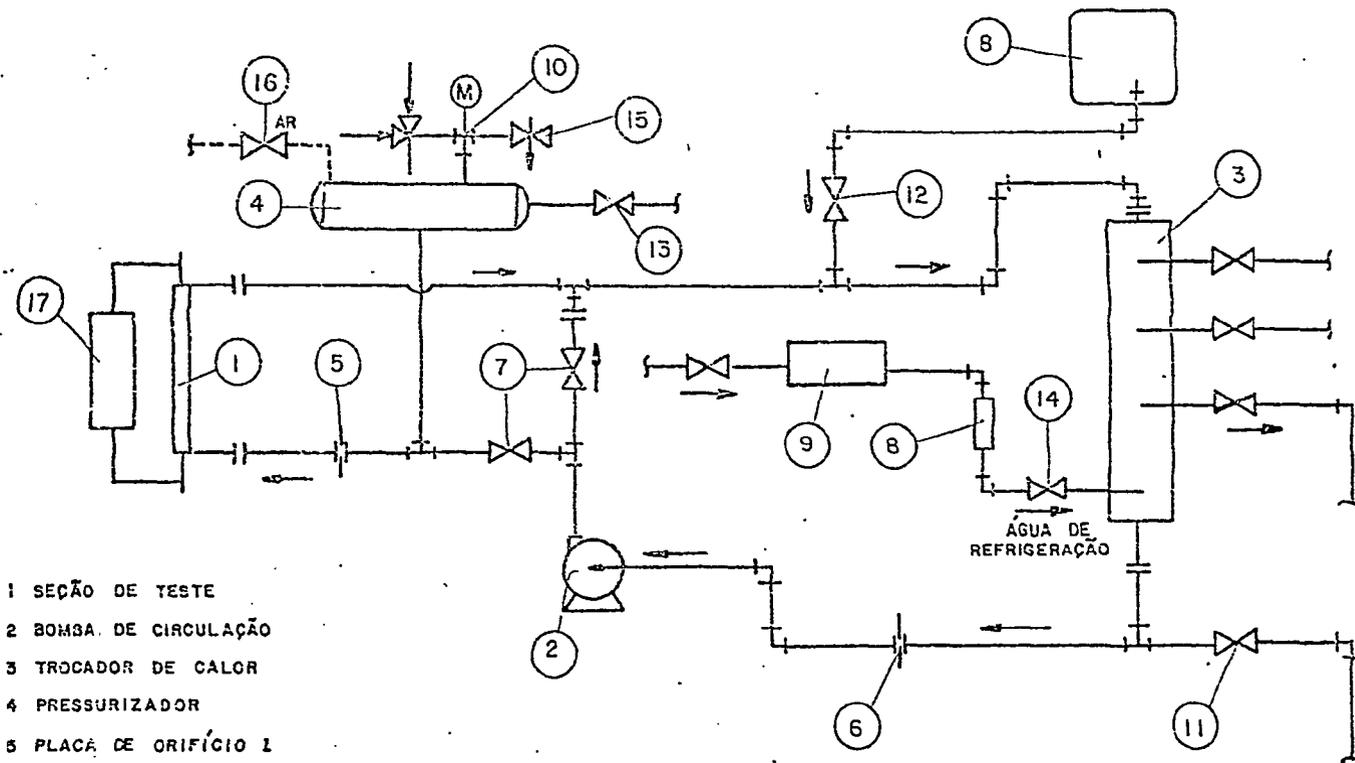
O "apparatus" experimental desenvolvido é apresentado na Fig. 1. Os seus componentes principais são:

- Circuito hidráulico.
- Seção de testes.
- Sistema de Aquecimento.
- Instrumentação.

O circuito hidráulico consta, basicamente, de um circuito principal com água desmineralizada e um circuito auxiliar que é utilizado para a refrigeração do trocador de calor. A pressurização do sistema é feita com ar comprimido.

Para a realização dos experimentos, foi desenvolvida uma seção de testes anular formada por dois tubos concêntricos, conforme mostrado na Fig. 2. O tubo interno, de aço inoxidável 316-L, com diâmetro externo de 6 mm e espessura de parede de 1 mm, funciona como uma resistência elétrica quando acoplado a uma fonte de corrente contínua. Este tubo é soldado com prata a uma barra de cobre em sua parte inferior e a um tubo de cobre na parte superior.

