

## 2

# Características e propriedades termofísicas da pasta de gelo

Sendo objetivo do presente trabalho a determinação das características de transferência de calor, torna-se necessário levantar as equações necessárias ao cálculo das propriedades termofísicas do fluido. No decorrer deste capítulo serão descritas essas propriedades e a forma de determiná-las.

Essas propriedades servem para avaliar os parâmetros de desempenho do trocador de calor tais como: o número de Reynolds rotacional e axial, o número de Prandtl, necessários para a determinação do número de Nusselt. A determinação da fração de gelo, importante na definição do estado termodinâmico da pasta de gelo, é feita pela medição da massa específica.

### 2.1

#### Propriedades Termofísicas do gelo e de soluções aquosas

Para calcular as propriedades termofísicas da pasta de gelo, determina-se, em primeiro lugar, as propriedades das substâncias puras que a compõem, i.e. o gelo (água solidificada) e a solução aquosa. As propriedades termofísicas disponíveis na literatura, são avaliadas a pressão atmosférica.

#### 2.1.1

##### Propriedades Termofísicas do Gelo

Kauffeld et al. [15] apresentam correlações para o cálculo das propriedades termofísicas de gelo, assim como, entre outros, Fukusako & Yamada [42].

A **condutividade térmica do gelo**,  $k_g$ , em função da temperatura,  $T_g$  em ( $^{\circ}\text{C}$ ), é determinada como segue:

$$k_g = 1,16(1,91 - 8,66 \times 10^{-3} \cdot T_g + 2,97 \times 10^{-5} \cdot T_g^2) \quad [\text{W/m} \cdot \text{K}]$$

$$0 \geq T_g \geq -173 \text{ } ^{\circ}\text{C} \quad (2-1)$$

A Eq. 2-1 foi proposta por Sakazume & Seki [43], é válida para o cálculo da condutividade térmica do gelo a pressão atmosférica. A correlação de Sakazume & Seki [43] fornece valores da condutividade térmica, muito próximos aos dados encontrados no Handbook of Thermodynamic Tables and Charts, de Raznjevic [44].

A condutividade térmica do gelo, é muito maior do que a condutividade térmica da água na fase líquida. A condutividade térmica da água em fase líquida a  $0,01 \text{ } ^{\circ}\text{C}$  e pressão atmosférica é  $0,56 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  [45], entanto que, a condutividade térmica da água em fase sólida (gelo) a  $0 \text{ } ^{\circ}\text{C}$  e pressão atmosférica é  $2,21 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  [44].

A **massa específica do gelo**,  $\rho_g$ , na temperatura  $T_g$  (em  $^{\circ}\text{C}$ ), e pressão atmosférica, é determinada como segue [42]:

$$\rho_g = 917(1 - 1,17 \times 10^{-4} \cdot T_g) \quad [\text{kg/m}^3]$$

$$0 \geq T_g \geq -140 \text{ } ^{\circ}\text{C} \quad (2-2)$$

A massa específica do gelo é menor do que a massa específica da água na fase líquida. Isto representa uma característica positiva na produção de pasta de gelo, em função de as forças de empuxo atuarem no sentido do escoamento, e uma desvantagem no armazenamento, visto que estas forças provocam a aglomeração da pasta de gelo no topo dos tanques de armazenamento.

Por outro lado Bel & Lallemand [26] consideram a seguinte função, proposta por Levy [46]:

$$\rho_g = 917(1 + 1,73 \times 10^{-4} \cdot T_g) \quad [\text{kg/m}^3] \quad (2-3)$$

Como pode-se observar, o sinal do coeficiente do termo dependente da temperatura é positivo. Isto significa que a massa do gelo cresce com a temperatura, e é contrário ao apontado por outras correlações encontradas na literatura. Como a massa específica da pasta de gelo é determinada a partir de varias variáveis, entre elas a massa específica do gelo, torna-se importante determinar corretamente esta variável.

Um dos trabalhos até agora mais recentes sobre pasta de gelo apresentados por Kauffeld et al. [15], mostram o coeficiente do termo dependente da temperatura como sendo negativo, e apresentam a seguinte relação:

$$\rho_g = 917 - 0,13 \cdot T_g \quad [\text{kg/m}^3] \quad (2-4)$$

No presente trabalho foi considerada a Eq. 2-4, que está baseada nos dados apresentados no Handbuch der Kältetechnik, VI/B. [47] e, apresenta boa concordância com a correlação Eq. 2-2.

O **calor específico do gelo**,  $c_{p,g}$ , em função da temperatura  $T_g$ , e pressão atmosférica, é dado por:

$$\begin{aligned} c_{p,g} &= 2,12 + 0,008 \cdot T_g \quad [\text{kJ/kg} \cdot \text{K}] \\ 0 &\geq T_g \geq -100 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (2-5)$$

O calor específico do gelo, à temperatura  $T_g$ , é menor que o calor específico da água na fase líquida.

A **entalpia do gelo**,  $h_g$ , na temperatura  $T_g$  (em  $^\circ\text{C}$ ) pode ser determinada a partir da seguinte relação:

$$h_g(T_g) = -332,4 + T_g \cdot (2,12 + 0,008 \cdot T_g) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (2-6)$$

Convencionou-se a entalpia de referência da água pura com o valor  $h_{Ref}=0$  kJ/kg, à temperatura de  $0$   $^\circ\text{C}$ , que é a temperatura de referência. A Eq. 2-6 está baseada na entalpia de referência, considerando a entalpia de fusão do gelo (332,4 kJ/kg) a partir de dados tomados do Handbook of Chemistry and Physics CRC [48].

### 2.1.2 Propriedades Termofísicas de soluções aquosas

As soluções aquosas utilizadas para aplicações da pasta de gelo que podem ser encontradas na literatura são as soluções de etanol [3, 26, 27], e cloreto de sódio [49]. Entretanto, para outras aplicações, soluções aquosas de glicóis [50] e sacarose (açúcar) [51, 27] também são mencionadas.

Melinder [52] apresenta diagramas e tabelas das propriedades termofísicas de diferentes soluções aquosas que podem ser utilizadas para a produção de pasta de gelo, a saber:

- Etileno glicol - água
- Propileno glicol - água
- Etanol - água
- Metanol - água
- Glicerina - água
- Amônia - água
- Carbonato de potássio - água
- Cloreto de cálcio - água
- Cloreto de magnésio - água
- Cloreto de sódio - água
- Acetato de potássio - água

Melinder [52] também fornece coeficientes para o cálculo computacional das propriedades termofísicas destas soluções aquosas. As seguintes propriedades termofísicas podem ser determinadas com este procedimento:

- Massa específica
- Calor específico
- Condutividade térmica
- Viscosidade dinâmica
- Temperatura de solidificação

- Concentração de soluto

As propriedades termofísicas são calculadas através de uma expressão polinomial  $f = f(x, y)$ , onde  $\mathbf{x}$  e  $\mathbf{y}$  são dois parâmetros de ingresso. A expressão polinomial tem a seguinte forma:

$$f = \sum C_{ij} \cdot (x - x_m)^i \cdot (y - y_m)^j \quad (2-7)$$

onde  $i \leq 5$ ,  $j \leq 3$ ,  $i + j \leq 5$  e  $C_{ij}$  são os coeficientes para cada termo da somatória. E  $x_m$  e  $y_m$  são duas constantes adicionais. Os coeficientes  $C_{ij}$  e as constantes  $x_m$  e  $y_m$  são fornecidas por Melinder [52].

