

COEFICIENTES DE TRANSPORTE DA PASTA DE GELO EM UM TROCADOR DE CALOR DE PLACAS

Hugo G. Jiménez Pacheco¹

¹Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Marquês de São Vicente 225, Rio de Janeiro, RJ – 22453-900 – Brasil.

hugojp@mec.puc-rio.br

Sergio Leal Braga²

²Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Marquês de São Vicente 225, Rio de Janeiro, RJ – 22453-900 – Brasil.

slbraga@mec.puc-rio.br

Resumo. O uso da pasta de gelo em sistemas de refrigeração e condicionamento de ar é relativamente novo. Dentro de suas vantagens, citam-se a capacidade de “armazenar frio” sob forma de calor latente e a possibilidade de ser bombeada como qualquer fluido. Para que esta tecnologia seja mais bem aceita, informações de engenharia são necessárias, principalmente no que se refere às características de escoamento do fluido e troca de calor. Neste trabalho, uma bancada experimental foi desenvolvida para determinar os coeficientes de perda de carga e troca de calor da pasta de gelo em um trocador de calor de placas. Utilizou-se água como fluido quente (carga térmica). Foram investigadas várias situações para diferentes frações iniciais de gelo e diferentes vazões da pasta de gelo. As condições de entrada da carga térmica foram mantidas constantes. Foram monitoradas ao longo de cada teste: as temperaturas de entrada e saída, tanto da pasta como da água; a queda de pressão, a fração de gelo e a vazão da pasta no trocador de calor. Os resultados indicam que a capacidade de resfriamento e o coeficiente global de troca de calor, aumentam em função da fração inicial de gelo e da vazão da pasta de gelo. Comparações foram realizadas com casos de troca de calor água-água, sob as mesmas condições de temperatura. Finalmente foi constatado que, como era esperado, a perda de carga também aumenta com ou aumento da fração inicial de gelo.

Palavras-chave: Trocador de calor de placas, pasta de gelo, fração de gelo, mudança de fase, termoacumulação.

1. INTRODUÇÃO

Em sistemas de termoacumulação encontra-se com facilidade calor sensível (água fria, por exemplo) e calor latente (gelo, por exemplo), cada um com suas vantagens e desvantagens, segundo a aplicação. Merecem destaque, em cada sistema, a facilidade de movimentação da água e a capacidade de armazenamento térmico (calor latente) do gelo.

Uma das últimas alternativas tecnológicas em sistemas de termoacumulação consiste na produção de finos cristais de gelo dispersos em uma solução aquosa, dando origem a uma “pasta de gelo”. Esta funciona com as duas boas características citadas dos sistemas de termoacumulação, ou seja, fácil bombeamento e alta capacidade de armazenamento presente nos sistemas de calor latente. Por isto, os sistemas de pasta de gelo representam uma alternativa com potencial elevado para melhorar os sistemas de refrigeração e condicionamento de ar. A pasta de gelo, também chamada de gelo líquido, “flo ice”, “ice slurry” entre outros, é formada por cristais de gelo em suspensão em uma determinada solução aquosa. As características de manipulação e a capacidade de refrigeração podem ser combinadas para a maioria das aplicações em refrigeração e condicionamento de ar.

Bellas, et al. (2001) estudaram o desempenho térmico da pasta de gelo em trocador de calor com 24 placas. Os resultados mostram que a troca de calor e queda de pressão da pasta de gelo são funções da viscosidade da pasta, tamanho dos cristais e fração do gelo. Por outro lado, Knodel, et al. (2000) observaram o comportamento da pasta de gelo em um trocador de calor tipo tubo horizontal. São apresentados resultados de queda de pressão e coeficientes de troca de calor para diferentes condições. Os resultados indicam que, para pequenos cristais de gelo, o processo de transferência de calor é incrementado, assim como o fator de atrito. O desempenho da pasta de gelo também foi avaliado para diferentes vazões mássicas por Gupta e Fraser et al. (1990), para soluções de glicol-água com 6% de concentração e frações de cristais de gelo desde 0% até 20%. Foram determinadas correlações para diferentes tubulações, mostrando que a troca de calor melhora para cristais pequenos, na faixa de 2 a 3 mm. Sanchez et al. (2002) estudaram o comportamento da pasta de gelo, obtendo as propriedades termofísicas para soluções com um ou mais solutos. Os resultados obtidos comparam soluções com etanol-água e sal. Ticona (2003) desenvolveu um dispositivo experimental para a geração de pasta de gelo. Foram determinados parâmetros de transferência de calor no gerador, assim como um método confiável de medição de fração de gelo quando comparado a outros métodos de medida.