A fonte de corrente contínua é constituída por um regulador de indução monofásica de 25 KVA AC, um transformador de 10 KVA e uma ponte monofásica de onda completa.



- 1 SEÇÃO DE TESTE
- 2 BOMBA DE CIRCULAÇÃO
- 3 TROCADOR DE CALOR
- 4 PRESSURIZADOR
- 5 PLACA DE ORIFÍCIO 1
- 6 PLACA DE ORIFÍCIO 2
- 7 VÁLVULAS AGULHA
- 8 CAIXA DE ALIMENTAÇÃO
- 9 CAIXA DE NÍVEL CONSTANTE
- 10 SISTEMA DE REGULAGEM E PROTEÇÃO DO PRESSURIZADOR
- 11 VÁLVULA DE DRENAGEM DO CIRCUITO
- 12 VÁLVULA DE CONTROLE DE ALIMENTAÇÃO
- 13 VÁLVULA DE DRENAGEM DO PRESSURIZADOR
- 14 VÁLVULA REGULADORA DE VAZÃO DO TROCADOR
- 15 VÁLVULA DE REGULAGEM DE PRESSÃO
- 16 VALVULA DE ENTRADA DE AR
- 17 FONTE DE CORRENTE CONTÍNUA

Figura 1: Desenho Esquemático do "Apparatus" Experimental.

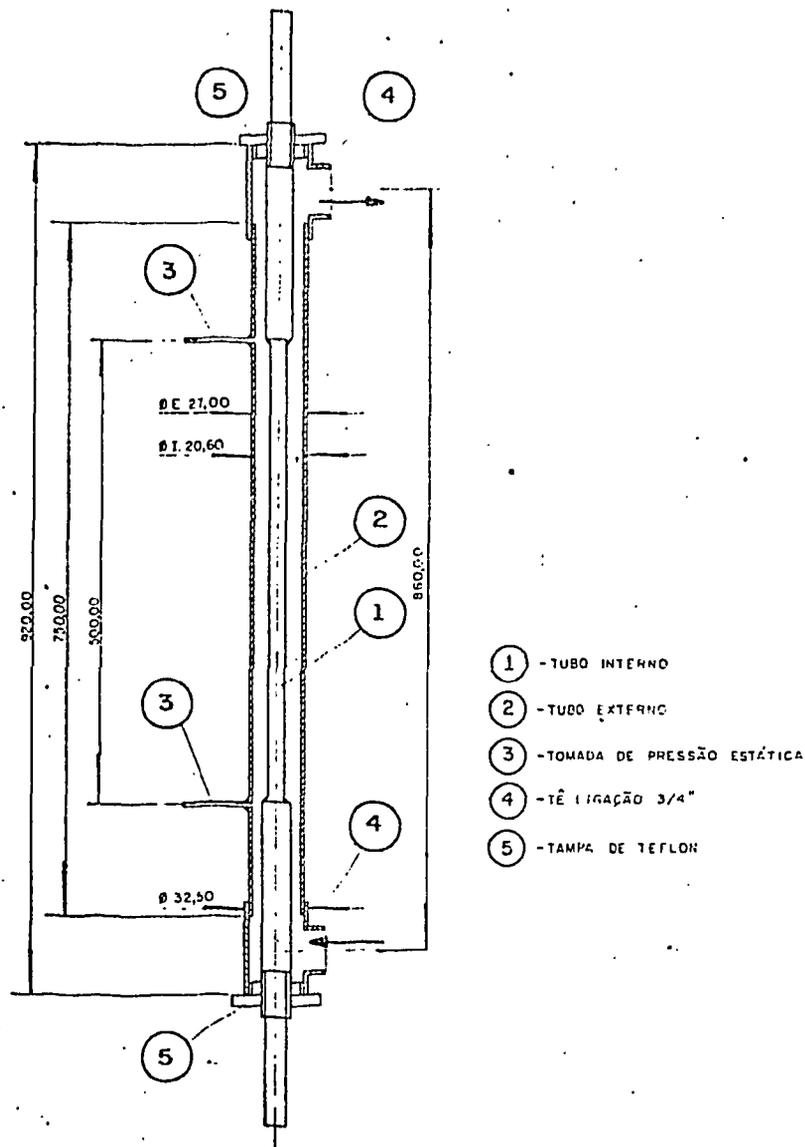


Figura 2 : Seção de Testes.

