

Evaluación del comportamiento termo-fluidodinámico de un hielo líquido.

Fernando Illán Gómez⁽¹⁾, Antonio Viedma Robles⁽¹⁾, Pedro Martínez Martínez⁽²⁾

(1) ETSII-UPCT Campus Muralla del Mar, C/ Dr. Fleming s/n, 30202, Cartagena
Tel.: 968 32 59 95, Fax: 968 32 59 99

e-mail: fernando.illan@upct.es, web: <http://www.upct.es/~dif>

(2) EPS de Elche-UMH Avda. de la Universidad s/n, 03202, Elche

Resumen

Son muchos los trabajos efectuados hasta la fecha en los que se ha tratado de estudiar la influencia que diversos factores como caudal, diámetro de conducto o porcentaje de hielo pueden tener sobre los fenómenos de pérdida de presión y transmisión de calor para un hielo líquido circulando por el interior de tuberías circulares. Sin embargo, la mayoría de estos trabajos proporcionan resultados de gran interés científico, pero difícilmente extrapolables a situaciones distintas a las ensayadas, por lo que resultan poco útiles a la hora de abordar el diseño de una aplicación práctica de hielo líquido.

Partiendo de un análisis dimensional del problema, el trabajo que se presenta pretende determinar cuáles son las variables que influyen sobre los procesos de transmisión de calor y pérdida de carga en un hielo líquido, determinar esa influencia y presentar los resultados de forma que puedan emplearse como herramienta de diseño en instalaciones de hielo líquido. Para ello se ha estudiado el comportamiento de un hielo líquido generado a partir de una disolución al 3% de agua y NaCl, actuando sobre diversos factores como contenido másico en hielo, tamaño de los cristales, diámetro de los conductos o velocidad de circulación del fluido y se han adimensionalizado los valores obtenidos, tanto para la pérdida de presión (mediante el factor de fricción) como para la transmisión de calor (mediante el número de Nusselt).

Los resultados experimentales para el factor de fricción se han representado en un diagrama de Moody, y los datos experimentales para el número de Nusselt se han representado frente al número de Reynolds. Estos resultados se han comparado con los obtenidos anteriormente por otros investigadores, arrojando para la mayoría de los casos un adecuado nivel de concordancia.

Palabras clave: hielo líquido, aplicación industrial, análisis dimensional, pérdida de presión, transmisión de calor.

1 Introducción

El hielo líquido ha mostrado importantes ventajas competitivas frente a otros refrigerantes secundarios, pero su aplicación industrial ha chocado con el inconveniente de la falta de conocimiento que sobre las propiedades del fluido tiene su potencial usuario.

Para poder realizar un dimensionamiento correcto de cualquier aplicación industrial de hielo líquido es necesario cuantificar los fenómenos de caída de presión y transmisión de calor que en ella se producen. El fenómeno de pérdida de carga puede evaluarse de una forma relativamente sencilla si se dispone del valor del factor de fricción, mientras que el fenómeno de transmisión de calor puede evaluarse conociendo el número de Nusselt. El problema es que, en el caso del hielo líquido, no se dispone todavía de una base de datos o de correlaciones universalmente aceptadas que permitan calcular de forma sencilla las principales variables de interés en el diseño de la instalación. Frente a otros estudios anteriores, de marcado carácter científico, uno de los objetivos del proyecto de investigación en el que está enmarcado este trabajo, es realizar un estudio de carácter tecnológico que permita obtener al proyectista, de forma relativamente sencilla, la influencia que sobre los procesos de pérdida de presión y transmisión de calor tienen tanto las principales variables de diseño de una instalación, como las características del hielo líquido empleado.

De acuerdo con Kitanovski et al. [7], los resultados obtenidos a partir de una determinación empírica del factor de fricción basada en un análisis dimensional del problema se ajustan mucho mejor a los datos experimentales que aquellos extraídos de modelos semiempíricos. Basado en el análisis dimensional, el trabajo que se presenta pretende determinar cuáles son las variables que influyen sobre los procesos de transmisión de calor y pérdida de carga en un hielo líquido, determinar esa influencia y presentar los resultados de forma que puedan emplearse como herramienta de diseño en instalaciones de hielo líquido. Para ello se ha estudiado el comportamiento de un hielo líquido generado a partir de una disolución al 3% de agua y NaCl, actuando sobre diversos factores como contenido másico en hielo, tamaño de los cristales, diámetro de los conductos o velocidad de circulación del fluido y se han adimensionalizado los valores obtenidos, tanto para la pérdida de presión (mediante el factor de fricción) como para la transmisión de calor (mediante el número de Nusselt), presentando su evolución frente al número de Reynolds.

2 Descripción de las instalaciones

La figura 1 muestra una representación esquemática de la instalación experimental empleada, que puede considerarse formada por dos circuitos independientes; en circuito de generación y almacenamiento y el circuito de ensayos. El componente principal del circuito de generación es una máquina frigorífica convencional (1) cuyo evaporador (2) está formado por dos tubos concéntricos, un tubo interior, de superficie rascada mediante

movimiento lineal alternativo, por el que circula el hielo líquido, y un tubo exterior por el que circula el líquido refrigerante. Una unidad hidráulica (3) proporciona el movimiento al agitador alternativo empleado para evitar la acumulación de cristales de hielo en la superficie del cilindro interior del evaporador. Impulsado por una bomba centrífuga (4), la solución salina circula a través del tubo interior del evaporador y es descargada en un tanque de almacenamiento de 1 m³ de capacidad (5), cerrándose de esta forma el circuito. En este tanque de almacenamiento se han colocado 10 sondas de temperatura, que permiten conocer con precisión la temperatura en cualquier punto del mismo y localizar posibles fenómenos de estratificación. Para evitar esa estratificación, se ha instalado un equipo de agitación (6) sobre el tanque. El funcionamiento de la máquina frigorífica es controlado a través de la temperatura del hielo líquido a la salida del evaporador, de forma que cuando se alcanza la temperatura de consigna fijada, la instalación es capaz de mantener las condiciones del fluido estables en ese punto.

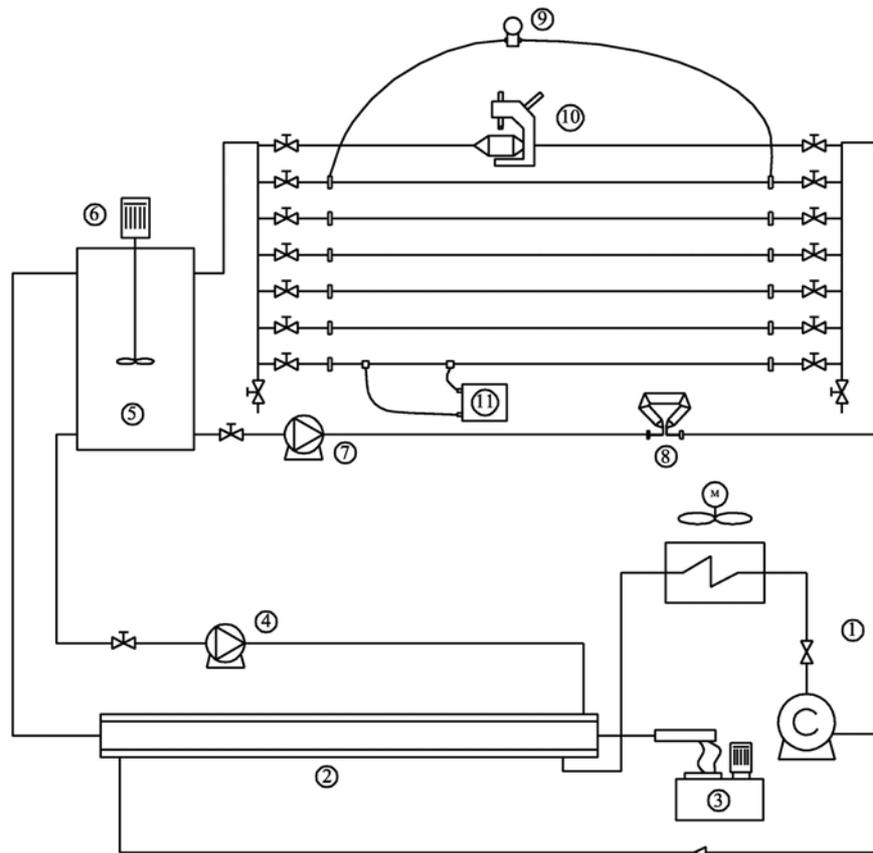


Figura 1 Representación esquemática de la instalación experimental.

Una vez que se han alcanzado las condiciones de ensayo deseadas, el fluido pasa al circuito de ensayos gracias a una bomba centrífuga (7) equipada con variador de frecuencia que permite controlar el caudal másico trasegado. A una distancia adecuada de la bomba, se ha colocado un caudalímetro de tipo Coriolis (8). A partir de ese punto, el circuito se ramifica en un total de seis tuberías de distintos diámetros y materiales. Sobre cada una de

estas tuberías se han colocado dos tomas de presión normalizadas, que permiten obtener, a través de tres sensores de presión diferencial (9) de distintos rangos de medida, la pérdida de presión en el conducto. La determinación del tamaño de los cristales de hielo se realiza mediante la captura de imágenes digitales con una cámara CCD conectada a un estereomicroscopio (10). Por último, la instalación dispone de un transformador eléctrico de 6 kVA de potencia (11), que permite aplicar por efecto Joule, el flujo de calor necesario para la realización de los ensayos de transmisión de calor.

Además de los equipos detallados, en la instalación se ha colocado una serie de RTD's, tanto de contacto como de inmersión, que permiten conocer la evolución en la temperatura del fluido a lo largo del circuito de ensayos, la temperatura ambiente o la temperatura superficial de los distintos conductos. Todos los sensores descritos anteriormente están conectados a un equipo de adquisición de datos HP 3790A, que permite automatizar el proceso de toma de datos, configurar los canales de lectura, etc. A su vez, este equipo está conectado a un ordenador personal sobre el que, al final de cada ensayo, se vuelcan los datos registrados para su posterior procesado.

3 Análisis dimensional del problema

3.1 Pérdida de presión

Para evaluar la pérdida de presión para un caudal de hielo líquido fluyendo a través de un conducto horizontal de sección circular, se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Propiedades de la disolución: densidad ρ_d , viscosidad μ_d , concentración γ % de NaCl
- Variables del hielo: densidad ρ_h , contenido másico ϕ , diámetro medio d .
- Parámetro del flujo: diámetro de la tubería D , rugosidad relativa de la tubería ε , velocidad media del flujo U , temperatura T .
- Gravedad: g .

En primera instancia, la pérdida de presión por unidad de longitud de conducto se puede expresar como una función de todos los parámetros implicados:

$$\frac{\Delta p}{L} = f(\rho_d, \mu_d, \gamma, \rho_h, \phi, d, D, \varepsilon, U, T, g) \quad (1)$$

Aplicando el teorema II con U , D y ρ_s como parámetros base y teniendo en cuenta algunas consideraciones prácticas (porcentaje de hielo, temperatura y concentración de la disolución



están interrelacionados, resulta más adecuado expresar la influencia de la flotación a través del parámetro $g \cdot \Delta\rho$, la expresión anterior puede escribirse:

$$\frac{\Delta p/L}{\frac{1}{2} \rho_d U^2 / D} = f\left(\frac{\mu_d}{\rho_d U D}, \gamma, \frac{\rho_h}{\rho_d}, \phi, \frac{d}{D}, \varepsilon, \frac{g \Delta \rho D}{\rho_d U^2}\right) \quad (2)$$

Para una concentración de disolución dada, densidad de hielo constante y asumiendo tubo liso, la relación expresada por la ecuación (2) puede reducirse a:

$$\lambda = f\left(Re, \phi, \frac{d}{D}, \frac{g \Delta \rho D}{\rho_d U^2}\right) \quad (3)$$

En los ensayos efectuados no se ha actuado sobre todos los parámetros anteriores. Asumiendo que en nuestros ensayos la velocidad mínima del flujo se fija para evitar la aparición de un lecho de partículas de hielo, sólo se han considerado como variables en los resultados presentados el contenido de hielo, la relación de diámetros y el número de Reynolds. Por tanto, los resultados se han presentado en la forma $\lambda = f\left(Re, \phi, \frac{d}{D}\right)$.

3.2 Transmisión de calor

Para estudiar la transmisión de calor cuando el fluido circula a través de una tubería más caliente, deben considerarse algunos parámetros adicionales respecto al estudio anterior:

- Propiedades térmicas de la disolución de partida: calor específico c_d , conductividad térmica k_d , coeficiente de expansión térmica $\beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}$.
- Propiedades térmicas del hielo: calor específico c_h , conductividad térmica k_h , calor latente de fusión h_{hi} .
- Temperatura de la pared del conducto: T_p .

Así, el calor transmitido hacia el flujo, por unidad de superficie, es función de:

$$\dot{q} = f(\rho_d, \mu_d, c_d, k_d, \beta, \gamma, \rho_h, c_h, k_h, h_{hi}, \phi, d, D, \varepsilon, U, T_o, T_p, g) \quad (4)$$

Tomando ρ_s , D , U y ΔT como los parámetros básicos para el teorema II, se puede escribir:

$$\frac{\dot{q} \cdot D}{k_d \Delta T} = f\left(\frac{\mu_d}{\rho_d U D}, \frac{c_a \Delta T}{U^2}, \frac{k_d}{\mu_d c_d}, \frac{D^3 \rho_d^2 g \beta \Delta T}{\mu_d^2}, \gamma, \frac{\rho_h}{\rho_d}, \frac{c_h}{c_d}, \frac{k_h}{k_d}, \frac{h_f}{c_d \Delta T}, \phi, \frac{d}{D}, \varepsilon, \frac{g \Delta \rho D}{\rho_d U^2}\right) \quad (5)$$

Identificando parámetros y eliminando aquellos que no tienen influencia en nuestro caso, la expresión anterior puede simplificarse hasta:

$$Nu = f\left(Re, Pr, Gr, \gamma, \phi, \frac{d}{D}\right) \quad (6)$$

Todos los ensayos se han realizado para la misma concentración de partida, a la vez que se puede despreciar la influencia del número de Rayleigh ($Ra=Gr \cdot Pr$), por lo que finalmente los resultados de los ensayos experimentales se presentarán en la forma $Nu = f\left(Re, \phi, \frac{d}{D}\right)$.

4 Desarrollo de los ensayos y resultados

El análisis dimensional anterior muestra que uno de los factores de mayor influencia en el comportamiento, tanto térmico como hidrodinámico, del hielo líquido es su contenido en hielo. La determinación del contenido másico en hielo se ha efectuado en nuestro caso a partir de los valores de densidad y temperatura registrados para el fluido, haciendo uso de la determinación de las propiedades de las disoluciones de agua y NaCl recogidas en el texto de Melinder [9].

Los ensayos efectuados están orientados a cuantificar la influencia real que sobre dichos procesos de pérdida de carga y transmisión de calor tienen aquellos factores que el análisis dimensional ha revelado como parámetros clave. Estos se inician una vez que se ha alcanzado la concentración de hielo deseada y una situación estacionaria en la que la temperatura del fluido se mantiene estable en cualquier punto del circuito para un periodo de tiempo suficientemente largo.

4.1 Ensayos de pérdida de presión

La instalación experimental de que se dispone nos permite actuar sobre los principales parámetros de influencia en el proceso de pérdida de presión, aunque por limitaciones de tiempo y puesta a punto de la instalación, hasta el momento sólo ha sido posible efectuar una pequeña parte de los ensayos previstos.

Para determinar la influencia de la concentración de hielo se han reproducido las mismas condiciones de ensayo para concentraciones de hielo del 6, 10, 13 y 22%. Las pruebas efectuadas una vez superados los problemas de puesta a punto muestran que será posible llegar sin problemas hasta concentraciones de hielo máximas en torno al 25-30%.

Todos los ensayos efectuados hasta la fecha se han realizado con aproximadamente el mismo tamaño de cristales de hielo, en torno a 500 μm . El proceso de crecimiento de los cristales de hielo se obtiene en nuestra instalación mediante el almacenamiento en el depósito por largos periodos de tiempo del hielo generado. Esto requiere la dedicación de gran cantidad de tiempo a este tipo de ensayos, por lo que se ha dejado para ensayos posteriores la determinación de la influencia del tamaño de los cristales.

La influencia del diámetro de la conducción se ha determinado haciendo circular el fluido, para cada concentración de hielo ensayada, por cuatro conductos de PVC de sección diferente. Para determinar la influencia de la velocidad de circulación, se actúa sobre el variador de frecuencia de la bomba (7), variando de esta manera el caudal que circula por cada una de las tuberías y por tanto la velocidad de circulación.

Previo a la realización de los ensayos descritos anteriormente, y con el fin de verificar el correcto funcionamiento de la instalación de ensayos, se efectuó una serie de ensayos similares a los descritos, pero sin presencia de hielo. Así, se obtuvo la pérdida de presión para distintas velocidades de circulación y distintos diámetros de tubería en el caso de agua pura y en el caso de una disolución al 3% de NaCl, mostrando los resultados obtenidos un muy nivel de ajuste a la línea correspondiente a tubo liso en el diagrama de Moody. Una vez comprobado el correcto funcionamiento de todos los equipos que forman la instalación de ensayos de pérdida de presión, se procedió a la realización de los ensayos descritos anteriormente para el caso del hielo líquido, construyéndose a partir de los datos recogidos el diagrama de Moody que se muestra en la figura 2.A. Los valores de Re y λ representados se han calculado empleando los valores de densidad y viscosidad para una disolución al 3% de NaCl a una temperatura de referencia de 0°C. Esta es una forma práctica de presentar los valores de fricción que permite al potencial diseñador de este tipo de instalaciones calcular la pérdida de presión conociendo únicamente los valores de flujo másico y diámetro de tubería (además de las propiedades de la disolución empleada a 0°C).

Los ensayos realizados hasta la fecha se han efectuado con un tamaño de partícula prácticamente constante, en torno a 500 μm . Para los diámetros de tubería que se tienen en la instalación experimental, esto supone una variación en la relación de diámetros (d/D) de aproximadamente 0.014 a 0.03, variación para la que los ensayos efectuados no han mostrado la influencia de este parámetro en las condiciones de pérdida de presión, por lo que los resultados se han presentado en la forma $\lambda = f(Re, \phi)$. Serán necesarios más ensayos con diferente tamaño de cristal para evaluar la influencia de ese factor y, si fuera necesario, plantearse una ampliación de la instalación, con tuberías de distinto diámetro.

Si bien por el momento no ha sido posible desarrollar todos los ensayos previstos, los resultados mostrados en la figura 2.A muestran un comportamiento que se ajusta bastante a lo descrito por otros investigadores. Al igual que en la mayoría de los trabajos precedentes,

se aprecia una tendencia general al aumento en el factor de fricción respecto al que se tiene en ausencia de hielo. En nuestros ensayos con concentraciones de hielo inferiores al 15%, no se aprecia una clara relación entre el factor de fricción y la concentración de hielo, para cualquier valor de número de Reynolds. En la línea de los resultados de otros investigadores como Bell & Lallemand [3] or Bedecarrats et al. [2], para valores bajos del número de Reynolds, se aprecia como el factor de fricción aumenta según aumenta la concentración de hielo. Para altas concentraciones, estas diferencias en el factor de fricción tienden a desaparecer cuando el número de Reynolds aumenta.

4.2 Ensayos de transmisión de calor

Para efectuar los ensayos de transmisión de calor se dispone de dos tuberías de acero inoxidable de 20 mm de diámetro exterior, una lisa y la otra corrugada, por cuyo interior circula un caudal ajustable de hielo líquido. La instalación dispone de un transformador eléctrico de 6 KVA de potencia máxima, que nos permite ajustar el flujo de calor suministrado a cualquier valor entre 0 y 6 kW. Conociendo la temperatura del fluido a la entrada y salida de ese tramo, el calor introducido por efecto Joule y la temperatura de la pared de la tubería, se puede determinar el coeficiente h de transmisión de calor por convección entre el fluido y la pared interior de la tubería.

