

5. Análise dos Resultados

5.1. Capacidade de Resfriamento

Como já mencionado, o calor trocado foi medido nos dois fluidos. À medida feita do lado da pasta de gelo denominou-se capacidade de resfriamento. O mesmo parâmetro, pelo lado da água, é chamado de carga térmica. Os pontos experimentais apresentados na figura 26 relacionam a carga térmica com a capacidade de resfriamento para os testes realizados com pasta de gelo. Comparando-se estes com pontos da função identidade encontra-se um fator de correlação $R^2 = 0,949$. Na média, a capacidade resfriamento experimental é 1,0% maior do que a carga térmica, resultado considerado bastante satisfatório. Pode-se considerar, por tanto, o trocador de calor como sendo adiabático, isto é, nenhum dos dois fluidos troca, significativamente, calor com o meio ambiente.

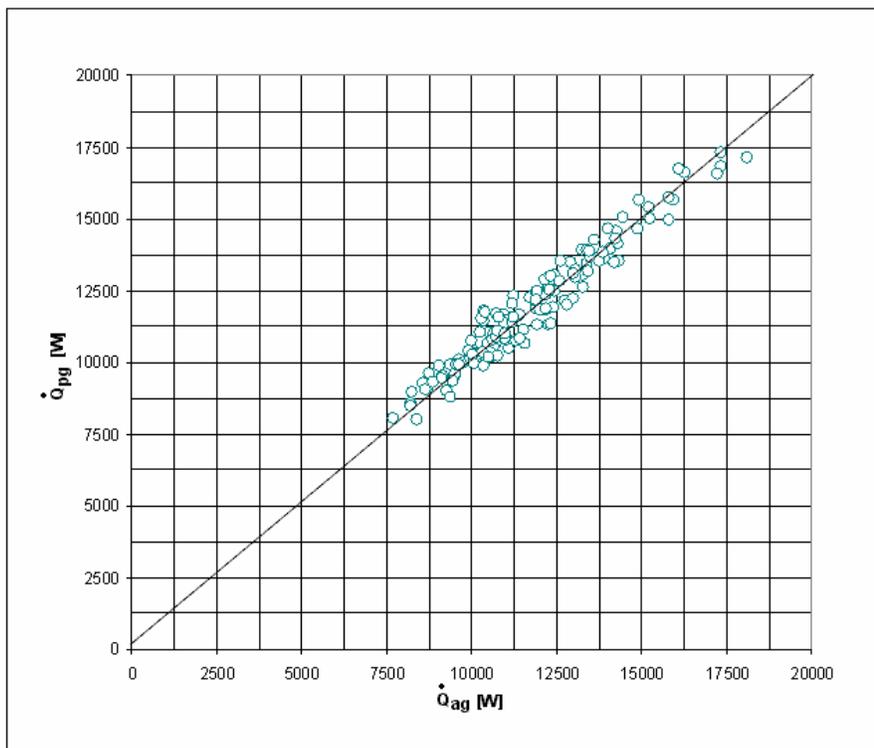


Figura 26 - Capacidade de resfriamento vs. Carga térmica, para a pasta de gelo.

Procedendo-se a mesma comparação para as experiências com a solução aquosa sem cristais de gelo, obtém-se uma correlação com $R^2 = 0,994$.

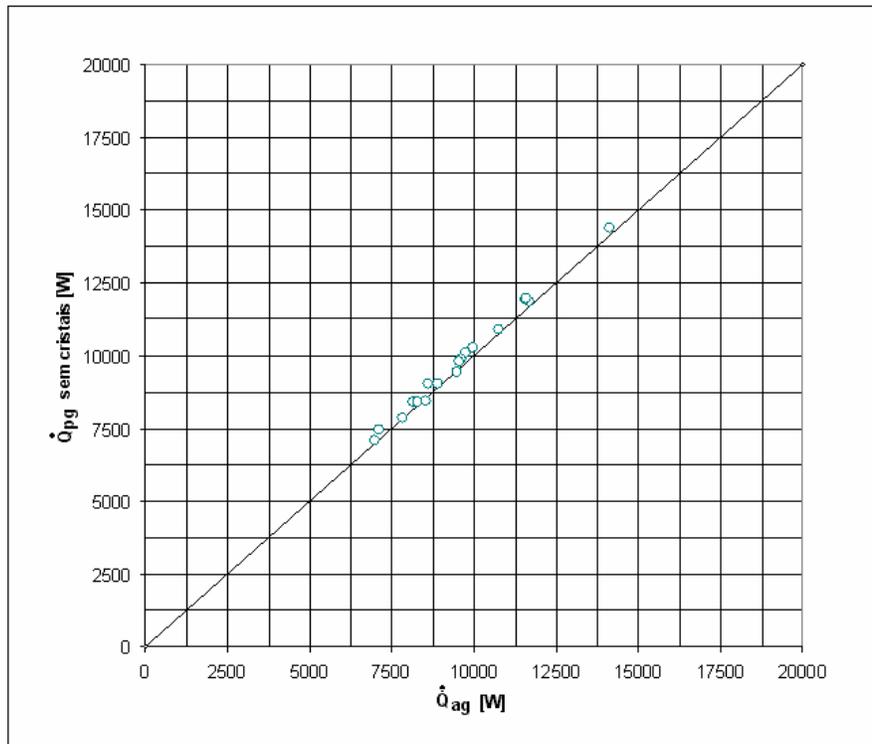


Figura 27 - Capacidade de resfriamento vs. Carga térmica , para a solução.

Para condições similares de entrada dos fluidos no trocador de calor, a capacidade de resfriamento da pasta de gelo aumenta com o aumento de sua vazão mássica. Por exemplo, para condições fixas de vazão mássica; 0,215 kg/s, e temperatura de entrada da água, 32,5°C; com troca de calor em contra-corrente, a capacidade de resfriamento apresenta um aumento na ordem de 21% para uma fração de gelo de 0,11; e de 32% para 0,14.

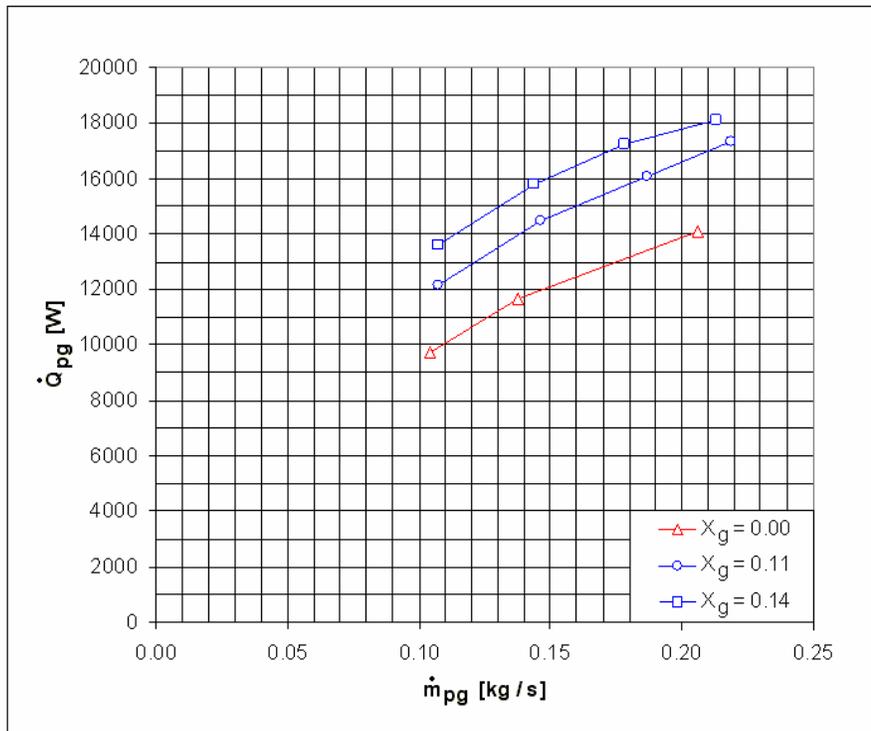


Figura 28 - Capacidade de resfriamento vs. Vazão mássica da pasta de gelo.

Na figura 28, se observa claramente como variam as faixas da capacidade de resfriamento da pasta de gelo à medida que aumenta a fração de gelo presente no fluido portador. Isto porque é possível armazenar maior quantidade de energia na forma de calor latente na pasta de gelo.