A instrumentação do sistema permite obter:

- A temperatura do fluido na entrada e na saída da seção de testes, com termopares tipo cobre-constantan.
- O perfil de temperaturas no interior do tubo de aquecimento, utilizando-se uma sonda graduada de termopar tipo chromel-constantan. A sonda é inserida no tubo de aço inoxidável através do terminal superior formada pelo tubo de cobre.
- As vazões na seção de testes e na entrada da bomba, por intermédio de placas de orifício.
- Diferença de tensão e corrente aplicada à seção de testes. A corrente é obtida com um "Shunt" calibrado.

As tubulações e a seção de testes são isoladas termicamente.

III) REDUÇÃO DE DADOS

A temperatura da superfície externa do tubo aquecido é dada pela expressão

$$T_{we} = T_{wi} + \frac{q'''}{k} \left(\frac{R_i^2 - R_e^2}{4} + \frac{R_i^2}{2} \ln \frac{R_e}{R_i} \right), \quad (4)$$

onde:

- T_{we} - temperatura da superfície externa;
- T_{wi} - temperatura da superfície interna;
- R_e - raio externo do tubo;
- R_i - raio interno do tubo;
- q''' - densidade de potência;
- K - condutividade térmica do aço inox 316-L.

O perfil de temperatura da parede interna do tubo de aquecimento é obtido medindo-se a temperatura do ar em diferentes níveis de altura no seu interior. Como o efeito convectivo do ar é muito pequeno para a relação L/D_i ⁽⁴⁾, assume-se que a temperatura medida é igual a T_{wi} .

Na região monofásica e na região de ebulição nucleada sub-resfriada, a temperatura do fluido ao longo da seção de testes, é dada pela equação

$$T_f(z) = T_{in} + \left(\frac{T_{out} - T_{in}}{L} \right) \cdot Z, \quad (5)$$

onde:

- L - comprimento do tubo, em cm;
- Z - coordenada axial, em cm;
- T_{in} - temperatura do fluido na entrada da seção de testes, em °C;
- T_{out} - temperatura do fluido na saída da seção de testes, em °C;

$T_f(z)$ - temperatura do fluido em uma altura z do comprimento aquecido, em $^{\circ}\text{C}$.

Considerando-se a pressão constante na seção de testes, o grau de sub-resfriamento ao longo do tubo aquecido é dado pela equação

$$\Delta T_{\text{sub}}(z) = T_{\text{sat}} - T_f(z) \quad (6)$$

IV) RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta as condições experimentais testadas. A Fig. 3 mostra os resultados típicos obtidos para uma corrida.

Para cada corrida, são obtidos nove valores de T_{we} ao longo do comprimento aquecido da seção de testes.

Na Fig. 3, pode ser observado que T_{we} decresce com o aumento de z devido a queda de pressão ao longo da seção de testes. Comparando qualitativamente esta figura com o trecho de ebulição subresfriada de Boarts et al.⁽⁵⁾, observa-se que, nas partes extremas do tubo aquecido, os perfis obtidos são influenciados pelo efeito de aquecimento dos contatos elétricos.

Para a verificação dos efeitos causados pelos parâmetros de ensaio, a ebulição sub-resfriada é analisada na metade do tubo aquecido ($z=25\text{cm}$), exceto os efeitos do grau de sub-resfriamento do fluido, os quais são analisados no trecho entre $z=15\text{cm}$ e $z=35\text{cm}$.

As Figs. 4, 5 e 6 apresentam gráficos " $q'' \times \Delta T_{\text{sat}}$ ", onde são analisados respectivamente os efeitos de pressão, velocidade e grau de sub-resfriamento na seção de testes.

A partir destes gráficos verifica-se que o fluxo de calor e a pressão são os parâmetros de maior influência sobre o super-aquecimento da parede.