2. MODELO EXPERIMENTAL

A bancada experimental é constituída pela seção de teste (trocador de calor), sistema de termoacumulação (gerador de pasta de gelo, reservatórios de pasta de gelo primário e secundário, bomba de pasta de gelo), sistema de carga térmica

(banho de temperatura constante, reservatório de água, banco de resistências elétricas e bomba de água) e o sistema de aquisição e processamento de dados (computador), observados nas Figs. 1 e 2.

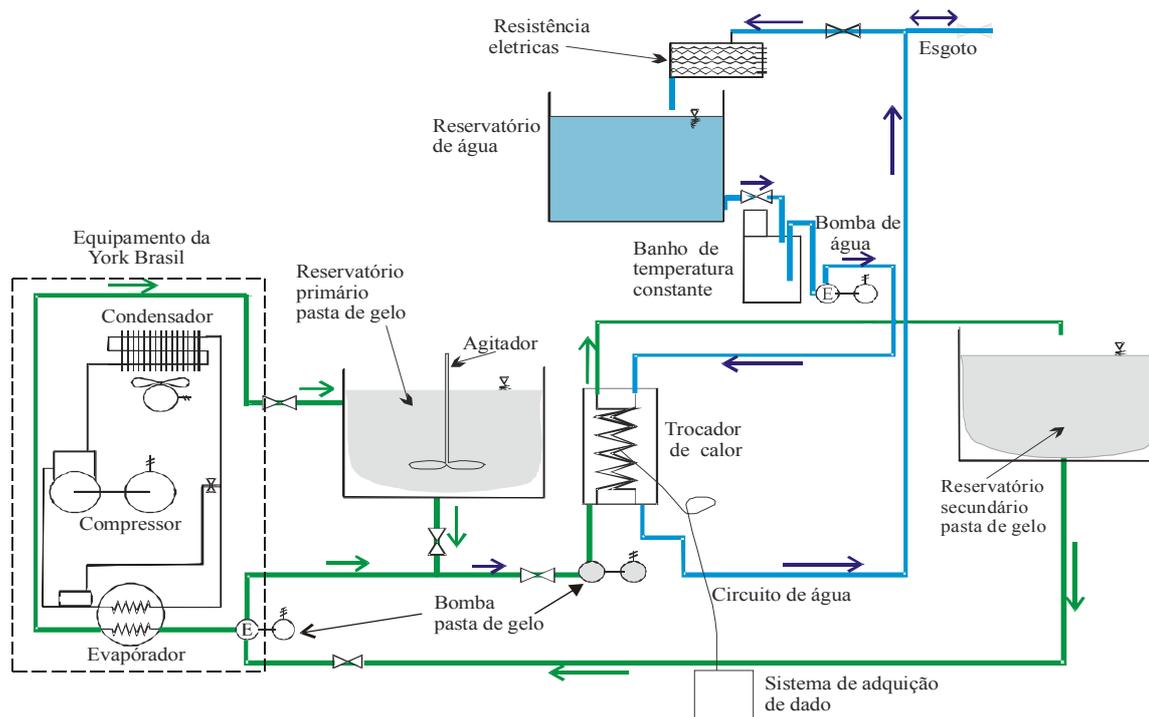


Figura 1 - Esquema da bancada experimental.

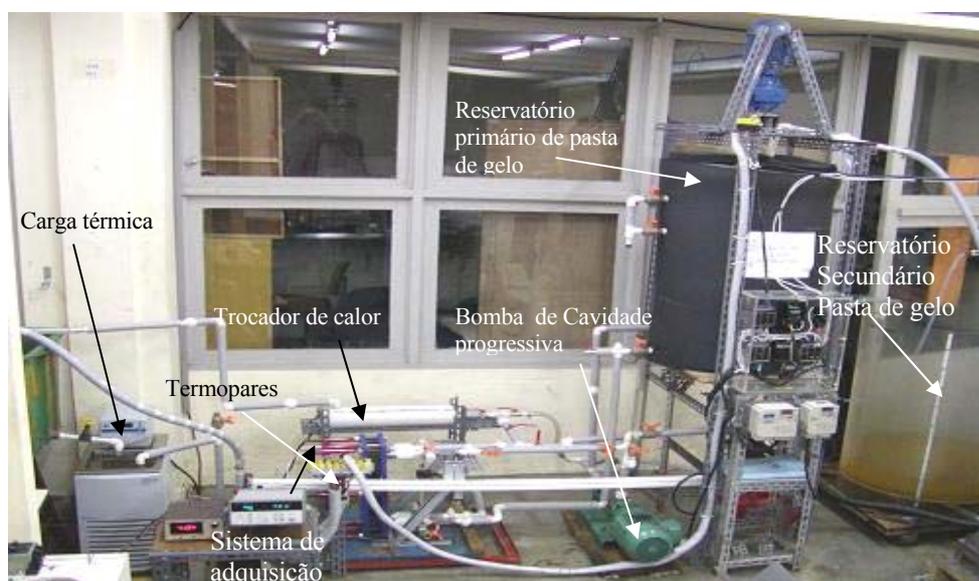


Figura 2 - Fotografia da bancada experimental.

