

# 1. Introdução

## 1.1. Motivação

O gelo é considerado um material de armazenamento de energia térmica efetivo, para temperaturas ao redor de 0°C, conseguindo reduzir os volumes de “armazenamento de frio” num fator de 2 a 10 vezes, segundo as condições de operação e temperaturas envolvidas. O motivo para a alta densidade de energia térmica é o calor latente na mudança de fase.

Se um material sólido é finamente disperso num fluido portador, este continua podendo ser facilmente bombeado através de sistemas complexos, com trocadores de calor, válvulas, reduções, etc. Quando finos cristais de gelo são introduzidos como material de mudança de fase (phase change material) em uma solução aquosa, surge uma mistura conhecida como pasta de gelo, que pode ser facilmente bombeada e receber grandes quantidades de calor, através da mudança de fase do sólido em suspensão. Tal “fluido” é usado para reduzir o requerimento da vazão mássica, propiciando assim instalações e equipamentos reduzidos, com ganho de espaço e, eventualmente, de custos de capital e operação.

A pasta de gelo se apresenta como uma mistura interessante nas instalações como refrigerante secundário, ou para uso direto em trocadores ou sobre produtos a resfriar. Isto se deve ao seu potencial de rápido resfriamento, razão pela qual vários estudos são orientados a determinar seu comportamento em tubulações, bombas e trocadores de calor, sendo este um tema relativamente novo.

Dados do coeficiente de troca de calor para a pasta de gelo são necessários para especificações ótimas de trocadores de calor. Os dados publicados por fabricantes não são otimizados para misturas com mudança de fase e variação de energia sensível. O uso da pasta de gelo traz grandes vantagens, pois ocasiona um impacto nas razões de transferência de calor, tendo como resultando sistemas mais compactos.

Resultados obtidos por diferentes pesquisadores indicam que o comportamento da pasta de gelo depende de um grande número de parâmetros, onde se incluem a composição da mistura, a vazão mássica, a fração de gelo, os tamanhos dos cristais e outros. Porém a influência destes parâmetros não está totalmente caracterizada, razões pela qual não são amplamente aceitam estas relações para o cálculo de transferência de calor e queda de pressão em trocadores de calor.

O presente trabalho pretende ajudar a explicar os efeitos de alguns parâmetros que influem no comportamento do coeficiente de troca e queda de pressão para a pasta de gelo em trocadores de placas, com presença de mudança de fase na mistura.

## 1.2. Pesquisa Bibliográfica

As primeiras pesquisas sobre pasta de gelo foram realizadas com escoamentos no interior de tubos, estudando-se as perdas de energia por troca de calor e o fator de atrito.

Metz (1987) e Choi e Knodel (1992) realizaram estudos sobre o potencial da pasta de gelo em tubulações, comparando-a com sistemas de água gelada convencionais. Potencialmente poder-se-ia reduzir a vazão mássica necessária em 35%. Por conseguinte, tem-se uma diminuição na potência requerida pelas bombas para uma mesma carga de resfriamento. Pode-se incrementar ainda a capacidade de resfriamento em até seis vezes para uma mesma potência de bombeamento. Este potencial era baseado na habilidade de criar pasta de gelo com um elevado valor relativo da fração de gelo, da ordem de 30%.

Choi (1992), em seus estudos sobre a capacidade de resfriamento em tubulações, mencionou a possibilidade de se incrementar, por um fator de dois, a referida capacidade para similares potências de bombeamento, com frações de gelo da ordem de 5%.

Knodel (2000) estudou a transferência de calor e queda de pressão, experimentalmente com pasta de gelo numa tubulação de 24,0mm de diâmetro interno de aço inoxidável, com velocidades de 2,8 a 5,0m/s, onde encontrou que o coeficiente global de troca de calor diminui para frações de gelo elevadas.

Devido ao potencial encontrado ao utilizar estas misturas relativamente simples, começou-se a fazer estudos sobre a possibilidade de utilizar a pasta de gelo nos demais componentes de um sistema de refrigeração, como é o caso dos trocadores de calor.

Grupta e Fraser (1990) conduziram estudos experimentais sobre a queda de pressão e transferência de calor para uma mistura de etileno glicol – água a 6%, com frações de gelo de 0 a 20%, e vazões volumétricas entre 0,18 e 2,16 m<sup>3</sup>/h, num trocador de calor de placas. Reportaram um aumento no coeficiente global de transferência de calor com a vazão mássica, porém uma diminuição do mesmo à medida que a fração de gelo aumentava. Foram observadas quedas de pressão quase constantes para frações de gelo até 20%.

Norgard (2001) estudou uma mistura de propileno glicol – água com uma concentração de 16% em peso, para frações de gelo entre 0 e 30%, e vazões entre 0,05 e 0,3 m<sup>3</sup>/h, num trocador de placas com diâmetro hidráulico de 4mm. Para baixas vazões volumétricas (0,05 m<sup>3</sup>/h) os resultados indicaram um incremento no coeficiente de troca de calor, e uma queda na pressão na medida que a fração de gelo aumenta. Foi observado que quando a vazão mássica aumentara, o efeito da fração de gelo sobre o coeficiente global de calor se reduzia.

