

## 5 Resultados

### 5.1 Considerações iniciais

#### 5.1.1 Tamanho e forma dos cristais de gelo

As fotografias de microscopia, mostradas nas Figs. 5.1 e 5.2, permitem apreciar o tamanho e forma dos cristais de gelo em uma amostra de pasta de gelo, retirada do gerador em condições típicas de operação. Estas fotografias foram obtidas no Laboratório de Estudo de Interfaces da PUC-Rio, por meio de uma câmera CCD acoplada a um microscópio Axiovert 40 MAT Inverted Microscope (Carl Zeiss). A obtenção destas fotografias apresentou grandes dificuldades, devido ao fato de, no instante em que os cristais da pasta de gelo entravam em contato com as paredes do recipiente do microscópio, e com os efeitos da intensidade da luz deste, fundiam-se rapidamente.

O procedimento da obtenção das fotografias é descrito a seguir. Foi gerada pasta de gelo a partir de uma solução aquosa de etanol com concentração de 12% e fração de gelo de 0,22 kg/kg. Foi coletada uma amostra em uma garrafa térmica de 500 mL. Previamente, no laboratório, a lente do microscópio foi ajustada com o objetivo em 10X. A câmera de vídeo estava ligada ao computador através de um sistema de registro e conversão da imagem a um formato digital. Estas imagens digitalizadas eram analisadas através de um software Axiovision (Carl Zeiss). O recipiente do microscópio era pré-resfriado com parte da amostra de pasta de gelo. Em seguida, a amostra era posta no recipiente e, analisada na interface gráfica do software.

Do conjunto de fotos tiradas apenas duas apresentaram resultados práticos. Nas fotografias pode-se ver uma indicação de escala (100  $\mu\text{m}$ ), permitindo uma idéia do tamanho dos cristais de gelo.

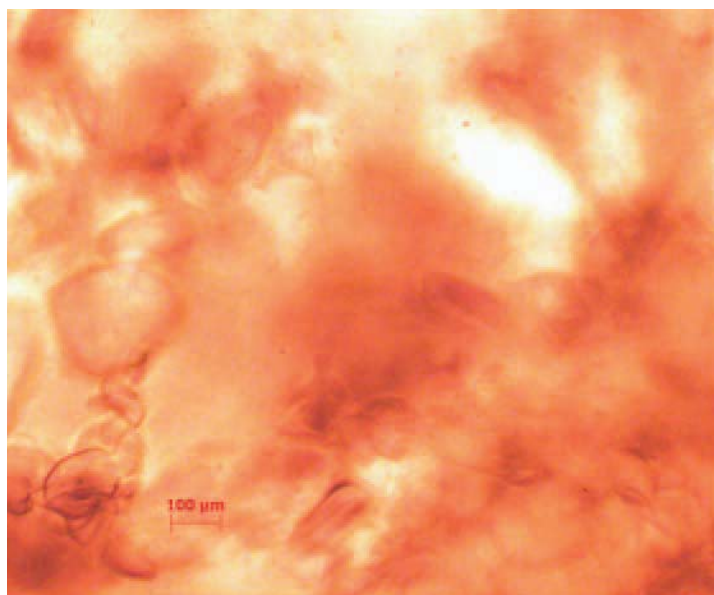


Figura 5.1: Foto de cristais de gelo em uma amostra de pasta de gelo produzida a partir de uma solução de etanol com concentração em massa de 12% e fração de gelo de 0,22 kg/kg, a uma temperatura ambiente de 20 °C.

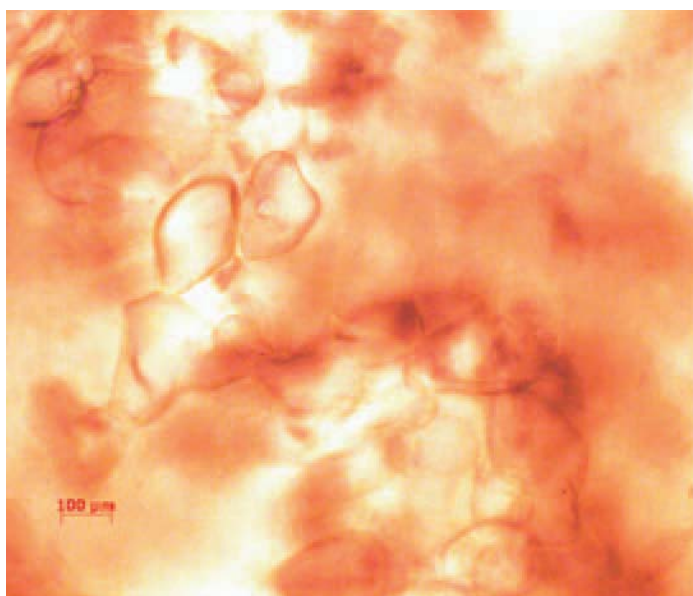


Figura 5.2: Foto de cristais de gelo em uma amostra de pasta de gelo produzida a partir de uma solução de etanol com concentração em massa de 12% e fração de gelo de 0,22 kg/kg, a uma temperatura ambiente de 20 °C.

### 5.1.2 Análise do regime transiente da geração de pasta de gelo

A Fig. 5.3 mostra a evolução com o tempo da temperatura e massa específica da solução aquosa no sistema de geração de pasta de gelo de uma corrida típica. Foi utilizado etanol com uma concentração em massa de 0,12 kg/kg. A vazão da solução foi de 0,18 kg/s e a velocidade de rotação do raspador,  $11 \text{ s}^{-1}$ .

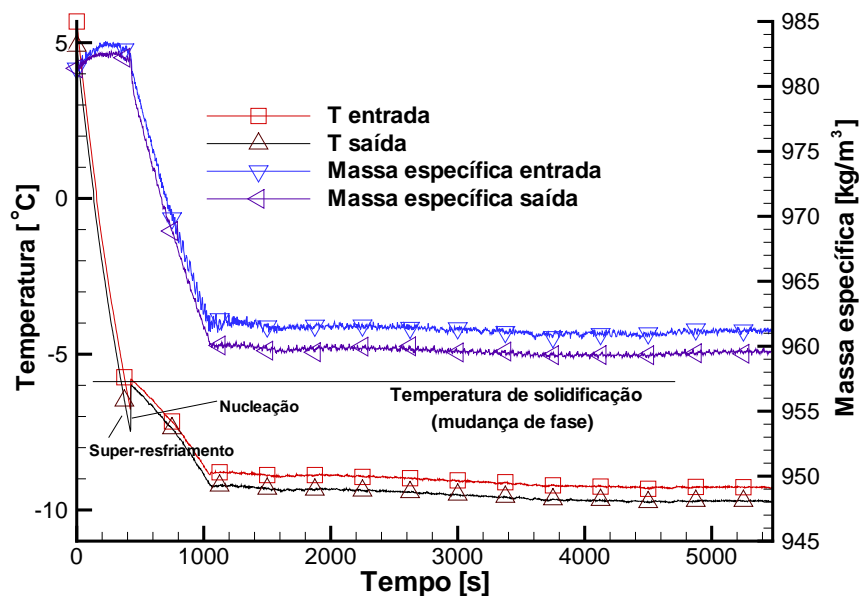


Figura 5.3: Evolução da temperatura e massa específica da pasta de gelo ao longo do processo de geração da pasta de gelo na entrada e saída do gerador, com uma concentração de etanol de 12%, vazão de 0,18 kg/s e frequência de rotação do mecanismo raspador,  $11 \text{ s}^{-1}$ .

Quando o sistema de refrigeração primário, a bomba do ciclo secundário e o mecanismo de raspagem são postos em funcionamento, a transferência de calor na solução aquosa transcorre, inicialmente, sem mudança de fase. A temperatura continua, então, a baixar até o ponto de mudança de fase. Em todas as experiências ao longo do tempo, foi observado o fenômeno de metaestabilidade. Ocorre um **super-resfriamento**, onde os primeiros cristais de gelo não são formados até um ou dois graus ( $^{\circ}\text{C}$ ) abaixo da temperatura de solidificação, como indicado na Fig. 2.3, onde podem ser observados pontos experimentais de temperatura abaixo da linha de temperatura de solidificação. Isto é, a solução aquosa permanece totalmente em

fase líquida a temperaturas abaixo da temperatura de solidificação. Após o período de super-resfriamento, a temperatura da solução aumenta abruptamente a valores próximos da temperatura de solidificação. Este fenômeno é chamado de **nucleação**, indicando o aparecimento dos cristais de gelo. Após essa transição, tudo indica que a formação dos cristais de gelo realiza-se em condições de equilíbrio termodinâmico. Na Fig. 5.3 pode-se também observar a variação da massa específica da solução aquosa. Quando ocorre a nucleação, a massa específica varia abruptamente, e diminui à medida que são gerados mais cristais de gelo, o que significa que a fração de gelo aumenta gradativamente, tal como é mostrado na Fig. 5.4. A determinação da fração de gelo é realizada através da medição da massa específica da pasta de gelo (Apêndice B).

