

## 6

# Conclusões e recomendações para trabalhos futuros

### 6.1

#### Conclusões

O presente trabalho teve por objetivo determinar as características de transferência de calor de um gerador de pasta de gelo de superfície raspada, com raspadores de lâminas planas. Com este objetivo foi construído um sistema de geração de pasta de gelo, que incluiu o gerador, uma unidade condensadora com R22 como fluido refrigerante, um aquecedor elétrico que simula uma carga térmica, uma bomba de deslocamento positivo a instrumentação e o sistema de aquisição de dados. O fluido utilizado foi uma solução aquosa etanol-água com diferentes concentrações. Os estudos incluíram a transferência de calor com e sem mudança de fase.

A revisão da literatura concernente às características de transferência de calor em trocadores de calor de superfície raspada, com mudança de fase, mostra lacunas importantes com respeito à previsão do número de Nusselt. Foram encontradas três correlações apresentando previsões muito afastadas, diferindo em termos de ordem de grandeza. Uma análise detalhada das geometrias e das condições de operação mostra tratar-se de casos distintos ao estudado no presente trabalho, justificando sua originalidade e contribuição aos esforços de suprir conhecimento adequado ao projeto de geradores de pasta de gelo de superfície raspada.

Foi desenvolvido, a partir de um modelo, um método experimental para a determinação do número de Nusselt interno em trocadores de calor de superfície raspada. O modelo foi desenvolvido a partir de uma análise da transferência de calor por condução na parede do gerador. Foi resolvida a equação de condução de calor para condições bidimensionais em regime

estacionário, sem geração interna de calor em coordenadas cilíndricas. Esta equação foi resolvida numericamente, pelo método de diferenças finitas. Concluiu-se que o fluxo de calor local é proporcional à diferença de temperatura interna e externa da parede, em um ponto específico. Isto permitiu o desenvolvimento de um modelo de determinação experimental do número de Nusselt. Este método, por outro lado, pode ser utilizado na avaliação do número de Nusselt para escoamentos com e sem mudança de fase.

Foi adotada a utilização de uma serpentina de tubo de cobre e uma superfície estendida envolvendo a parede externa do gerador, por onde escoava o fluido refrigerante R22. Assegurou-se, desta forma, o retorno de óleo de lubrificação ao compressor do sistema, visto que, em trocadores de calor tipo do tubo é carcaça, encontram-se problemas com o retorno de óleo lubrificante no sistema. Este fato pode acarretar danos ao compressor e a conseqüente parada do sistema de geração. O sistema de geração de calor foi testado durante muito tempo e não foi observado acumulação de óleo no gerador. Isto mostra que a medida adotada foi eficaz.

A determinação da fração de gelo mostrou-se um problema relativamente complexo, foi efetuada por meio da medição da massa específica da pasta de gelo. Para a medição da massa específica foram utilizados medidores do tipo CORIOLIS. Os resultados mostraram baixas incertezas na determinação da fração de gelo.

Foi testado o método de determinação experimental do número de Nusselt, através da comparação do número de Nusselt experimental com os valores previstos por correlações existentes na literatura, para a transferência de calor em trocadores de superfície raspada sem mudança de fase.

A comparação incluiu os resultados da determinação do número de Nusselt para escoamento laminar, quando foi realizada uma corrida experimental com o mecanismo de raspagem parado, i.e,  $N = 0$ . Obtiveram-se resultados comparáveis aos da literatura existente.

Com relação aos resultados da transferência de calor no trocador de calor com mudança de fase, foi observado um aumento no coeficiente interno de transferência de calor da transição de escoamento sem mudança de fase para escoamento com mudança de fase, da ordem de 20 %.

O efeito da ação do mecanismo raspador incrementa notavelmente o número de Nusselt, da ordem de 5 vezes, se comparado aos números de Nusselt obtidos sem a ação deste mecanismo. Por outro lado foi estimada experimentalmente a potência dissipada pelo mecanismo raspador. Mostrou-se que, com altas frações de gelo, esta potência de dissipação é considerável.

Em qualquer sistema que utilize a pasta de gelo como fluido refrigerante secundário, a geração da pasta tem-se revelado como grande avanço tecnológico, Infelizmente, os custos de investimento necessários para a produção do aparato gerador de pasta são ainda elevados, dificultando a utilização desta promissora tecnologia. No Brasil, esta tecnologia ainda não é utilizada e, espera-se que esta pesquisa contribua à difusão desta tecnologia.

Existe, em equipamentos em geral, uma relação inversamente proporcional entre os custos de fabricação e a tolerância de fabricação. No presente trabalho, concluiu-se que, com uma separação de 0,4 mm entre o raspador e a superfície da parede do gerador, não se produz nenhuma deposição de gelo na superfície de transferência de calor. Isto implica a parede não ter que ser literalmente raspada. Tal característica, isto pode simplificar a tecnologia dos geradores de pasta de gelo.

Foi observado que, para frações de gelo maiores que 0,3 kg/kg, as perdas de carga são um fator a levar em conta. Desta forma, o projeto das tubulações de transporte de pasta de gelo deve ser cuidadosamente conduzido.

## 6.2

### Recomendações para trabalhos futuros

Uma alternativa ao processo de geração de pasta de gelo com trocadores de calor de superfície raspada, pode ser a adição de um gás no interior do gerador. Este processo, patenteado, cria as condições para que a formação dos cristais de gelo ocorra no volume interno do gerador e não na parede ou perto dela. Esta tecnologia é denominada “Bubble Slurry<sup>TM</sup> Ice” e parece ser a tecnologia da segunda geração de geradores de pasta de gelo. Pode-se observar que ainda existe muito potencial para o desenvolvimento

de geradores de pasta de gelo.

O mecanismo de formação dos cristais de gelo ainda não está bem compreendido, e necessita-se de mais pesquisa neste sentido. A compreensão deste mecanismo pode contribuir à tecnologia de geração de pasta de gelo, levando a sistemas mais eficientes.

O processo de geração de cristais na parede do trocador de calor, produz, provavelmente, um gradiente localizado de concentração do fluido portador e fração de gelo, próximo à superfície do trocador. Localmente, a concentração do fluido portador é, provavelmente incrementada devido ao aumento da fração de gelo, levando então, a temperatura a ser menor. O processo de mistura deste fluido com o fluido do volume restante ainda não é totalmente compreendido, assim, como isto afeta o processo de geração dos cristais de gelo e a transferência de calor. Trata-se de um assunto em aberto e que merece uma investigação cuidadosa.

Uma análise dimensional dos cristais de gelo se faz necessária para o estudo das características da hidrodinâmica da pasta de gelo e também para o estudo da transferência de calor no gerador. Um instrumento de visualização por microscópio ótico e luz polarizada permitiria uma análise dimensional dos cristais. As fotografias apresentadas nos resultados do presente trabalho, foram realizadas com um microscópio que não possui estas características.

O método de determinação da fração de gelo mostrou-se eficaz mas, por outro lado, o custo dos medidores CORIOLIS é elevado. Cabe aqui estudar outros métodos de determinação da fração de gelo. Existem esforços de pesquisadores neste sentido. Atualmente está sendo estudada a possibilidade de utilização de ultra-sonografia e de radiação infravermelha, projetadas transversalmente ao escoamento de pastas de gelo, para se determinar a fração de gelo.