5.2. Coeficiente global de troca de calor

Dos resultados sob diferentes condições de troca de calor, apresenta-se um resumo de alguns dos parâmetros que têm efeito sobre o coeficiente global de troca de calor.

Para a mesma vazão mássica de água, de 0,215kg/s, e uma fração de gelo fixa na entrada, o coeficiente global aumenta com a vazão mássica da pasta de gelo. Isto é apresentado na figura 29, onde também se constata o aumento do coeficiente global, com o aumento da temperatura de entrada da água, mantidas fixas a vazão e fração de gelo da pasta.

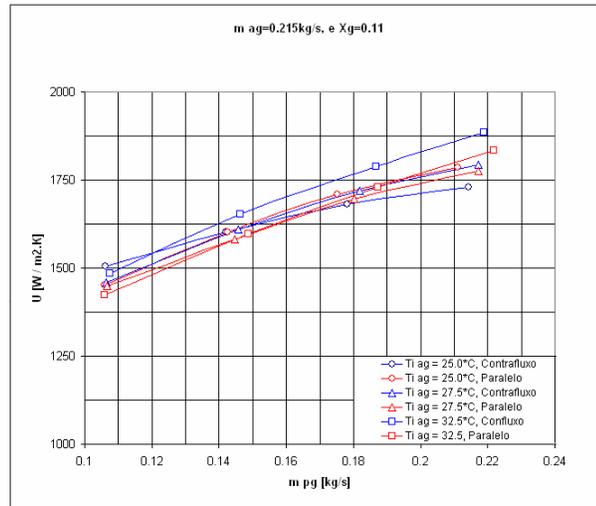


Figura 29 – Coeficiente global, para $m_{ag}=0.215$ kg/s e $X_g=0.11$.

Comparando as mesmas condições, porém com frações de gelo maiores (fig.29 e fig. 30), o coeficiente global diminui; sendo numa ordem não tão considerável para as condições acima mencionadas, de uma fração de gelo de 0,11 a 0,14.

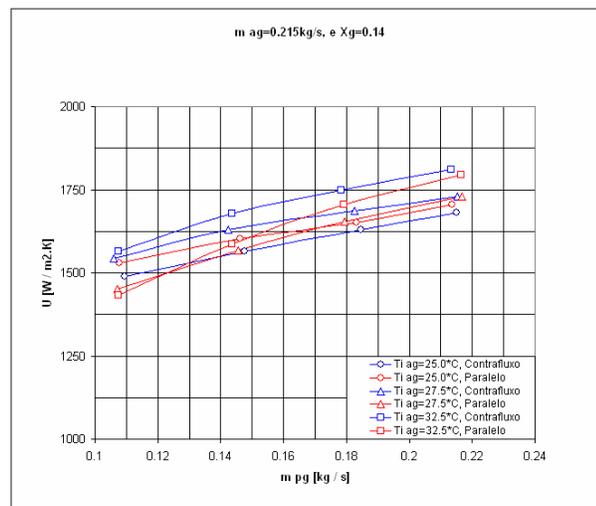


Figura 30 – Coeficiente global, para $m_{ag}=0.215$ kg/s e $X_g=0.14$.

Agora, considerando fixa a fração de gelo na entrada, para o exemplo apresentado com uma fração de gelo de 0,14; (figs 30 e 31), e mudando a vazão mássica de água de 0,215 a 0,128kg/s, o coeficiente global de troca de calor sofre uma diminuição forte, de ordem de 1625 para 1250 W / m².K (23%).

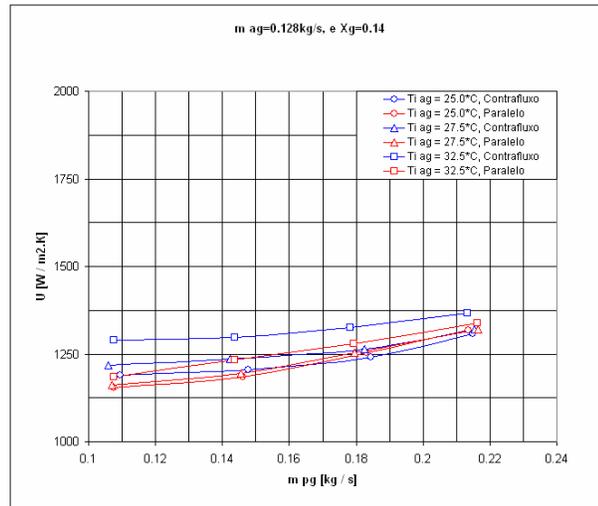


Figura 31 - Coeficiente global, para $m_{ag}=0,128\text{kg/s}$ e $X_g=0,14$.

Ao apresentar os resultados do coeficiente global em função da vazão mássica da pasta de gelo para uma condição de temperatura inicial da água e uma fração de gelo para a pasta, observa-se facilmente o efeito marcante que tem a vazão mássica da água (ver figuras 32, 33 e 34), o que não acontecia quando se apresentava os resultados considerando fixa a vazão da água para uma fração de gelo da pasta, ver figuras 29, 30 e 31.

Na figura 32 apresenta-se a variação do coeficiente global de troca de calor em função da vazão mássica para certa condição de temperatura inicial da água e uma fração de gelo fixa de 0,11 para a pasta de gelo.

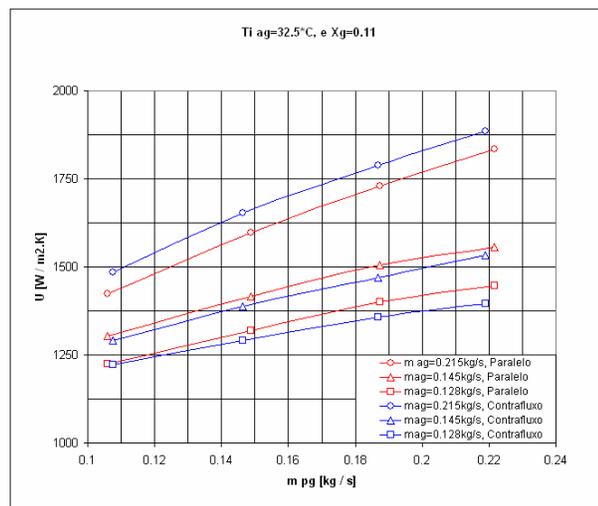


Figura 32 - Coeficiente global, para $T_{i,ag}=32,5^\circ\text{C}$ e $X_g=0,11$.

Nos gráficos (figs 32 e 33) se observa claramente o forte efeito sobre o coeficiente global da vazão mássica da água, para uma fração de gelo inicial. O efeito de diminuir a temperatura inicial da água se faz visível, dada uma condição inicial de gelo, com a diminuição no coeficiente global de troca de calor.

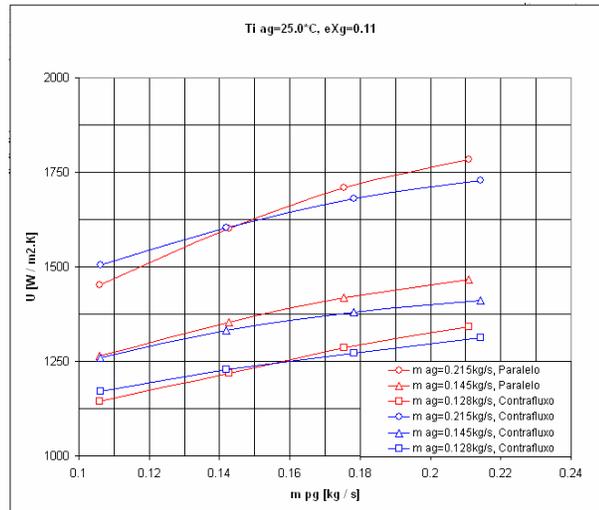


Figura 33 - Coeficiente global de troca de calor, para $T_{iag}=25,0^\circ C$ e $X_g=0,11$.

Como era esperado, inverter o sentido da troca de calor, paralelo ou contra-corrente, não afeta significativamente o coeficiente global de troca de calor ao se utilizar a pasta de gelo. Isto se pode observar em todas as figuras apresentadas para o coeficiente global de troca de calor.