2.1. Seção de teste

O objeto do estudo é o trocador de calor de placas. Este foi escolhido pelas características térmicas, aplicáveis nas mais diferentes situações em refrigeração e condicionamento de ar. Neste trabalho foi utilizado um trocador de calor de placas de marca Alfa Laval com 16 placas de aço inox 316 e NBR como material das gaxetas, operando em fluxo cruzado.

Na Fig.3 é observado o tipo de trocador, que permite o escoamento dos fluidos alternadamente entre as placas e em sentido cruzado. Cada placa apresenta 0.032 m^2 de área de transferência de calor. Para medir a queda de pressão da pasta de gelo dentro do trocador de calor foi utilizado um transdutor de pressão diferencial, com faixa de operação de 0 até 10 kPa. O sinal gerado em voltagem pelo transdutor é enviado ao sistema de aquisição de dados.

Para colher amostras da pasta de gelo foram instaladas válvulas na entrada e na saída do trocador.

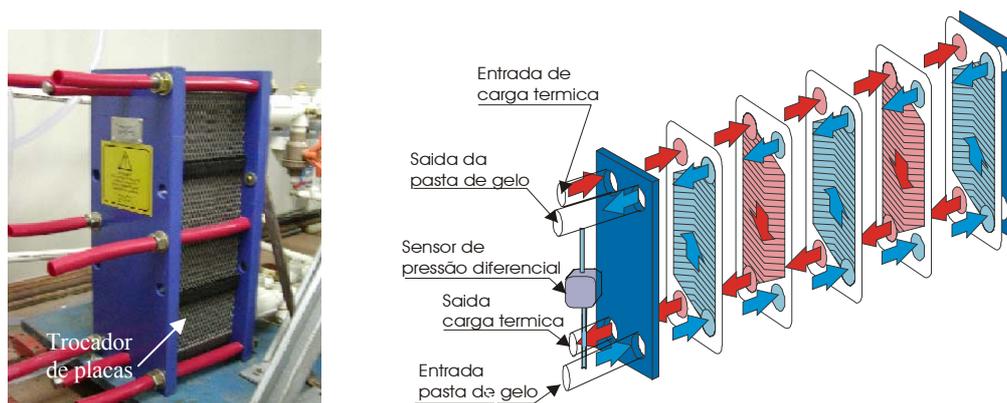


Figura 3 – Fotografia e esquema da seção de teste.

Para a medição da fração de gelo nas amostras, foi empregado um calorímetro, desenvolvido por Ticona (2003), formado por uma resistência elétrica (voltagem de alimentação de 24 V), sensor de temperatura e um misturador (Fig. 4). A amostra é colocada no calorímetro ao mesmo tempo em que se acionam o misturador e a resistência elétrica. Enquanto tudo isso acontece os sinais de amperagem, voltagem e temperatura são adquiridos para posterior tratamento.

