

3 Aparato experimental

Com base nos levantamentos realizados, foi possível projetar o protótipo e montar uma bancada experimental. O estudo da transferência de calor no fluido refrigerante indica que um sistema inundado tem os coeficientes mais altos de troca de calor e da análise do lado da solução aquosa, filmes finos têm altos coeficientes de transferência de calor.

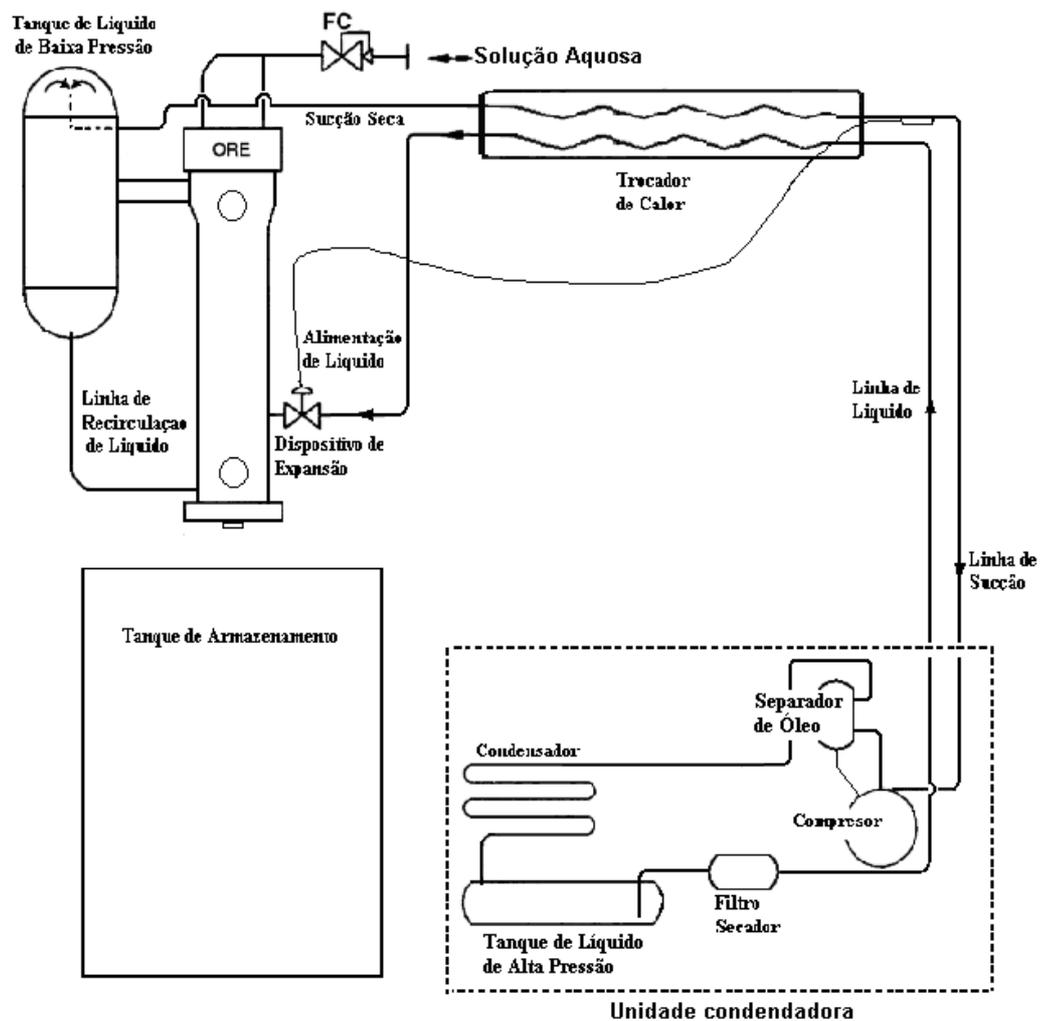


Figura 25 - Diagrama de instalação do sistema gerador de pasta de gelo



Figura 26 - Vista parcial do sistema gerador de pasta de gelo

O protótipo ao utilizar um evaporador inundado corre perigo constante de retorno de refrigerante líquido para o compressor, por isso foi necessário um sistema de proteção baseado em sensores de temperatura e uma válvula solenóide que fecha o retorno de refrigerante ao detectar líquido refrigerante na linha de retorno.

3.1. Solução aquosa empregada na produção da pasta de gelo

Em geral, o gelo produzido de água super-resfriada é muito pegajoso, enquanto cristais de gelo formados em uma solução aquosa super-resfriada com um aditivo próprio, como o etileno glicol, não apresentam este problema. Isto se deve ao fato da existência de um filme da solução ao redor de partículas de gelo, que também evita a formação de blocos de gelo através de fenômeno de coalescência. Então, pasta de gelo é uma solução de água líquida mais um aditivo e cristais de gelo. Pode-se supor que as partículas do gelo consistem na água pura, enquanto o líquido restante consiste na água e o aditivo, denominado líquido portador. Soluções aquosas com etileno glicol, propileno glicol, etanol, acetato de potássio e sais inorgânicos (acetato de cálcio e magnésio, NaCl, CaCl₂, NaHCO₃) foram provadas com sucesso. As concentrações utilizadas estão em torno de dez por cento. Foram produzidas no laboratório pastas de gelo com soluções aquosas de etanol propileno glicol e etileno glicol em concentrações de 8 e 10%. A figura 27 mostra a pasta de gelo e o fluido portador de uma solução aquosa de propileno glicol com concentração de 8%.



Figura 27 - Amostra de pasta de gelo

É preciso familiaridade com alguns termos e definições úteis.

A pasta de gelo é uma solução de água, gelo e um aditivo então:

$$m_{\text{gelo liq}} = m_{\text{gelo}} + (m_{\text{agua}} + m_{\text{ad}}) \quad (3.1)$$

O termo entre parêntesis é o fluido portador.