Qualitativamente, o gráfico da Fig. 4 mostra que os pontos experimentais referentes à $P = 5,0$ bar, estão afastados e posicionados à esquerda dos pontos experimentais referentes à $P = 3,0$ bar. Isto significa que, fixado um fluxo de calor o grau de super-aquecimento da superfície diminui com o aumento de pressão.

Os gráficos das Figs. 5 e 6 mostram que, para um mesmo fluxo de calor, o grau de super-aquecimento da superfície é muito pouco in

fluenciado pelos parâmetros velocidade e grau de subresfriamento local.

Desta forma, os pontos experimentais são ajustados por uma equação do tipo

$$\Delta T_{\text{sat}} = \Psi (q'')^n, \quad (7)$$

onde:

$$\begin{array}{ll} n = 0,27 & \text{e} \quad \Psi = 19,62 \text{ para } P = 3,0 \text{ bar;} \\ n = 0,30 & \text{e} \quad \Psi = 17,20 \text{ para } P = 5,0 \text{ bar.} \end{array}$$

Nas Figs. 7 e 8, são comparadas as correlações obtidas no presente trabalho (equação 7) com as correlações de Mac Adam et al⁽¹⁾, Jens - Lottes⁽²⁾ e Thom et al⁽³⁾. Nestes gráficos são representadas duas correlações de Mac-Adams. A correlação Mac Adams-A leva em consideração uma concentração de 300 cm³ de ar por m³ de água ($\Psi=22,62$), enquanto que a correlação de Mac Adams-B considera uma concentração de 60 cm³ de ar por m³ de água ($\Psi=28,92$).

Pode ser observado que as curvas do presente trabalho possuem inclinações semelhantes à inclinação das curvas de Mac Adams et al e estão posicionadas à esquerda da curva de Mac Adams-A. A diferença entre os coeficientes das equações do presente trabalho e da equação de Mac Adams-A pode ser explicado por concentrações maiores que 300 cm³ de ar por m³ de água. Este fato ocorre porque, no tanque de pressurização a água está em contato direto com o ar comprimido.

Maiores esclarecimentos sobre os dados experimentais e resultados poderão ser obtidos no trabalho "Desenvolvimento de um Aparato Experimental para Análise do Processo de troca de calor por Ebulição Nucleada"⁽⁶⁾.

PRESSÃO (bar)	VEL. (m/s)	$\Delta T_{\text{sub in}}$ ($^{\circ}\text{C}$) ($^{\circ}\text{C}$)	FLUXO DE CALOR (Watt/cm 2)
3,0	0,50	20,0	26,33 a 46,47
3,0	0,25	20,0	25,61 a 46,61
3,0	0,25	15,0	34,12
5,0	0,50	35,0	30,34 a 42,95
5,0	0,50	35,0	29,78 a 43,03
5,0	0,25	30,0	33,80 a 43,68
5,0	0,25	30,0	34,05 a 43,18

Tabela 1: Tabela das Condições Experimentais.