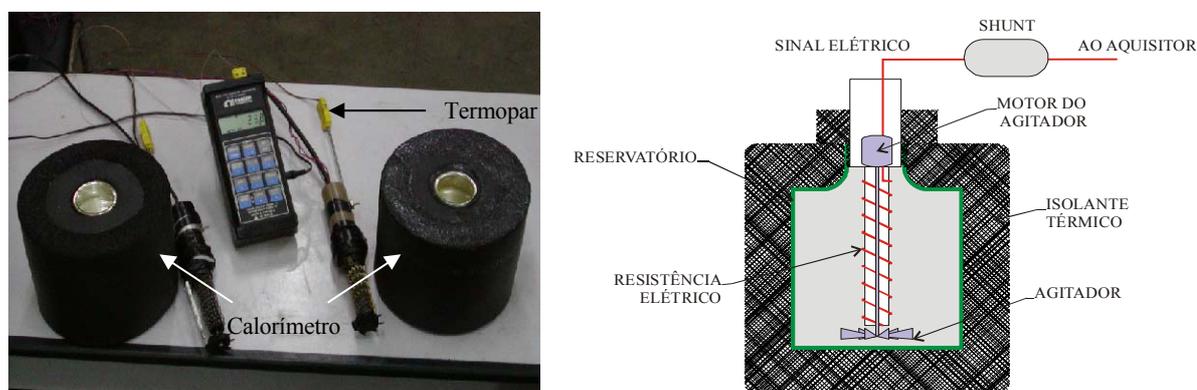


Figura 4 – Fotografia e esquema do calorímetro utilizado

2.2. Sistema de termoacumulação

Formado por um gerador de pasta de gelo, dois reservatórios (principal e secundário), uma bomba de deslocamento positivo e o painel de controle e força. O gerador de pasta de gelo é do tipo evaporador tubo carcaça, com raspador helicoidal, de marca York. Um fluido secundário (mistura de etileno glicol e água) é transportado pela bomba de pasta de gelo desde o reservatório até a parte inferior do evaporador. O refrigerante absorve calor da mistura gerando a pasta de gelo. Esta é armazenada no reservatório principal. Um agitador foi instalado no reservatório principal para manter a pasta de gelo em estado homogêneo. A bomba de pasta de gelo é de cavidade progressiva. Um inversor de frequência foi instalado para regular vazão da pasta de gelo. O reservatório secundário é utilizado para receber a pasta de gelo depois de passar pelo trocador. Desta forma, não se modifica a fração de gelo no reservatório principal. O painel de controle concentra todos os comandos em um só dispositivo.

2.3. Sistema de carga térmica

Tem a função de absorver a energia da pasta de gelo no trocador de calor. Formado por um banho de temperatura constante, um banco de resistências elétricas, um reservatório de água e a bomba de água. O banho de temperatura constante (BTC) tem a função de manter as condições de temperatura no reservatório de água durante os testes. É da marca NESLAB, modelo RTE 17, capaz de fornecer uma potência elétrica de 1600 W e uma potência de refrigeração de 700 W a 0 °C. O controle de temperatura é realizado mediante o método PID com 0,05 °C de resolução de controle de temperatura. O banco de resistências (três de 2,0 kW cada) esquenta a água rapidamente, elevando sua temperatura perto da temperatura de teste. Uma vez que isto é feito, o banho térmico passa a controlar a temperatura do fluido “carga térmica”, permitindo um ajuste preciso da temperatura de teste. O reservatório de água tem a função de armazenar líquido suficiente, à temperatura desejada, para todo o tempo de teste. Um agitador foi instalado para uniformizar esta temperatura. A bomba de água tem a função de circular a água através do trocador na realização dos testes. Esta é do tipo centrífuga e trabalha com uma vazão constante, regulada por uma válvula de gaveta instalada na saída da bomba.

2.4. Sistema de aquisição e processamento de dados

É formado por um sistema de aquisição de dados, um terminal de conexão e um computador. O sistema de aquisição de dados é da marca Agilent, tem a capacidade para até três placas de aquisição, com 20 canais cada, para temperatura, voltagem ou corrente elétrica.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Realizado em 3 etapas: geração de pasta de gelo, aquecimento da água à temperatura desejada e transferência de calor no trocador de calor. A obtenção da pasta de gelo é realizada a partir de uma solução de etileno glicol-água, a 12% em peso. Esta é bombeada através do evaporador, onde se gera a pasta de gelo, em um processo contínuo. A pasta de gelo é armazenada no reservatório primário. O volume produzido de pasta de gelo é de 0,5 m³. Para evitar a aglomeração de cristais na pasta de gelo, o misturador funciona constantemente. A pasta de gelo é produzida com diferentes frações de gelo, pré-definidas para cada teste, desde 3,0 até 25%, com temperaturas variando entre -2°C e -3,8°C e bombeadas a diferentes vazões. Em paralelo à geração da pasta de gelo se prepara a carga térmica. As resistências esquentam a água, previamente filtrada, até perto de 29°C. O volume requerido para cada teste foi de aproximadamente 0,4 m³. Uma vez que a água atinge a temperatura prevista para o teste, o banco de resistências é desligado e o banho de temperatura constante passa a controlar a temperatura da água. Logo que as condições pré-determinadas, tanto para pasta de gelo quanto para a carga térmica são atingidas, inicia-se o processo de aquisição de dados e, em seguida, se procede à troca de calor.

4. REDUÇÃO DE DADOS

Das amostras coletadas foi possível calcular as frações de gelo na entrada e saída do trocador. Para tal foi adotado o procedimento descrito mais adiante.

4.1. Calor sensível da pasta de gelo (Q_{sen})

$$Q_{sen} = m_{pg} C_{p_{fp}} (T_{f,pg} - T_{i,pg}) + m_v C_{p_v} (T_{f,pg} - T_{i,pg}) + m_{re} C_{p_{re}} (T_{f,pg} - T_{i,pg}) \quad (1)$$

Onde:

- m_{pg} massa do pasta de gelo no calorímetro [kg]
- $C_{p_{pg}}$ calor específico do fluido portador [J/kg °C]
- $T_{f,pg}$ temperatura final da pasta no teste de calorímetro [°C]
- $T_{i,pg}$ temperatura inicial da pasta no teste de calorímetro (°C).
- m_r massa do recipiente do calorímetro (kg).
- C_{p_r} calor específico do recipiente do calorímetro (J/kg °C).
- m_{re} massa de conjunto da resistência elétrica de calorímetro (kg).
- $C_{p_{re}}$ calor específico da resistência elétrica do calorímetro (J/kg °C).