A concentração do gelo na pasta é:

$$x_{\text{gelo}} = \frac{m_{\text{gelo}}}{m_{\text{gelo liq}}} \quad (3.2)$$

A concentração do aditivo total é determinada quando se prepara a solução, antes de se iniciar o processo de refrigeração. Nesta etapa coexistem apenas a água e o aditivo. Esta concentração é constante e dada por

$$x_0 = \frac{m_{\text{ad}}}{m_{\text{gelo liq}}} \quad (3.3)$$

A concentração do aditivo no fluido portador é:

$$x_{\text{fp}} = \frac{m_{\text{ad}}}{m_{\text{gelo liq}} - m_{\text{gelo}}} = \frac{x_0}{1 - x_{\text{gelo}}} \quad (3.4)$$

Esta última varia com a concentração da pasta de gelo, visto que a massa do fluido portador muda com a formação de gelo.

3.2.

Determinação da concentração da pasta de gelo

A pasta de gelo tem diversas vantagens comparadas aos refrigerantes secundários tradicionais devido a seu caráter bifásico, isto é, mistura de líquido e sólido (partículas de gelo). O conhecimento da concentração do gelo e, daqui, da capacidade de resfriamento do pasta de gelo é de grande importância na operação de sistemas de pasta de gelo e é preciso na avaliação do coeficiente de troca de

calor que é o estudo desta dissertação. Na literatura encontrou-se o trabalho de Torben M. Hansen (2001), é considerado para determinar a concentração da pasta de gelo. Várias propriedades termofísicas da pasta de gelo podem ser usadas para se determinar a concentração do gelo e são apresentadas abaixo. As propriedades do pasta de gelo diferem significativamente do gelo puro. As propriedades termofísicas do pasta de gelo podem, em muitos casos, serem deduzidas da ponderação linear das propriedades do gelo e do líquido. Para a determinação de todas as propriedades pode-se supor que as partículas de gelo consistem na água pura, visto que o líquido restante consiste na água e o aditivo, isto é, o agente que baixa a temperatura de congelamento. Enquanto o gelo se forma, a concentração do aditivo aumenta no líquido restante, que de agora em diante será chamado de fluido portador. As seguintes propriedades são importantes para a aplicação prática em pasta de gelo:

- (1) Ponto de solidificação
- (2) Massa específica
- (3) Entalpia
- (4) Calor específico
- (5) Condutividade térmica
- (6) Viscosidade
- (7) Condutividade elétrica

A concentração do aditivo no fluido portador x_{fp} pode ser calculada da seguinte equação, já apresentada no item anterior:

$$x_{fp} = \frac{x_0}{1 - x_{gelo}}$$

Onde:

x_0 É a concentração do aditivo total na dissolução.

x_{gelo} Concentração do gelo na dissolução total

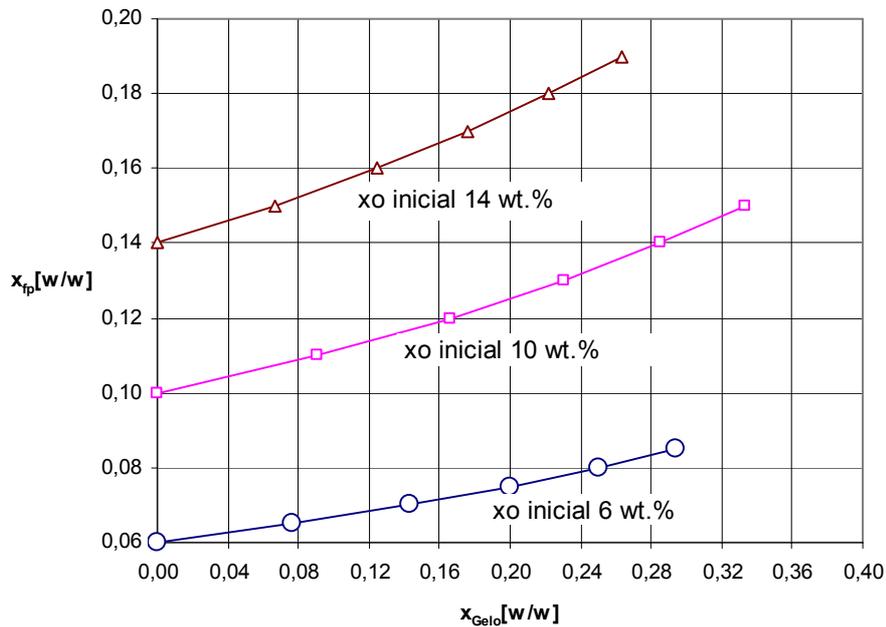


Figura 28 – Variação da fração mássica do aditivo no fluido portador com a variação da fração mássica de gelo

O ponto de solidificação de uma pasta de gelo depende muito dos aditivos empregados, isto é, álcool, etileno glicol, propileno glicol ou sais, e da concentração total deste aditivo, como é apresentado na figura 29. O ponto de solidificação corresponde à temperatura onde se inicia a formação de gelo na concentração em questão. Com este início de solidificação a concentração do fluido portador aumenta e os próximos cristais de gelo se formarão a uma temperatura inferior, face à maior concentração da solução.

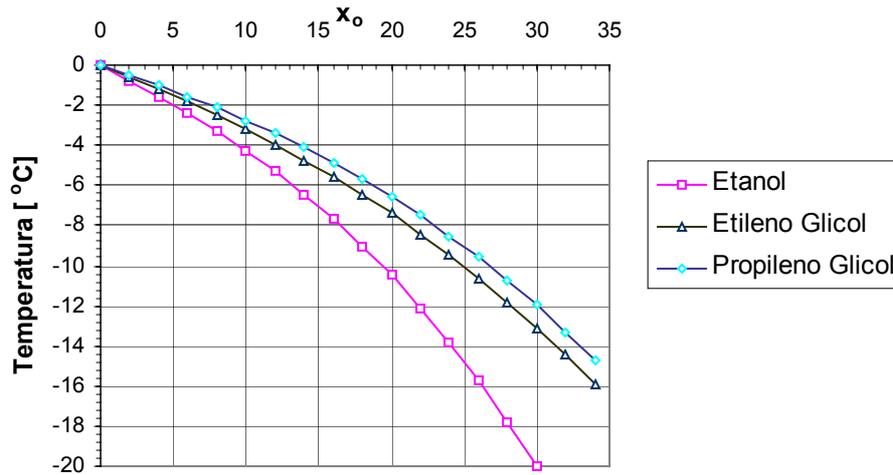


Figura 29 – Ponto de solidificação das soluções aquosas com diferentes aditivos e variação com a concentração do aditivo em porcentagem [w/w]