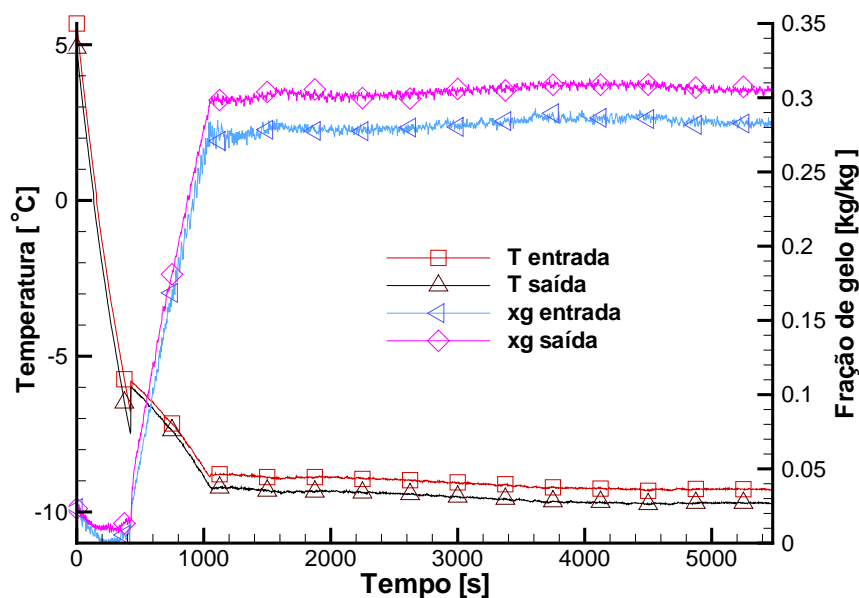


Figura 5.4: Evolução da temperatura e fração de gelo da pasta de gelo ao longo do processo de geração da pasta de gelo na entrada e saída do gerador, com concentração de etanol 12%, vazão de 0,18 kg/s e frequência de rotação do mecanismo raspador,  $11 \text{ s}^{-1}$ .

A fração de gelo continuaria a aumentar até valores que poderiam comprometer a operação do sistema de geração. De fato, foi observado que altos valores da fração de gelo, acima de 0,30 kg/kg, produzem oscilações nas leituras de massa específica, nos medidores CORIOLIS, e, seguido a este sinal, produz-se a parada da bomba, como pode observado na Fig. 5.5. Neste

incidente, prévio à parada da bomba (vazão nula), as leituras dos medidores de massa específica CORIOLIS apresentaram flutuações e, repentinamente, a bomba parou de funcionar. Isto pode ser explicado pela grande variação da viscosidade dinâmica da pasta de gelo com a fração de gelo (Eq. 2-21). O aumento da viscosidade acarreta perdas de carga excessivas com o conseqüente desligamento da bomba.

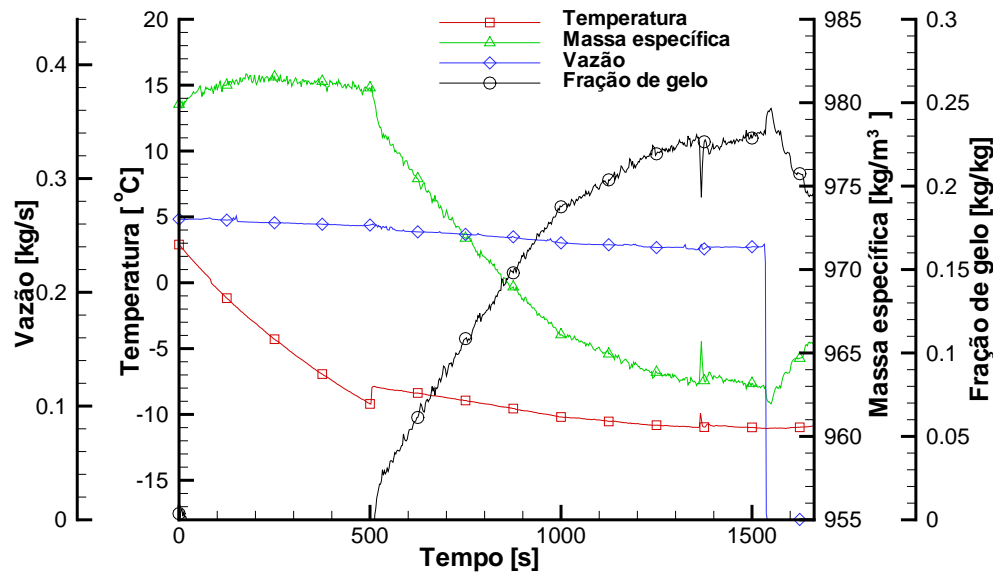


Figura 5.5: Registro de um incidente onde ocorreu o desligamento da bomba do sistema devido ao aumento da fração de gelo. Pode-se observar as flutuações na medida da massa específica antes do desligamento. Condições de operação: concentração de etanol, 15,8% e frequência de rotação do mecanismo raspador,  $9 \text{ s}^{-1}$ .

Na realidade, as bombas de deslocamento positivo são bombas de fluxo volumétrico constante ( $\dot{V} = \text{constante}$ ). Se a velocidade de rotação do motor que a aciona for constante, considerando a relação  $\dot{m} = \rho \dot{V}$ , a variação na vazão é diretamente proporcional à variação da massa específica do fluido ( $\rho$ ). Para os dados com que foi levantada a figura 5.5, a variação da massa específica foi de 1,7%. Porém, a variação da vazão foi de 14%. Pode-se concluir que a variação na vazão não é atribuível exclusivamente à variação da massa específica da pasta de gelo, mas também à perda de carga no circuito, decorrente da grande variação da viscosidade dinâmica da pasta de gelo.

O medidor CORIOLIS CMF025, instalado na bancada experimental, e tal como indicam as especificações do fabricante, produz uma queda de pressão de 1 bar à vazão nominal (0,3 kg/s), valor este obtido com água como fluido de operação. Do ponto de vista de operação em uma corrida experimental, se for desejável manter constante uma vazão de operação, tem-se que ajustar continuamente o variador de frequência, que controla a velocidade angular da bomba. A Fig. 5.6 mostra a evolução da vazão de operação em uma corrida com concentração de etanol de 12%, a vazão em regime permanente 0,18 kg/s e frequência de rotação do mecanismo raspador,  $11 \text{ s}^{-1}$ .

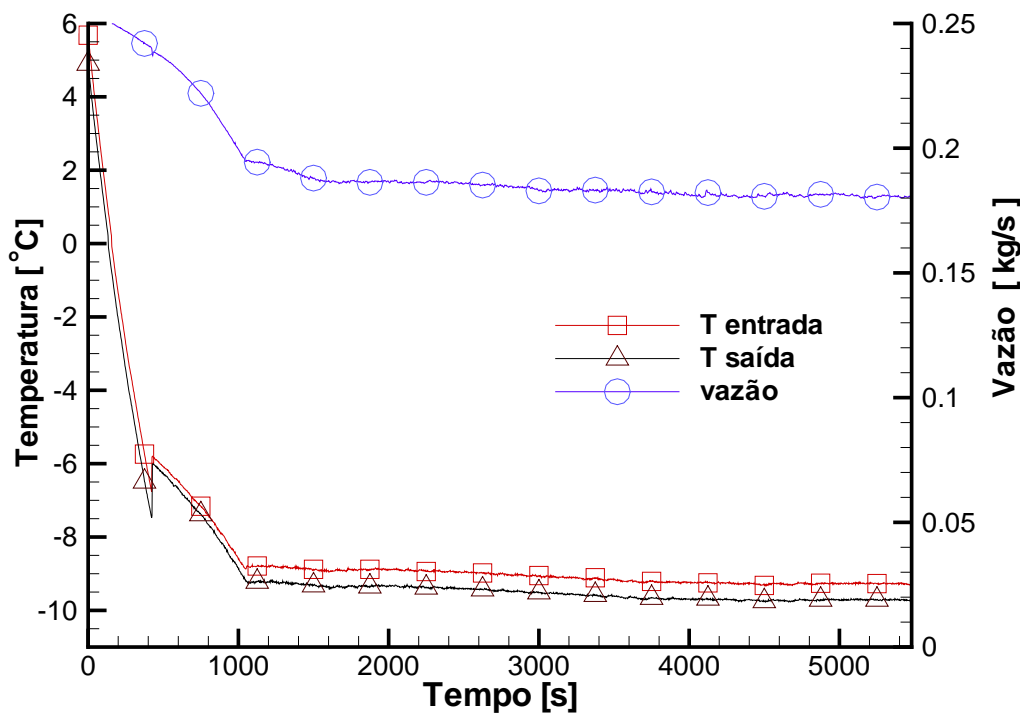


Figura 5.6: Variação da vazão da pasta de gelo com valor pre-fixado no variador de frequência. Condições de operação: concentração de etanol, 12%; vazão em regime permanente de 0,18 kg/s e frequência de rotação do mecanismo raspador,  $11 \text{ s}^{-1}$ .

No presente trabalho mostrou-se impossível, devido à necessidade de outros dois controles, de carga térmica e de temperatura de evaporação, adotar o procedimento acima para o controle da vazão. Eventualmente,

entretanto, a vazão também atinge regime permanente (Fig. 5.6).

Os efeitos da variação da viscosidade dinâmica da pasta de gelo são ainda mais pronunciados na operação de bombas centrífugas. A fig 5.7 mostra a grande variação da vazão no sistema, com a operação de uma bomba centrífuga, CAM W-4C DANCOR, com uma concentração de etanol de 13% e frequência de rotação do eixo dos raspadores de  $6 \text{ s}^{-1}$ . Descartou-se, já no início do levantamento dos pontos experimentais, a utilização da bomba centrífuga em favor da bomba de deslocamento positivo.