4.2. Fração de gelo da amostra do calorímetro (x_{pg})

$$x_{pg} = \frac{Q_{el} - Q_{sen}}{L m_{pg}} \quad (2)$$

onde:

- L Calor latente do gelo, kJ/kg

4.3. Calor latente da pasta de gelo (Q_{lat}):

$$Q_{lat} = m_{pg} x_{pg} L \quad (3)$$

4.4. Capacidade de resfriamento da pasta de gelo (\dot{Q}_{pg})

É definida como a potência térmica de resfriamento sentida pela pasta de gelo no trocador de calor

$$\dot{Q}_{pg} = \dot{m}_{pg} \left[C_{p_{fp}} (T_{f,e} - T_{f,s}) + (x_{pg,e} - x_{pg,s}) L \right] \quad [W] \quad (4)$$

4.5. Coeficiente global de troca de calor

Para a determinação do desempenho do trocador de calor foi utilizada a definição do coeficiente global de troca de calor em função da temperatura média logarítmica, área de troca de calor e capacidade de resfriamento da pasta de gelo.

$$U = \frac{\dot{Q}_{pg}}{A(LMTD)} \quad (5)$$

Onde:

$$LMTD = \frac{(T_{q,e} - T_{f,s}) - (T_{q,s} - T_{f,e})}{\ln \left(\frac{T_{q,e} - T_{f,s}}{T_{q,s} - T_{f,e}} \right)} \quad (6)$$

4.6. Carga Térmica

A potência térmica é calculada com os dados de temperatura e vazão da água.

$$\dot{Q}_{ag} = \dot{m}_{ag} C_{p_{ag}} \Delta T \quad (7)$$

Onde:

\dot{m}_{ag} Vazão mássica da água (kg/s)

$C_{p_{ag}}$ Calor específico da água (J/kg°C)

ΔT Diferença de temperatura entre a entrada e a saída da água

5. RESULTADOS

5.1. Temperaturas no trocador de calor

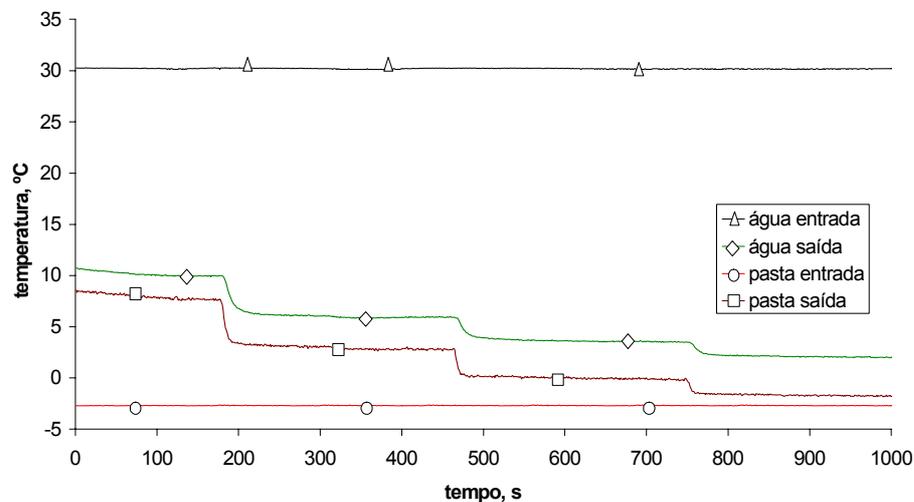


Figura 5. Medição típica das temperaturas no trocador de calor

Pode-se observar na Fig. 5 os valores das temperaturas de entrada e saída do trocador de calor, tanto da pasta de gelo como da água. As condições de entrada da pasta de gelo e de entrada da água são mantidas constantes, para cada teste. Ao longo de cada seqüência de testes se varia a vazão da pasta de gelo. Observa-se que, para cada vazão imposta, as temperaturas de saída da água e da pasta de gelo variam até atingir o regime permanente. Neste instante pode-se realizar a amostragem e o teste no calorímetro para determinar a fração de gelo.