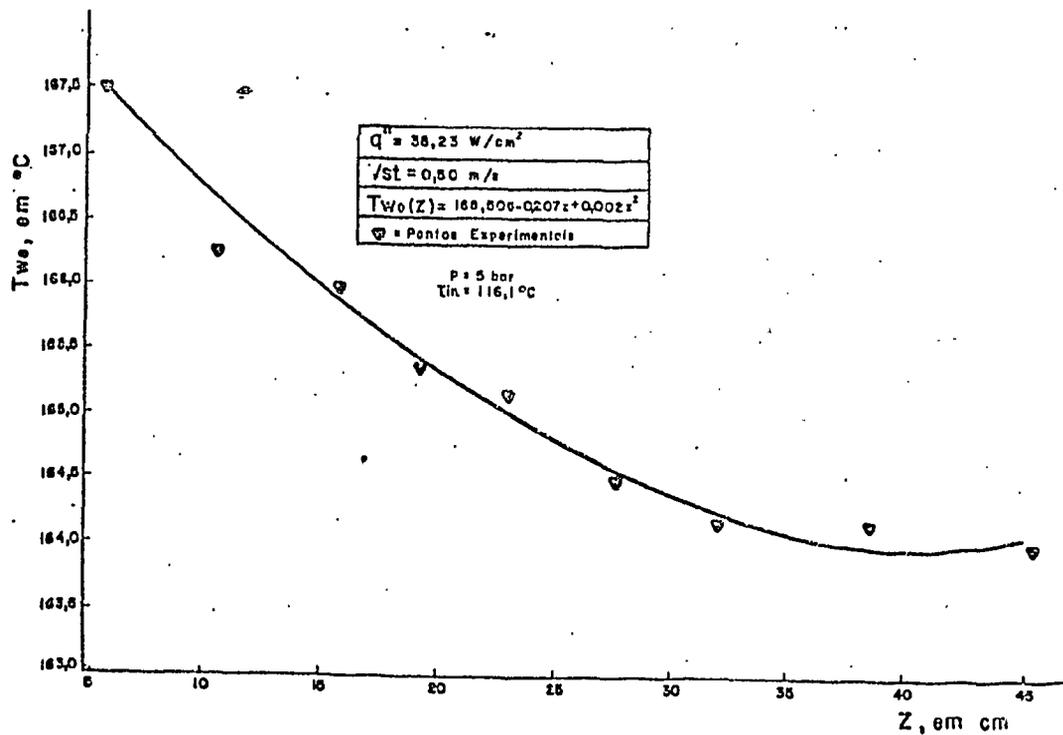


Figura 3: Perfil da Temperatura Externa da Superfície Aquecida para uma Corrida Típica.