Do ponto de vista de comportamento reológico, a pasta de gelo comporta-se como um fluido Newtoniano a frações de gelo menores que (0,20 kg/kg) [15]. Com frações de gelo mais elevadas o comportamento reológico da pasta de gelo passa ser o de um fluido não-Newtoniano.

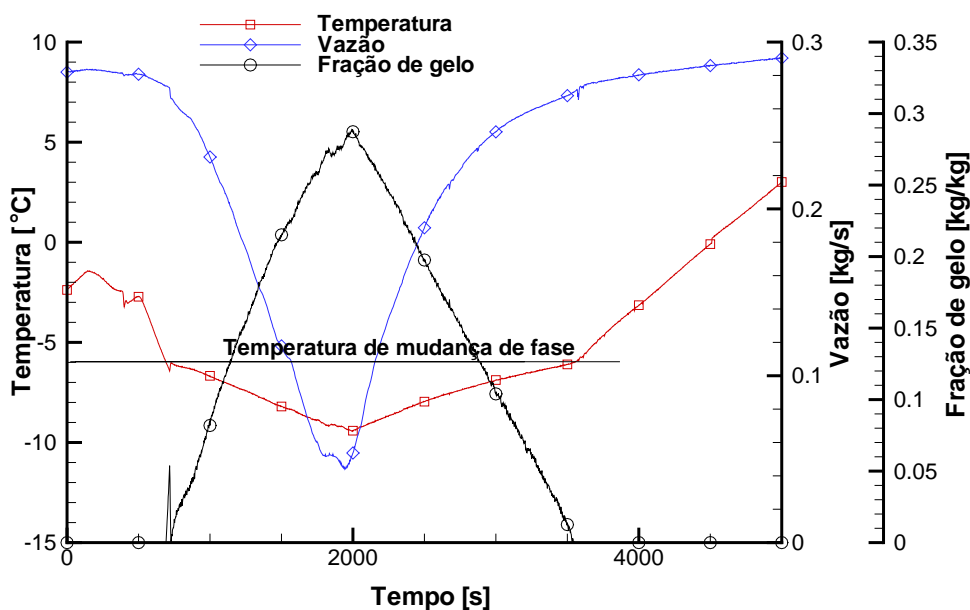


Figura 5.7: Variação da vazão com uma bomba centrífuga CAM W-4C DANCOR, com solução aquosa de etanol de 13% e frequência de rotação do mecanismo raspador,  $6 \text{ s}^{-1}$ .

O controle que permite operar e estabilizar o sistema de geração com determinada fração de gelo se faz através da carga térmica. Na Fig. 5.8 pode-se observar a variação da fração de gelo com a carga térmica.

A carga térmica é controlada pela diferença de potencial (V) fornecida à resistência elétrica. No instante em que a carga térmica é acionada, Fig. 5.8, interrompe-se o crescimento contínuo da fração de gelo no sistema. A partir deste instante, opera-se no controle da diferença de potencial para, eventualmente, atingir o regime permanente.

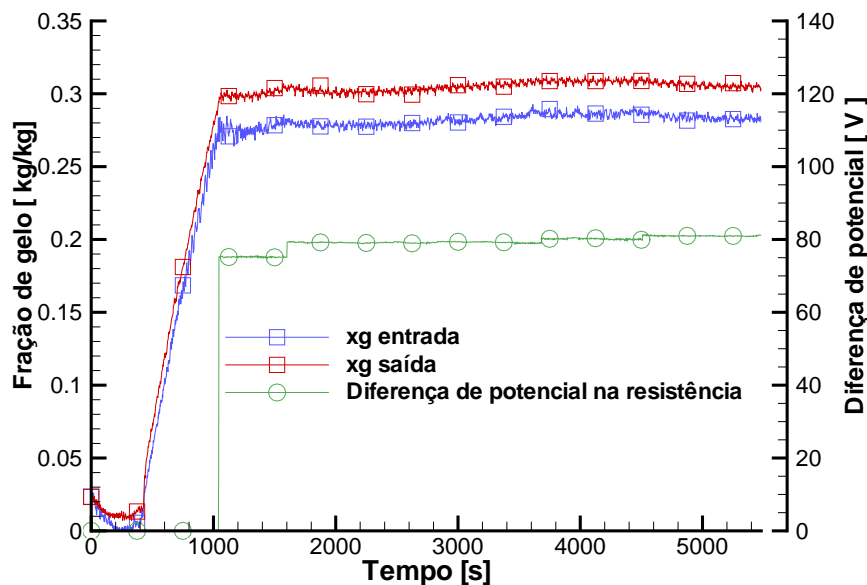


Figura 5.8: Exemplo de como o controle da carga térmica permite atingir o regime permanente no processo de geração da pasta de gelo. Condições de operação: concentração de etanol, 12%; vazão de 0,18 kg/s e a frequência de rotação do mecanismo raspador,  $11 \text{ s}^{-1}$ .

## 5.2

### Validação do modelo de determinação experimental do número de Nusselt

No modelo proposto para a determinação experimental do número de Nusselt na Seção. 4.4, obteve-se uma relação linear entre o fluxo de calor médio na interface,  $\bar{q}''$ , e a diferença de temperatura média da temperatura de parede (entre a face interna e externa da parede),  $\overline{\Delta T}_z$  (Eq. 4-95). Esta relação foi verificada experimentalmente. A Fig. 5.9, com  $\bar{q}'' \times \overline{\Delta T}_z$ , mostra



que a constante de proporcionalidade pode ser a mesma para todos os dados experimentais, com e sem mudança de fase. Isto indica que o modelo de determinação do número de Nusselt pode ser aplicado para os dois casos, isto é, com e sem mudança de fase. Conforme teria sido previsto pelo modelo (Eq. 4-95). Chegou-se à seguinte correlação:

$$\bar{q}'' = 1398,1 \bar{\Delta T}_z, \quad (5-1)$$

a qual é válida para os limites de operação do presente trabalho e para esta geometria específica de gerador de pasta de gelo. O erro ou desvio padrão do coeficiente da reta é  $3,33 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  e o coeficiente de correlação, 0,92.

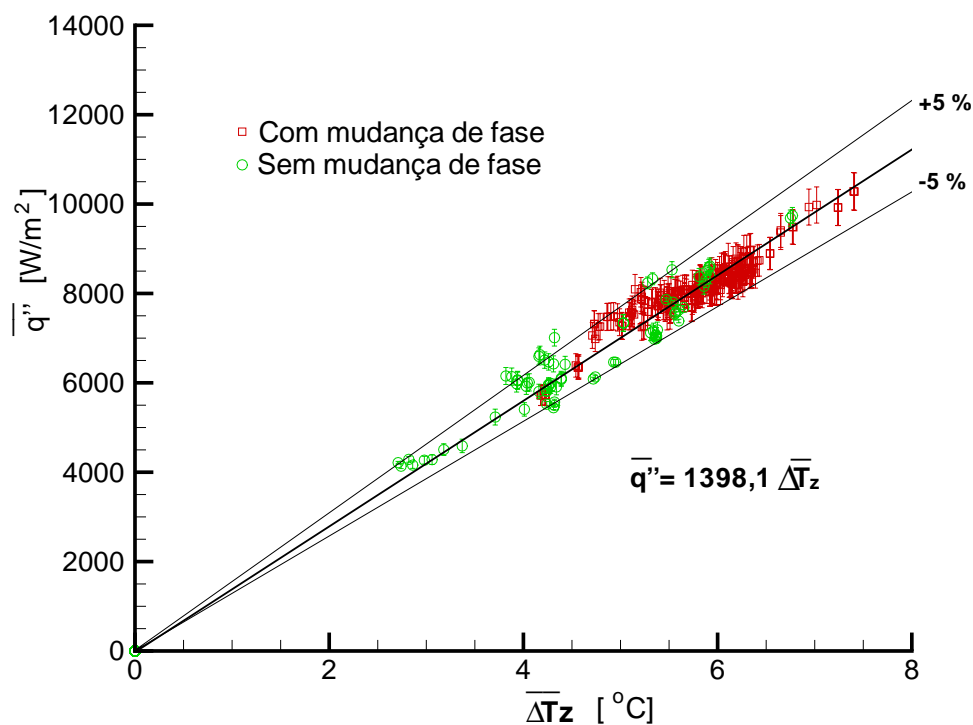


Figura 5.9: Verificação experimental da relação linear entre o fluxo médio de calor na interface,  $\bar{q}''$ , e a diferença de temperatura média,  $\bar{\Delta T}_z$ , (Eq. 4-95).

A Fig. 5.10 mostra o número de Nusselt local em uma corrida específica com rotor parado,  $N = 0$ , com uma vazão mássica de 0,29 kg/s, número de Prandtl  $Pr = 70$  e número de Reynolds axial  $Re_a = 350$ , isto

é, escoamento laminar, hidrodinamicamente e termicamente desenvolvido. Para o escoamento laminar desenvolvido no interior de tubos circulares lisos, a literatura indica que, para condições de temperatura de parede constante, o número de Nusselt é  $Nu = 3,66$ . E, para fluxo de calor constante,  $Nu = 4,36$  [71]. Por outro lado, tem-se que as condições de escoamento plenamente desenvolvido são alcançadas para  $[(z/D)/Re_a Pr] \approx 0,05$  [71]. Com os dados disponíveis e aplicando o conceito de diâmetro hidráulico da seção anular, deduz-se que o escoamento, nas condições do presente trabalho, não corresponde à região de escoamento plenamente desenvolvido.