5.2. Calorímetro

Para cada vazão da pasta de gelo, em regime permanente, procedem-se a medição e a coleta dos parâmetros elétricos e térmicos dentro do calorímetro. Na Fig. 6 pode-se observar que, quando o calorímetro é ligado, a voltagem cai levemente e a corrente assume um valor constante. Com estes valores e as temperaturas, pode-se realizar o cálculo da energia consumida pela amostra de pasta de gelo.

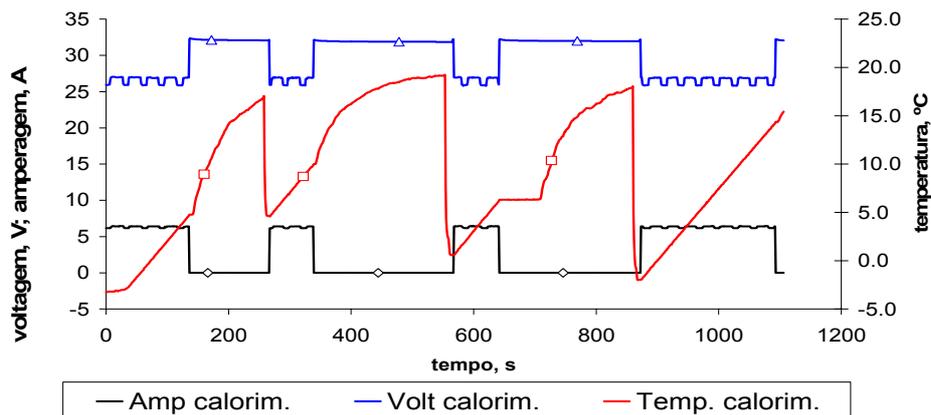


Figura 6 – Medição dos parâmetros elétricos e térmicos da experiência

5.3. Queda de pressão

Na Fig. 7 apresenta-se um exemplo da medição da queda de pressão em um teste típico. Os valores foram aquisitados para diferentes vazões da pasta de gelo. Percebe-se que a flutuação na medida aumenta ao longo da experiência, função do aumento da vazão. Para a análise da queda de pressão foi tomada uma média dos valores após o estabelecimento do regime permanente.

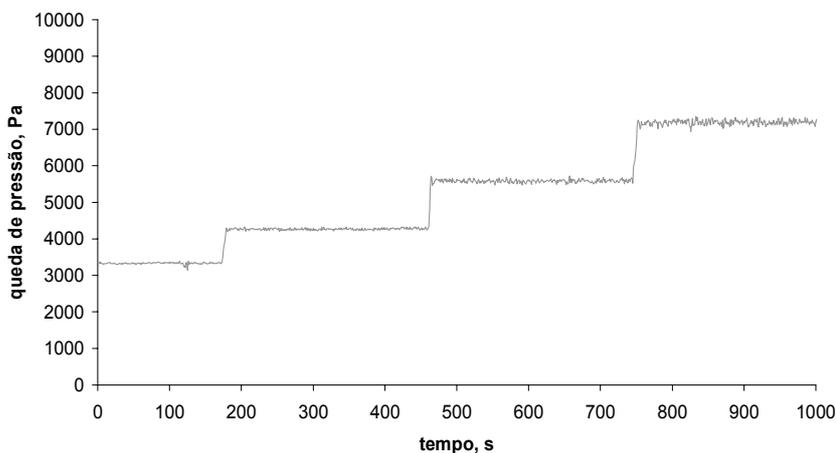


Figura 7 – Medição da perda de pressão no trocador de calor

5.4. Capacidade de resfriamento do trocador de calor

A Fig. 8 mostra a variação da capacidade de resfriamento do trocador de calor em função da vazão mássica. Pode-se observar que, para frações iniciais de gelo maiores, a capacidade de resfriamento aumenta consideravelmente. Quando comparando com os testes com água, a capacidade de resfriamento do trocador aumenta em até 3 vezes. Para cada teste é mostrada a fração de gelo na saída do trocador de calor. Em vários casos a fração de gelo à saída do trocador chegou a

zero, ou seja, apenas líquido deixava o trocador. Para maiores frações iniciais de gelo e vazões maiores, a fração na saída do trocador é maior que zero, indicando a presença de cristais de gelo na saída do trocador.

