

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**, ρ_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[®] 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).

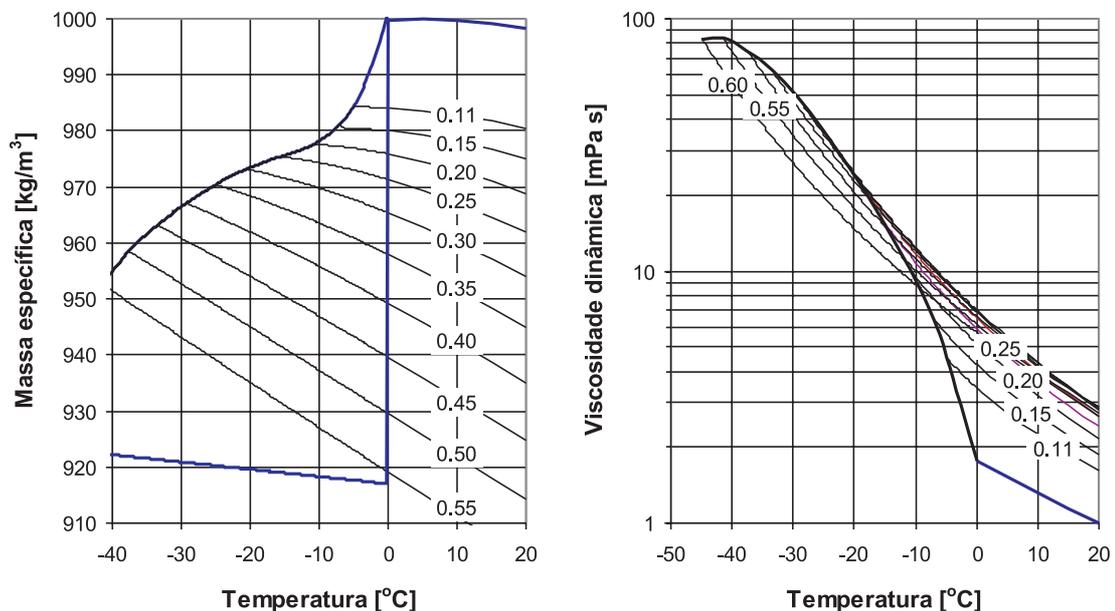


Figura 2.1: Massa específica e viscosidade dinâmica de uma solução etanol-água obtidas com a Eqs. 2-7 e 2-9, propostas por Melinder [52]. Os números na figura representam as linhas de fração em massa do soluto constante.

Parâmetros de ingresso

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

i	j	Conc	ρ	c_p	k	μ
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

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

i	j	$T_{solidif}$	ρ	c_p	k	μ
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]