Lundberg et al [77] fornecem o número de Nusselt local para fluxo de calor constante no escoamento em dutos anulares através da equação a seguir:

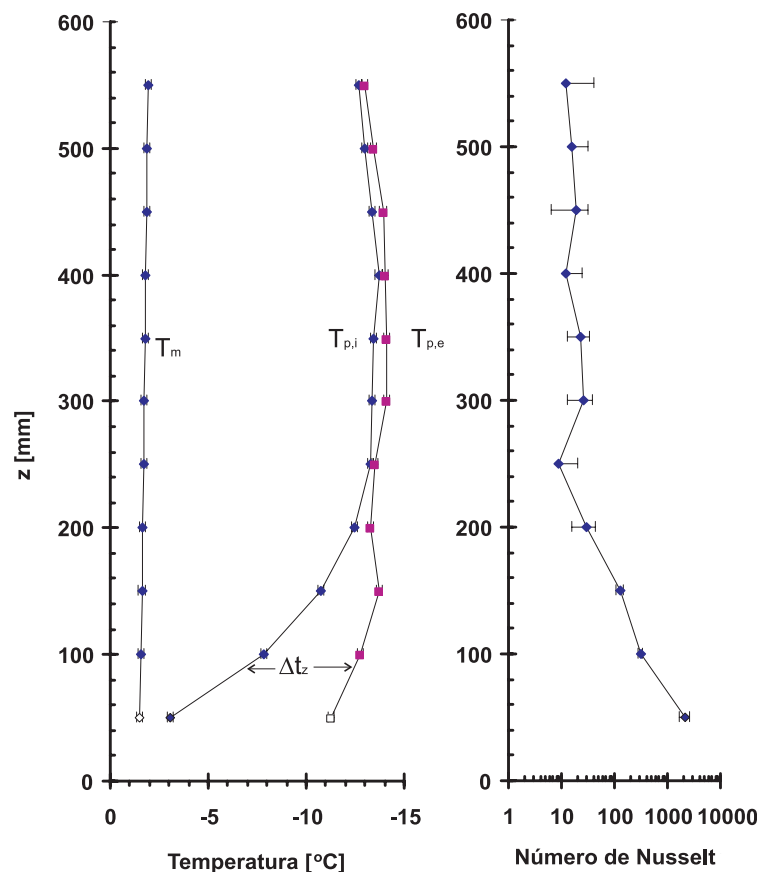


Figura 5.10: Variação do número de Nusselt com a posição axial com rotor parado ( $N = 0$ ), sem mudança de fase, com solução aquosa de etanol com concentração de 27%, vazão 0,29 kg/s,  $Pr = 70$  e  $Re_a = 350$  (escoamento laminar).

$$Nu_{\bar{z}} = \frac{1}{\theta_{oo}^{(2)} - \theta_{bo}^{(2)}} \quad (5-2)$$

onde a diferença  $\theta_{oo}^{(2)} - \theta_{bo}^{(2)}$  é fornecida pela tabela 5.1.

$r^*$	$\bar{z}$	$\theta_{oo}^{(2)} - \theta_{bo}^{(2)}$
0,5	0,0005	0,0560
	0,001	0,0704
	0,005	0,117
	0,01	0,142
	0,05	0,193
	0,10	0,198
	0,5	0,199
	$\infty$	0,199

Tabela 5.1: Coeficientes para a obtenção do número de Nusselt local em escoamentos laminares em dutos anulares com razão de diâmetros  $r^* = d/D$  e um comprimento adimensional  $\bar{z}$  [77].

Na tabela 5.1 o comprimento adimensional,  $\bar{z}$ , está definido como segue:

$$\bar{z} = \frac{z/D_h}{Re_a Pr} \quad (5-3)$$

onde o diâmetro hidráulico da seção anular é dado por:

$$D_h = D - d \quad (5-4)$$

O gerador do presente trabalho apresenta a razão de diâmetros igual a  $r^* = 0,5$ . O número de Nusselt, para fluxo de calor constante escoando em dutos anulares e na região plenamente desenvolvida, segundo a Eq. 5-2, corresponde a 5.

Estes números servem de balizamento para os resultados obtidos na figura 5.10. Nesta experiência, em particular, foi difícil controlar a vazão de fluido refrigerante R22. Com isto, a determinação do fluxo médio calor na interface ficou prejudicada, o que explicaria valores acima do esperado. Contudo, qualitativamente, esta curva apresenta similaridade com a variação esperada do número de Nusselt na literatura, ou seja, altos números de Nusselt na entrada e na região em desenvolvimento decréscimo do número de Nusselt. Na Fig. 5.10, pode-se observar que este não é um caso de temperatura constante ou fluxo de calor constante. A Fig. 5.11, por outro lado, mostra uma boa concordância dos dados experimentais com a

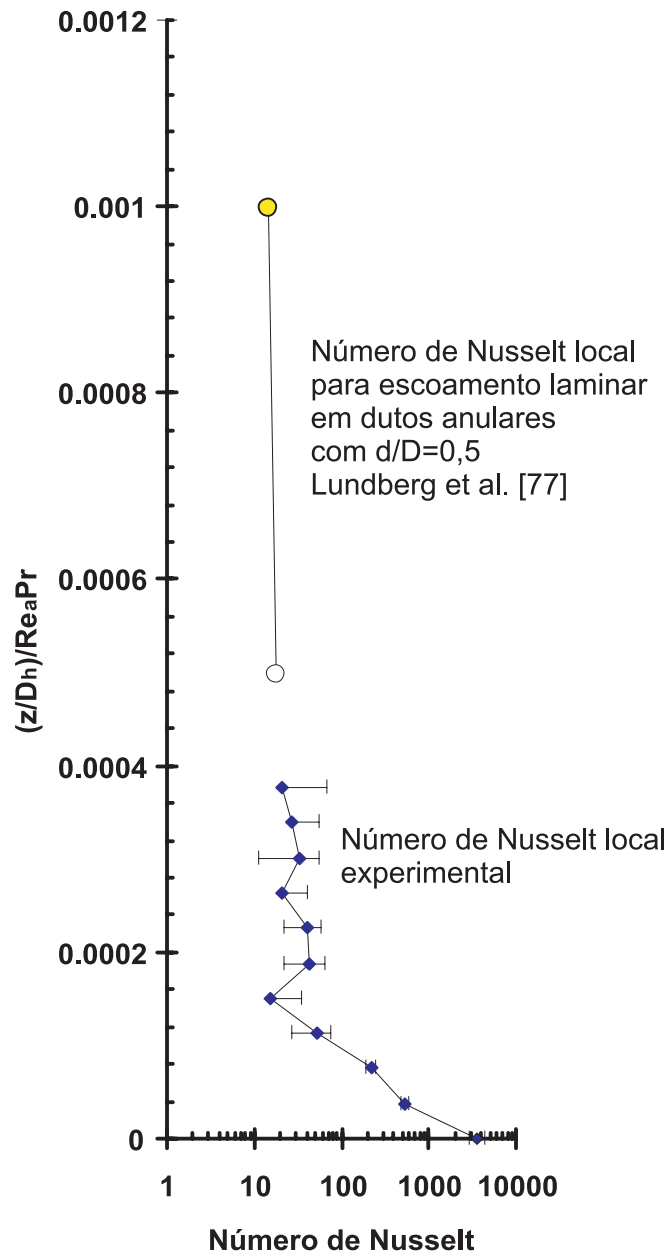


Figura 5.11: Comparação do número de Nusselt local experimental e o número de Nusselt pela correlação de Lundberg et al. [77], para escoamentos anulares (Eq. 5-2 ). Foi utilizada solução aquosa de etanol com concentração de 27%, vazão de 0,29 kg/s,  $Pr = 70$ ,  $Re_a = 350$  (escoamento laminar).

tendência apresentada pela correlação de Lundberg et al. [77].

Procedeu-se, então, à obtenção dos dados experimentais do sistema de geração de pasta de gelo. Na primeira etapa foram realizadas experiências sem mudança de fase. Na segunda etapa, os experimentos envolveram a coleta de dados experimentais, com e sem mudança de fase.

### 5.3

#### Número de Nusselt para troca de calor sem mudança de fase

As experiências realizadas sem mudança de fase foram realizadas com uma solução aquosa de etanol com concentração em massa de 27,2%, que corresponde a uma temperatura de solidificação de -17,7 °C, permitindo a operação do trocador a baixas temperaturas.

Dos resultados das experiências realizadas, sem mudança de fase, obteve-se o número de Nusselt médio, pelo método dos mínimos quadrados, na forma  $\overline{Nu} = f(Re_r, Re_a, Pr)$ . O resultado é apresentado a seguir:

$$\overline{Nu} = 2,46 Re_a^{0,15} Re_r^{0,42} Pr^{0,18} \quad (5-5)$$

Esta correlação é válida para:

$$\begin{aligned} 47 &< Re_a < 413 \\ 2560 &< Re_r < 21900 \\ 70 &< Pr < 122 \end{aligned}$$

A Fig. 5.12 mostra o número de Nusselt médio experimental versus o número de Nusselt da correlação Eq. 5-5. O coeficiente de correlação encontrado foi de 0,989.

Os resultados experimentais do presente trabalho foram comparados com modelos e correlações existentes na literatura, para escoamento em trocadores de calor de superfície raspada sem mudança de fase. Na Seção 4.2 foram apresentados o modelo teórico de transferência de calor com presença de raspadores, proposto por Kool [17], Harriott [18] e Latinen [19], assim como várias correlações da forma  $Nu = f(Re_r, Re_a, Pr, n_R)$ , apresentadas por diversos outros pesquisadores [64, 65, 24, 67, 68, 25, 70].

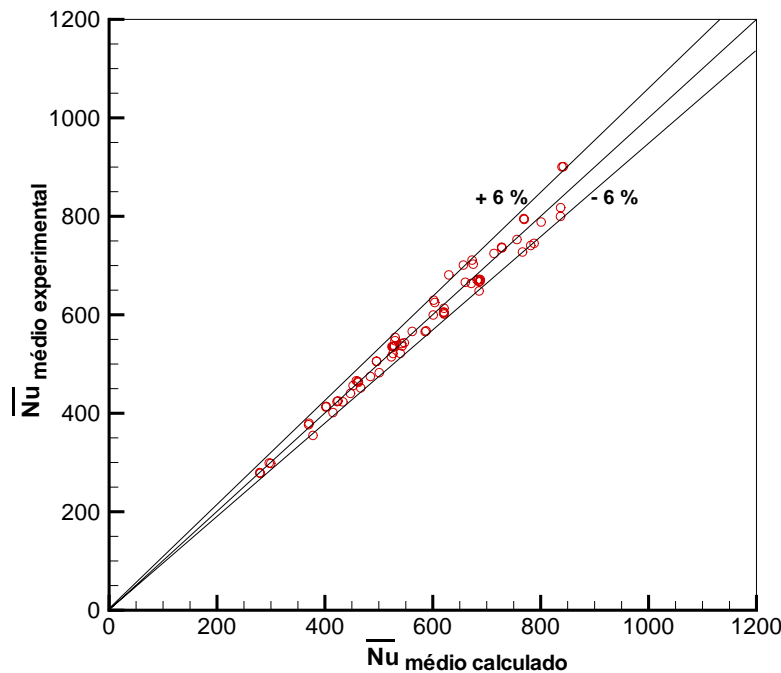


Figura 5.12: Comparação do número de Nusselt experimental médio para condições de escoamento sem mudança de fase e o número de Nusselt da correlação obtida, equação (5-5).

A Fig. 5.13 apresenta, em um mesmo gráfico, o número de Nusselt médio experimental comparado com o número de Nusselt previsto por estas outras correlações da literatura. O objetivo é apresentar, de uma forma geral, como as correlações se comparam. Pode-se observar que, ao longo dos anos, as correlações têm apresentado a tendência a reduzir os números de Nusselt previstos.

O modelo teórico de penetração de calor, adotado por Kool [17], Harriott [18] e Latinen [19], não inclui os efeitos de viscosidade. Este modelo, como explicado anteriormente, assume que uma camada fresca de fluido, à temperatura de mistura (“bulk”), substitui a camada que é retirada da interface pelo raspador. Na realidade, os efeitos da viscosidade, entretanto, não permitem uma mistura adequada do fluido, e a temperatura que substitui a camada retirada não é a temperatura de mistura. Por conseguinte, o efeito da viscosidade reduz a transferência de calor, motivo pelo qual as correlações (4-31) a (4-33), (4-35), (4-39), (4-40) e (4-42), em maior ou menor medida, superestimam o número de Nusselt.

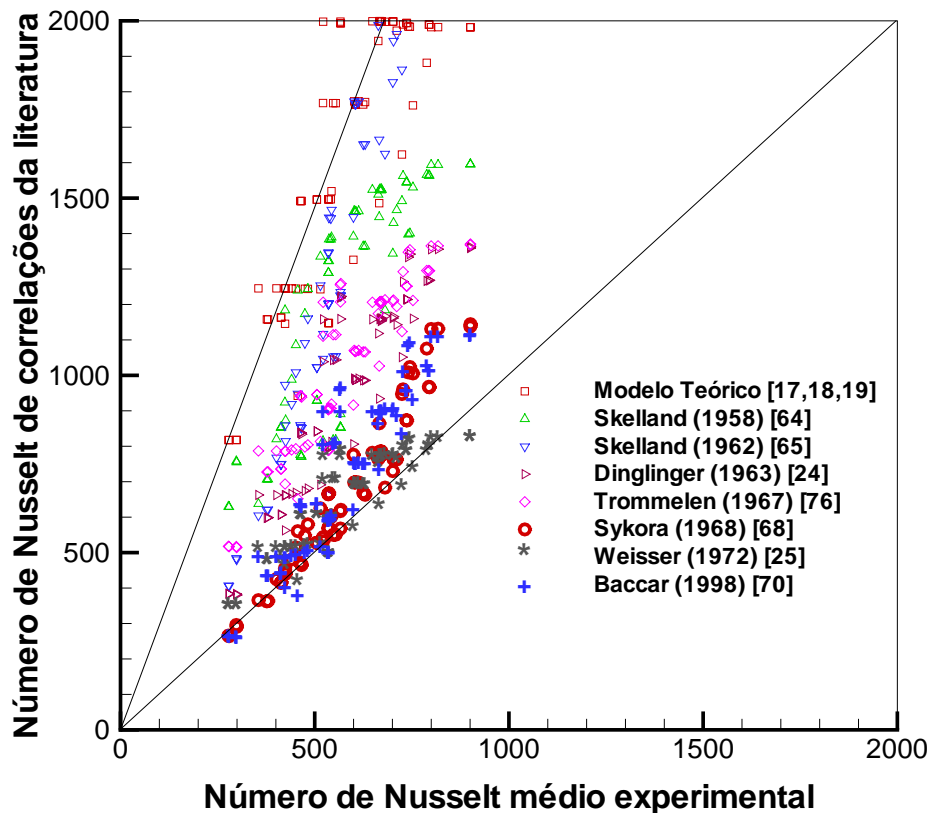


Figura 5.13: Comparação do número de Nusselt médio experimental com outras correlações da literatura.

Pode-se observar que as correlações de Skelland [64, 65] apresentam resultados comparáveis ao modelo teórico.

Para efeito de comparação, buscou-se a faixa de aplicação das diversas correlações disponíveis na literatura. Não foram encontrados os limites de validade para a correlação de Dinglinger [24]. A correlação de Trommelen [76] aplica-se a escoamento laminar e transicional. Não foi, portanto, considerada para efeitos de comparação, visto que, no presente estudo, abrangeu-se a região de escoamento transicional a turbulento. A correlação de Sykora [68] é válida para a região de transição, como comentado anteriormente.

Na Fig. 5.14, é apresentada a comparação entre o número de Nusselt médio e o previsto pelas correlações de Skelland [65], Sykora [68], Weisser [25] e Baccar [70], as quais apresentaram seus limites de validade dentro

dos limites obtidos no presente trabalho.

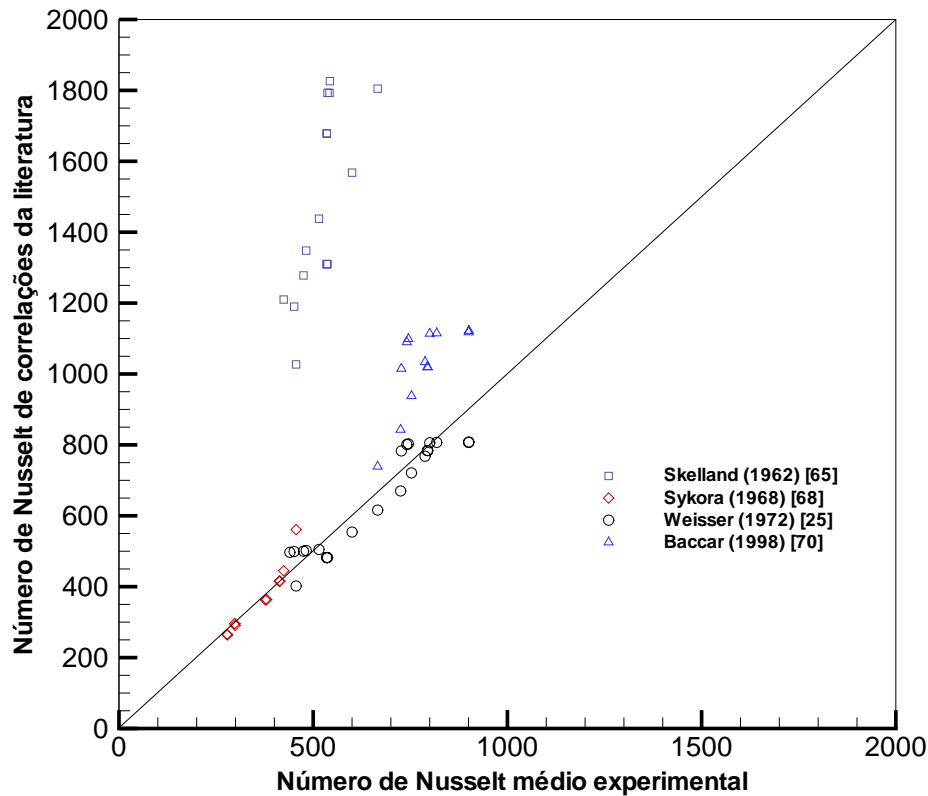


Figura 5.14: Comparação do número de Nusselt médio experimental com correlações da literatura, para os quais os números de  $Re_a$ ,  $Re_r$  e  $Pr$  estão dentro dos limites de validade do presente trabalho.