Novamente, ao se elevar a fração de gelo, para uma mesma condição de temperatura de entrada da água, para diferentes vazões de água, diminui o coeficiente global de troca de calor. Esta queda fica mais pronunciada para vazões maiores de pasta de gelo. Ver figuras 33 e 34.

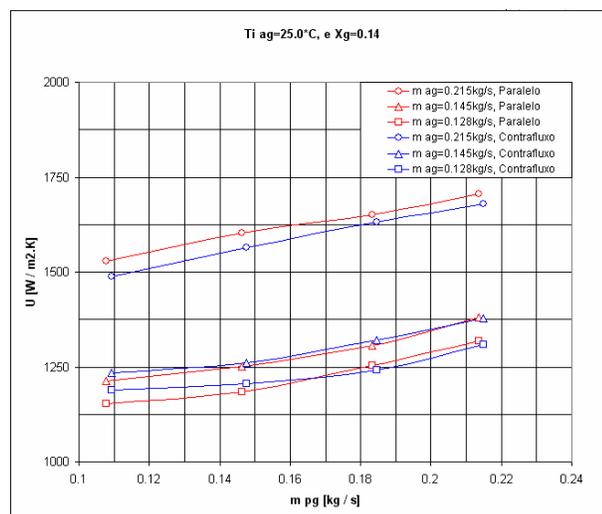


Figura 34 - Coeficiente global, para $T_{iag}=25,0^\circ C$ e $X_g=0,14$.

O fato de que o modo de troca de calor não tenha um efeito significativo no coeficiente global de troca de calor, não quer dizer que ambas condições trabalhem de forma igual. Na figura 35, fazendo uma comparação dos resultados das cargas térmicas, considerando as mesmas condições de entrada dos fluidos, pode-se observar que para todos os resultados em contra-corrente é mais efetivo como era de se esperar. Os resultados em contra-corrente apresentaram uma troca térmica cerca de 4,5% acima dos resultados dos casos em paralelo.

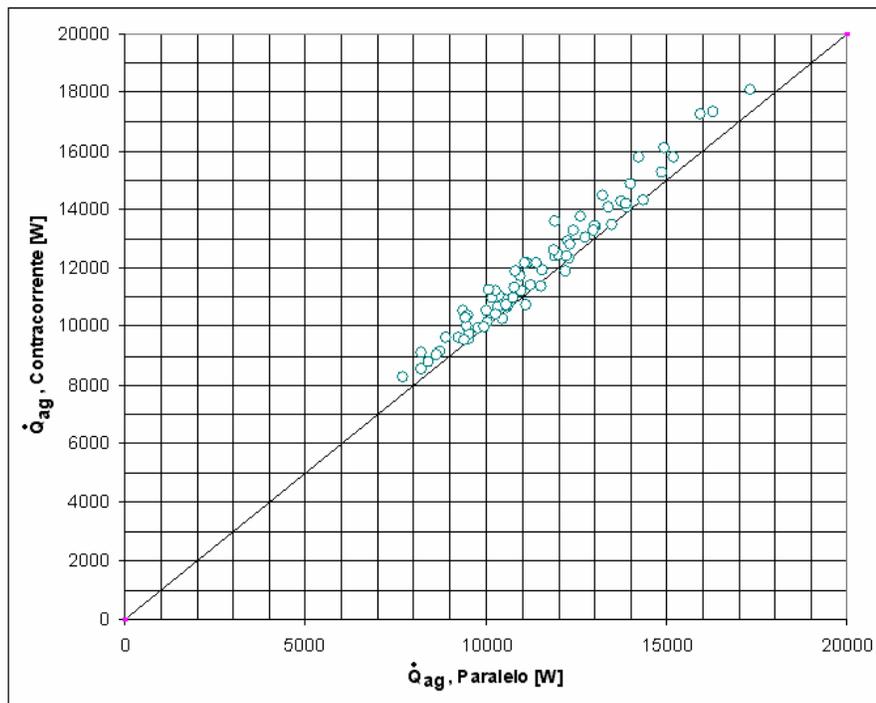


Figura 35 - Cargas térmicas em paralelo versus contra-corrente.

O efeito de aumentar a fração de gelo, considerando uma mesma carga térmica, diminui o coeficiente global de troca. Comparando os resultados dos testes da pasta de gelo com a solução sem cristais, a qual se comporta como água, observa-se uma diminuição da ordem de 30% para uma fração de 0,11; e 35% para 0,14.

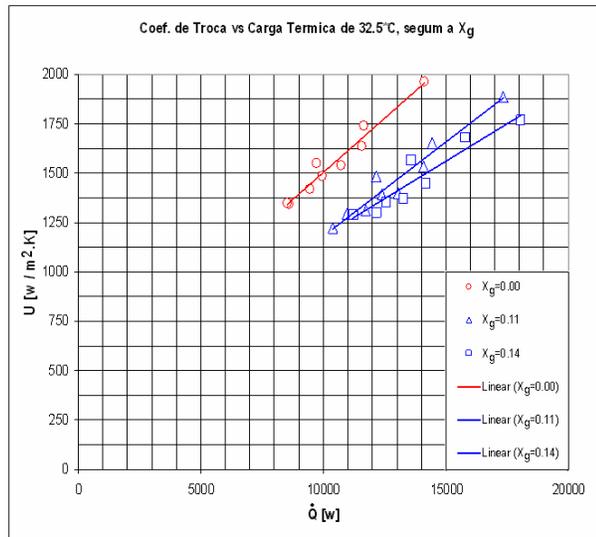


Figura 36 - Coeficiente global em função da carga térmica, para $T_{i-ag}=32,5^{\circ}\text{C}$.

Ao comparar-se com outra condição de temperatura inicial da água, se pode observar a variação do coeficiente global de troca de calor em função da carga térmica. Observa-se uma diminuição no coeficiente global de troca ao diminuir a temperatura da água, este efeito se apresenta tanto para as misturas de pasta de gelo como para a solução sem cristais.

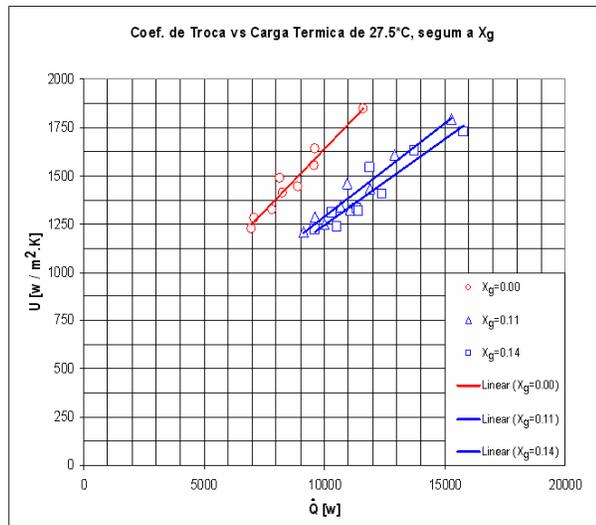


Figura 37 - Coeficiente global em função da carga térmica, para $T_{i-ag}=27,5^{\circ}\text{C}$.

5.3. Equivalente da vazão mássica no lugar de pasta de gelo

Uma vantagem de se utilizar a pasta de gelo no lugar de uma solução sem cristais ou água em condições semelhantes, seria a redução da vazão mássica. Para uma fração de gelo de 0,11 e uma mesma carga térmica obtém-se uma diminuição da vazão mássica para algo em torno de 87% .

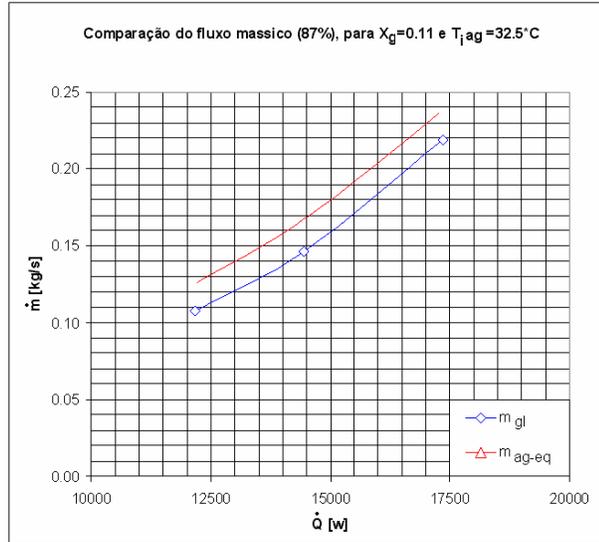


Figura 38 – Vazão mássica equivalente para $X_g=0,11$, e $T_{iag}=32,5^\circ\text{C}$.