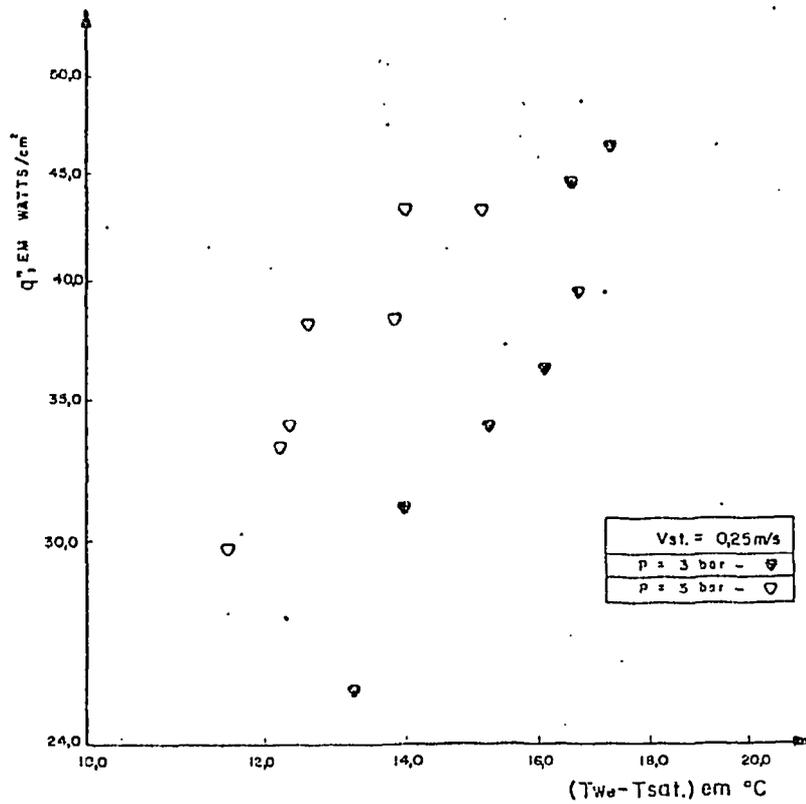


Figura 4: Efeitos da Pressão

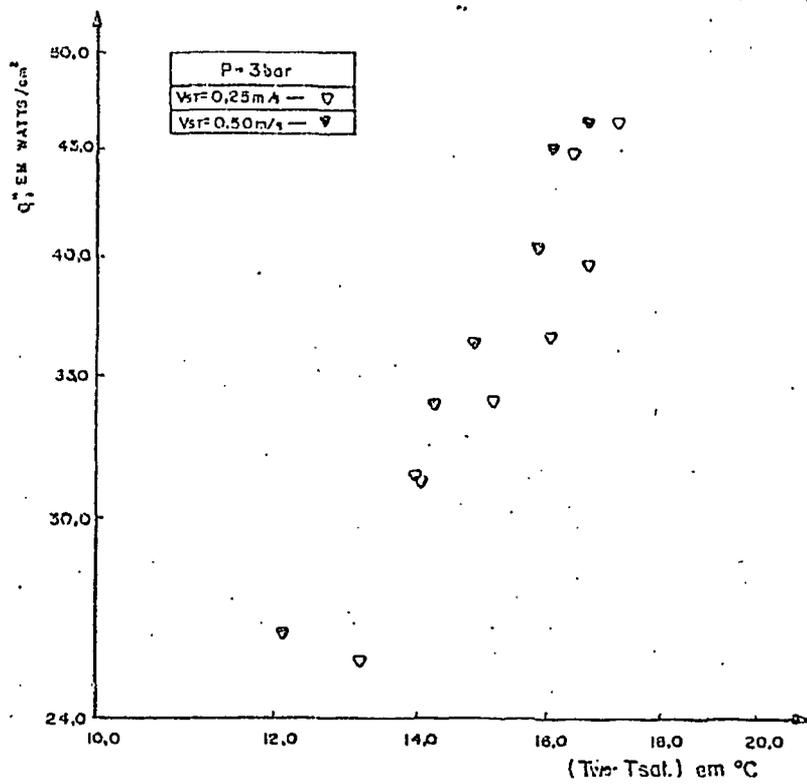


Figura 5: Efeitos da Velocidade

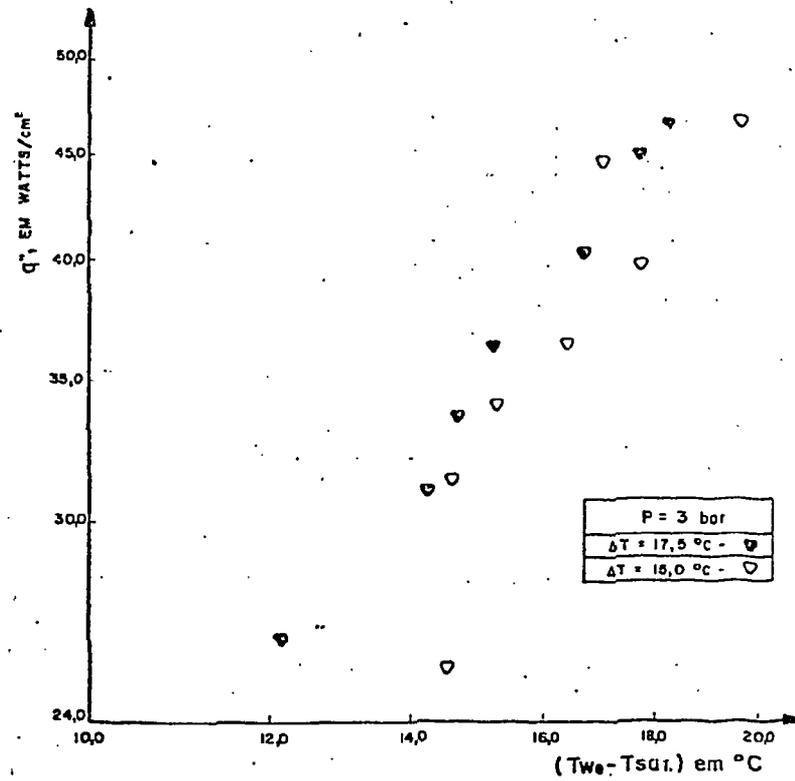


Figura 6: Efeitos do Grau de Sub-resfriamento Local.