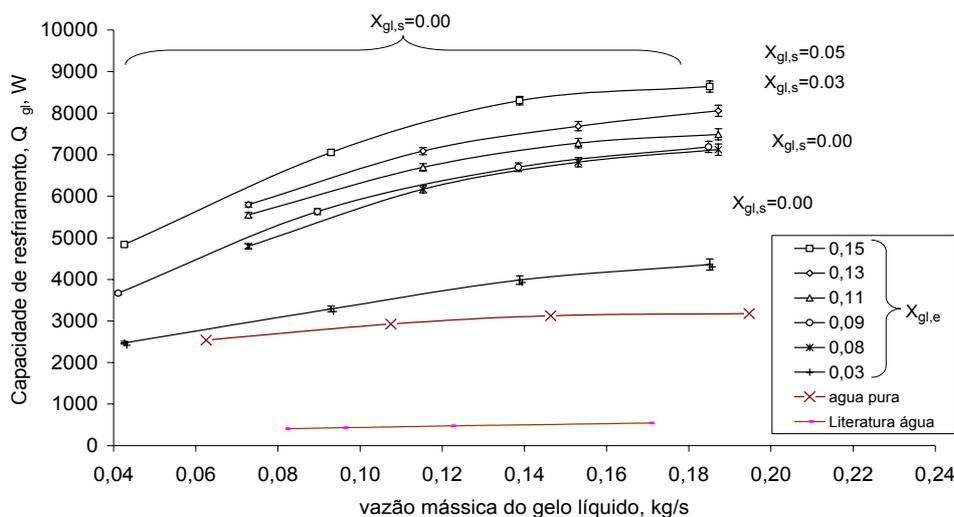


Figura 8. Variação da capacidade de resfriamento do trocador de calor em função da vazão mássica.

5.5. Coeficiente global de troca de calor

Na Fig. 9 são apresentadas as variações do coeficiente global de troca de calor em função da vazão mássica da pasta de gelo. Observa-se que para maiores concentrações iniciais de pasta de gelo, este coeficiente aumenta. Pode ser visto na mesma figura o comportamento do caso água-água que, como era de esperar, fica bastante próximo do caso de baixa fração de gelo. Também é apresentada comparação com o caso de Bellas (2001) que mostra boa concordância com o presente trabalho.

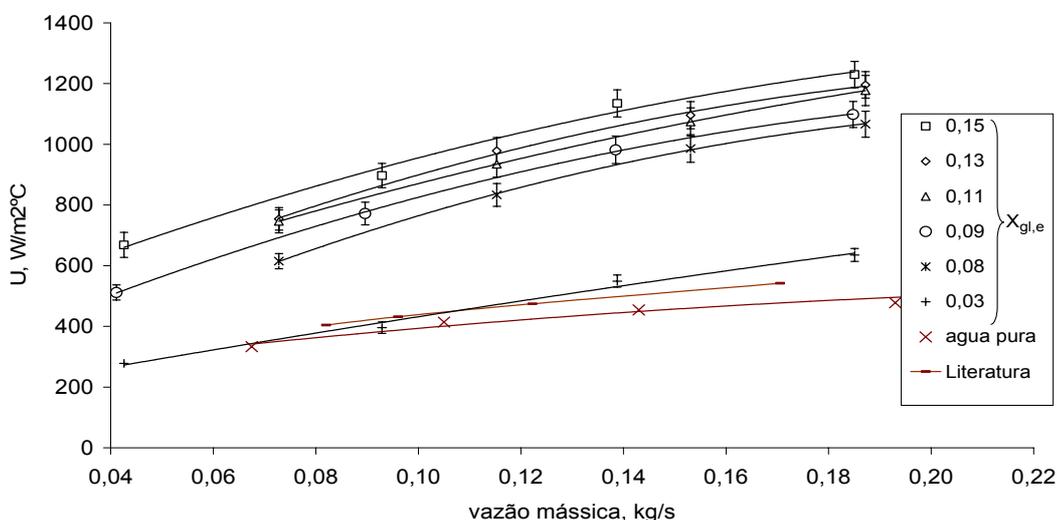


Figura 9 – Coeficiente global de troca de calor versus vazão mássica da pasta de gelo

5.6. Queda de pressão

Pode-se observar na Fig. 10 a variação da queda de pressão no trocador de calor de placas como função da vazão mássica. Cada caso é mostrado para diferentes frações iniciais de pasta de gelo. Pode-se observar que, para maiores concentrações iniciais de pasta de gelo, a queda de pressão aumenta. Também é observado, como esperado, que o diferencial de pressão aumenta com a vazão, isto para todas as diferentes concentrações iniciais de pasta de gelo. Quando comparado com o caso água-água, a queda de pressão aumenta para os casos com pasta de gelo, sendo o caso de mínima fração inicial de gelo semelhante ao caso de água pura.