Para as mesmas condições do caso anterior, porém com uma fração de gelo de 0,14; observa-se uma possível diminuição da vazão mássica para algo em torno de 75%, com o que se consegue a mesma carga térmica especificada.

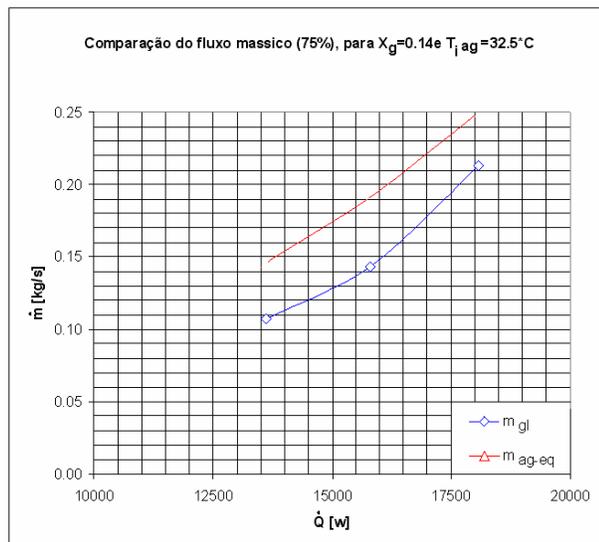


Figura 39 – Vazão mássica equivalente para $X_g=0,14$, e $T_{iag}=32,5^\circ\text{C}$.

5.4. Efeito da Resistência térmica da placa no número de Nusselt

No modelo matemático, para o presente trabalho, considerou-se o efeito que tem a resistência térmica do material das placas do trocador de calor. No caso que se tivesse desprezado esta resistência térmica, por apresentar a placa uma boa condutividade térmica ou espessura muito pequena, cometer-se-ia um erro de superestimativa no número de Nusselt da ordem de 10% , para os testes de água – solução sem cristais em relação ao número de Reynolds (Re).

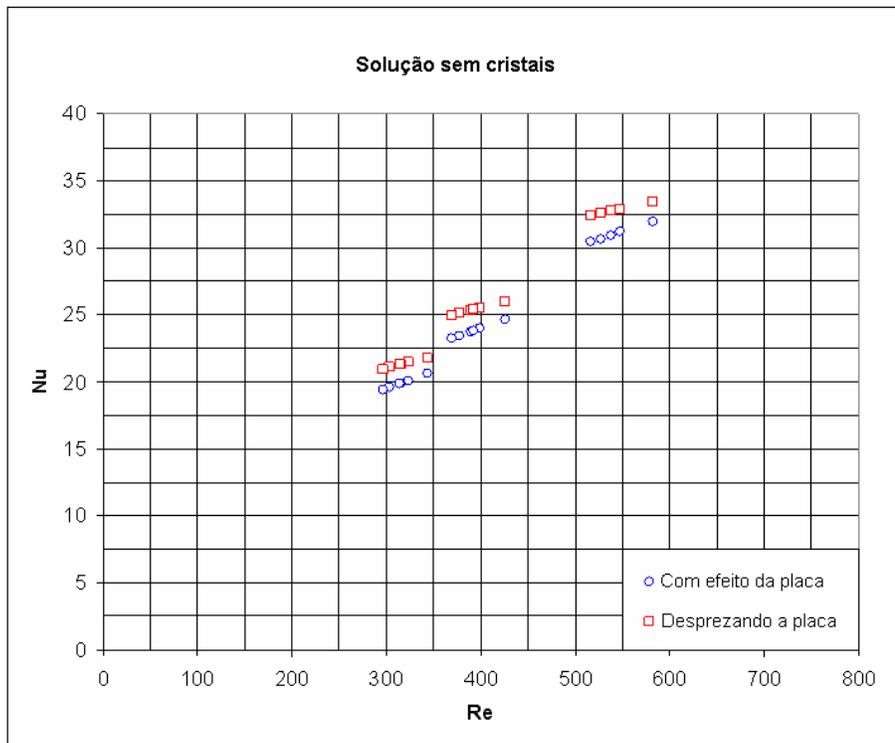


Figura 40 - Efeito no número de Nu se tivesse sido depreciada a resistência térmica da placa, para a solução sem cristais.

5.4.1. Testes Água–Solução sem cristais

Na figura 41, se apresenta o número de Nusselt em função do número de Reynolds para a água e para a solução, a partir de propileno glicol, sem cristais.

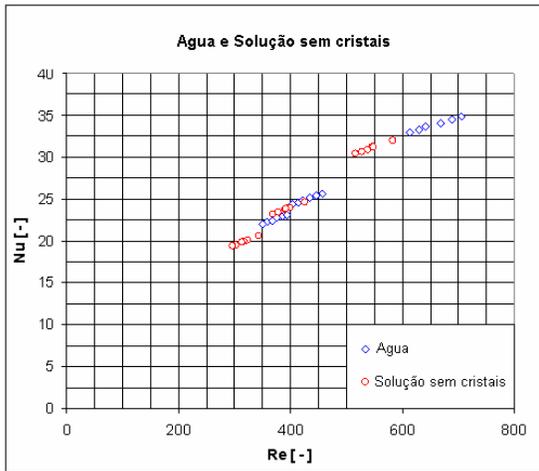


Figura 41 – Nu vs Re, para a solução.

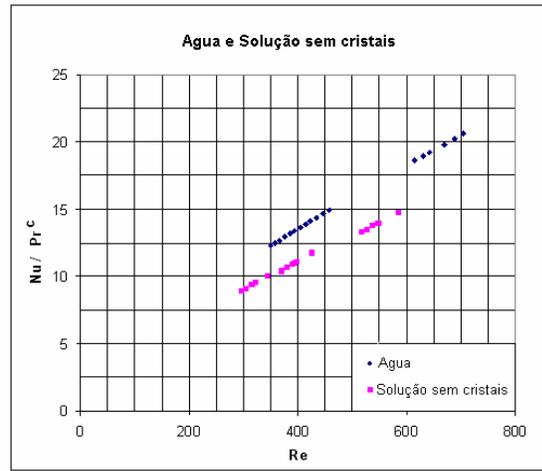


Figura 42 – Nu/Pr^C vs Re, para a solução.

Na figura 42, se observa os resultados na forma de Nu / Pr^C versus o número de Reynolds, para a água e a mistura sem cristais, apresentando ambos um comportamento similar. As correlações de transferência de calor sem mudança são apresentadas a seguir.

Para o lado da água, onde $350 < Re < 705$, e $5,8 < Pr < 7,0$.

$$Nu_{ag} = 0,1588.Re^{0,7417} . Pr^{0,3} \quad (45)$$

Para a solução sem cristais, onde $296 < Re < 583$, e $5,9 < Pr < 7,9$.

$$Nu_{sol} = 0,1588.Re^{0,7417} . Pr^{0,4} \quad (46)$$

Os expoentes do número de Prandtl foram impostos. Os ajustes tiveram um erro médio da ordem de $4,059 \times 10^{-9}$.

5.4.2. Testes Água – Pasta de Gelo

Os valores do número de Nusselt em função do número de Reynolds para os testes com e sem cristais são apresentados na fig.43. Na medida que a fração de gelo aumenta, o número de Reynolds diminui, porém o número de Nusselt. Mas considerando um número de Reynolds fixo, a presença dos cristais de gelo faz aumentar o número de Nusselt.

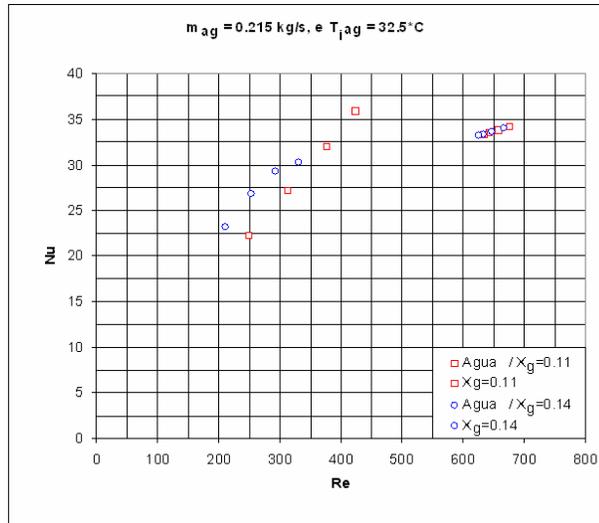


Figura 43 - Nu vs Re da pasta de gelo, para uma vazão de água de $m_{ag}=0,215\text{kg/s}$ e $T_{iag}=32,5^\circ\text{C}$.