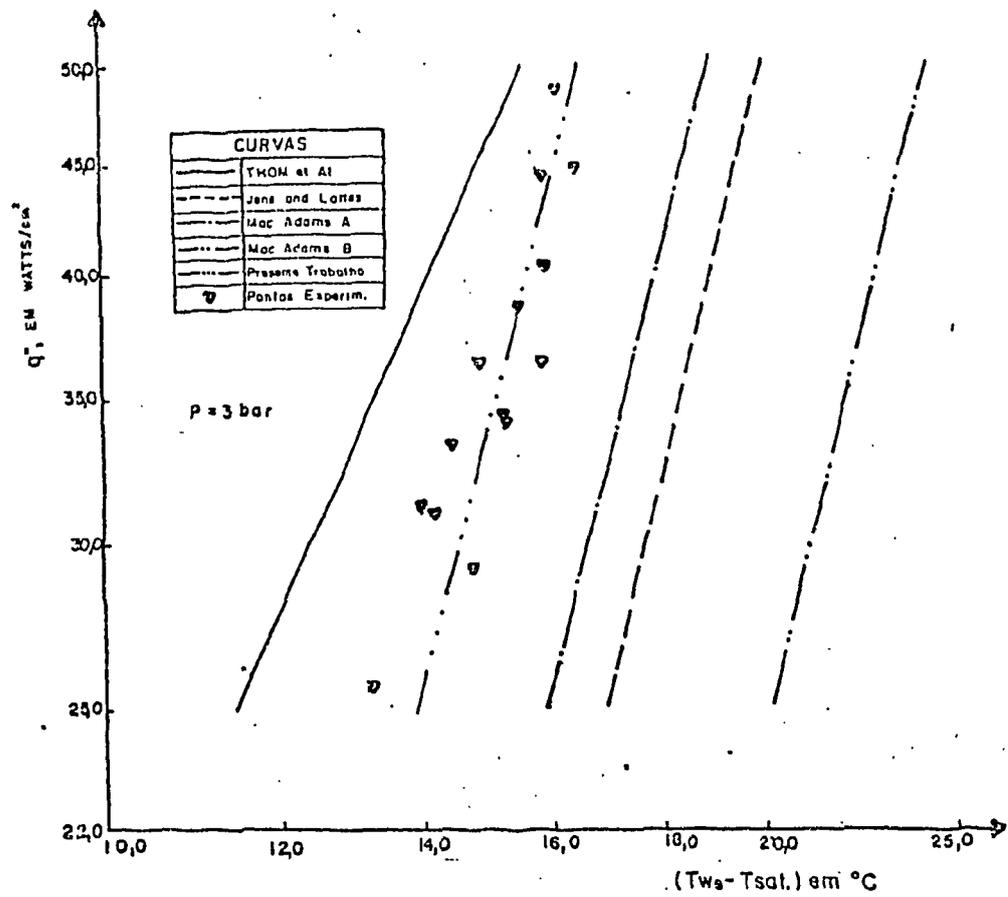


Figura 7: Comparação de Correlações para $P=3,0 \text{ bar}$

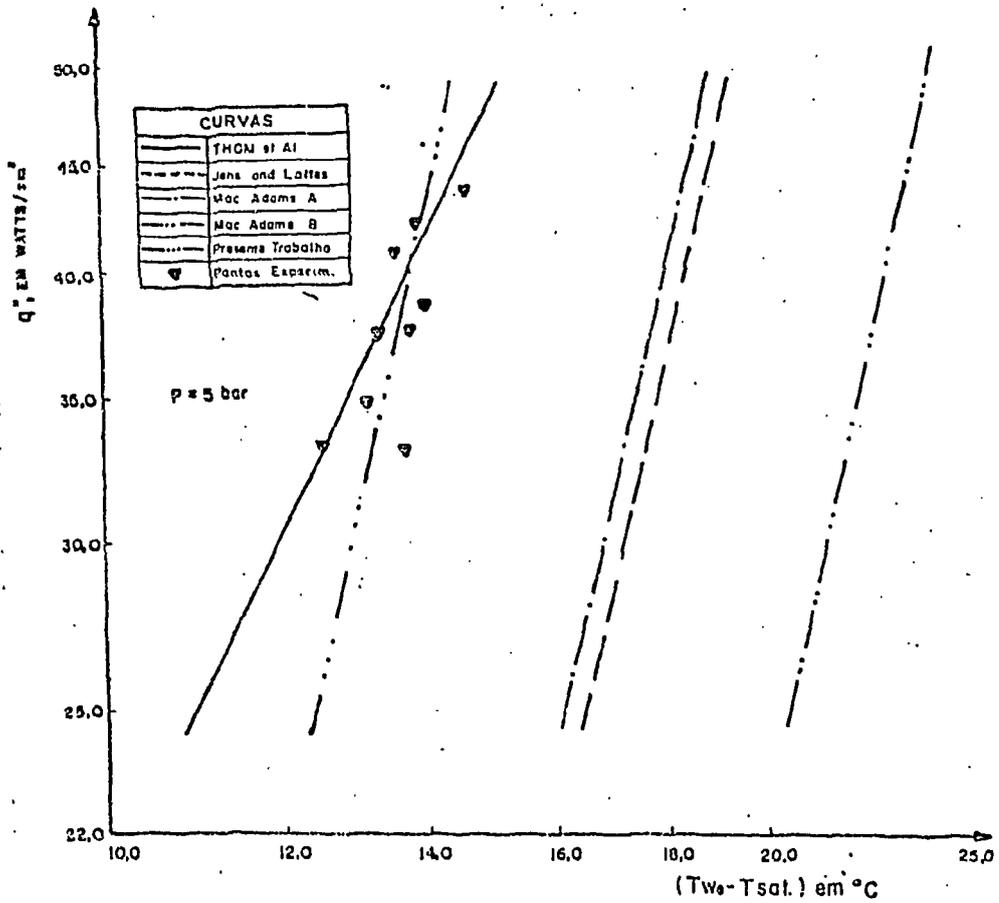


Figura 8: Comparação de Correlações para $P=5,0 \text{ bar}$

V) CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que dos parâmetros analisados, os que exercem maior influência sobre o processo de troca de calor por ebulição nucleada sub-resfriada são a pressão e o fluxo de calor.

Da comparação entre as equações do presente trabalho e as equações de Mac Adams, chega-se a conclusão que a quantidade de ar dissolvido na água é um parâmetro de grande influência no processo de troca de calor por ebulição sub-resfriada.

Quanto ao desempenho do "apparatus" experimental, algumas modificações são recomendadas:

- Utilização de um ou mais pré-aquecedores, juntamente com "by-passes", na entrada da seção de testes. Esta recomendação é feita para se evitarem problemas de cavitação na bomba, quando se desejar trabalhar com temperaturas próximas à de saturação na entrada da seção de testes.
- Utilização de pressurizadores em que a água não entre em contato com ar, porque a concentração do ar na água é um parâmetro de influência no processo de troca de calor por ebulição nucleada.
- Controle e medida da concentração do ar na água.