Stamatiou (2001) utilizou um modelo pouco convencional de trocador de calor de placas, com um diâmetro hidráulico de 47 mm, para vazões de pasta de gelo entre 1,7 e 3,6 m<sup>3</sup>/h com números de Reynolds variando entre 1600 e 3500. Reportaram-se resultados para frações de gelo de 0% a 8%, onde o número de Nusselt aumenta com o número de Reynolds.

Bellas et al (2002) reportam resultados para misturas de propileno – água a 5%, para frações de gelo entre 0 e 25%, e vazões de 1,0 até 3,7m<sup>3</sup>/h. num trocador a placas. Observaram um aumento de 30% na capacidade de resfriamento, comparando com água gelada. Foi observado que o coeficiente de troca de calor aumenta com a vazão mássica da pasta de gelo, tendo a queda de pressão um aumento exponencial. Para uma variação da fração de gelo de 0 a 20%, a queda de pressão aumentou em 15%.

Jiménez (2003) realizou testes utilizando uma mistura de etileno glicol – água a 12% num trocador de placas, observando um aumento em até três vezes da capacidade de resfriamento do trocador de calor, e dos coeficientes globais de troca de calor utilizando pasta de gelo, comparando-se com a água líquida. Para uma mesma vazão, a pasta de gelo apresenta um menor número de Reynolds quando comparado com a água. Isto é devido ao fato de que a pasta de gelo apresenta maior viscosidade, apresentando valores menores do número de Nusselt da pasta de gelo comparando com a água.

Frei e Boyman (2003) realizaram experiências num trocador de calor de placas, com pasta de gelo, onde obtiveram coeficientes globais de troca de calor e quedas de pressão em função da vazão mássica, para frações de gelo até 30%. Observou-se que o coeficiente de troca de calor diminui ao aumentar a fração de gelo.

Tentando contribuir com a literatura, sobre este tema, se estudou a influência que tem a temperatura de entrada e o sentido de escoamento dos fluidos, assim como a carga térmica, sobre o comportamento do coeficiente global de troca de calor, a capacidade de resfriamento e a perda de carga no escoamento da pasta de gelo, conseguindo assim correlações para o número de Nusselt e o fator de atrito, como funções do número de Reynolds. O cálculo, para a fração de gelo, é feito a partir de uma análise diferencial das amostras analisadas, para levar em conta o efeito da variação da concentração da solução com a fração de gelo.

### **1.3. Estrutura do Trabalho**

Neste trabalho são apresentados os resultados mais relevantes do estudo conduzido no Laboratório de Refrigeração e Aquecimento da PUC-RIO, sobre os comportamentos do coeficiente global de troca de calor e da perda de carga em trocadores de placa. São apresentadas correlações para o número de Nusselt da pasta de gelo, assim como para o fator de atrito, como função do número de Reynolds. Em todos os casos, o fluido portador é composto por propileno glicol e água.

No capítulo 2, são apresentados, sucintamente, alguns conceitos sobre sistemas com termoacumulação, a classificação destes sistemas, alternativas de como armazenar a energia térmica. Introduce-se o conceito de pasta de gelo e dos aditivos que podem ser utilizados para conseguir os cristais de gelo. Faz-se ainda uma breve explicação sobre os modos de produção da pasta de gelo. Finalmente, um pequeno resumo sobre algumas vantagens da pasta de gelo é incluído.

Para determinar as propriedades termofísicas da pasta de gelo, são introduzidas algumas correlações, para levar em conta, além da temperatura, a fração de gelo presente na mistura devido à sua natureza bifásica.

No cálculo da fração de gelo considerou-se a variação das propriedades termofísicas com a temperatura e com a concentração do aditivo no fluido remanescente. A concentração aumenta na medida em que aparecem os cristais de gelo.

Na seção 2.4. apresenta-se uma breve introdução aos trocadores de calor de placas, suas variantes, sua configuração, além de alguns detalhes sobre os padrões de corrugação que suas placas apresentam.

Apresenta-se uma breve explicação sobre como classificar uma configuração de trocador de calor de placas e as possíveis variantes que se tem na hora de fazer os arranjos dos mesmos. Ao final, algumas das vantagens e desvantagens do uso de este tipo de trocadores são mostradas.

No capítulo 3, descreve-se a abordagem experimental feita para o presente estudo. Descrevem-se os parâmetros a serem estudados, assim como os detalhes da bancada de testes, onde se fizeram as experiências. O procedimento experimental seguido nos testes é descrito em detalhe.

O modelo matemático, do sistema em estudo, é apresentado no capítulo 4. Descrevem-se o cálculo da carga térmica e da capacidade de resfriamento, assim como as expressões adimensionais utilizadas nos estudos de transferência de calor e queda de pressão no trocador.

No capítulo 5 é apresentado um resumo dos resultados relevantes obtidos, incluindo a variação da capacidade de resfriamento da pasta de gelo, segundo as vazões mássicas, a fração de gelo e algumas condições para a carga térmica.

Para o coeficiente global de troca de calor, apresentam-se os resultados encontrados, como função dos diferentes parâmetros considerados nos testes. São feitas algumas comparações para uma mesma condição de carga térmica e a possibilidade de redução da vazão mássica no trocador ao utilizar a pasta de gelo em comparação com a água.

Finalmente, são apresentadas as correlações adimensionais para o número de Nusselt e fator de atrito versus o número de Reynolds, tanto para os testes com a solução aquosa sem cristais, quanto para aqueles com pasta de gelo.