Os resultados apresentados do número de Nusselt, e do número de Reynolds para a pasta de gelo, e separados para duas condições de gelo na entrada, ver fig.44, apresentam a mesma tendência que sem cristais de gelo, porém com uma baixa correlação do $R^2=0,77$; o que indica que o número de Nusselt para a pasta de gelo ainda depende de outros parâmetros, não considerados na presente correlação.

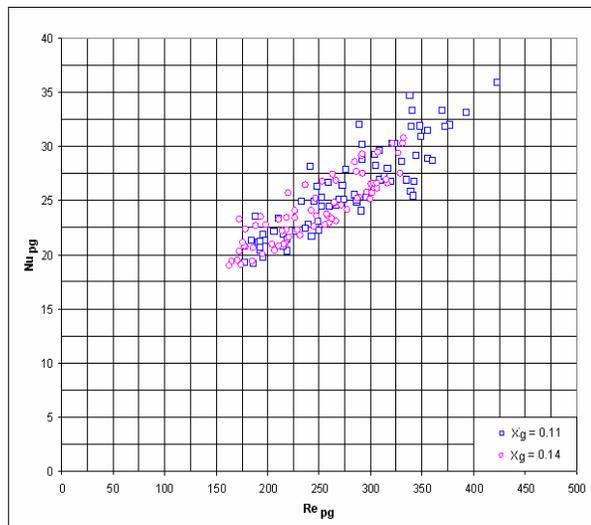


Figura 44 - Nu vs Re, para a pasta de gelo.

Ao se fazer o ajuste com os resultados de Nusselt para a pasta de gelo, obteve-se a seguinte correlação:

$$Nu_{pg} = 1,0574 \cdot Re^{0,62} \cdot Pr^{-0,115397} \quad (47)$$

A correlação apresentada não tem um termo visível que mostre a fração de gelo, mas o efeito da fração de gelo foi levada em consideração nos cálculos das propriedades termofísicas, no cálculo do número de Reynolds e do número de Prandtl. Os resultados apresentaram um desvio quadrático o médio de $S=2,1187$.

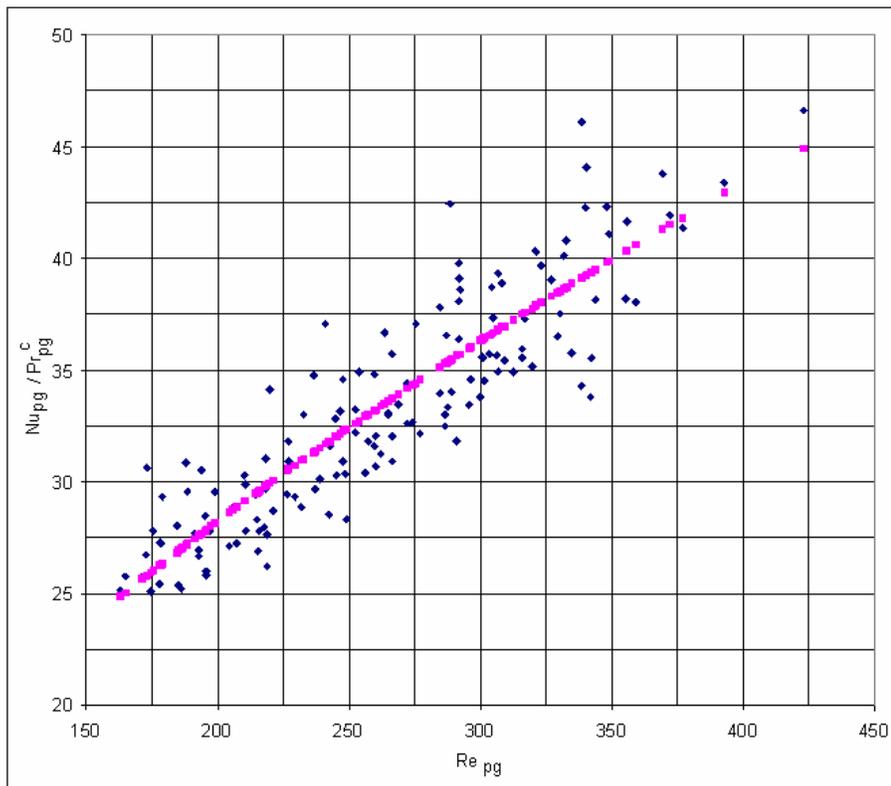


Figura 45 - Nu/Pr^c versus Re para a pasta de gelo.

Ao se separar os resultados segundo a fração de gelo obtiveram-se as seguintes correlações para a pasta de gelo.

Para $X_g=11\%$, com um desvio quadrático médio de $S=1,4432$.

$$Nu_{pg} = 0,387.Re^{0,58132} .Pr^{0,4} \tag{48}$$

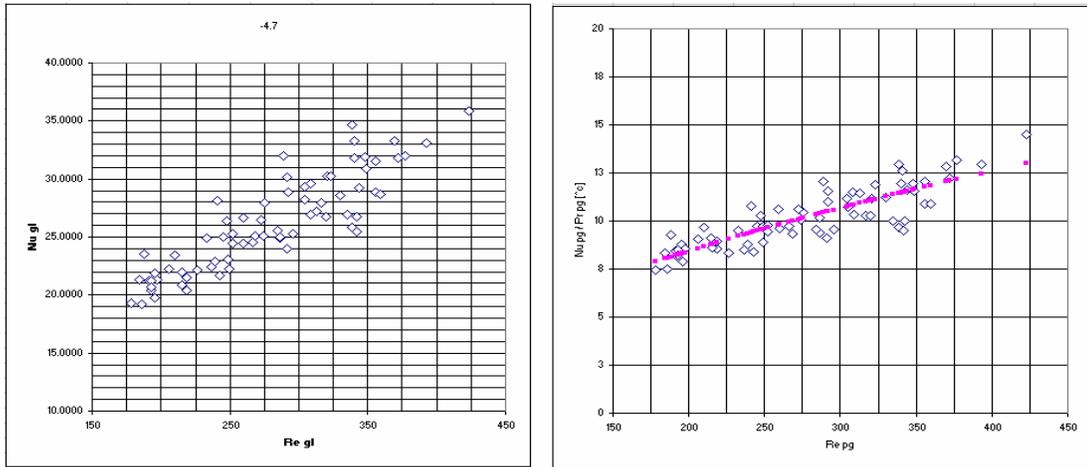


Figura 46 - Nu versus Re da pasta de gelo para $X_g=0,11$.

Para $X_g=14\%$, com um desvio quadrático médio de $S=1,347$.

$$Nu_{pg} = 0,784.Re^{0,44521} .Pr^{0,4} \tag{49}$$

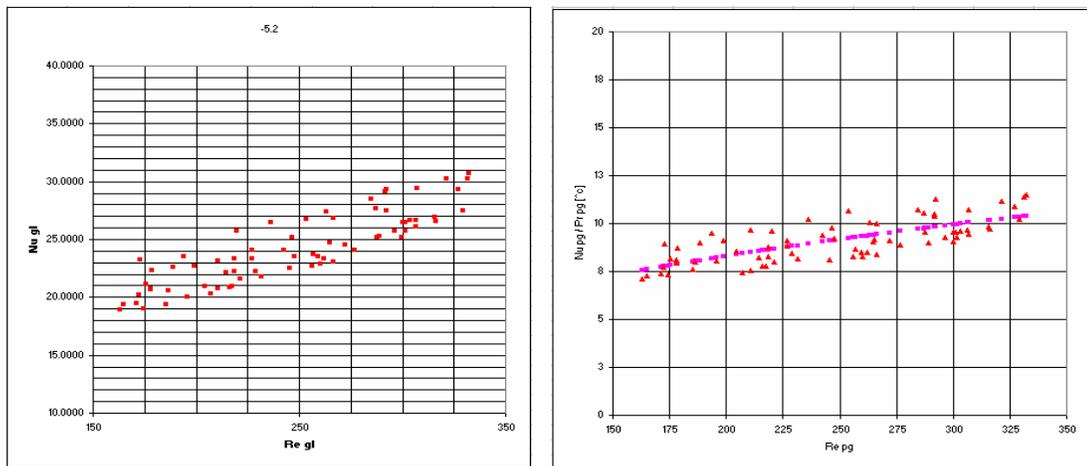


Figura 47 - Nu versus Re da pasta de gelo para $X_g=0,14$.