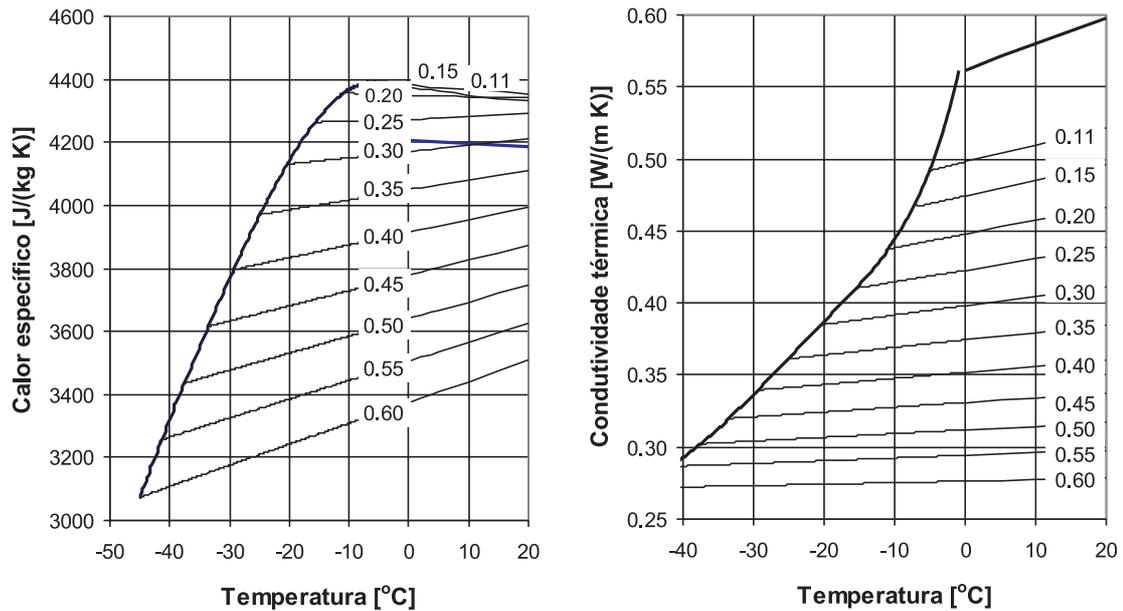


Figura 2.2: Calor específico e condutividade térmica de uma solução etanol-água obtidos com a Eq. 2-7, proposta por Melinder [52]. Os números na figura representam linhas de fração em massa do soluto constante.

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

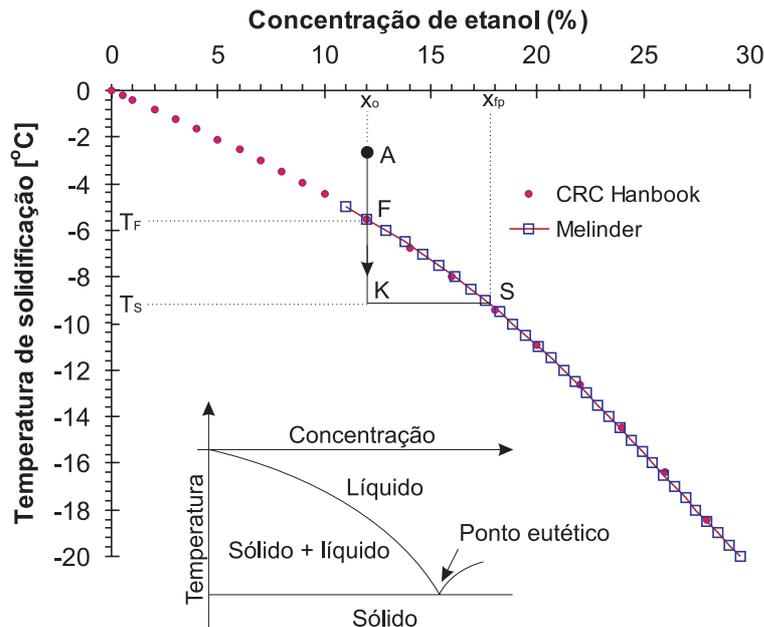


Figura 2.3: Variação da temperatura de solidificação com a concentração de uma solução aquosa de etanol, e diagrama de fase de uma solução aquosa.

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 consequência 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

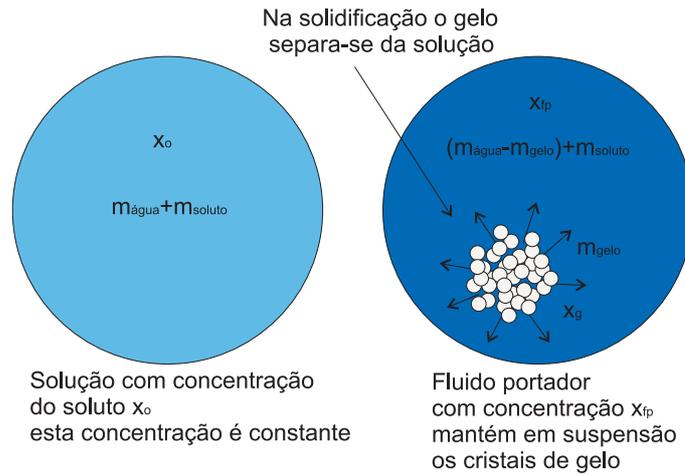


Figura 2.4: A formação dos cristais de gelo muda a concentração do fluido portador.

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]:

$$x_{fp} = \frac{x_o}{1 - x_g} \quad (2-10)$$

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]:

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

onde:

x_i é a fração mássica do componente i ;

ρ_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.

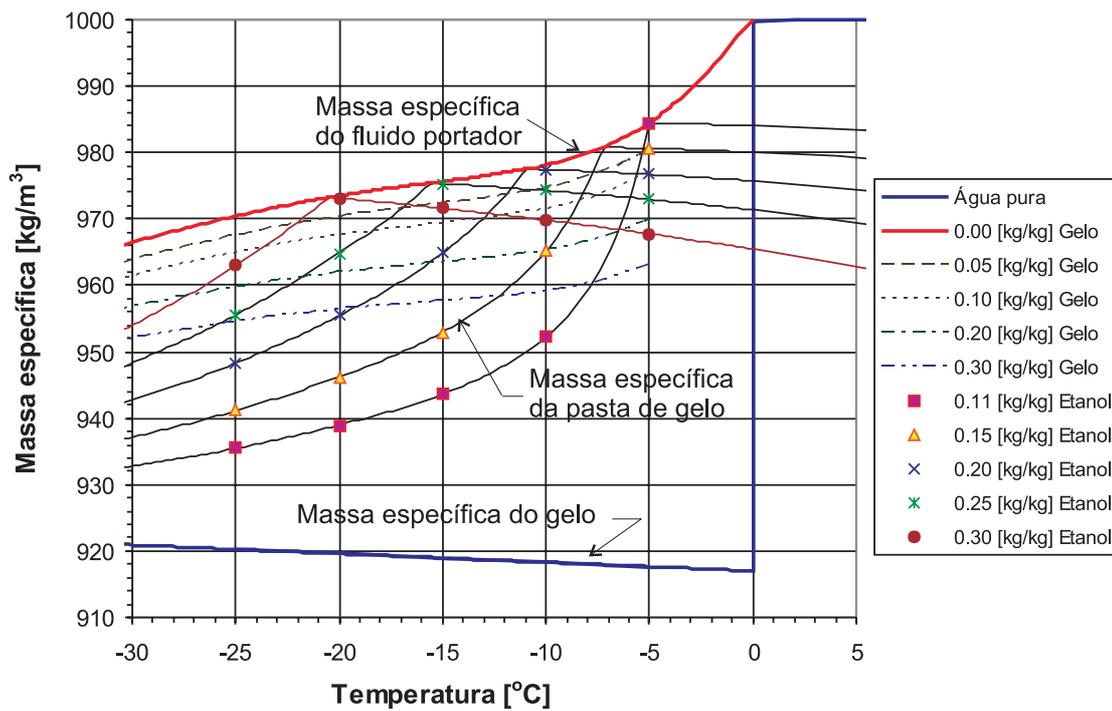


Figura 2.5: Massa específica da pasta de gelo com uma solução etanol-água.

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 φ_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} [m³/s] é o fluxo volumétrico, ΔT [K] é a variação da temperatura do fluido entre a entrada e a saída, ρ [kg/m³] é a massa específica e c_p [J/kg·K] é o calor específico do fluido.

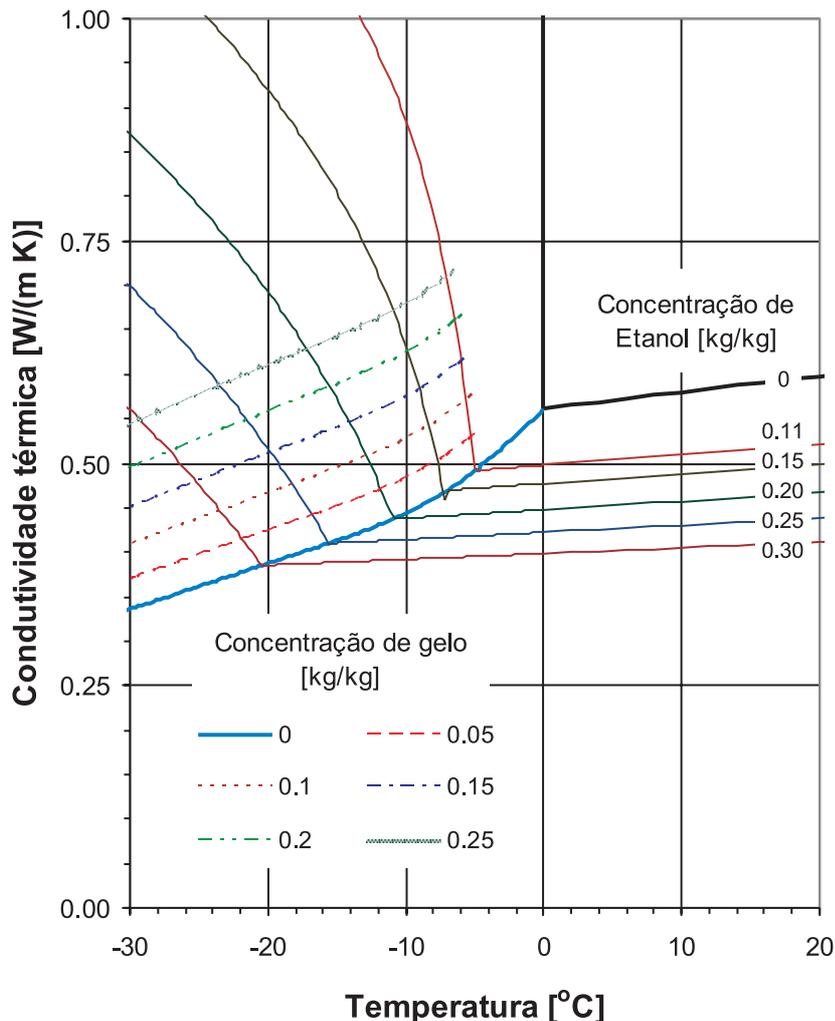


Figura 2.6: Condutividade térmica da pasta de gelo com solução etanol-água.

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 $H_{T_{mf}}$, que representa a linha de entalpia correspondente à temperatura de mudança de fase ($x_g = 0$). As linhas $H_{T_{mf}+10}$, $H_{T_{mf}-1}$, $H_{T_{mf}-3}$, $H_{T_{mf}-5}$ e $H_{T_{mf}-10}$ 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.

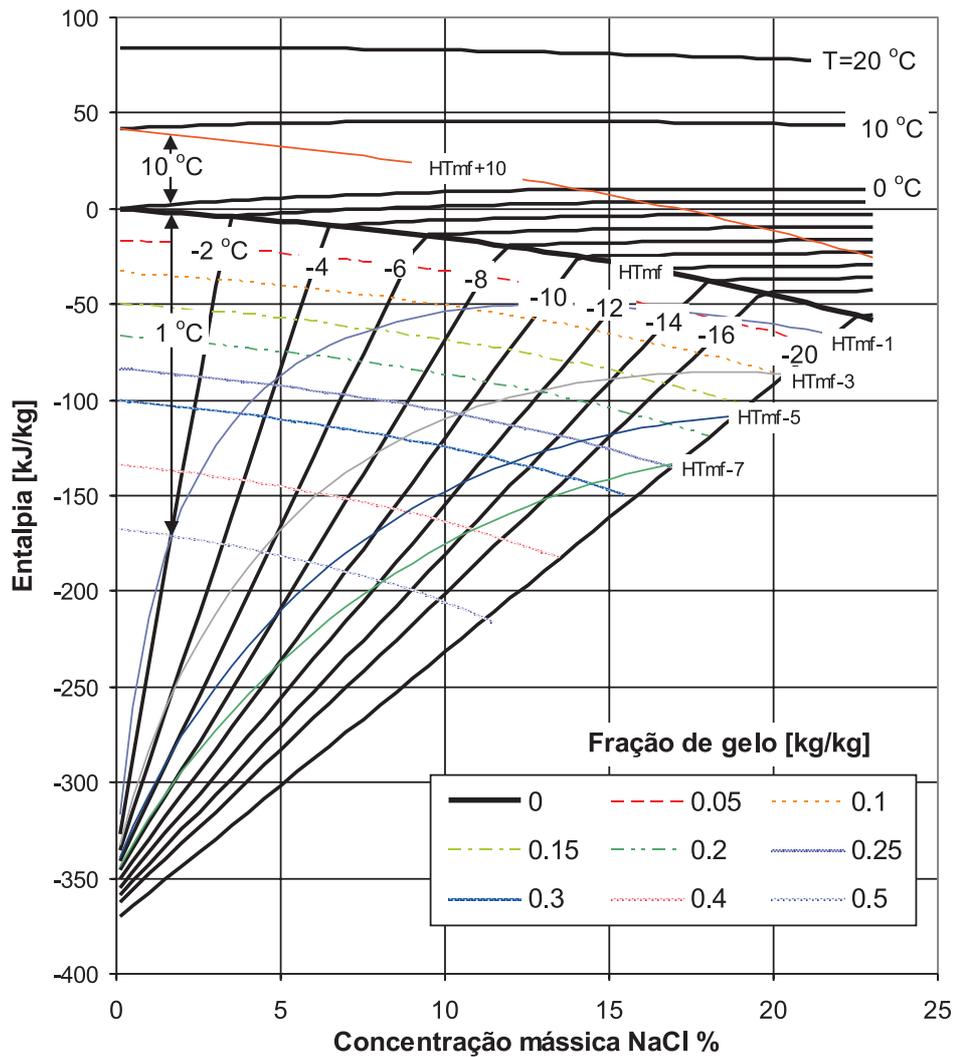


Figura 2.7: Diagrama de fase de entalpia de uma solução de cloreto de sódio-água.