A massa específica da pasta de gelo pode ser avaliada por ponderação linear das propriedades das duas fases:

$$\rho_{\text{gelo liq}} = \frac{1}{\frac{x_{\text{gelo}}}{\rho_{\text{gelo}}} + \frac{(1-x_{\text{gelo}})}{\rho_{\text{fp}}}} \quad (3.5)$$

A entalpia de uma pasta de gelo pode ser calculada como:

$$h = h_{\text{gelo}}(T, x_{\text{gelo}})x_{\text{gelo}} + h_{\text{fp}}(T)(1-x_{\text{gelo}}) \quad (3.6)$$

O calor específico de uma pasta de gelo pode ser avaliado das definições termodinâmicas.

$$c_p \cong \frac{h(T) - h(T + \delta T)}{\delta T} \quad (3.7)$$

A condutividade elétrica depende da concentração de gelo e da condutividade elétrica do fluido portador sem o conteúdo do gelo.

$$x_{\text{gelo}} = 1 - \frac{C_{\text{gelo}}}{C_{\text{fp}}} \quad (3.8)$$

3.2.1.

Determinação da concentração de gelo por medição da concentração do fluido portador

A medição da variação da concentração do aditivo no fluido portador durante a formação da pasta de gelo, pode ser usada para se determinar a concentração de gelo. A variação da concentração pode ser determinada indiretamente pela medição das propriedades relacionadas com esta concentração do fluido portador. Em geral, a concentração do fluido portador pode ser determinada pela medição da temperatura do ponto de solidificação da solução aquosa que tem relação com a concentração do fluido portador, também deve ser conhecida a concentração total do aditivo no fluido.

Medições da concentração por métodos de refratometria também já foram provadas com sucesso. A figura 30 mostra as incertezas associadas a este método.

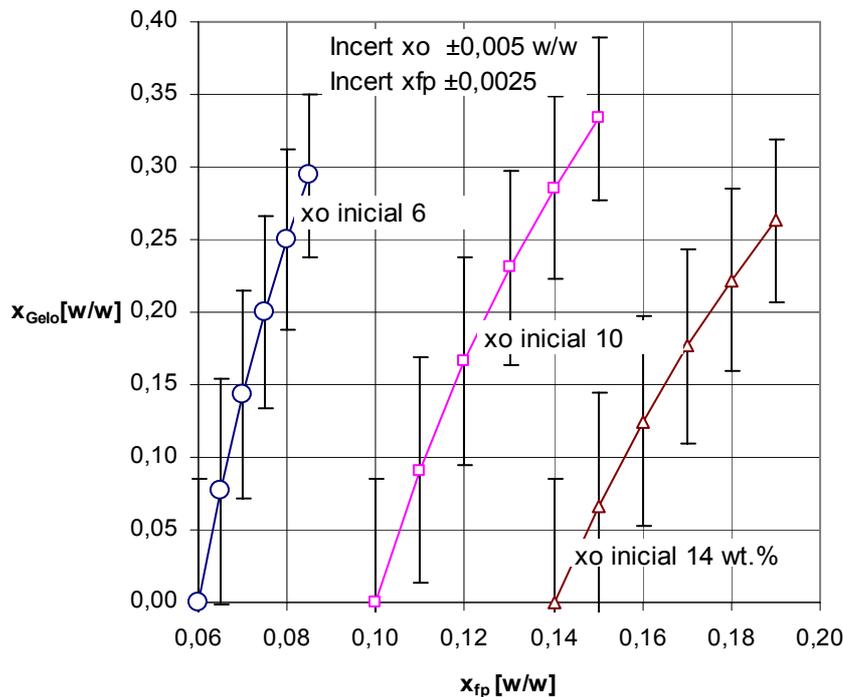


Figura 30 - Determinação da concentração de gelo baseada na medição da concentração do fluido portadora

3.2.2.

Determinação da concentração por medição da temperatura da pasta de gelo

Quando se conhece a temperatura de solidificação (freezing point) de uma solução, determina-se sua concentração e, conseqüentemente, a concentração da pasta de gelo. Isto se baseia nas condições de equilíbrio. conseqüentemente, a concentração do pasta de gelo pode ser determinado da equação:

$$x_{fp} = \frac{x_0}{1 - x_{gelo}}$$

A figura 31 mostra a variação da concentração de gelo com a temperatura da pasta de gelo e várias concentrações iniciais de etanol. Note-se que para baixas concentrações iniciais de etanol a variação na temperatura é pequena e a variação na concentração de gelo é abrupta. A aplicação deste método implica em incertezas grandes.

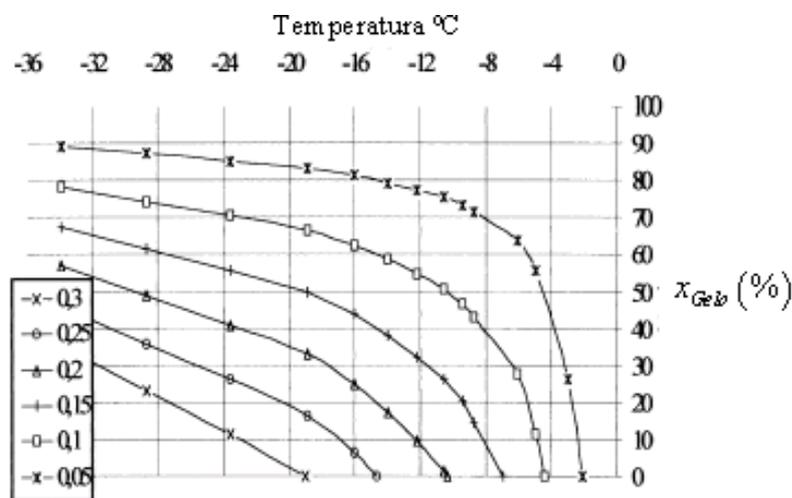


Figura 31 - Variação da concentração de gelo por temperatura da pasta de gelo a varias concentrações iniciais de etanol

Para uma concentração de etanol $x_0=6$ wt.%, $x_0=10$ wt.%, e $x_0=12$ wt.%, as incertezas na determinação da concentração do pasta de gelo são mostradas na figura 32, para uma precisão na determinação da temperatura de $\pm 0,1$ °C. Para o

cálculo é pressuposto que a concentração do aditivo total x_0 é conhecida dentro de $\pm 0,5$ wt.% e também é conhecida a temperatura do ponto de solidificação com as concentrações de etanol. A incerteza da medição da concentração do pasta de gelo pelo método da medição da temperatura do ponto de solidificação é maior quando a concentração do aditivo é baixa. O método assume que existe equilíbrio ao longo da curva de solidificação. Isto é seguro somente em sistemas de armazenamento homogêneos e sistemas de distribuição homogêneos.

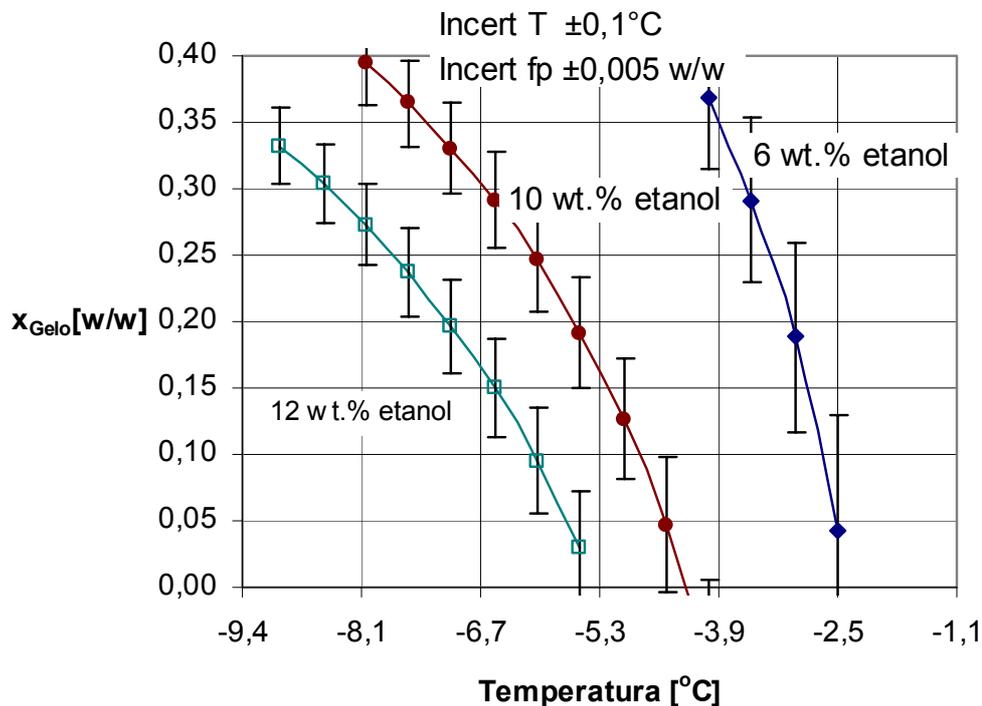


Figura 32 - Determinação da concentração da pasta de gelo por medição da temperatura de solidificação

3.2.3.

Determinação da concentração por medição das propriedades elétricas da pasta de gelo ou o fluido portador

As propriedades elétricas do fluido portador ou da pasta de gelo podem ser utilizadas para determinar a concentração de gelo. Estas propriedades são: capacitância, indutância, resistência e condutividade elétricas. A condutividade do fluido portador com ou sem partículas de gelo pode ser medida.

3.2.4.

Determinação da concentração por medição da massa específica

Nesta dissertação, inicialmente, optou-se por usar a *massa específica* para a determinação da concentração do gelo, já que se dispunha de um medidor CORIOLIS. A concentração do gelo pode ser determinada ao medir-se a densidade da pasta de gelo porque a densidade do gelo difere consideravelmente daquela do fluido portador ρ_{fp} .

No caso dos sistemas compreendidos de N fases, a massa específica da mistura pode ser expressa usando a seguinte relação:

$$\frac{1}{\rho} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{w_i}{\rho_i} \right) \quad (3.9)$$

Onde:

w_i é a fração mássica do componente i

ρ_i é a densidade do componente i

A massa específica da pasta de gelo é calculada aplicando esta expressão pela seguinte equação:

$$\rho_{\text{gelo liq}} = \frac{1}{\frac{x_{\text{gelo}}}{\rho_{\text{gelo}}} + \frac{(1-x_{\text{gelo}})}{\rho_{\text{fp}}}} \quad (3.10)$$

A fase sólida é formada por gelo puro. A variação da massa específica do gelo por temperatura foi estudada por Levy 1982. A seguinte equação mostra essa variação θ é a temperatura do gelo:

$$\rho_{\text{gelo}} = 917 \left(1 + 1,73 \times 10^{-4} \theta \right) [kg / m^3] \quad (3.11)$$

$$0 \geq \theta \geq -140 \text{ } ^\circ C$$

A massa específica da fase líquida, isto é, da solução aquosa, em geral varia com a temperatura. Para soluções aquosas de etanol, foram feitas regressões polinomiais de dados experimentais estudados por Sorensen, Perry e Chilton, Oliveros, Brunel e Van Bibber e Wolf et.al. A forma geral deste polinômio é do segundo grau. Os valores dos coeficientes são apresentados na tabela 3 em função da concentração mássica do aditivo Etanol.

x_0	a_0	a_1	a_2	$r(x,y)$
0,05	991,54	1,3720	0,0235	0,96
0,10	987,07	0,8129	0,0089	0,97
0,15	982,31	0,2801	-0,0043	0,98
0,20	977,39	-0,2174	-0,0158	0,99
0,25	976,38	-0,1274	-0,0139	0,99
0,30	969,51	-0,8620	-0,0287	1,00

Tabela 3 - Coeficientes do polinômio que expressa a variação da massa específica a diferentes concentrações em massa de soluções aquosas de Etanol

O valor da massa específica da pasta de gelo está compreendido entre o da massa específica do gelo puro e o da massa específica da fase líquida da solução aquosa. A figura 33 mostra a variação da massa específica da pasta de gelo em função da temperatura e a concentração inicial de uma solução aquosa de etanol.

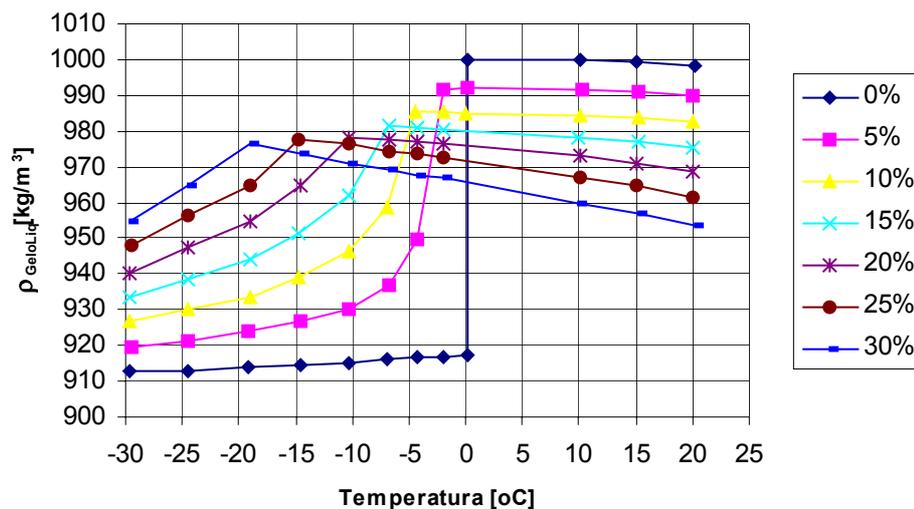


Figura 33 - Variação da massa específica de pasta de gelo de uma solução aquosa de etanol em função da temperatura e a concentração inicial em massa da solução

A densidade do pasta de gelo é a propriedade principal a medir, o método é insensível às variações na concentração do aditivo total x_0 . A fração do gelo baseada na medição da densidade da pasta de gelo, na qual a incerteza relativa é $\pm 0.15\%$ e uma incerteza absoluta da concentração do aditivo total x_0 de ± 0.5 wt.%, é mostrada na figura 34. Esta mostra que a determinação é insensível à concentração de aditivo e da concentração absoluta do gelo. Em geral, a concentração do gelo está determinada dentro de ± 2 wt.% quando a densidade é determinada dentro de ± 0.15 wt.% (Torben M. Hansen et. Al. 2001). A presença de ar no sistema influencia consideravelmente a incerteza da medição. De fato, nas experiências iniciais realizadas, constatou-se a presença de ar, o que dificultou bastante as medições. O método pode ser aplicado a todos os tipos de tanques de armazenamento e de sistemas da distribuição e ser medido em linha.

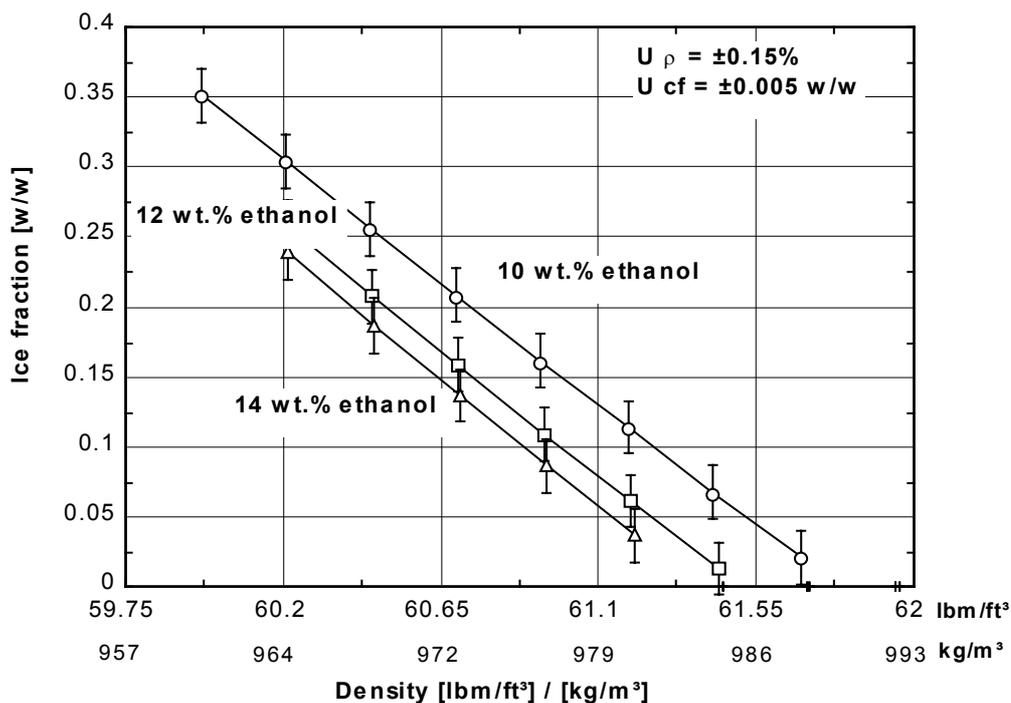


Figura 34 - Determinação da fração de gelo baseada na medição da massa específica da pasta de gelo de uma solução aquosa de etanol a diferentes concentrações

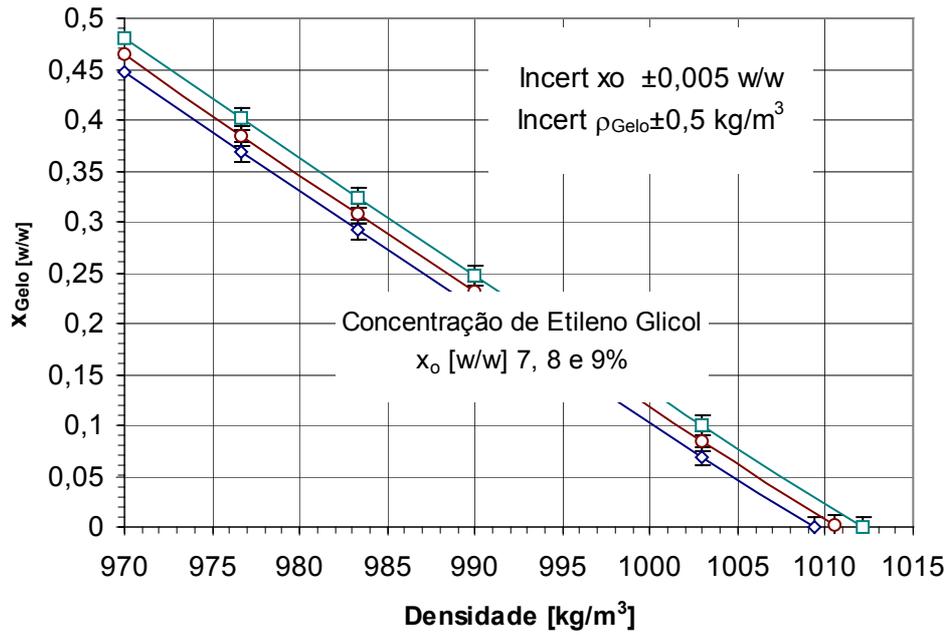


Figura 35 - Determinação da fração de gelo baseado na medição da massa específica da pasta de gelo de uma solução aquosa de etileno glicol a diferentes concentrações

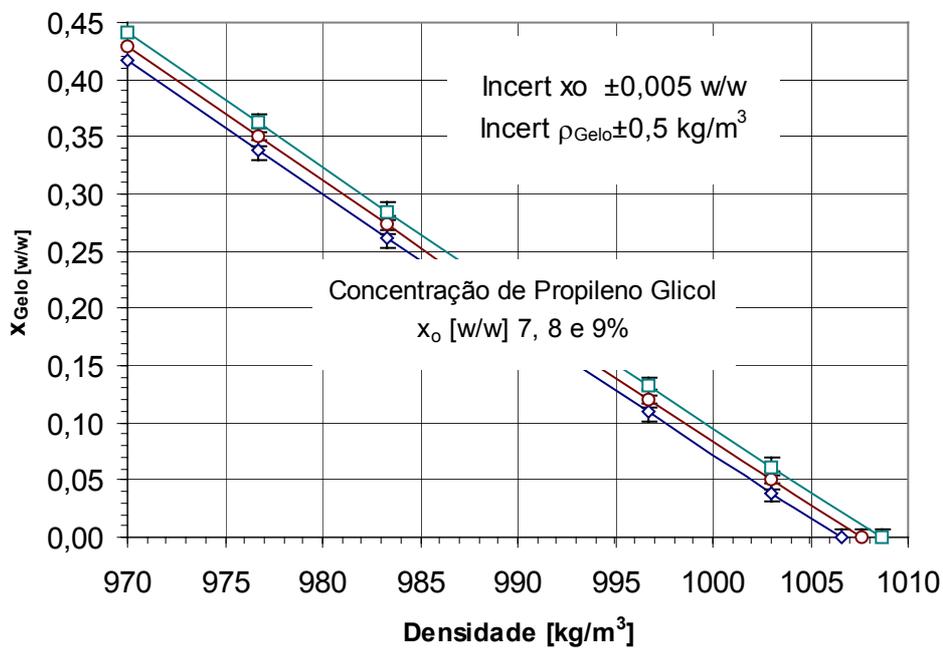


Figura 36 - Determinação da fração de gelo baseado na medição da massa específica da pasta de gelo de uma solução aquosa de propileno glicol a diferentes concentrações

Para construir os gráficos da variação da fração de gelo com a variação da massa específica de uma pasta de gelo, é preciso determinar a dependência da massa específica com a concentração do aditivo, na linha da temperatura do ponto de solidificação.

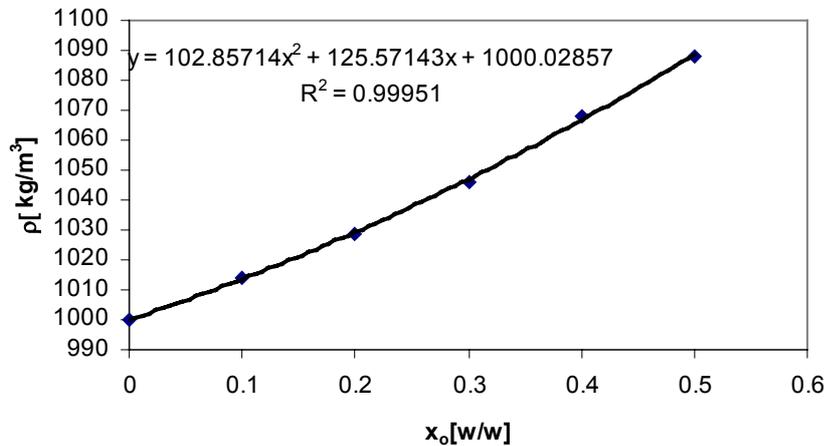


Figura 37 - Dependência da massa específica com a concentração do aditivo na linha da temperatura do ponto de solidificação para soluções aquosas de etileno glicol

3.2.4.1.

Medida da densidade por meio do medidor Coriolis

Os medidores de vazão foram usados por muitos anos para medidas em linha da massa específica em sistemas do transporte. Hoje, medidores que utilizam o princípio de Coriolis, baseado na medição de uma deformação no interior do medidor causada pela vazão mássica, é usado com sucesso para pasta de gelo. O equipamento usado na bancada de testes tem uma incerteza de medição da ordem de $\pm 0.15\%$.

A seguir descreve-se procedimento adotado: inicialmente enche-se o tanque de armazenamento com água medindo-se a massa do líquido, é vertido o aditivo (etanol, etileno glicol, ou propileno glicol) medindo-se também a massa, tem-se a concentração do aditivo total x_0 , avalia-se a incerteza desta concentração. O passo seguinte consiste em ligar o gerador de pasta de gelo, foram testados os métodos de medição da temperatura da pasta, medidor Coriolis, medição da concentração do fluido portador por refratometria, mas só o método de calorimetria foi satisfatório.

3.2.5.

Determinação da concentração pelo método da calorimetria

O método está baseado na medição da potência elétrica, q , aplicada a uma amostra de pasta de gelo de massa definida, m , aquecendo a amostra de $T_{Gelo liq}$ para uma temperatura T_f acima do ponto de solidificação, durante o tempo t . A concentração de gelo x_{Gelo} pode ser definida de um balanço de energia:

$$\int_0^t q dt = m(h(T_{Gelo liq}) - h(T_f)) \quad (3.12)$$

O método de medição inclui os seguintes passos:

- (1) Medição da massa m de uma amostra de pasta de gelo
- (2) Medida da temperatura da pasta $T_{Gelo liq}$
- (3) Medição do tempo de fornecimento de potencia elétrica t
- (4) Medição da potência fornecida q
- (5) Medição da temperatura final da solução aquosa T_f

Finalmente a determinação das entalpias empregando a equação que segue devem ser aplicados para se calcular a quantia de gelo na amostra:

$$h = h_{gelo}(T, x_{gelo})x_{gelo} + h_{fp}(T)(1 - x_{gelo}) \quad (3.13)$$

O método é insensível às variações na concentração de partículas, inibidores e outros elementos aditivos no fluido de portador. O método de medição é considerado como o mais preciso dos mencionados acima e é insensível à concentração de gelo e a concentração do aditivo. O método não é diretamente satisfatório para medidas em linha da concentração de gelo, pois funciona em bateladas. O método também não é satisfatório para medidas de concentração de gelo em tanque de armazenamento heterogêneo.

Se a temperatura no sistema pode ser ajustada e pode ser medida dentro de $\pm 0.1^\circ\text{C}$, então a concentração em massa de gelo pode ser determinada dentro de $\pm 1.5\%$, para baixas concentrações de gelo.

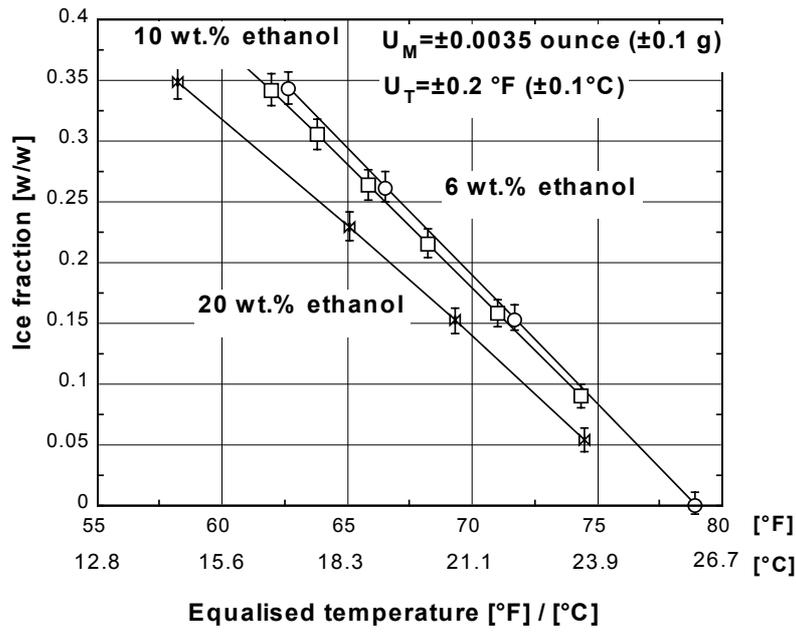


Figura 38 - Determinação da concentração de gelo pelo método de calorimetria. Incerteza na medição de temperatura 0,1°C Torben M. Hansen (2001)

Ao contrário dos outros métodos mencionados, a incerteza aumenta quando a concentração de gelo aumenta.

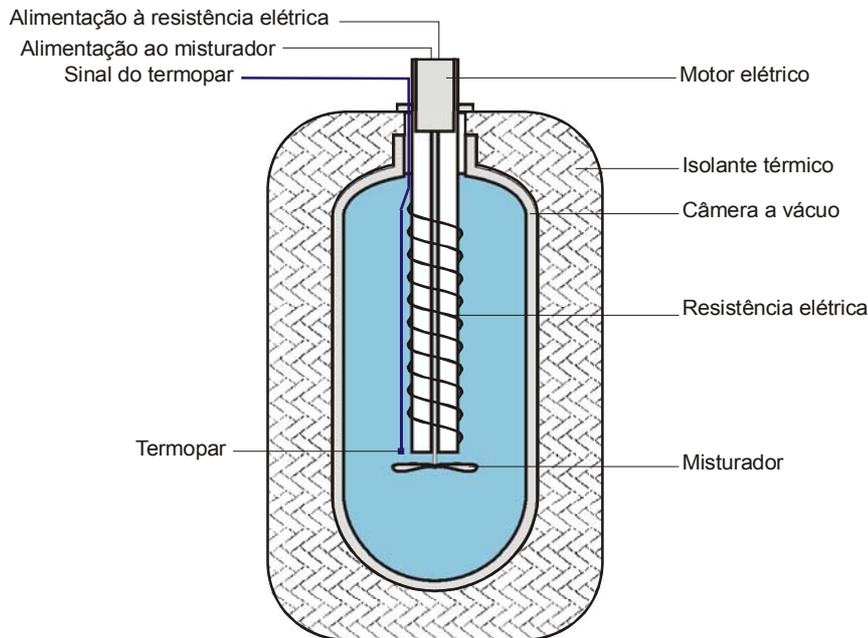


Figura 39 - Calorímetro empregado na determinação da concentração da pasta de gelo