Expandindo-se a somatória tem-se:

$$\begin{aligned} f = & C_{00} + C_{01}(y - y_m) + C_{02}(y - y_m)^2 + C_{03}(y - y_m)^3 + C_{10}(x - x_m) + \\ & C_{11}(x - x_m)(y - y_m) + C_{12}(x - x_m)(y - y_m)^2 + C_{13}(x - x_m)(y - y_m)^3 + \\ & C_{20}(x - x_m)^2 + C_{21}(x - x_m)^2(y - y_m) + C_{22}(x - x_m)^2(y - y_m)^2 + \\ & C_{23}(x - x_m)^2(y - y_m)^3 + C_{30}(x - x_m)^3 + C_{31}(x - x_m)^3(y - y_m) + \\ & C_{32}(x - x_m)^3(y - y_m)^2 + C_{40}(x - x_m)^4 + C_{41}(x - x_m)^4(y - y_m) + \\ & C_{50}(x - x_m)^5 \end{aligned} \quad (2-8)$$

Entretanto, para a determinação da viscosidade dinâmica, é utilizado o mesmo polinômio, mas na forma de uma equação logarítmica, conforme a seguir:

$$\ln(f) = \sum C_{ij} \cdot (x - x_m)^i \cdot (y - y_m)^j \quad (2-9)$$

onde, também,  $i \leq 5$ ,  $j \leq 3$ ,  $i + j \leq 5$ .

Na tabela 2.1 estão listados os valores dos coeficientes  $C_{ij}$  para a determinação de cada uma das propriedades termofísicas de soluções aquosas de etanol. Tabelas similares são utilizadas para a determinação das propriedades termofísicas das outras soluções aquosas apresentadas [52]. A determinação das propriedades requer de dois parâmetros de ingresso,  $\mathbf{x}$  e  $\mathbf{y}$ . Pode-se observar que, para utilizar a tabela superior de 2.1, os parâmetros de ingresso são:

$\mathbf{x}$  = temperatura de solidificação da solução ( $^{\circ}\text{C}$ )

$y$  = temperatura da solução em ( $^{\circ}\text{C}$ )

Por outro lado para utilizar a tabela inferior, os parâmetros de ingresso são:

$x$  = concentração do soluto em (%)

$y$  = temperatura da solução em ( $^{\circ}\text{C}$ ).

A tabela 2.1 também mostra as faixas de validade para os parâmetros de ingresso. Para o cálculo das propriedades foi implementado um conjunto de macros no Microsoft Excel<sup>®</sup> 2002, de forma a obtê-las de forma sistemática.

A Fig. 2.1 mostra a variação de massa específica e da viscosidade dinâmica de uma solução aquosa de etanol com a temperatura. As diversas curvas representam a propriedade para uma diferente fração em massa [kg/kg] do soluto, etanol. A Fig. 2.2 mostra o calor específico e a condutividade térmica de uma solução etanol-água. Os números apresentados nas figuras representam a fração em massa [kg/kg] do soluto (etanol).

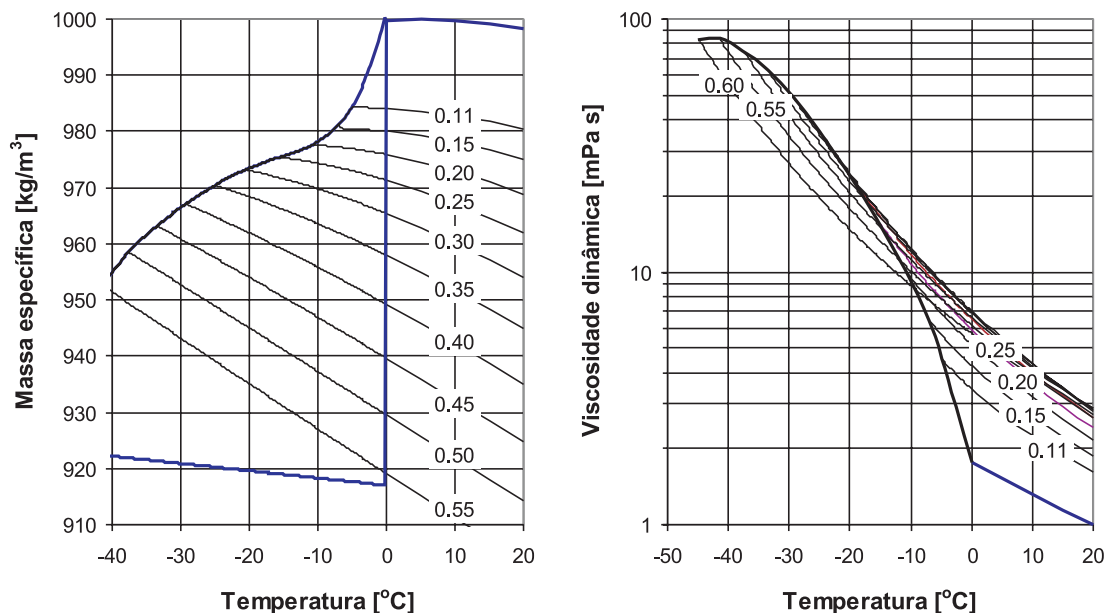


Figura 2.1: Massa específica e viscosidade dinâmica de uma solução etanol-água obtidas com a Eqs. 2-7 e 2-9, propostas por Melinder [52]. Os números na figura representam as linhas de fração em massa do soluto constante.

**Parâmetros de ingresso**

$x=T_{solidif}$  ( $^{\circ}\text{C}$ );  $xm=-27,8846$ ; limites de validade:  $-45 \leq x \leq -5$   $^{\circ}\text{C}$   
 $y=Temp$  ( $^{\circ}\text{C}$ );  $ym=-4,9038$ ; limites de validade:  $x \leq y \leq 20$   $^{\circ}\text{C}$

| i | j | Conc       | $\rho$     | $c_p$      | $k$        | $\mu$      |
|---|---|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0 | 0 | 3,830E+01  | 9,554E+02  | 3,940E+03  | 3,573E-01  | 2,211E+00  |
| 0 | 1 | 1,853E-04  | -6,281E-01 | 3,745E+00  | 4,570E-04  | -5,724E-02 |
| 0 | 2 | -6,849E-06 | -2,644E-03 | 8,054E-04  | -2,695E-07 | 4,705E-04  |
| 0 | 3 | 1,566E-07  | 1,597E-05  | -5,778E-06 | -1,221E-08 | -1,358E-06 |
| 1 | 0 | -1,174E+00 | 1,988E+00  | 3,195E+01  | 5,161E-03  | -2,923E-03 |
| 1 | 1 | -3,691E-05 | 2,195E-02  | -2,061E-01 | 2,287E-05  | -2,696E-04 |
| 1 | 2 | -2,130E-07 | -3,693E-04 | -3,060E-05 | 1,768E-09  | 9,900E-06  |
| 1 | 3 | 7,393E-08  | -4,714E-07 | 1,413E-06  | -5,937E-10 | -2,024E-07 |
| 2 | 0 | 5,947E-03  | -3,759E-02 | -2,548E-01 | 1,297E-05  | -9,079E-04 |
| 2 | 1 | -4,386E-06 | 6,311E-04  | -3,510E-03 | 3,639E-07  | 9,402E-06  |
| 2 | 2 | -8,485E-08 | -5,612E-07 | 1,084E-05  | 1,651E-09  | 3,813E-07  |
| 2 | 3 | 4,058E-09  | -1,174E-07 | 4,766E-07  | -2,258E-11 | -2,138E-08 |
| 3 | 0 | 3,233E-04  | -1,040E-03 | -8,398E-03 | -3,327E-06 | 2,378E-05  |
| 3 | 1 | 8,389E-08  | -1,117E-05 | -3,151E-05 | 8,246E-09  | -8,056E-07 |
| 3 | 2 | -6,145E-09 | 7,605E-07  | 5,825E-07  | 5,777E-11  | 2,577E-08  |
| 4 | 0 | -9,750E-07 | -2,033E-06 | -2,319E-04 | -1,514E-08 | -2,184E-07 |
| 4 | 1 | 9,984E-09  | -5,091E-07 | 2,082E-06  | -2,981E-10 | 2,584E-08  |
| 5 | 0 | -1,143E-06 | 2,597E-06  | 1,964E-06  | 8,600E-09  | -6,136E-08 |

**Parâmetros de ingresso**

$x=\text{Concentração}$  (%);  $xm=38,9250$ ; limites de validade:  $11 \leq x \leq 60$  (%)  
 $y=Temp$  ( $^{\circ}\text{C}$ );  $ym=-4,9038$ ; limites de validade:  $T_{solidif} \leq y \leq 20$   $^{\circ}\text{C}$

| i | j | $T_{solidif}$ | $\rho$     | $c_p$      | $k$        | $\mu$      |
|---|---|---------------|------------|------------|------------|------------|
| 0 | 0 | -2,842E+01    | 9,544E+02  | 3,925E+03  | 3,545E-01  | 2,214E+00  |
| 0 | 1 | 9,753E-06     | -6,416E-01 | 3,876E+00  | 4,421E-04  | -5,710E-02 |
| 0 | 2 | -1,236E-05    | -2,495E-03 | 2,300E-04  | -2,942E-07 | 4,679E-04  |
| 0 | 3 | 6,378E-07     | 1,729E-05  | 1,322E-05  | -1,115E-08 | -1,374E-06 |
| 1 | 0 | -8,563E-01    | -1,729E+00 | -2,795E+01 | -4,334E-03 | 8,025E-04  |
| 1 | 1 | 5,274E-05     | -1,824E-02 | 1,773E-01  | -2,021E-05 | 2,618E-04  |
| 1 | 2 | 1,843E-06     | 3,116E-04  | 4,769E-05  | -4,865E-09 | -8,472E-06 |
| 1 | 3 | -1,428E-07    | -6,425E-07 | 3,008E-06  | 2,972E-10  | 1,478E-07  |
| 2 | 0 | 4,050E-03     | -2,193E-02 | -9,620E-02 | 3,021E-05  | -7,330E-04 |
| 2 | 1 | -3,058E-06    | 5,847E-04  | -3,908E-03 | 4,239E-07  | 7,056E-06  |
| 2 | 2 | -1,531E-07    | -2,517E-06 | 1,951E-05  | 1,007E-09  | 2,473E-07  |
| 2 | 3 | 5,543E-09     | -2,875E-08 | 3,366E-08  | -7,325E-12 | -1,329E-08 |
| 3 | 0 | -1,179E-04    | 6,217E-04  | 7,580E-03  | 6,904E-07  | 4,285E-07  |
| 3 | 1 | -9,416E-08    | 4,208E-06  | 2,283E-05  | -3,203E-09 | 3,239E-07  |
| 3 | 2 | 4,676E-09     | -3,460E-07 | -9,149E-07 | -1,439E-11 | -1,234E-08 |
| 4 | 0 | -1,992E-06    | 2,288E-06  | -1,213E-04 | -1,512E-08 | 4,313E-08  |
| 4 | 1 | 5,409E-09     | -4,141E-07 | 2,545E-06  | -3,486E-10 | 8,582E-09  |
| 5 | 0 | 2,951E-07     | -6,412E-07 | 2,235E-07  | -1,012E-09 | 7,654E-09  |

Tabela 2.1: Coeficientes  $C_{ij}$  da equação polinomial de Melinder [52]

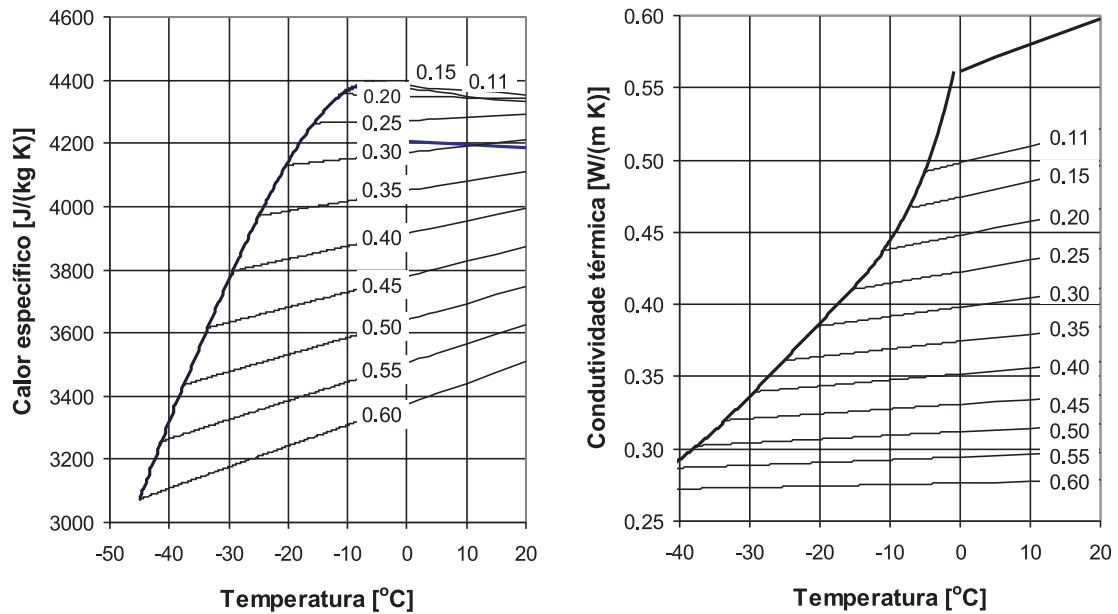


Figura 2.2: Calor específico e condutividade térmica de uma solução etanol-água obtidos com a Eq. 2-7, proposta por Melinder [52]. Os números na figura representam linhas de fração em massa do soluto constante.

## 2.2

### Propriedades Termofísicas da pasta de gelo

As propriedades termofísicas da pasta de gelo são calculadas a partir das propriedades termofísicas da solução aquosa e do gelo puro. Em alguns casos, as propriedades da pasta de gelo podem ser determinadas por ponderação linear de tais propriedades.

#### 2.2.1

##### Temperatura de solidificação da pasta de gelo

A Fig. 2.3 mostra a variação da temperatura de solidificação com a concentração de uma solução aquosa de etanol. A figura foi levantada com dados tomados do Handbook of Chemistry and Physics CRC [48], e com dados obtidos segundo a equação 2-7, proposta por Melinder [52].

Como pode ser observado, apresentam uma boa concordância. Outras soluções aquosas apresentam curvas similares. Observa-se que o incremento da concentração do soluto baixa a temperatura de solidificação da solução aquosa. Tal comportamento continua até que se atinge uma concentração onde a água e o soluto formam uma solução eutética, como observado no



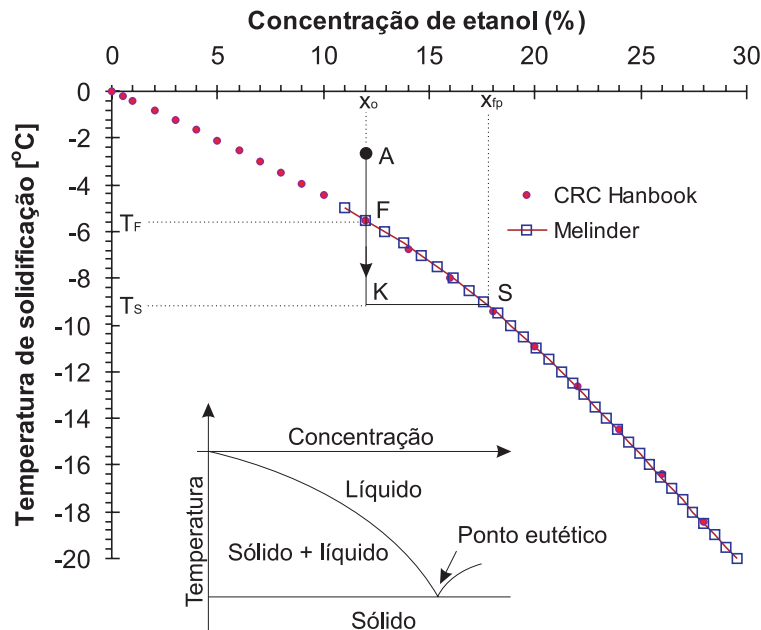


Figura 2.3: Variação da temperatura de solidificação com a concentração de uma solução aquosa de etanol, e diagrama de fase de uma solução aquosa.

detalhe da figura 2.3. No caso de soluções aquosas de etanol, a concentração eutética corresponde a 93,5% e à temperatura de  $-118\text{ }^{\circ}\text{C}$  [26]. Concentrações maiores que a eutética geralmente não são de interesse em aplicações com pasta de gelo [53].

Apresenta-se, no diagrama da Fig. 2.3, uma análise do processo de uma solução com concentração  $x_o$  sendo resfriada de um ponto (A), até o ponto de solidificação (F), e depois, até abaixo daquela temperatura, ponto (K). Se a temperatura for reduzida abaixo do ponto de solidificação e o processo se realiza em equilíbrio, uma separação das fases ocorre. Considera-se, idealmente, que a pasta de gelo esteja constituída por cristais de gelo (água pura) sem traços do soluto [53, 5]. O soluto resultante do processo de separação, como mostra a Fig.2.4, aumenta a concentração no fluido portador, denominação esta que se dá à solução aquosa em que estão suspensos os cristais de gelo.

Na temperatura correspondente ao ponto (K), na Fig. 2.3, tem-se cristais de gelo com concentração de soluto nula e fluido portador com concentração  $x_{fp}$ .

Uma conseqüência da consideração anterior é que a solução aquosa não se solidifica como um bloco sólido quando a temperatura do ponto de solidificação é transposta. O que ocorre é a formação de uma pasta

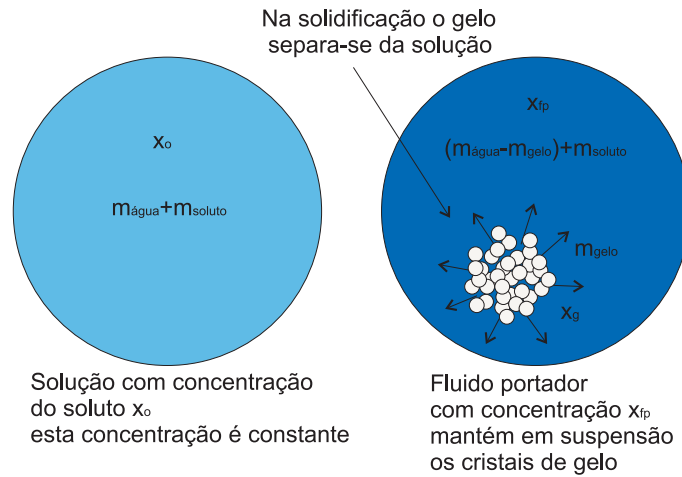


Figura 2.4: A formação dos cristais de gelo muda a concentração do fluido portador.

de gelo, como corresponde à fase sólido-líquido no diagrama de fases da Fig. 2.3. Se a concentração for eutética e a temperatura for mais baixa que a temperatura correspondente ao ponto eutético, a solução solidifica-se totalmente.

Apresentadas as considerações anteriores, tem-se uma concentração total do soluto na solução aquosa, que não muda com a fração de gelo, ( $x_o$ ), e uma concentração de fluido portador, ( $x_{fp}$ ). Esta variável muda com a fração de gelo, ( $x_g$ ), visto que, como explicado anteriormente, o soluto separa-se da solução, o que incrementa a concentração do soluto no fluido restante.

As variáveis  $x_o$ ,  $x_{fp}$  e  $x_g$  estão relacionadas pela expressão a seguir [54, 53]:

$$x_{fp} = \frac{x_o}{1 - x_g} \tag{2-10}$$

### 2.2.2 Massa específica da pasta de gelo

Em sistemas compreendidos por N fases, a massa específica da mistura pode ser avaliada utilizando-se a seguinte relação [26]:

$$\frac{1}{\rho} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{\rho_i} \tag{2-11}$$

onde:

$x_i$  é a fração mássica do componente  $i$ ;

$\rho_i$  é a massa específica do componente  $i$ .

A pasta de gelo, sendo um sistema binário, tem sua massa específica determinada pela seguinte equação:

$$\rho_{pg} = \frac{1}{\frac{x_g}{\rho_g} + \frac{1 - x_g}{\rho_{fp}}} \quad (2-12)$$

A Fig. 2.5 mostra a variação da massa específica da pasta de gelo, com diferentes valores da concentração do soluto (etanol) e da temperatura. A linha que corresponde à água pura apresenta uma descontinuidade. Isto é devido à mudança de fase, onde a massa específica do gelo é menor que massa específica da água em estado líquido.

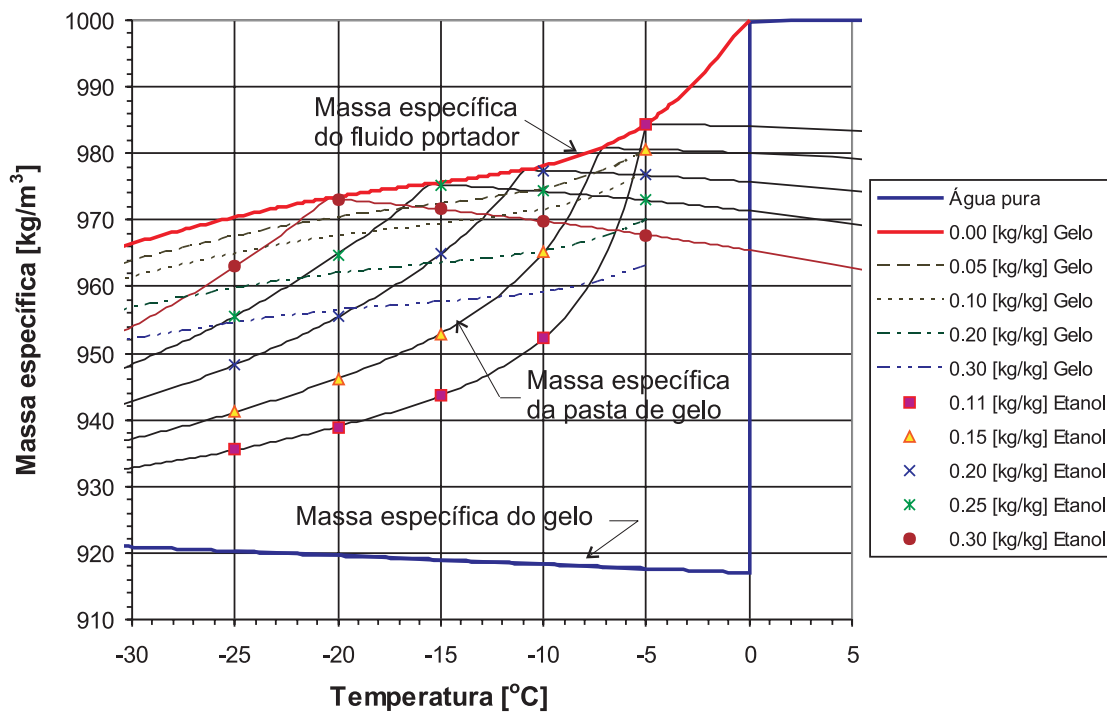


Figura 2.5: Massa específica da pasta de gelo com uma solução etanol-água.

### 2.2.3

#### Condutividade térmica da pasta de gelo

Os valores da condutividade térmica da pasta de gelo são obtidos a partir das seguintes equações (assumindo que as partículas de gelo

sejam esféricas), formuladas por Perry & Chilton [55]. Na literatura esta formulação foi utilizada por vários pesquisadores entre eles Kauffeld & Hansen [54] e Melinder [7].

$$k = k_{fp} \cdot \frac{1 + 2 \cdot \varphi_g \cdot y}{1 - \varphi_g \cdot y} \quad (2-13)$$

onde o termo  $y$  é avaliado pela seguinte relação:

$$y = \frac{1 - \frac{k_{fp}}{k_g}}{2 \frac{k_{fp}}{k_g} + 1} \quad (2-14)$$

e  $\varphi_g$  é a concentração volumétrica de gelo, dada por:

$$\varphi_g = \frac{x_g}{x_g + (1 - x_g) \frac{\rho_g}{\rho_{fp}}} \quad (2-15)$$

Aplicando-se as equações 2-13 a 2-15 chega-se à Fig. 2.6. Observa-se que a figura ilustra uma vantagem importante da pasta de gelo: sua condutividade térmica é maior do que a da solução em fase líquida. Esta característica, aliada à possibilidade de a pasta de gelo escoar como um fluido monofásico, favorece o mecanismo de troca de calor com uma superfície.

## 2.2.4

### Entalpia da pasta de gelo

Uma das propriedades mais importantes da pasta de gelo, para avaliar sua capacidade de resfriamento, é sua entalpia específica.

Se for considerado o transporte de energia por meio de um fluido sem mudança de fase, a capacidade de resfriamento pode ser avaliada simplesmente usando-se a relação  $\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = \dot{V} \cdot (\rho \cdot c_p \cdot \Delta T)$ . Entretanto, o transporte de energia utilizando pasta de gelo envolve mudança de fase. A capacidade de resfriamento é, então, avaliada como sendo  $\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta h$ , que é uma forma simplificada da equação de conservação de energia. Esta expressão envolve a entalpia específica da pasta de gelo e considera o calor sensível e o calor latente de solidificação. Nesta equação tem-se que  $\dot{m}$  [kg/s] é a vazão mássica do escoamento,  $\dot{V}$  [m<sup>3</sup>/s] é o fluxo volumétrico,  $\Delta T$  [K] é a variação da temperatura do fluido entre a entrada e a saída,  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] é a massa específica e  $c_p$  [J/kg·K] é o calor específico do fluido.

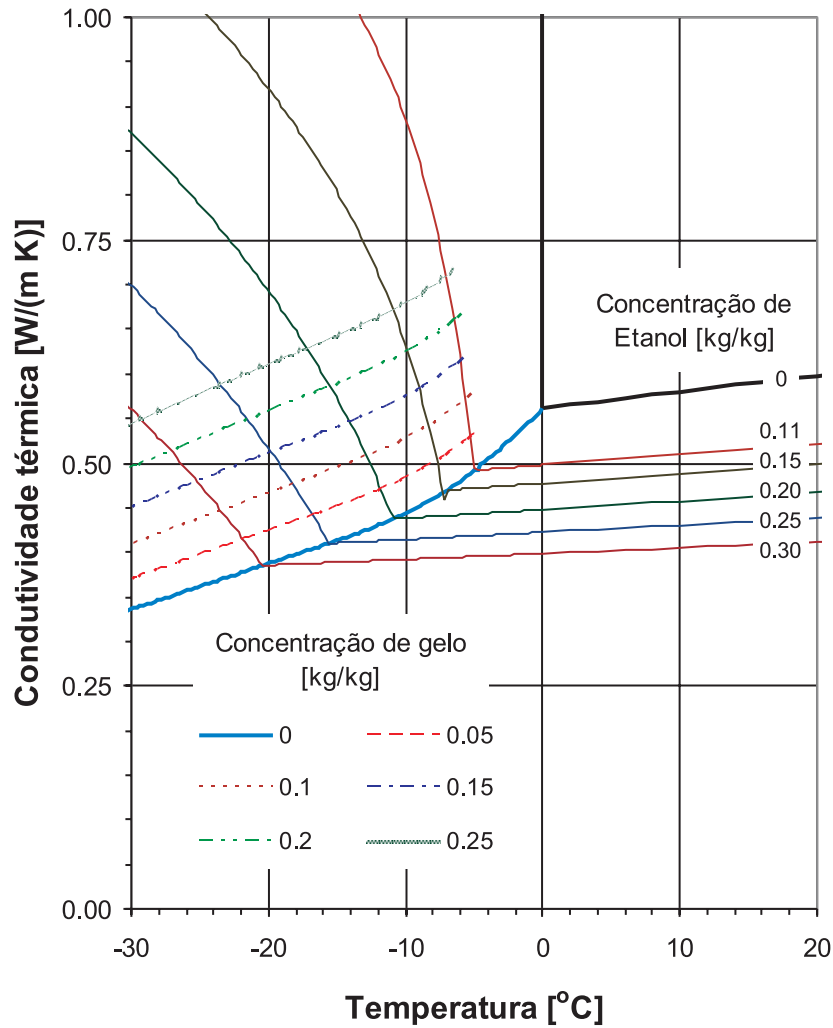


Figura 2.6: Condutividade térmica da pasta de gelo com solução etanol-água.

Para visualizar-se a vantagem de utilizar a entalpia de solidificação do gelo ou “calor latente” em aplicações da pasta de gelo, pode-se observar, na Fig. 2.7, o diagrama de fase entalpia-concentração de uma solução aquosa de cloreto de sódio. Este diagrama mostra linhas isotérmicas e linhas de fração de gelo constante. Tem-se a linha  $H_{Tmf}$ , que representa a linha de entalpia correspondente à temperatura de mudança de fase ( $x_g = 0$ ). As linhas  $H_{Tmf+10}$ ,  $H_{Tmf-1}$ ,  $H_{Tmf-3}$ ,  $H_{Tmf-5}$  e  $H_{Tmf-10}$  são linhas de entalpia na temperatura 10 °C acima e abaixo -1, -3, -5, -10 °C, respectivamente, da temperatura de mudança de fase de uma dada concentração de cloreto de sódio. A Fig. 2.7 permite ilustrar como, com uma variação de temperatura de poucos graus °C, com respeito à temperatura de mudança de fase, produz-se grandes variações de entalpia. Esta diferença de entalpias é tanto

maior quanto mais baixa for a concentração do soluto. Na referida figura mostra-se, como exemplo, que a variação de temperatura de 1 °C em uma pasta de gelo corresponde a uma variação de entalpia muito maior que a variação de temperatura de 10 °C da mesma solução com determinada concentração, sem mudança de fase. Para outras soluções aquosas, os diagramas e as conclusões são similares.

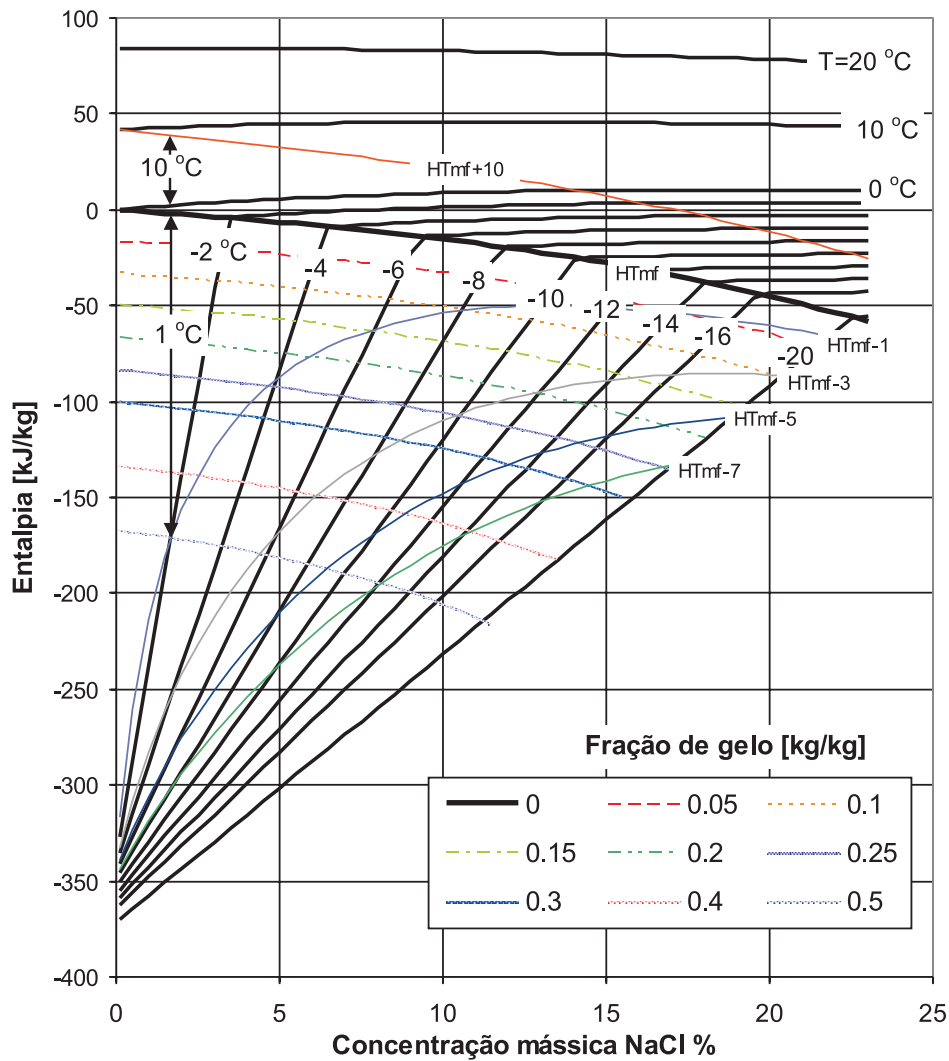


Figura 2.7: Diagrama de fase de entalpia de uma solução de cloreto de sódio-água.

Para se estimar a entalpia da pasta de gelo necessita-se do calor específico da solução aquosa, da entalpia do gelo e da entalpia de reação das soluções aquosas.

No que diz à entalpia de reação, alguns solutos, tais como álcoois, causam uma reação exotérmica quando são adicionados à solução. Já o cloreto de sódio produz uma reação endotérmica. Para estimar a entalpia específica da pasta de gelo, esta entalpia de reação tem que ser levada em conta. Conforme explicado, a fração de gelo na pasta de gelo muda a concentração do fluido portador, e por conseguinte, a entalpia de reação.

Na Fig. 2.7 nota-se que há uma variação da entalpia, da solução a 0 °C (isoterma), com a concentração do soluto. Precisamente, esta curva de variação de entalpia específica relaciona-se com a entalpia de reação da solução aquosa.

O diagrama de fase mostrado na Fig. 2.7 foi construído seguindo o procedimento que será relatado a seguir. Como já comentado, assume-se que a pasta de gelo é formada por cristais de gelo (isto é água pura). A entalpia de soluções aquosas é estimada a partir do calor específico da solução aquosa, da entalpia do gelo e da entalpia de reação da solução aquosa.

A entalpia da pasta de gelo, portanto, pode ser expressa como segue na seguinte equação [53]:

$$h_{pg} = h_g(T_g) \cdot x_g + h_{fp}(x_{fp}, T_{fp}) \cdot (1 - x_g) \quad (2-16)$$

onde  $h_g(T_g)$  é a entalpia do gelo, (Eq. 2-6), a qual considera a entalpia de fusão do gelo (332,4 kJ/kg) e seu calor específico.

O termo  $h_{fp}(x_{fp}, T_{fp})$  é a entalpia do fluido portador, que pode ser expressa como:

$$h_{fp}(x_{fp}, T_{fp}) = h_{0,Ref} + \Delta h_M(x_{fp}, T_{Ref}) + \int_{T_{Ref}}^{T_{fp}} c_{pfp} dT \quad (2-17)$$

onde  $h_{0,Ref}$  é a entalpia da água pura à temperatura de referência, ou seja, é a entalpia de referência e

$\Delta h_M(x_{fp}, T_{Ref})$  é a entalpia de reação para a concentração  $x_{fp}$ , à temperatura de referência.

A entalpia de reação para soluções aquosas,  $\Delta h_M$ , usualmente para  $T_{Ref} = 0$  ou 25 °C, está disponível na literatura. Bel & Lallemand [26]

forneem a entalpia de reação para soluções aquosas de etanol à temperatura de referência de  $T_{Ref} = 0$  °C, utilizadas no presente trabalho, com a equação seguinte:

$$\Delta h_M(x_{fp}, T_{Ref} = 0) = -390,85x_{fp} + 950,5x_{fp}^2 - 647,96x_{fp}^3 \quad (2-18)$$

onde  $\Delta h_M$  está em [kJ/kg]

No termo  $\int_{T_{Ref}}^{T_{fp}} cp_{fp} dT$  integra-se o calor específico do fluido portador  $cp_{fp}$ , ao longo do intervalo de temperatura. O calor específico é determinado a partir da equação polinomial de Melinder [52], (Eq. 2-7 e tabela de coeficientes Tab. 2.1 ).

Todo este procedimento de cálculo da entalpia específica da pasta de gelo foi implementado em um conjunto de macros no Microsoft® Excel 2002. A entalpia é estimada a partir de duas variáveis intensivas, a concentração de etanol ( $x_o$ ) e a temperatura da pasta de gelo ( $T_{pg}$ ) com uma função macro.

A Fig. 2.8 mostra a variação da entalpia da pasta de gelo de soluções aquosas de etanol-água, para diferentes temperaturas e diferentes concentrações de etanol. As Figs. 2.7 e 2.8 foram geradas segundo o procedimento descrito acima, de cálculo da entalpia específica da pasta de gelo.

### 2.2.5

#### Calor específico aparente da pasta de gelo

O calor específico aparente da pasta de gelo é calculado derivando-se numericamente a Eq. 2-19. Devido à entalpia de solidificação ou calor latente, o calor específico apresenta uma descontinuidade no início da mudança de fase, como pode ser observado na Fig. 2.10. Esta propriedade é utilizada para determinar o número de Prandtl da pasta de gelo.

$$c_{p.pg} = \frac{\partial h_{pg}}{\partial T} \quad (2-19)$$



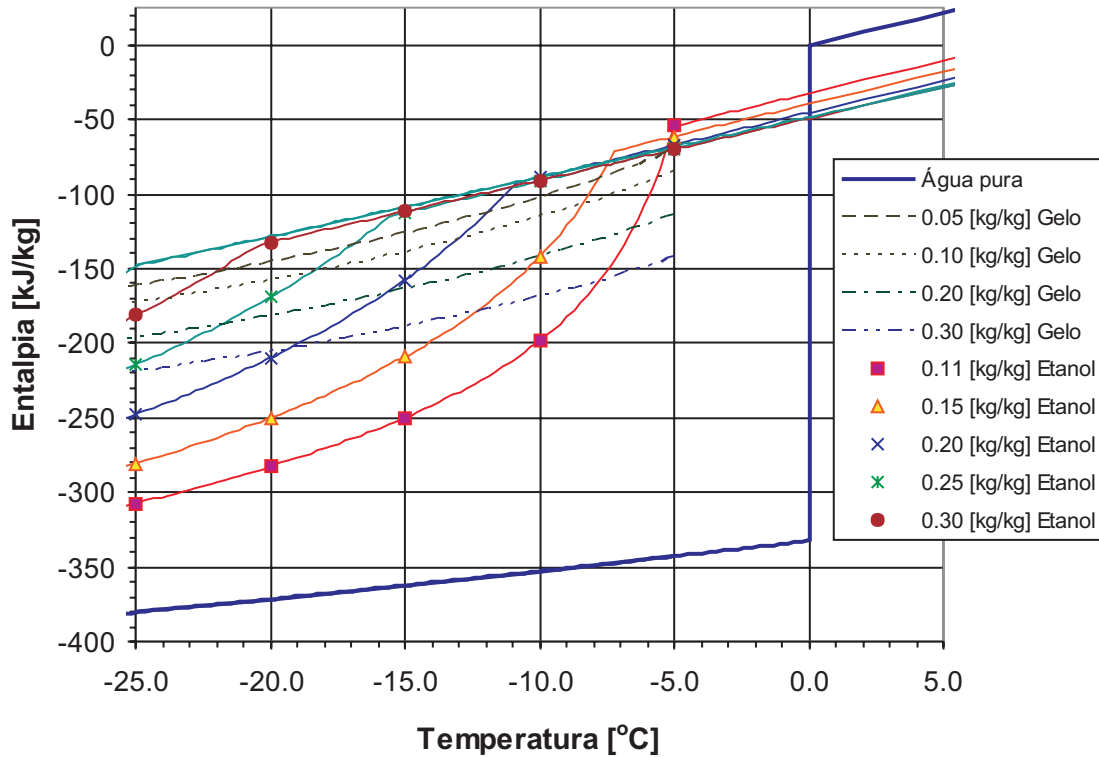


Figura 2.8: Entalpia da pasta de gelo de uma solução etanol-água.

### 2.2.6 Viscosidade dinâmica da pasta de gelo

O efeito na viscosidade de um líquido submetido à inserção de partículas esféricas, formando uma suspensão, foi estudado primeiro por Einstein [56]. Ele considerou que as partículas estão suficientemente distantes uma das outras e que o movimento de uma partícula não influencia o movimento das outras partículas e, baseado nestas considerações, propôs uma relação para a viscosidade relativa da suspensão e o fluido, a saber:

$$\mu_r = \frac{\mu_{susp}}{\mu_{fluido}} = 1 + 2,5\varphi \quad (2-20)$$

onde  $\mu_{susp}$  e  $\mu_{fluido}$  são a viscosidade dinâmica da suspensão e do fluido respectivamente e  $\varphi$  é a concentração (ou fração de volume) da fase sólida (partículas) na mistura sólido-líquido.

Entretanto, a equação de Einstein somente é válida para  $\varphi$  menores que 0,01 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>].

Thomas [57] apresenta uma relação, como uma extensão do trabalho

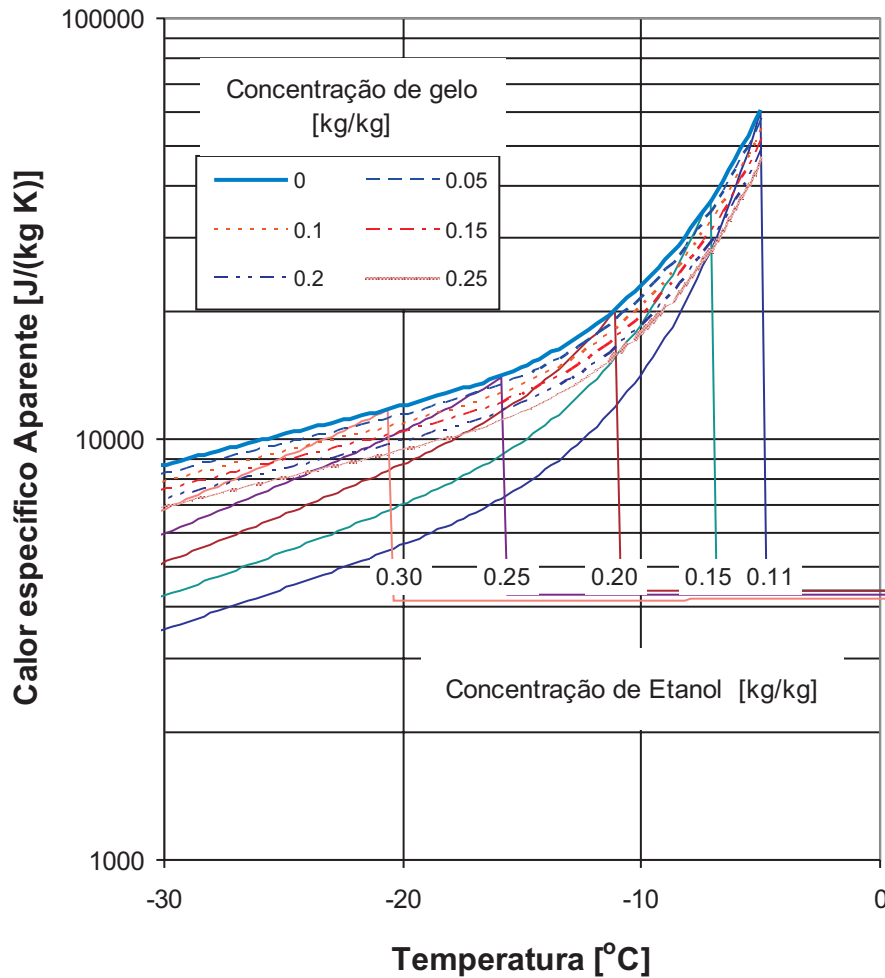


Figura 2.9: Calor específico aparente da pasta de gelo.

de Einstein [56], para determinar a viscosidade dinâmica da pasta de gelo, na relação a seguir:

$$\mu_{pg} = \mu_{fp}(1 + 2,5 \cdot \varphi_g + 10,05 \cdot \varphi_g^2 + 2,73 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(16,6 \cdot \varphi_g)) \quad (2-21)$$

onde  $\varphi_g$  é a fração de gelo em volume [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>] e  $\mu_{fp}$  é a viscosidade dinâmica do fluido portador.

A Fig. 2.10 mostra a variação da viscosidade dinâmica com a temperatura. Esta figura foi gerada a partir da Eq. 2-21. Observa-se o aumento significativo da viscosidade dinâmica  $\mu_{pg}$  com a fração de gelo  $x_g$  [kg/kg], o que se traduz no aumento da potência de bombeamento.

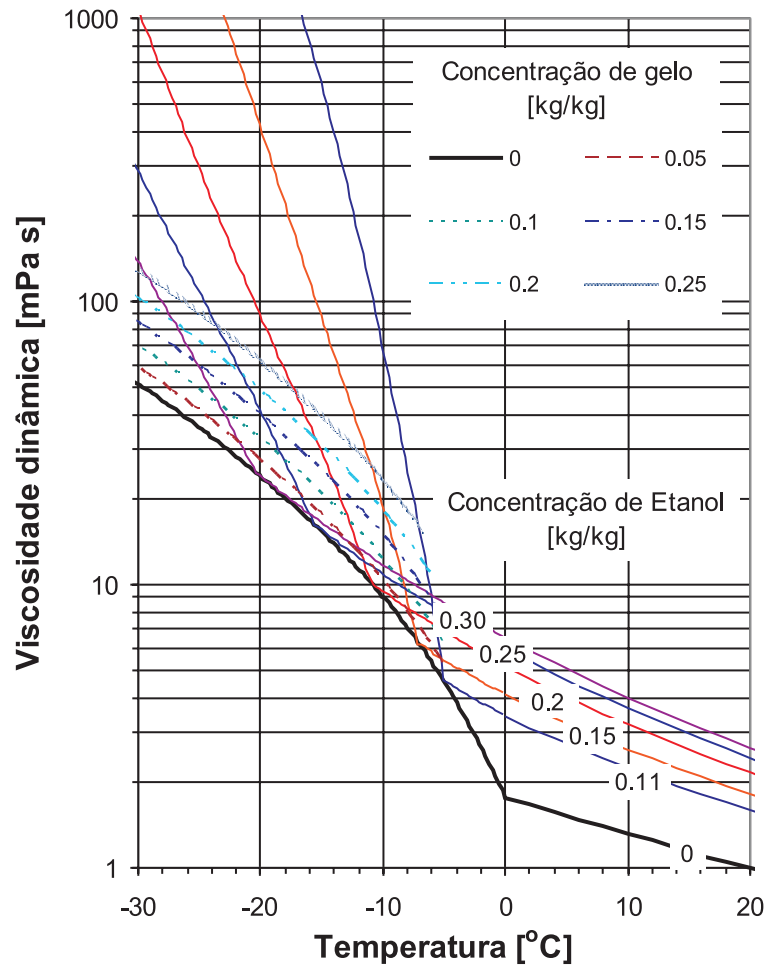


Figura 2.10: Viscosidade dinâmica da pasta de gelo.