VI) BIBLIOGRAFIA

- 1) MAC ADAMS, W.H., KENNEL, W.E., MINDEN, C.S.L., CARL, R., PICORNEL, P.M., and DEW, J.E.. Heat transfer at high rates to water with surface boiling. Ind. Engng. Chem., 41 (9): 1945-53, 1949.
- 2) JENS, W.H. and LOTTES, P.A.. Analyses of Heat transfer burnout, pressure drop and density data for high pressure water. Chicago, Illinois, Argonne National Laboratory, May, 1951. (ANL-4627).
- 3) THOM, J.R.S., WALKER, W.M., FALLOW, T.A., and REISING, G.F.S.. Boiling in subcooled water during flow up heated tubes or annuli. In: INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS. Symposium on Boiling Heat Transfer in Steam Generating Units and Heat Exchangers: proceedings of international conference held in Manchester, September 1965. London, 1965.
- 4) JAPIKSED, D.. Advances in Thermosyphon Technology. In: Advances in Heat Transfer, 9, papers I-III, Academic Press, 1973.
- 5) BOARTS, R.M., BADGER, W.L., and MEISENBURG, S.J.. Temperature drop and liquid-film coefficients in vertical tubes. Ind. Eng. Chem., p. 912. August, 1937.
- 6) CASTRO, A.J.A. Desenvolvimento de um Aparato Experimental para análise do processo de troca de calor por ebulição nucleada. Rio de Janeiro, 1984. (Tese de Mestrado, Dpto. Eng. Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro).