

DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE UN HIELO LÍQUIDO FORMADO A PARTIR DE AGUA Y NaCl. ESTUDIO TEÓRICO – EXPERIMENTAL.

Sánchez Recarte, I.; Torres de María, G.; Abril Requena, J.; Casp Vanaclocha, A.

Tecnología de Alimentos. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos.
Universidad Pública de Navarra. Campus Arrosadía s/n. 31006. Pamplona, España.
Autor de Contacto: acasp@unavarra.es

1. Introducción.

El hielo líquido se puede definir como una mezcla de partículas de hielo y una solución acuosa. Esta solución se compone de agua con uno o más solutos que provoquen la depresión del punto de congelación, para permitir el descenso de temperatura a rangos negativos y por consiguiente la coexistencia de una fase sólida y otra líquida. Debido a estas características, el fluido se puede transportar por tubería, bombear, y almacenar en tanques.

La dificultad en el estudio de las propiedades termofísicas de los hielos líquidos reside esencialmente en dos aspectos: son fluidos multicomponentes (binarios, ternarios, etc.) y difásicos, por lo que a efectos de su estudio se deben conjugar las características de los fluidos monofásicos (agua - NaCl, agua - etanol, etc.) y de los sólidos (partículas de hielo), mediante estudios experimentales y teóricos.

Casi la práctica totalidad de aportaciones presentes en la literatura se centran en la determinación de propiedades de hielos líquidos formados con agua y etanol (Egolf, 1996, Bel, 1996; Ben Lakhdar, 1998; Guilpart, 1999), mientras que son escasas las correspondientes a aquellos formados mediante agua y NaCl (Lucas, 1998), y no de forma directa. Debido al proceso de generación del hielo líquido las características del mismo varían, lógicamente, respecto al comportamiento de una solución de agua y NaCl llevada a temperaturas menores a su punto de congelación, por lo que es necesario conocer el comportamiento y las características de estos fluidos.

2. Materiales y Métodos.

Como equipo de producción de hielo líquido se empleó el generador STS Miniligs B103, de 6 kW de potencia, producción de 4,8 T de hielo diarias, a una concentración máxima de hielo del 40%. El hielo líquido se genera en un evaporador de superficie rascada que emplea como refrigerante el R 404A.

Las medidas de densidad de la muestra de agua y sal se tomaron mediante un densímetro PROTON, mientras que las medidas de concentración de NaCl en la fase líquida del fluido se realizaron mediante un Reflectómetro portátil ATAGO S10 y un conductivímetro CRISON GLP32. Las temperaturas se tomaron con sondas PT100 y un adquirente AMR ALMENO 2290-8V5.

3. Resultados y Discusión.

3.1. Fracción másica y volúmica de hielo.

Algunos autores, como Egolf (1996) o Ben Lakhdar (1998), asumen que el hielo formado a partir de una solución binaria se compone de agua pura. Si adoptamos esta simplificación, el hielo líquido se comportaría como una suspensión de cristales de hielo puro en una solución acuosa. Al realizarse el proceso de generación, la solución acuosa

de partida se va concentrando progresivamente, hasta que, tras la generación, alcanza una concentración final. Esta concentración decrecerá conforme se funda el hielo contenido en el fluido.

Por lo tanto, aplicando un balance de materia al sistema, se obtiene que una solución con una concentración inicial de soluto X_s^i llevada a una temperatura inferior a la de su punto de congelación contendrá una fracción másica de hielo X_h según la siguiente expresión:

$$X_h^{(X_s^i, t)} = 100 \left(1 - \frac{X_s^i}{X_s^r}\right) \quad [\%] \quad (1)$$

X_s^i : concentración inicial de soluto (m/m)

X_s^r : concentración de soluto en la solución residual (m/m)

La expresión anterior aplicada a la fracción volúmica, para una concentración inicial de sal y a tiempo determinado se muestra a continuación:

$$V_h^{(X_s^i, t)} = 100 X_h^{(X_s^i, t)} \frac{\rho_{hl}^{(X_s^i, t)}}{\rho_h^{(X_s^i, t)}} \quad [\%] \quad (2)$$

ρ_{hl} : densidad del hielo líquido (kg/m^3)

ρ_h : densidad del hielo (kg/m^3)

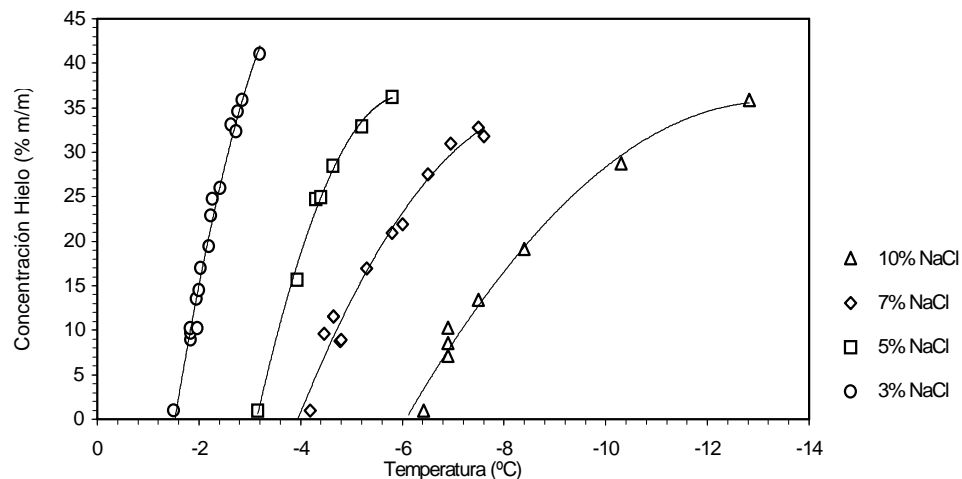


Fig. 1. Variación de la fracción másica de hielo con la temperatura para varias concentraciones iniciales de NaCl.

3.2. Densidad.

En el caso de sistemas con N fases, la densidad de la mezcla se puede determinar a partir de la relación siguiente:

$$\frac{1}{\rho} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_i}{\rho_i} \right) \quad (3)$$

Por tanto, la densidad del fluido para una temperatura determinada viene dada por:

$$\frac{1}{\rho_{hl}} = \frac{X_h}{\rho_h} + \frac{1-X_h}{\rho_i} \quad \longrightarrow \quad \rho_{hl} = \left[\frac{X_h}{\rho_h} + \frac{1-X_h}{\rho_i} \right]^{-1} \quad [\text{Kg/m}^3] \quad (4)$$

ρ_{hl} : densidad hielo líquido.

X_h : fracción másica de hielo.

ρ_i : densidad agua-NaCl.

ρ_h : densidad del hielo.

La fase sólida está formada por hielo puro. Adoptaremos la ecuación de variación de densidad del hielo en función de la temperatura de Levy (1982).

$$\rho_h = 917(1 + 1,73 \cdot 10^{-4} T) \quad [\text{Kg/m}^3] \quad (5)$$

La fase líquida está formada por una solución de agua y NaCl. La variación de densidad de ésta se obtuvo de Melinder (1997).

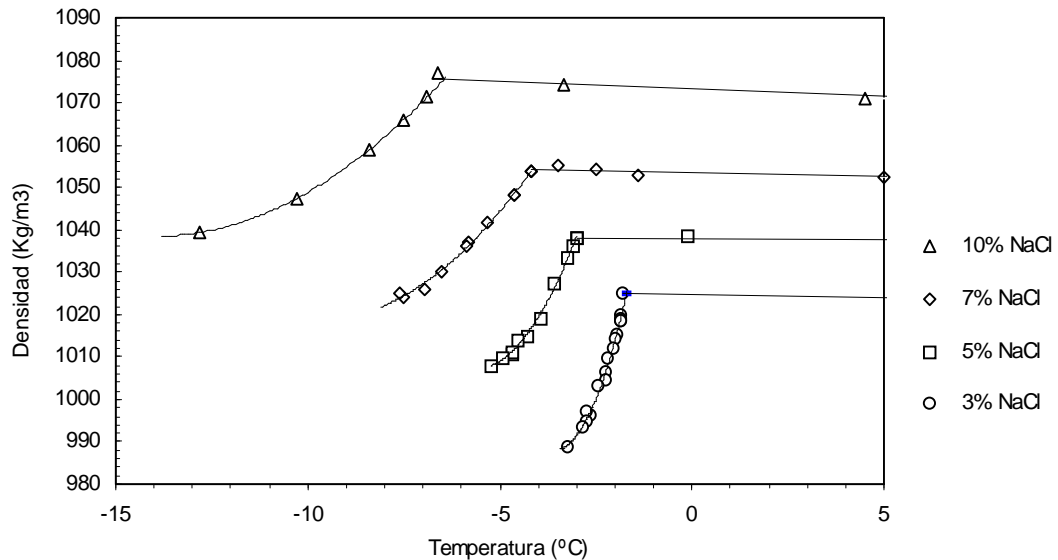


Fig. 2. Variación de la densidad del hielo líquido con la temperatura para varias concentraciones iniciales de NaCl.

3.3. Punto de congelación.

La temperatura de congelación de una mezcla se define como aquella a la que se forma el primer cristal de hielo. El punto de congelación de una solución de agua-NaCl fue estudiado por varios autores, hasta un rango de concentraciones elevadas de NaCl (23%). Lucas (1998) adopta la expresión mostrada en ASHRAE (1983), por considerarla bien ajustada a los valores experimentales.

$$T_{cc} = T_{sat} \{X_s^i\} = 0,027 - 46,30 X_s^i - 182,01 (X_s^i)^2 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (6)$$

3.4. Conductividad térmica.

Hasta el momento no tenemos conocimiento de ningún trabajo experimental sobre la conductividad térmica de un hielo líquido formado a partir de una solución de agua y NaCl. La validación experimental de los datos de conductividad térmica es difícil de realizar, debido a la inestabilidad del hielo líquido, que tiende a fundirse, y es asimismo proclive a experimentar una estratificación por fases durante el experimento perdiendo por lo tanto su homogeneidad.

Debido a esta problemática, Guilpart y col. (1999) proponen el cálculo de la conductividad térmica mediante la ecuación de Tareef citada en Perry (1973), aplicable a suspensiones sólido líquido:

$$\lambda_{hl} = \lambda_l \left[\frac{2\lambda_l + \lambda_h - 2V_h(\lambda_l - \lambda_h)}{2\lambda_l + \lambda_h + V_h(\lambda_l - \lambda_h)} \right] \quad [\text{W/m}^0\text{K}] \quad (7)$$

λ_{hl} : conductividad térmica del hielo líquido. λ_h : conductividad térmica del hielo.
 λ_l : conductividad térmica agua-NaCl. V_h : fracción volúmica de hielo.

Otros autores, como Bel y col. (1999) han utilizado la ecuación de Jeffrey (1973):

$$\lambda_{hl} = \lambda_l (1 + 3V_h\beta + 3V_h^2\beta^2\gamma) \quad [\text{W/m}^0\text{K}] \quad (8)$$

$$\beta = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 2}, \quad \alpha = \frac{\lambda_h}{\lambda_l}, \quad \gamma = 1 + \frac{\beta}{4} + \frac{3\beta}{16} \left(\frac{\alpha + 2}{2\alpha + 3} \right)$$

Se ha optado por la ecuación de Tareef por dos razones: es más fácil de utilizar, tiene un rango de utilización más amplio y tiende a aproximarse a los valores del hielo puro para concentraciones elevadas de hielo en el fluido.

La relación de conductividad térmica del hielo en función de la temperatura viene descrita en Alexiades y Solomon (1993):

$$\lambda_h = 2,24 + 5,975 \cdot 10^{-3} (273 + T)^{1,156} \quad [\text{W/m}^0\text{K}] \quad (9)$$

La conductividad térmica de la mezcla de agua y NaCl se obtuvo de Melinder (1997).

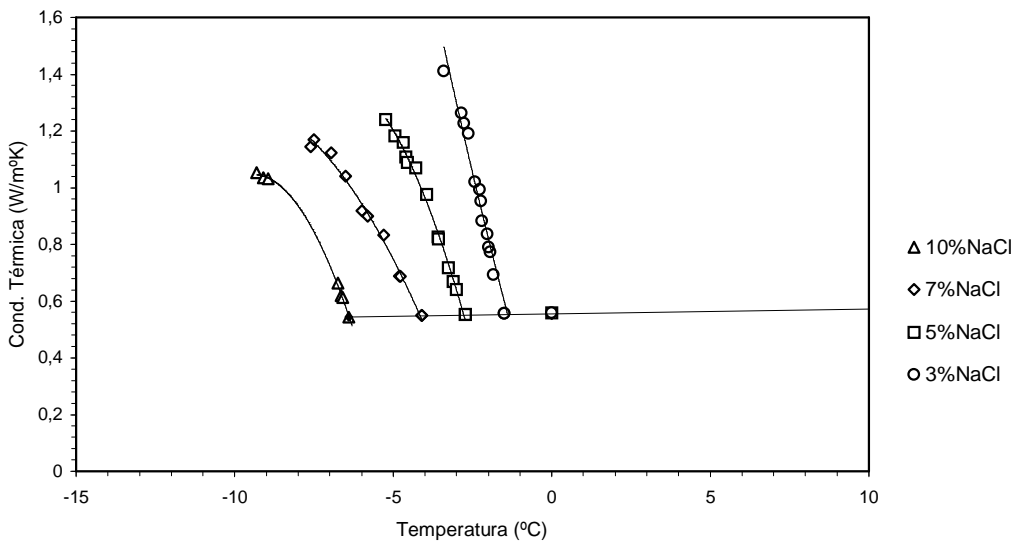


Fig. 3. Variación de la conductividad térmica del hielo líquido con la temperatura para varias concentraciones iniciales de NaCl.

3.5. Entalpía.

La entalpía del hielo líquido se puede considerar como la suma ponderada de las entalpías del hielo y de la fase líquida de agua-NaCl, a la misma temperatura, considerando el modelo entálpico de Bel (1996). Se toma como 0 (KJ/Kg) la entalpía de los cuerpos puros a 0 °C.

$$h_{hl} = (1 - x_h)h_l + x_h(-L_f + h_h) \quad [\text{KJ/Kg}] \quad (10)$$

h_{hl} : entalpía del hielo líquido. h_h : entalpía del hielo.
 h_l : entalpía agua-NaCl. L_f : calor latente de fusión hielo a 0 °C (333,6 KJ/Kg)
 x_h : fracción másica del hielo calculada por (1)

La entalpía de los cuerpos puros se obtiene a partir de su calor específico a una determinada temperatura T (en °C).

$$h = \int_0^T c_p \cdot dT \quad [\text{KJ/Kg}] \quad (11)$$

Para el cálculo del calor específico del hielo ($C_{p,h}$) adoptamos el modelo entálpico desarrollado por Bel y col. (1999):

$$c_{p,h} = 2,1162 + 0,0078 \cdot T \quad [\text{KJ/Kg}^\circ\text{K}] \quad (12)$$

El calor específico de la solución agua-NaCl se obtuvo de Melinder (1997).

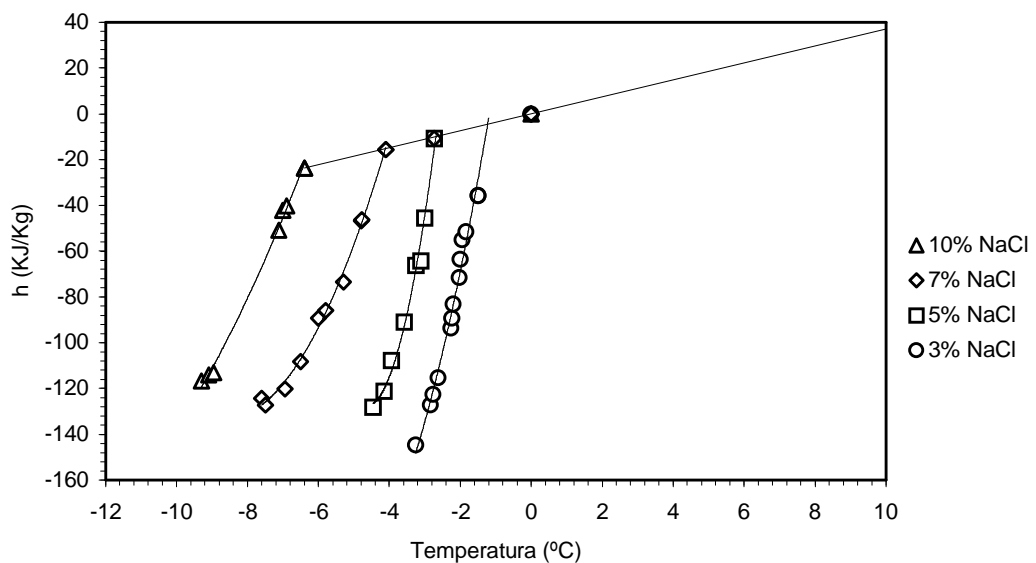


Fig. 4. Variación de la entalpía del hielo líquido con la temperatura para varias concentraciones iniciales de NaCl.

3.6. Calor específico.

El calor específico del hielo líquido se define como la cantidad de calor que es necesario suministrar a una unidad de masa del producto para elevar 1°K su temperatura considerando su cambio parcial de estado. Considera por lo tanto el calor latente y el

calor sensible del fluido. Debido al calor latente, el calor específico del hielo líquido no tiene una representación lineal.

Por definición, el cálculo del calor específico se puede obtener mediante la derivación de la entalpía:

$$c_{p,hl} = \left[\frac{\partial h_{hl}}{\partial T} \right] \quad [\text{KJ/Kg}^\circ\text{K}] \quad (13)$$

4. Conclusiones.

Se han determinado las características termofísicas de un hielo líquido formado a partir de agua-NaCl, para distintas concentraciones de sal y de hielo. Este trabajo se ha realizado asumiendo un comportamiento ideal del fluido basado en la homogeneidad de la mezcla entre las dos fases de cara a la aplicación de las expresiones teóricas.

A la vista de los resultados obtenidos se ha podido comprobar la similitud en el comportamiento entre los hielos líquidos formados a partir de la mezcla agua-NaCl y agua-etanol.

5. Referencias.

Alexiades, V., Solomon, A.D. (1993). "Mathematical Modelling of Melting and Freezing Processes". USA: Hemisphere Publishing Corporation, 321p.

ASHRAE. (1983). "ASHRAE Handbook - 1981 Fundamentals". Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc.

Bel, O. (1996). Contribution à l'étude du comportement thermohydraulique d'un mélange diphasique dans un boucle frigorifique à stockage diphasique. These de Doctorat: thermique et énergétique, INSA de Lyon, 1996, 235p.

Bel, O., Lamelland, A. (1999). Study of a two-phase secondary refrigerant. 1: Intrinsic thermophysical properties of an ice slurry. Int. J. Refrig.; 22(1999): 164-174.

Ben Lakhdar, M.A. (1998). Comportement thermohydraulique d'un fluide frigopporteur diphasique: le coulis de glace. Étude théorique et expérimentale. Th. Doct: Thermique et Energétique. INSA Lyon, 18 November 1998, 241 p.

Egolf, P.W., Brühlmeier, J., Özvegyi, F., Abächerli, F., Renold, P. (1996). Properties of ice slurry. Proc. 2nd Conf. On the Use of Non- Artificial Substances, Aarhus, DK, Session 12, pp. 517-526.

Guilpart, J., Fournaison, L., Ben Lakhdar, M.A. (1999). Calculation method of thermophysical properties for ice slurries application to water / ethanol mixture. Proceedings 20th International Congress of Refrigeration, Sydney, Volume II, Paper 342.

Jeffrey, D.J. (1973). Conduction through a random suspension spheres. Proc. R. Soc. London; Vol A335: 355-367.

Levy, F.L. (1982). Calculating the thermal conductivity of meat and fish in the freezing range. R. Int. Froid, 1982; 5(3): 149-154.

Lucas, T. (1998). Chilling and freezing by immersion in concentrated aqueous solutions: experimental characterization and modelling of heat and mass transfer. Th. Doct.: Génie Procédés agro-aliment., ENGREF Paris, 1998, 189 p.

Melinder, A. (1997). "Propriétés thermophysiques des frigopporteurs liquides". Paris, Institut Internationale du Froid, 122p.

Perry, R.H., Chilton, C.H. (1973). "Chemical Engineer's Handbook". 5th ed. Mc Graw-Hill Book Co., New York.