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, Δh_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 Δh_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.

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

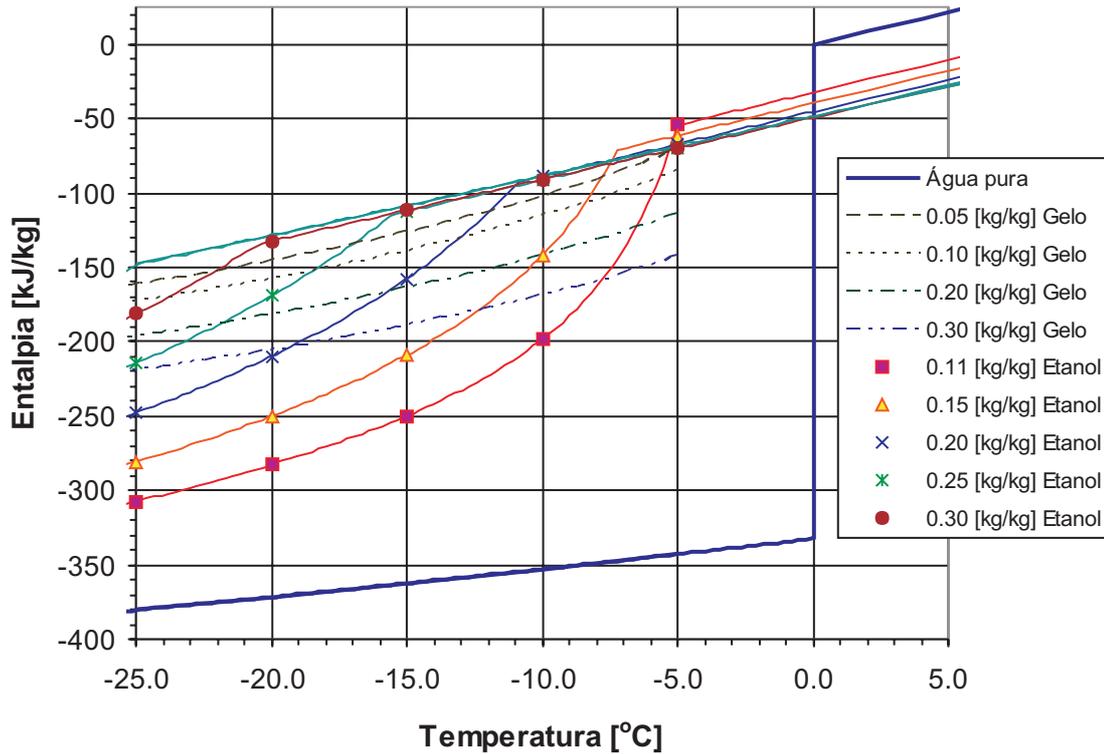


Figura 2.8: Entalpia da pasta de gelo de uma solução etanol-água.

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

Entretanto, a equação de Einstein somente é válida para φ menores que 0,01 [m³/m³].

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

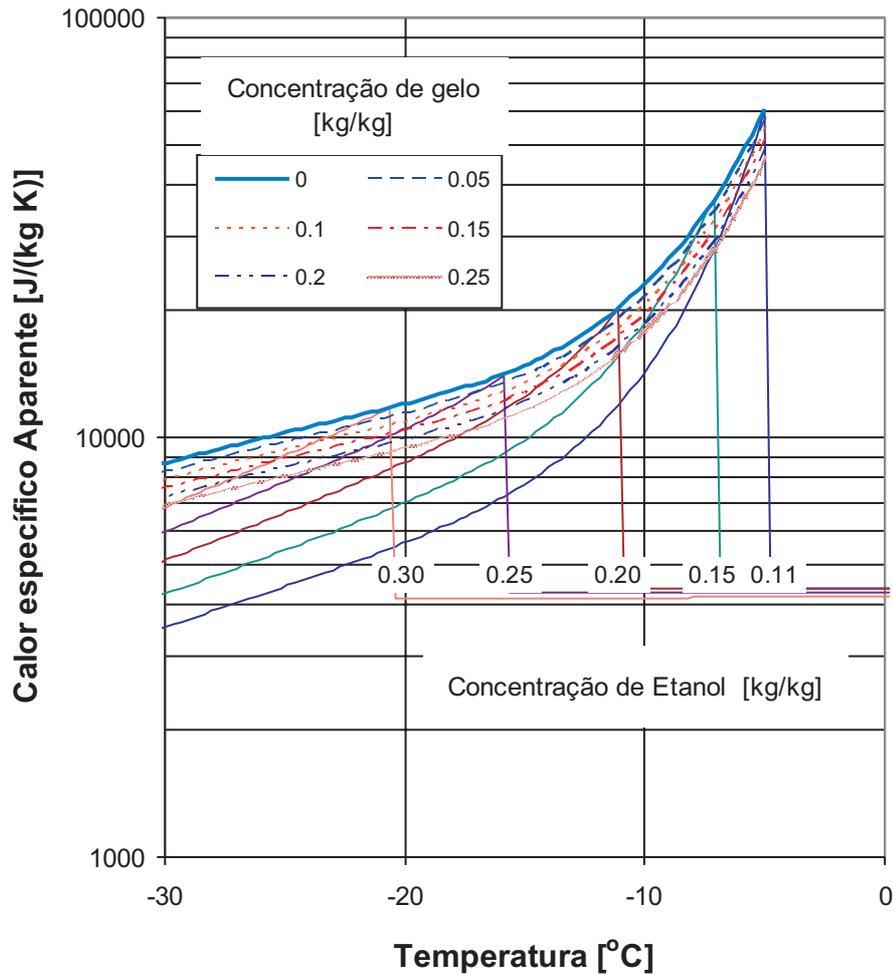


Figura 2.9: Calor específico aparente da pasta de gelo.

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 φ_g é a fração de gelo em volume [m³/m³] e μ_{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 μ_{pg} com a fração de gelo x_g [kg/kg], o que se traduz no aumento da potência de bombeamento.

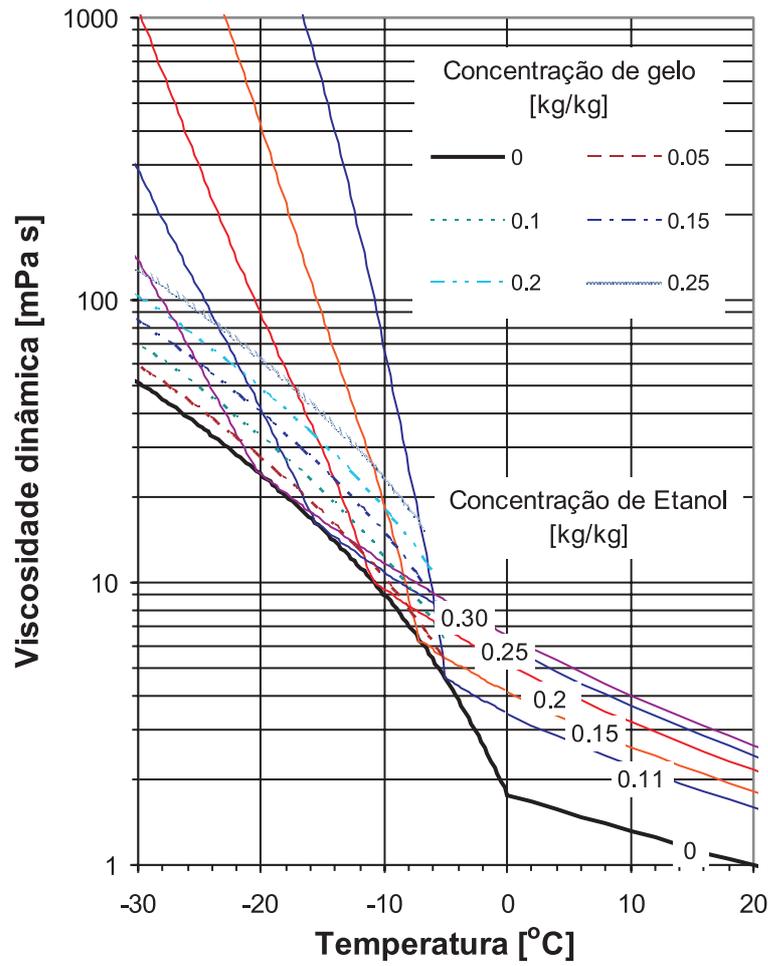


Figura 2.10: Viscosidade dinâmica da pasta de gelo.