Na Fig. 5.14, pode ser observado que as correlações de Sykora [68] e Weisser [25] correlacionam satisfatoriamente com os dados do presente trabalho. A correlação de Baccar [70], talvez devido ao fato de ser resultado de uma simulação numérica, prevê valores superiores se comparados com os resultados do presente trabalho. Os resultados de Skelland [65], embora os limites de validade estejam enquadrados nos limites do presente trabalho, são conservadores e aproximam-se do modelo teórico.



## 5.4

### Comparação da transferência de calor com mudança de fase

As experiências que envolvem mudança de fase foram realizados com soluções aquosas de etanol com concentrações em massa de 12,2; 13,4; 15; e 15,6%. A faixa de temperatura de trabalho foi de -12 até 0 °C e a fração de gelo variou entre 0 e 0,30 kg/kg. A Fig. 5.15 mostra a variação da fração de gelo com a temperatura. A fração de gelo foi determinada por medição de massa específica da pasta de gelo, na entrada e saída do gerador,  $x_{g,e}$  e  $x_{g,s}$ . A fração de massa levantada na figura 5.15 é a média das frações mencionadas. A temperatura indicada também é a média das temperaturas de entrada e saída.

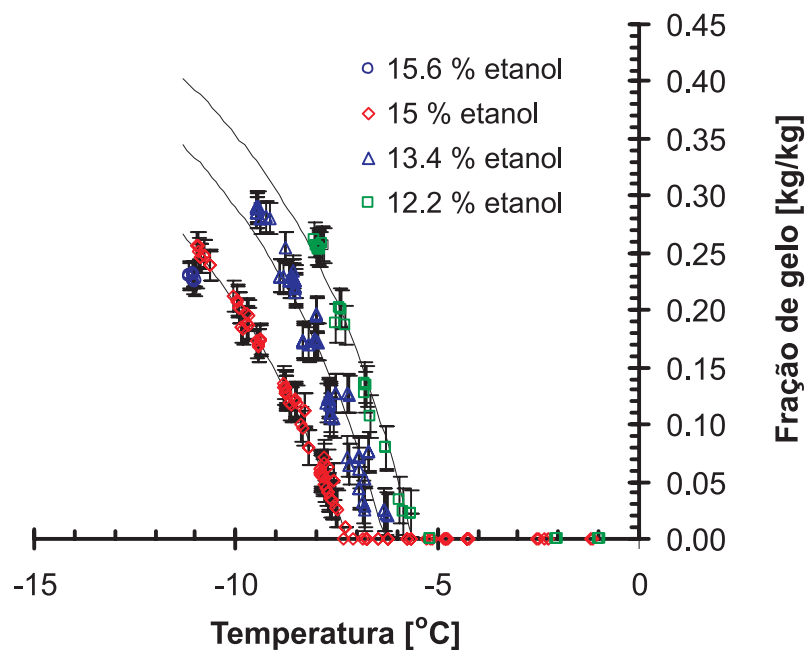


Figura 5.15: Variação da fração de gelo com a temperatura.

A Fig. 5.16 mostra a variação da diferença entre a temperatura média da parede interna e a temperatura média do fluido,  $\bar{T}_{p,i} - \bar{T}_m$  com o número de Nusselt. A temperatura média do fluido é a média das temperaturas do fluido na entrada e na saída no gerador. Pode-se observar que esta diferença de temperaturas foi menor em experimentos com mudança de fase. A diferença de temperatura  $T_{p,i} - T_m$  é utilizada na determinação do número de Nusselt local e médio (Eqs. 4-97 e 4-98).

As Figs. 5.17 e 5.18 mostram a variação do coeficiente interno médio de troca de calor com a temperatura de operação do sistema. Manteve-

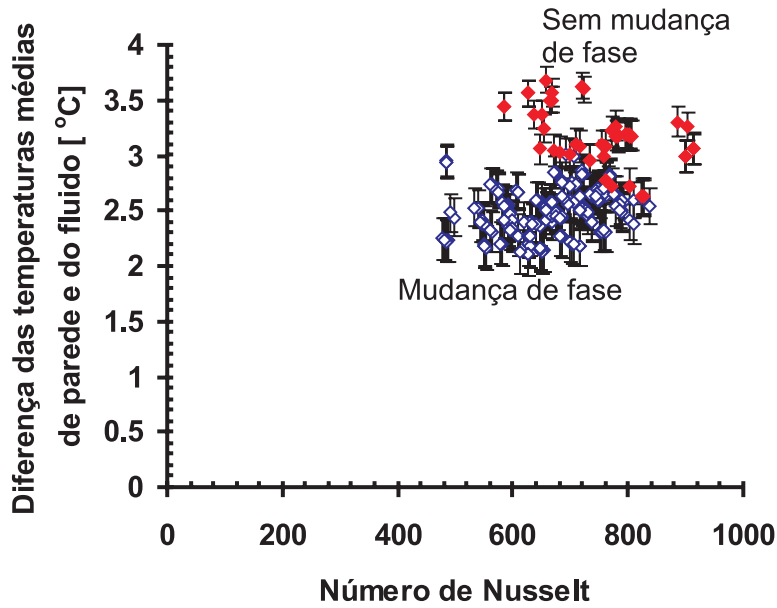


Figura 5.16: Variação da diferença entre as temperaturas médias da parede interna e do fluido,  $\bar{T}_{p,i}$  e  $\bar{T}_m$  com o número de Nusselt.

se a velocidade rotacional do mecanismo raspador, preestabelecendo-se uma vazão mássica e a temperatura de evaporação do fluido refrigerante. Observa-se que o coeficiente de troca de calor é ligeiramente maior com mudança de fase, se comparado aos resultados sem mudança de fase.

Corroborando com as observações acima, Stamatiou et al. [16], em um trabalho recente, estudaram um sistema de geração de pasta de gelo compacto de placas planas raspadas. Apresentaram, sem muitos detalhes, resultados de transferência de calor com e sem mudança de fase. Compararam, também, a transferência de calor com e sem ação do mecanismo raspador. A solução aquosa que utilizaram foi cloreto de sódio-água com concentração em massa de 3% (Fig. 5.19). Pode-se observar que o número de Nusselt é maior com mudança de fase e que o mecanismo de raspagem aumenta o número de Nusselt em cerca de 10 vezes. Por outro lado, pode-se observar que seus dados experimentais aproximam-se bastante do fornecido pelo modelo teórico de penetração de calor, talvez em virtude da geometria plana empregada.

Os números de Nusselt e de Reynolds foram calculados com as propriedades termofísicas do fluido portador.

A seguir serão apresentados os resultados relativos à transferência de

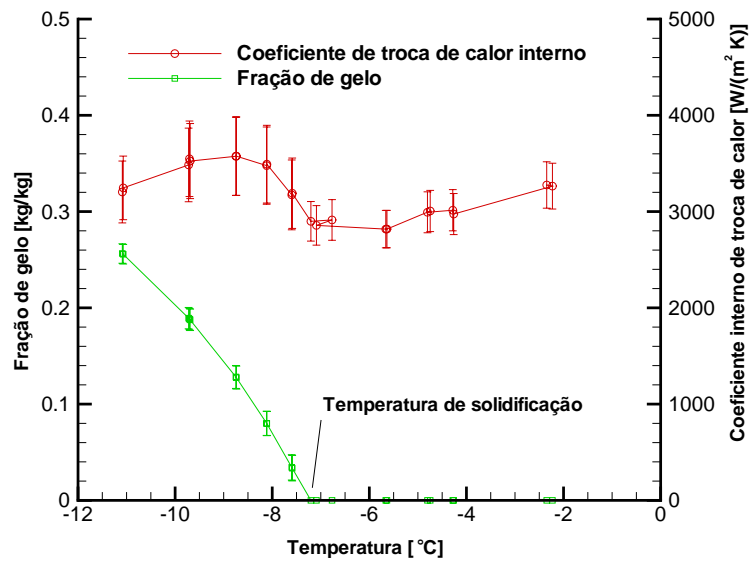


Figura 5.17: Variação com a temperatura do coeficiente interno de transferência de calor com e sem mudança de fase, com solução aquosa de etanol de 15%, vazão média de operação 0,12 kg/s, frequência de rotação do eixo do raspador  $9,4 \text{ s}^{-1}$  e temperatura média de evaporação do fluido refrigerante de  $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ .

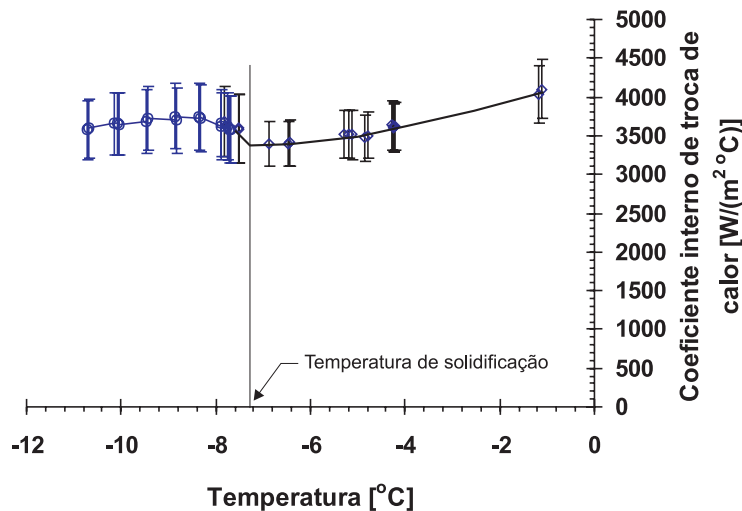


Figura 5.18: Variação com a temperatura do coeficiente interno de transferência de calor com e sem mudança de fase, com solução aquosa de etanol de 15%, vazão média de operação 0,25 kg/s, frequência de rotação do eixo do raspador  $11,9 \text{ s}^{-1}$  e temperatura média de evaporação do fluido refrigerante de  $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ .

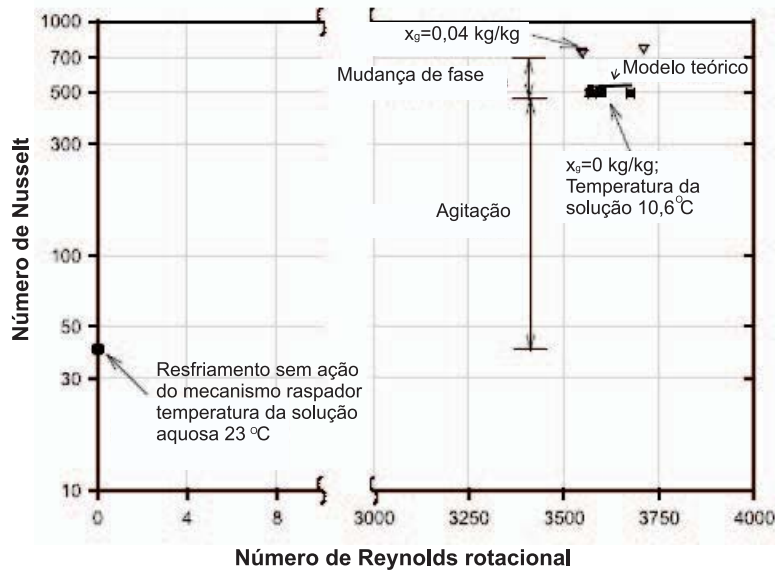


Figura 5.19: Variação do número de Nusselt devido à ação do mecanismo de raspagem e à mudança de fase, conforme Stamatiou et al. [16].

calor exclusivamente com mudança de fase. Inicialmente, nas Figs. 5.20, 5.21 e 5.22, será apresentada a variação individual do número de Nusselt com os dois números de Reynolds e com o número de Prandtl. Em seguida, será apresentada uma correlação para a troca de calor no lado interno do gerador de pasta de gelo objeto de estudo do presente trabalho.

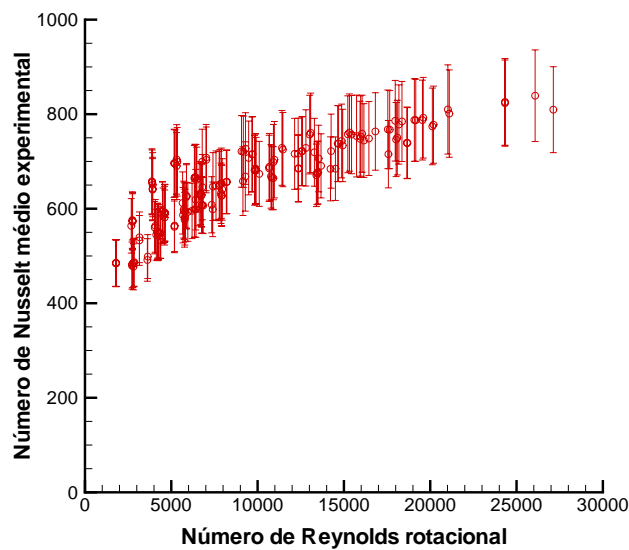


Figura 5.20: Variação do número de Nusselt com o número de Reynolds rotacional.

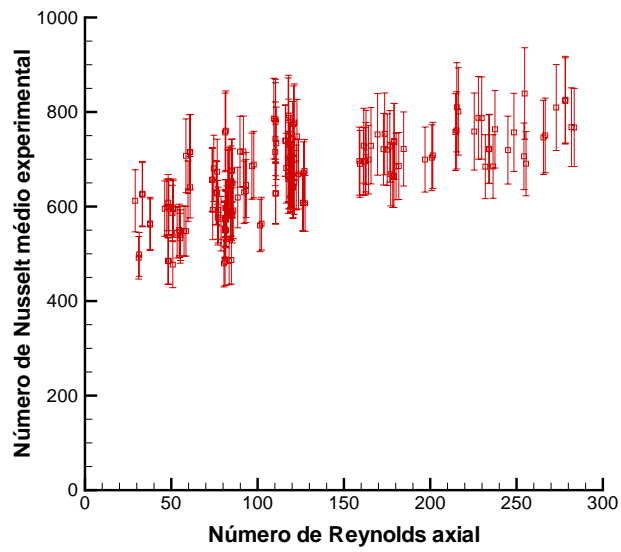


Figura 5.21: Variação do número de Nusselt com o número de Reynolds axial.

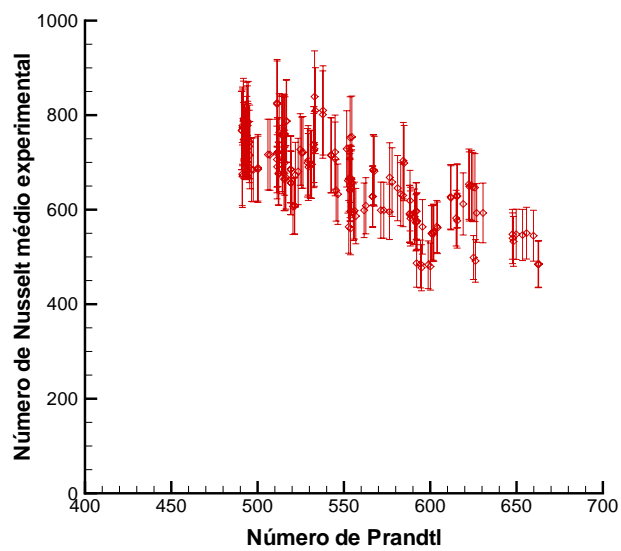


Figura 5.22: Variação do número de Nusselt com o número de Prandtl.

As Figs. 5.20. 5.21 mostram, como esperado, um crescimento do número de Nusselt com os dois números de Reynolds.

Na Fig. 5.22 pode-se observar que o número de Prandtl varia em uma estreita faixa de valores. Desta forma, embora o número de Nusselt apresente uma clara tendência negativa, não se pode concluir, de forma decisiva, que realmente seja assim para uma faixa mais ampla de números de Prandtl. Lakhdar et al. [27] concluíram que o número de Prandtl não tem efeito significativo na transferência de calor em trocadores de superfície raspada com mudança de fase. Por outro lado, Vaessen [78] indica que um valor comumente aceito na literatura para o expoente do número de Prandtl é 0,3.

Em vista da discussão acima, optou-se por estudar algumas correlações para o número de Nusselt. Todos os cálculos foram realizados pelo método dos mínimos quadrados.

A seguir apresenta-se o resultado do número de Nusselt com número de Prandtl com expoente igual a 0,3. Com o o número de Nusselt correlacionado da seguinte forma:

$$\overline{Nu}_{calculado} = a Re_a^b Re_r^c Pr^{0,3} \quad (5-6)$$

tem-se:

$$\overline{Nu}_{calculado} = 13,32 Re_a^{0,07} Re_r^{0,18} Pr^{0,30} \quad (5-7)$$

O coeficiente de correlação foi de 0,86. A correlação é válida para:

$$\begin{aligned} 30 &< Re_a < 280 \\ 1790 &< Re_r < 27100 \\ 490 &< Pr < 662 \end{aligned}$$

Buscou-se, também, correlacionar o número de Nusselt com o número de Prandtl com a seguinte forma:

$$\overline{Nu}_{calculado} = a Re_a^b Re_r^c Pr^d \quad (5-8)$$

Os resultados são apresentados a seguir:

$$\overline{Nu}_{calculado} = 571,1 Re_a^{0,05} Re_r^{0,14} Pr^{-0,22} \quad (5-9)$$

O coeficiente de correlação foi 0,86. Nota-se que, liberando o expo-

ente do número de Prandtl, não houve melhora ou qualquer alteração no coeficiente de correlação.

A partir de observação por Stamatiou et al. [16], de que Bel & Lallemand [26] não tentaram correlacionar a fração de gelo, optou-se por correlacionar o número de Nusselt com a fração de gelo, com a expressão a seguir:

$$\overline{Nu}_{calculado} = a Re_a^b Re_r^c x_g^d \quad (5-10)$$

obtendo-se

$$\overline{Nu}_{calculado} = 115,44 Re_a^{0,06} Re_r^{0,16} x_g^{0,002} \quad (5-11)$$

com um coeficiente de correlação de 0,85.

Pode-se observar, da equação 5-11, que a fração de gelo não tem efeito independente significativo no número de Nusselt. Lembra-se, entretanto, que a fração de gelo apresenta papel relevante no cálculo de propriedades termofísicas que compoem os números de Reynolds e de Prandtl.

Apresenta-se, na Fig. 5.23, a comparação do número de Nusselt médio experimental com o número de Nusselt calculado pela correlação Eq.5-7.

Em continuação, na Fig. 5.24, realiza-se uma comparação dos dados experimentais com o modelo teórico de penetração de calor e com as correlações apresentadas por Bel & Lallemand [26] e Lakhdar et al. [27]. A correlação proposta por Weisser [25] não é considerada nesta comparação, por ser válida somente para números de Prandtl menores que 100, não se enquadrando na presente comparação. Pode-se observar, na Fig. 5.24, que o modelo teórico de penetração de calor prevê valores superiores aos obtidos experimentalmente. A mesma tendência já havia sido observada nos casos de escoamento sem mudança de fase.