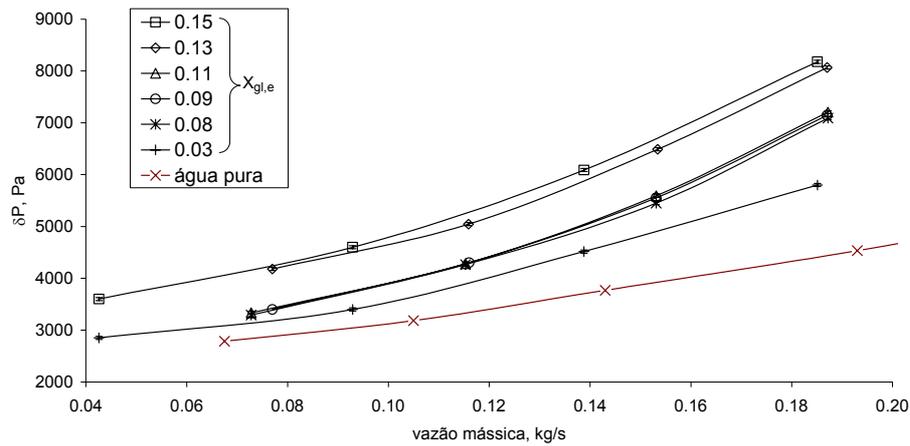


Figura 10. Variação da queda de pressão para diferentes vazões e frações de gelo da pasta de gelo.

6. CONCLUSÕES

Foi construída uma bancada experimental para o estudo das propriedades de transporte da pasta de gelo em trocadores de calor de placas. Os resultados obtidos no presente trabalho mostram a viabilidade técnica da utilização da pasta de gelo através do trocador de calor de placas, mostrando algumas vantagens, quando se compara ao caso água-água.

A capacidade de resfriamento e o coeficiente global de troca de calor aumentam em até três vezes com a utilização da pasta de gelo, quando comparado ao caso só com água. Estas vantagens vêm acompanhadas de um aumento aceitável na queda de pressão, que apresenta valores maiores com o incremento da fração de gelo.

REFERÊNCIAS

- ASHRAE. Industrial Refrigeration Handbook, Ashrae Standard. USA, 1998.
- Bellas, J. Chaer, S. Heat transfer and pressure drop of ice slurries in plate heat exchangers. Department of Mechanical Engineering, Brunel University, pp. 721-732. 2001
- E.N. Jensen, E. et all, Pressure drop and heat transfer with ice Slurry, University, USA., 2000.
- Grupta, R. e Fraser, C. Effect of new friction reducing additive on sunwell ice slurry characteristics, Canada, Institute of Mechanical Engineering, Low Temperature Laboratory, Report no. TRLT-023, 1990.
- Knodel, B. et all, Heat transfer and pressure drop in ice-water slurries, Applied Thermal Engineering University of Illinois at Chicago, USA, pp. 671-685. 2000
- Knodel, B. et all, Performance of an ice-water slurry based district cooling system. Baltimore, MD. Proceedings of 78th. Annual, Conference of the IDHCA. 1987
- Knodel, B. et all, Pressure drop in ice-water slurries for thermal storage applications, Experimental Heat Transfer, pp. 265 -275. 1987
- Kauffeld, M. Christensen, K. Hansen, T.M. Experience with ice slurry IIR. Congress, Sydney. 1999.
- Sanchez, R. et all. Determinacion de propiedades de um hielo líquido formado a partir de água y ClNa, Pamplona, Espana, 2001.
- Ticona, E.M., Determinação Experimental do coeficiente de Troca de Calor em um Gerador de gelo. Dissertação de mestrado. Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2003

TRANSPORT COEFFICIENTS OF ICE SLURRY IN PLATE HEAT EXCHANGER

Hugo G. Jiménez Pacheco¹

¹Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Marquês de São Vicente 225, Rio de Janeiro, RJ – 22453-900 – Brasil.

hugojp@mec.puc-rio.br

Orientador: Sergio Leal Braga²

²Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Marquês de São Vicente 225, Rio de Janeiro, RJ – 22453-900 – Brasil.

slbraga@mec.puc-rio.br

Abstract. The use of ice slurry in refrigeration and air conditioning systems is relatively new. Among its advantages, it can be cited the facilities to be pumped and its high energy storage capacity. In order to be employed in those applications, it is necessary the knowledge of the heat transfer and fluid flow characteristics. An experimental device was developed to study the transport properties of the ice slurry in plate heat exchangers. Several situations were investigated for different initial ice fractions and mass flows rates of the ice slurry. The conditions of the thermal load (pure water, had been kept constant. The temperature field, the pressure loss, the initial fraction and the mass flow rate of the ice slurry are continuously monitored in the heat exchanger, beyond the flow and the temperature field is monitored in the part of the thermal load.

The overall heat transfer coefficient, increases as a function of the initial ice fraction. The capacity cooling of the heat exchanger increases with the use of ice slurry when compared to pure water. Finally, it can be showed that the pressure drop increases for higher initial ice fraction.

Keywords. Plate heat exchanger, ice slurry, ice fraction, phase change, thermal storage