3.3. Coeficiente de Troca de Calor

A determinação experimental do coeficiente de troca de calor pode ser avaliada aplicando-se a equação de conservação de energia. Este é o objetivo final deste trabalho e tudo o que foi feito até este ponto vire esta determinação como meta. O calor transferido por unidade de tempo, ou fluxo de calor, pode ser avaliado pela equação:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{geloliq} \cdot (h_{ent} - h_{gelo liq}) \quad (3.14)$$

Onde aparecem a vazão mássica da pasta de gelo e as entalpias de entrada e saída.

Note que a solução aquosa na entrada do trocador está totalmente na fase líquido. De fato a temperatura de entrada é a maior temperatura da pasta de gelo e, na prática, esta pode estar na temperatura ambiente. No evaporador a solução aquosa experimentará troca de calor sensível e latente. A figura 40 mostra, esquematicamente, as temperaturas do fluido refrigerante e da solução aquosa.

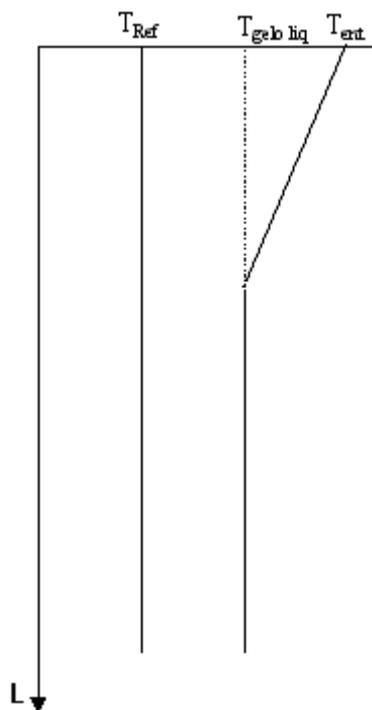


Figura 40 - Temperaturas do fluido refrigerante e da solução aquosa

A entalpia da pasta de gelo é avaliada como se segue:

$$h = h_{gelo}(T, x_{gelo}) \cdot x_{gelo} + h_{fp}(T) \cdot (1 - x_{fp}) \quad (3.15)$$

Baseado em propriedades de substância pura e temperatura de referência de 273 K, a entalpia tem duas parcelas: o calor sensível e calor latente:

$$h_{gelo\ liq} = ((1 - x_{gelo}) \cdot C_{p,fp} + x_{gelo} C_{p,gelo}) \cdot (T_{gelo\ liq} - 273,16) - h_{ls} \cdot x_{gelo} \quad (3.16)$$

A entalpia de entrada da solução aquosa pode ser avaliada como:

$$h_{ent} = C_{p,fp} \cdot (T_{ent} - 273,16) \quad (3.17)$$

O calor transferido é finalmente:

$$\begin{aligned} \dot{Q} = \dot{m}_{gelo\ liq} (& C_{p,fp} \cdot (T_{ent} - T_{gelo\ liq}) + h_{ls} \cdot x_{gelo} + \\ & x_{gelo} (273,16 - T_{gelo\ liq}) (C_{p,gelo} - C_{p,fp})) \end{aligned} \quad (3.18)$$

As propriedades termofísicas da solução aquosa podem ser encontradas no apêndice correspondente desta dissertação. O calor latente de solidificação do gelo h_{ls} vale 333,4 kJ/kg e o calor específico do gelo 2.07 kJ/kgK. Na prática a última parcela da última equação pode ser desprezada.

Subseqüentemente, o coeficiente global de troca de calor pode ser determinado experimentalmente por:

$$U = \frac{\dot{Q}}{A \cdot \Delta T} \quad (3.19)$$

Onde A é a área de troca de calor que corresponde ao diâmetro interno do tubo. Na troca de calor o fluido refrigerante está em condição de saturação, isto é,

a temperatura do fluido refrigerante é praticamente constante. Mas a solução aquosa experimenta troca de calor sensível e mudança de fase. Nesta dissertação a temperatura de referência ΔT foi definida pela seguinte expressão:

$$\Delta T = \frac{Q - Q_L}{Q_S - Q_L} \Delta T_{\text{in}} - \frac{Q - Q_S}{Q_S - Q_L} \Delta T_{\text{min}}$$

$$\Delta T_{\text{in}} = \frac{\Delta T_{\text{Max}} - \Delta T_{\text{min}}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{\text{Max}}}{\Delta T_{\text{min}}}\right)} \quad (3.20)$$

$$Q = Q_S + Q_L$$

Onde as variáveis estão descritas graficamente na figura 41 a seguir:

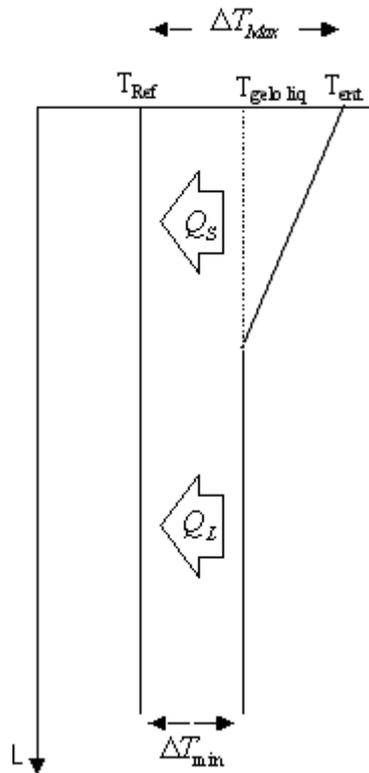


Figura 41 - Variáveis envolvidas na temperatura de referencia ΔT