5.5. Queda de Pressão e Fator de Atrito

Com o aumento da vazão mássica da pasta de gelo, a queda de pressão experimenta um aumento quase linear, para a faixa de vazão apresentada. O aumento da fração de gelo na entrada tem uma influência direta na perda de carga no trocador. Na figura 48, observam-se as quedas de pressão, tanto para os testes com a pasta de gelo, quanto para a solução sem cristais.

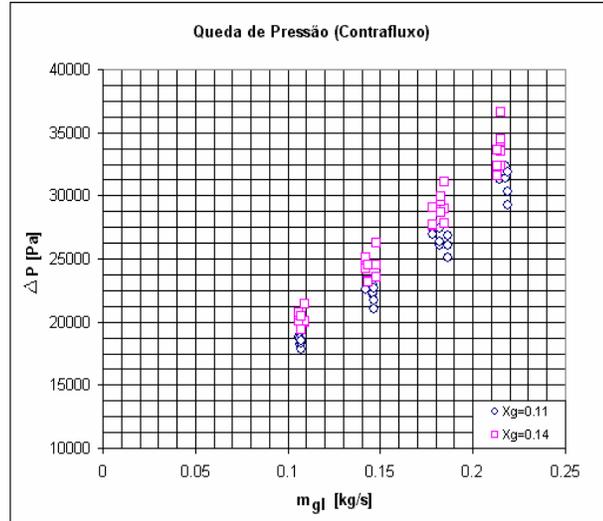


Figura 48 – Queda de pressão com a vazão mássica da pasta de gelo.

Como era de se esperar, o fator de atrito diminui com o aumento da vazão da pasta de gelo. Observa-se também que para maiores frações de gelo, o fator de atrito tende a aumentar.

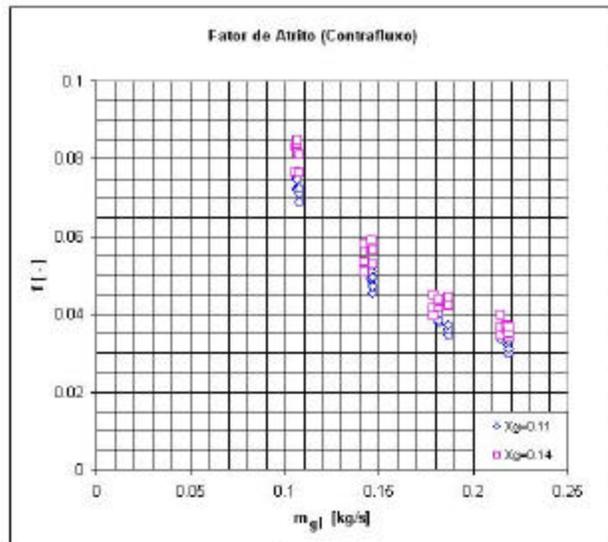


Figura 49 - Fator de atrito com a vazão mássica da pasta de gelo.

Logo, se obtém uma correlação adimensional para o fator de atrito com respeito ao número de Re da pasta de gelo. O fator de atrito diminui com o aumento da fração de gelo, por outro lado o fato de ter troca de calor em contracorrente ou paralelo, não influi de maneira apreciável no fator de atrito.

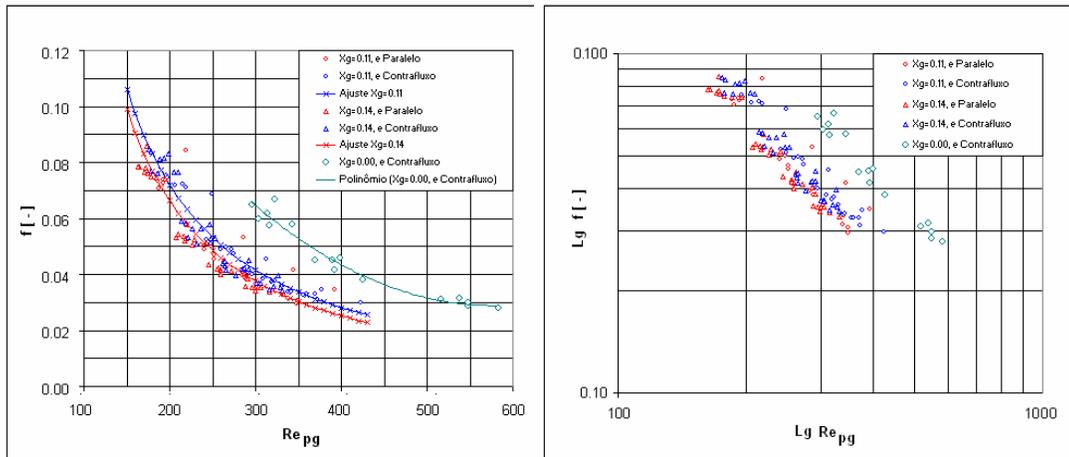


Figura 50 - Fator de atrito versus Re, para a pasta de gelo com a fração de gelo.

Fazendo um ajuste por mínimos quadrados as seguintes correlações do fator de atrito versus o número de Reynolds foram obtidas.

Para a solução aquosa sem cristais

$$f_{pg} = 123,4590 \cdot \text{Re}^{-1,3249} \quad , \text{ com } R^2=0,934. \quad (50)$$

ou

$$f_{pg} = \frac{23,262}{\text{Re}} - 0,0136 \quad , \text{ com } R^2=0,946. \quad (51)$$

Para a pasta de gelo com $X_g=0,11$.

$$f_{pg} = 94,1383 \cdot \text{Re}^{-1,35458} \quad , \text{ com } R^2=0,972 \quad (52)$$

ou

$$f_{pg} = \frac{17,77}{\text{Re}} - 0,0173 \quad , \text{ com } R^2=0,878 \quad (53)$$

Para a pasta de gelo com $X_g=0,14$

$$f_{pg} = 108,6096 \cdot \text{Re}^{-1,39715} \quad , \text{ com } R^2=0,960 \quad (54)$$

ou

$$f_{pg} = \frac{17,68}{\text{Re}} - 0,02 \quad , \text{ com } R^2=0,898 \quad (55)$$

5.6. Coeficiente de troca de calor, obtido pelo método da efetividade

Fazendo cálculos com um $C_{p_{eq-m}} pg$, que represente o efeito de calor sensível, e calor latente da pasta de gelo, o qual representa de 1 a 8 vezes o $C_{p_{ag}}$ da água dependendo as condições de troca, se fazem os cálculos para o NTU em condição de troca paralelo e contra-corrente, pelo método da efetividade, (Apêndice E).

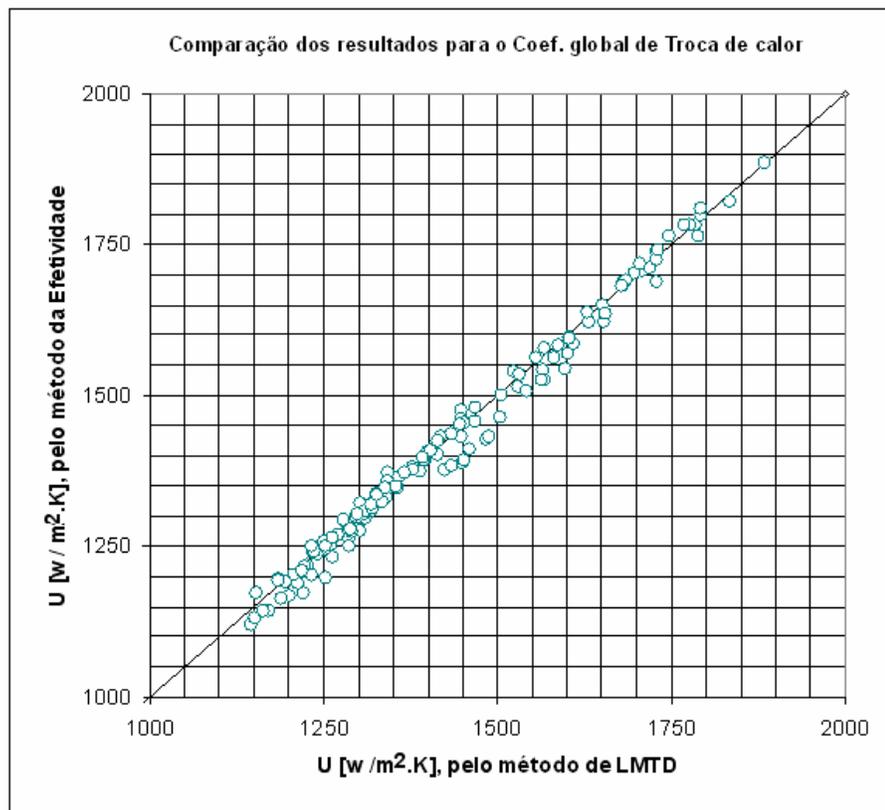


Figura 51 – Coeficiente global de troca pelo método da LMTD versus o método da efetividade.