Na Fig. 5.25 apresenta-se o número de Nusselt médio experimental com as correlações de Bel & Lallemand [26] e Lakhdar et al. [27]. A discrepância entre os resultados é notável. Por um lado, Lakhdar et al. [27] compararam sua correlação com a correlação de Harriot [18], a qual está baseada no modelo teórico de penetração de calor. O número de Prandtl foi calculado com as propriedades da pasta de gelo e, encontraram que a

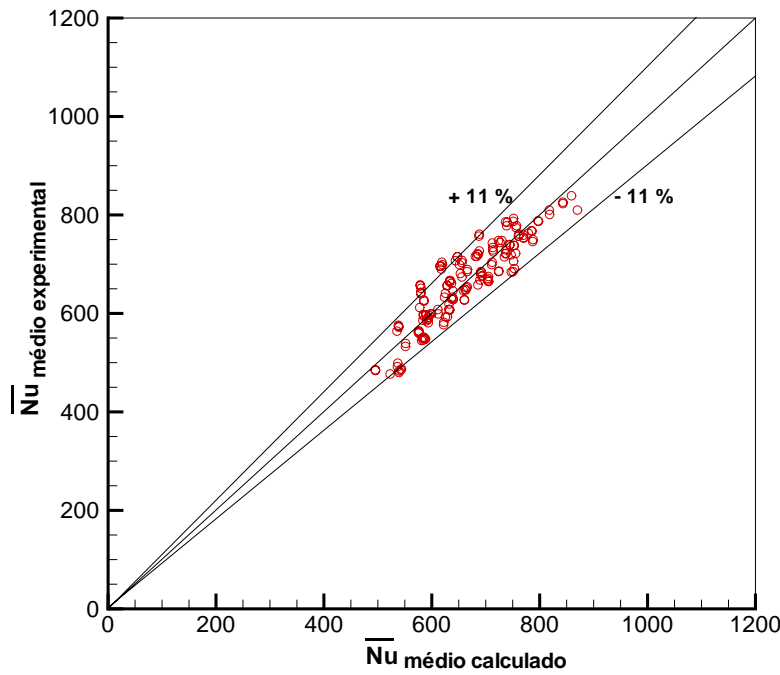


Figura 5.23: Comparação do número de Nusselt médio experimental com o número de Nusselt calculada pela Eq. 5-7 .

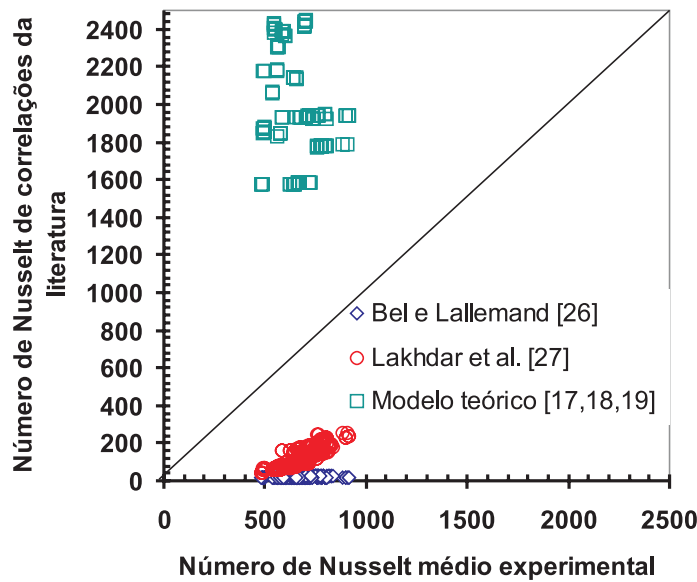


Figura 5.24: Comparação do número de Nusselt médio experimental com correlações disponíveis na literatura para condições semelhantes ao do presente trabalho.



correlação baseada no modelo de penetração de calor prevê números de Nusselt na ordem de centenas de vezes maior.

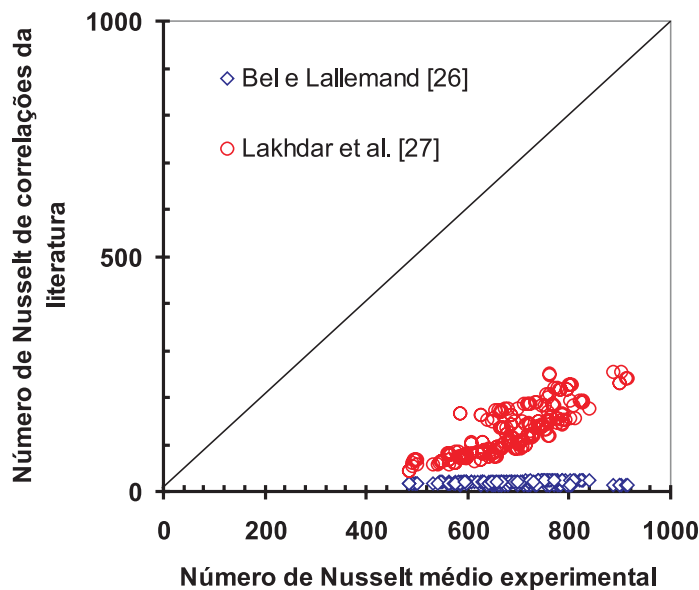


Figura 5.25: Comparação do número de Nusselt médio experimental com o número de Nusselt previsto por correlações da literatura.

Lakhdar et al. [27] também compararam os resultados da sua correlação com a correlação de Bel & Lallemand [26], encontrando valores até 8 vezes maiores. Portanto, Lakhdar et al. [27] encontraram a mesma discrepância com seus próprios dados experimentais.

Meewisse [5], por outro lado, também apontou que a correlação de Bel & Lallemand [26] prevê valores relativamente baixos do coeficiente de transferência de calor e, portanto do número de Nusselt, se comparados com outros geradores de superfície raspada como os geradores de haste giratória (Fig. 1.7b) [12].

Pode-se creditar a discrepância dos dados de Bel & Lallemand [26] ao mecanismo helicoidal e à escova que raspa a superfície do seu gerador, Fig. 5.26, o que afeta razoavelmente o escoamento na região anular [5].

Os resultados do presente trabalho apresentam números de Nusselt maiores em relação à correlação de Lakhdar et al. [27], da ordem de 6 vezes

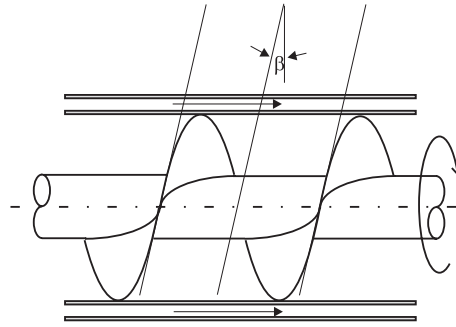


Figura 5.26: Esquema de mecanismo helicoidal que escova a superfície do gerador [26].

maior.

Em primeiro lugar, deve-se lembrar que o gerador que o gerador de Lakhdar et al. [27] está posicionado horizontalmente. Igualmente importante é o fato de terem usado folgas no raspador de 1 mm e 3 mm, em oposição a 0,4 mm do presente trabalho. Com estas folgas e com o gráfico apresentados em seu trabalho, Fig. 5.27, fica evidente que ocorria acumulação de cristais de gelo na parede interna, onde a formação periódica e a retirada de uma camada de gelo explicam a evolução da temperatura da parede. Com 3 mm de folga forma-se permanentemente uma camada de cristais de gelo na parede. Fato este que não ocorreu no presente trabalho.

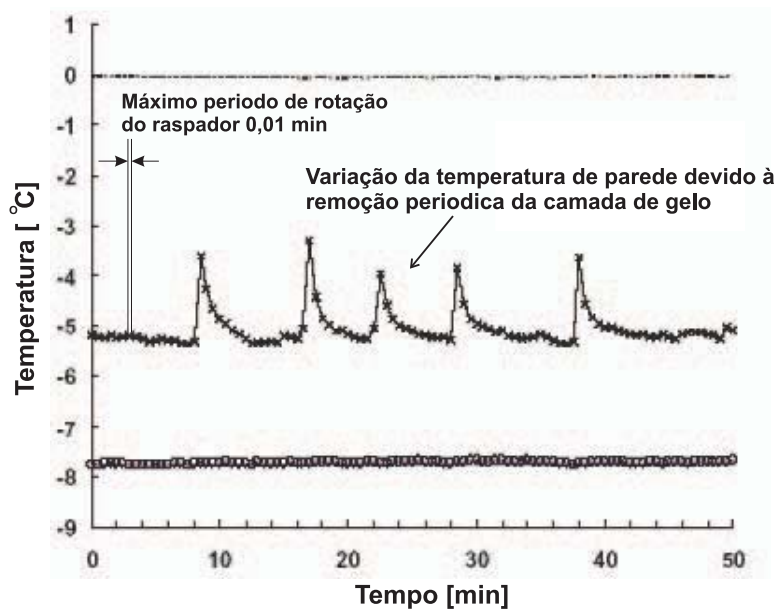


Figura 5.27: Evolução da temperatura de parede (ponto 6) para um trocador de calor operando com solução aquosa de sacarose, concentração 15%, vazão 0,14 m/s e velocidade de rotação do mecanismo raspador de 700 rpm [27].