Los resultados obtenidos se han representado en la figura 2.B comparándolos con los datos de Bedecarrats et al. [1]. Los valores de los números de Nusselt (Nu) y Reynolds (Re) se han calculado evaluando las propiedades físicas de la disolución (k , ρ y μ) a una temperatura de referencia de 0°C. Los resultados presentados corresponden a la tubería lisa. Los resultados para la tubería corrugada no están aún disponibles.

Dado que todos los ensayos se han efectuado con un tamaño de cristal constante y para una única tubería, los resultados se presentan en la forma $Nu = f(Re, \phi)$.

La figura 2.B muestra la misma tendencia para los dos grupos de datos representados: una ligera tendencia al descenso en el número de Nusselt in presencia de partículas de hielo. Estos resultados concuerdan parcialmente con los datos de Knodel et al. [8], quienes encontraron que el número de Nusselt descendía al aumentar el porcentaje de hielo, aunque en nuestro caso no se aprecia una clara relación entre el contenido en hielo y el número de Nusselt. En la misma línea que nuestros resultados están los de Bellas et al. [4], para quienes el coeficiente global parece ser independiente del porcentaje de hielo, aunque en su caso los resultados están determinados para un intercambiador de placas planas en lugar de una tubería. Por el contrario, autores como Stamatiou y Kawaji [10] encontraron que el número de Nusselt local para un flujo de hielo líquido aumenta respecto al que se tiene para un flujo monofásico, y dependiendo del valor de la longitud de la sección térmica de entrada, el número de Nusselt local aumenta al aumentar el contenido en hielo. Otros autores como Ben Lakhdark et al. [5] encontraron que para un flujo constante, un aumento en el porcentaje

de hielo implica un fuerte aumento en el coeficiente de transferencia de calor. A pesar de lo dicho, hay que tener presente que debido a la gran capacidad térmica del hielo, el comportamiento global como agente de transporte de frío es muy superior al obtenido empleando agua o disoluciones acuosas frías.

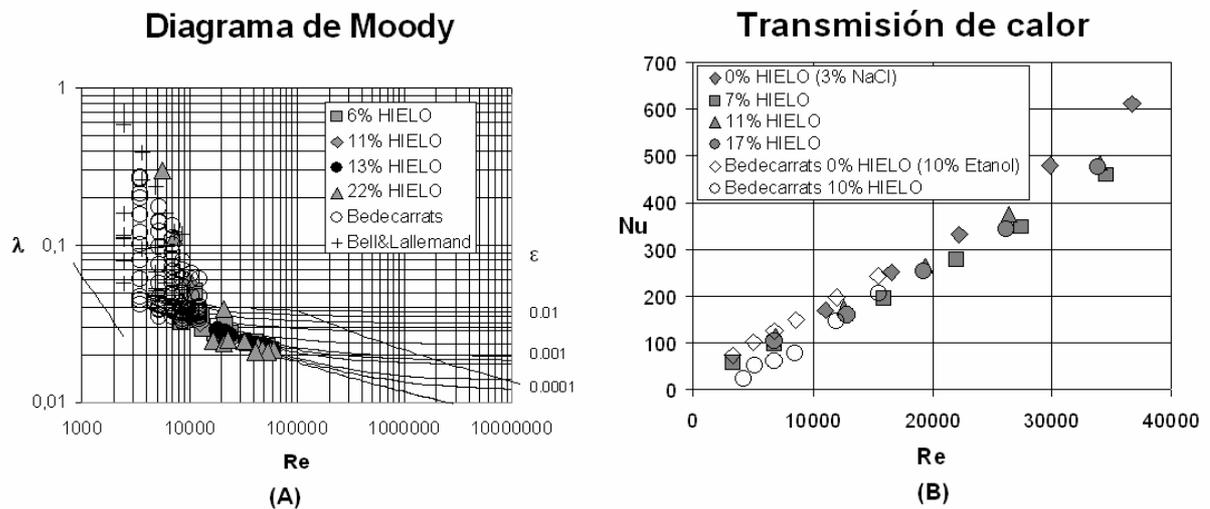


Figura 2 Resultados de los ensayos.

5 Conclusiones

Se ha efectuado un análisis dimensional de los procesos de pérdida de presión y transmisión de calor para un flujo de hielo líquido. Este análisis ha mostrado que los principales parámetros de influencia sobre esos procesos, en nuestras condiciones de ensayo, son la concentración de hielo y el número de Reynolds.

Se ha investigado experimentalmente la pérdida de presión y transmisión de calor para un hielo líquido generado en un equipo comercial de superficie rascada, a partir de una disolución al 3% de NaCl. Se ha investigado la influencia de la concentración de hielo y el número de Reynolds. Las principales conclusiones que han podido extraerse son:

- Los resultados muestran un incremento en la pérdida de presión en presencia de hielo, especialmente en la zona de transición entre flujo laminar y turbulento. En la zona de flujo turbulento, la influencia de la concentración de hielo sobre el proceso de pérdida de presión no es clara. Estos resultados deben ser confirmados con nuevos ensayos efectuados con diferentes concentraciones de hielo.
- No se observa una clara relación entre el coeficiente global de transmisión de calor y el contenido en hielo, aunque es claro que hay un fuerte incremento en la capacidad de transmisión de calor comparado con el que se tendría para flujo monofásico, que

debe llevar a una significativa reducción del caudal de refrigerante secundario necesario para compensar una carga térmica dada.

- Son necesarios más ensayos para poder obtener correlaciones empíricas de uso para el cálculo de la pérdida de presión o transmisión de calor, especialmente para evaluar la influencia de la relación de diámetros entre partícula y tubería (d/D) en esos procesos.

6 Referencias

- [1] Bedecarrats J.P., Strub F., Stutz B., Peuvrel C., *Heat transfer for different slurries flowing in heat exchangers*. Proceedings of the 5th IIR Workshop on Ice Slurries, Stockholm, May 2002.
- [2] Bedecarrats J.P., Strub F., Peuvrel C., Dumas J.P., *Heat transfer and pressure drop of ice slurry in a heat exchanger*. Proceedings of the 21st IIR International Congress of Refrigeration, Washington D.C., August 2003.
- [3] Bell O., Lallemand A., *Etude d'un fluide frigoporteur diphasique 2: Analyse expérimentale du comportement thermique et rhéologique*. International Journal of Refrigeration 22 (1999), 175-187.
- [4] Bellas J., Chaer I., Tassou S.A., *Heat transfer and pressure drop of ice slurries in plate heat exchangers*. Applied Thermal Engineering 22 (2002), 721-732.
- [5] Ben Lakhdar M.A., Guilpart J. Lallemand A., *Experimental study and calculation method of heat transfer coefficient when using ice slurries as secondary refrigerant*. Heat and Technology, Vol. 17, n.2 (1999).
- [6] Kitanovski A., Poredoš V., *Concentration distribution and viscosity of ice-slurry in heterogeneous flow*. International Journal of Refrigeration 25 (2002), 827-835.
- [7] Kitanovski A., Vuarnoz D., Ata-Caesar D., Egolf P.W., Hansen T.M., Doetsch C., *The fluid dynamics of ice slurry*. International Journal of Refrigeration 28 (2005), 37-50.
- [8] Knodel B.D., France D.M., Choi U.S., Wambsganss M.W., *Heat transfer and pressure drop in ice-water slurries*. Applied Thermal Engineering 20 (2000), 671-685.
- [9] Melinder Å., *Thermophysical properties of liquid secondary refrigerants*. IIR Handbook. International Institute of Refrigeration, Paris, 1997.



- [10] Stamatiou E., Kawaji M., *Heat transfer characteristics of melting ice slurries in compact plate heat exchangers*. Proceedings of the 21st IIR International Congress of Refrigeration, Washington D.C., August 2003.