Conseqüentemente, com os NTU obtido pode se obter o coeficiente global de troca de calor e, comparando-se os resultados obtidos pelo método de LMTD, observa se uma correlação de $R^2=0,989$.

5.7. Validação e Comparação de resultados

Nesta seção são comparados os resultados obtidos no presente trabalho com os disponíveis na literatura.

5.7.1. Para transferência de calor sem mudança de fase em trocadores de calor

Gut e Pinto (2004) encontraram correlações para soluções sem mudança de fase utilizando um mini trocador de calor de placas “planas” Armfield FT-43.

$$Nu = 0,0169 \cdot Re^{0,897} \cdot Pr^{1/3} \quad , \text{ com } R^2 = 0,98. \quad (56)$$

Válido para $100 < Re < 1000$ e $2,2 < Pr < 6,8$.

Na figura 52, se comparam as correlações de Nusselt vs. Reynolds para transferência de calor sem mudança de fase para um número de Prandtl igual a $Pr=6,0$, validas para trocadores de cabr de placas de formato chevron, exceto a de Pinto (2004) que foi encontrada num trocador de placas planas (sem corrugação).

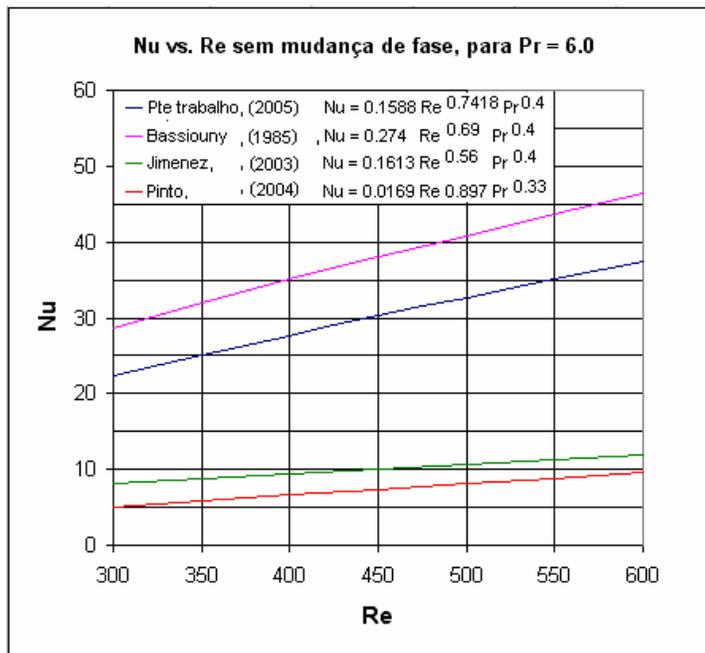


Figura 52 – Comparação de Nu vs Re, para escoamento sem mudança de fase.

Holger (1992) apresenta os resultados encontrados por Bassiouny, (1985) num tratado sobre trocadores de calor. Um estudo teórico-experimental em trocadores de calor de placas utilizando fluidos sem mudança de fase.

$$Nu = 0,274 \cdot Re^{0,69} \cdot Pr^{0,4} \quad , \text{ Para placas do tipo H (71}^\circ\text{).} \quad (57)$$

Válido para $100 < Re < 10000$, e $2 < Pr < 40$.

Jimenez (2003) apresenta a expressão para escoamento sem mudança de fase num trocador de calor de placas. Ao fazer testes num trocador de placas com uma solução a partir de etileno.

$$Nu = 0,1613 \cdot Re^{0,56} \cdot Pr^{0,4} \quad (58)$$

Na figura 53, se apresentam as comparações na forma de Nu / Pr^c versus Re para transferência de calor sem mudança de fase para um número de Prandtl igual a $Pr=6,0$. Vale lembrar que a correlação de Pinto é para trocadores de placas planas.

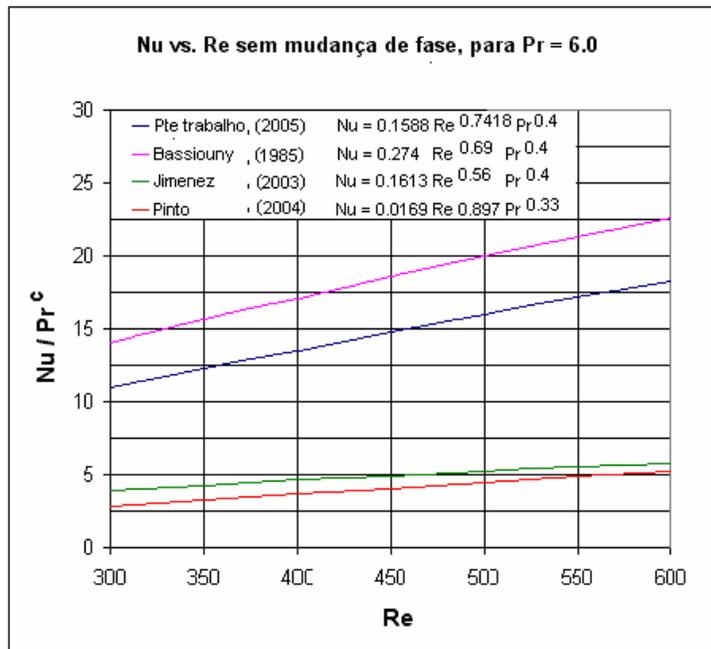


Figura 53 – Comparação de Nu / Pr^c vs Re , para escoamento sem mudança de fase.

5.7.2.

Para trocadores de calor de placas utilizando pasta de gelo

Na literatura não se encontrou informações referentes a correlações adimensionais para pasta de gelo em trocadores de calor de placas, salvo correlações más para escoamento em tubulações, como o caso de Christensen e Kauffeld (1997).

Bellas et al. (2002) obtiveram os seguintes resultados num estudo num trocador de calor de placas, Standard da Alfa Laval, utilizando pasta de gelo a partir de uma mistura de propileno, para fluxos de 1,0 a 3,7 m³/h. Na figura 54 se observa a variação da capacidade de resfriamento. Para uma fração de gelo de 20% a capacidade de resfriamento aumenta até 30% e apresenta um acréscimo na queda de pressão de 15% comparado com o uso de água gelada. A faixa de resultados (com ganhos de 1000 – 1400, para 1300 - 1800W na capacidade de resfriamento) é semelhante com os resultados do presente trabalho (fig 28).

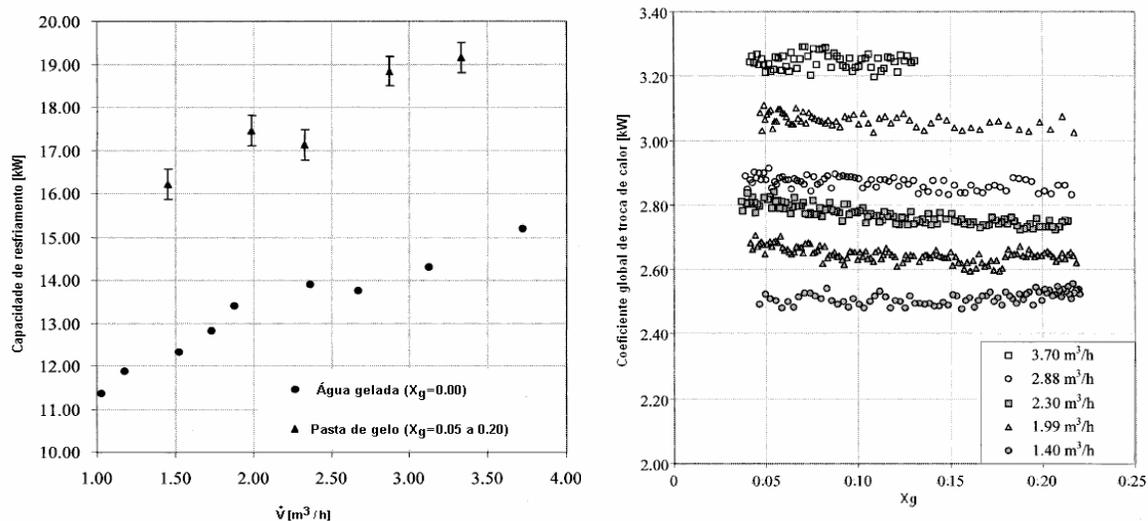


Figura 54 – (a) Capacidade de resfriamento em função do fluxo mássico; (b) Coeficiente global de troca de calor segundo a fração de gelo.

Segundo o trabalho de Bellas et al. (2002) o coeficiente global não varia ante a presença da fração de gelo. No presente trabalho encontrou-se uma variação do mesmo de 1120 a 1900 W/m².K de acordo com a fração de gelo, além das condições de vazão mássica e temperatura inicial da água, ditos resultados foram apresentados nas figuras 29 a 34.

As quedas de pressão apresentadas se encontram na mesma faixa que no presente trabalho, comparando com a faixa de Reynolds correspondente, como se observou nas figuras 48 e 49. Na figura 55 observa-se a queda de pressão em função do número de Reynolds, para algumas frações de gelo.

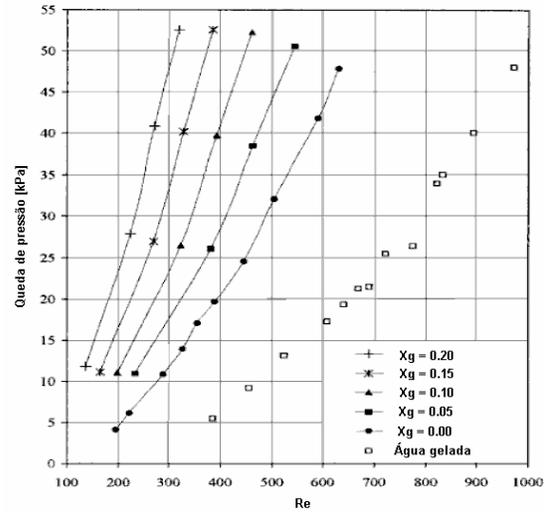


Figura 55 – Queda de pressão em função do número de Reynolds.

Jiménez (2003) apresentou resultados para a capacidade de resfriamento e o coeficiente global e troca de calor para pasta de gelo a partir de etileno.

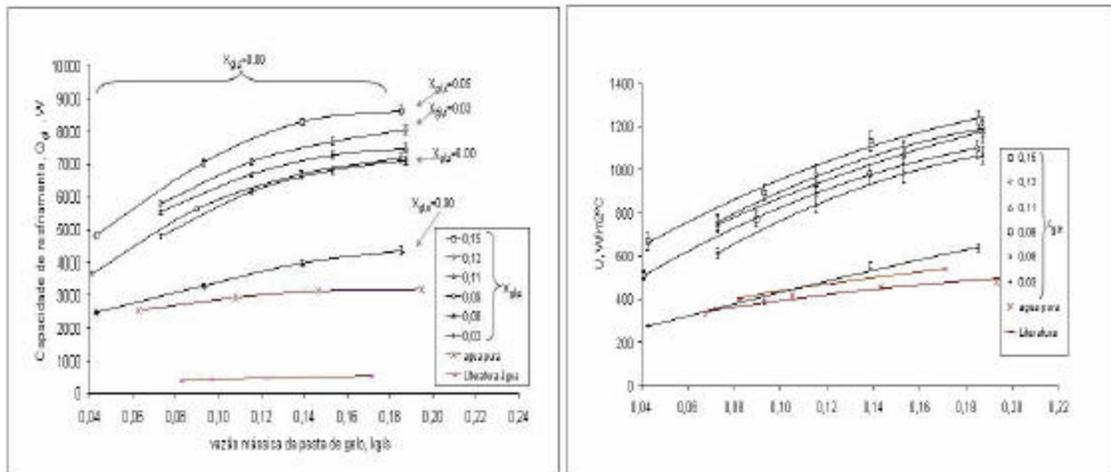


Figura 56 – (a) Capacidade de resfriamento em função da vazão mássica; (b) Coeficiente global de calor em função da vazão mássica.

A capacidade de resfriamento, em função da vazão mássica, apresenta a mesmo comportamento ao se aumentar a fração de gelo. Mas não acontece o mesmo com os resultados para o coeficiente global de troca de calor.

Frei e Boyman (2004) estudaram o coeficiente global e a queda de pressão num trocador de calor de placas com 0.1 m^2 de área de transferência de calor, utilizando pasta de gelo a partir de etanol para uma concentração de 9% em peso.

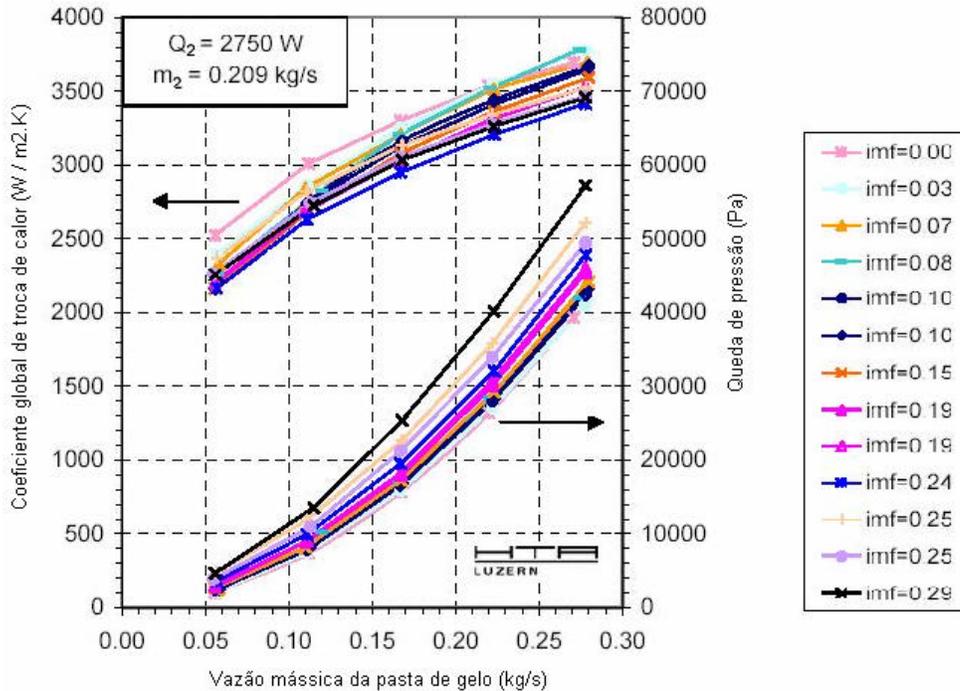


Figura 57 – Coeficiente global de troca de calor e queda de pressão em função da vazão mássica.

Encontrou-se o mesmo comportamento do coeficiente global de troca de calor e da queda de pressão como função da vazão da pasta de gelo e da fração de gelo. Quantitativamente, os resultados encontram-se numa mesma ordem de grandeza, devido às condições dos testes e os parâmetros utilizados. A faixa de resultados encontrada para o coeficiente global de transferência de calor, no presente trabalho, vai de 1120 a $1900 \text{ W/m}^2.K$ ver figuras 29 a 34. Para vazões na faixa de 0,11 a 0,22 kg/s , a queda de pressão para $X_g=0,11$ é de 18750 a 31250 Pa, e para $X_g=0,14$ de 21000 Pa a 35000 Pa, ver fig.48.