

## CORRELACION DE INTERES EN LA FORMACION DE ESCARCHA SOBRE SUPERFICIES FRIAS

Jorge A. Gatica<sup>\*</sup>, Vicente A. Pita<sup>\*</sup>, y Nisio de C. Brum<sup>†</sup>

<sup>\*</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica  
Universidad del Bío-Bío,  
Concepción, Octava Región, Chile  
e-mail: jgatica@ubiobio.cl, web page: <http://www.ubiobio.cl>

<sup>†</sup> Instituto de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE)  
Universidade Federal do Rio de Janeiro,  
Rio de Janeiro, Estado do Rio, Brasil  
e-mail: nisio@serv.com.ufrj.br

**Key words:** refrigeración, escarcha, evaporadores, simulador.

**Resumen.** *En este trabajo se presenta un modelo numérico computacional que permite evaluar el proceso de depósito de escarcha en superficies frías bajo condiciones de convección forzada del aire circulante sobre ella. Las consideraciones físicas son de fluido newtoniano, incompresible e isotrópico en el cual el mecanismo preponderante es la difusión. El modelo matemático se basa en un análisis de volúmenes de control que lleva a un sistema de ecuaciones diferenciales parciales, no lineales: ecuación de difusión de masa y ecuación de energía y un conjunto de relaciones auxiliares que permiten cerrar el sistema y/o definir contornos e interfaces.*

*El sistema es resuelto numéricamente por el método de diferencias finitas. Las ecuaciones son linealizadas a través de media armónica, siendo resueltos los sistemas lineales resultantes en forma iterativa de acuerdo al algoritmo de Thomas para sistemas tridiagonales, utilizando además criterios de relajación. Los resultados transientes generados incluyen la distribución de temperaturas en la superficie de la capa de escarcha formada y el crecimiento de la misma. Por otra parte, al término del tiempo de simulación es posible generar resultados relativos a la densidad de la escarcha formada a lo largo de su espesor, de su conductividad, temperatura, porosidad, etc...*

*Los resultados del modelo matemático son validados haciendo un análisis comparativo con datos similares disponibles en la literatura. El análisis de formación y crecimiento de la escarcha es de tipo unidimensional. Finalmente y con base en los resultados coherentes obtenidos se llega a una correlación para el factor de resistencia a la difusión, que satisface condiciones operacionales variadas y factibles en la práctica.*

## 1 INTRODUCCION

Resulta de gran interés el proceso transiente de formación de hielo sobre una placa fría puesto que la transferencia de calor y masa ocurre en condiciones de límites móviles. La formación de los cristales de hielo ocurre en regiones apropiadas de nucleación y condensación de la humedad en la superficie.

La progresión de los locales de nucleación aumenta con el tiempo y la formación del hielo asume un aspecto casi uniforme en toda la superficie. El congelamiento del agua depositada por condensación sobre la superficie, genera cristales como agujas produciendo una superficie áspera. La ramificación de estos cristales forma estructuras arbóreas que son responsables por el aumento de espesor del hielo.

La formación de hielo en la superficie externa de evaporadores en contacto con el aire, en el interior de cámaras frigoríficas, es indeseable pues afecta la transferencia de calor y agrava la pérdida de carga por el lado del aire, disminuyendo la capacidad de refrigeración. Los periodos de parada del sistema de refrigeración para la remoción de la capa de hielo, excesivamente espesa en las aletas de evaporadores, comprometen significativamente el desempeño de tales equipamientos o similares.

Durante este trabajo fueron revisadas investigaciones analítico-experimentales<sup>2,7,8,10,11,13</sup>, y trabajos más recientes<sup>3,14</sup>, que en general caracterizan los efectos de parámetros: número de Reynolds, humedad y temperatura del aire, temperatura de la placa, etc., en la formación y crecimiento del hielo sobre una placa. Merecen reconocimiento, sin embargo, propuestas relativas al coeficiente de difusión efectivo<sup>2,8,13</sup>, si bien una<sup>13</sup> fue particularmente aprovechada.

## 2 FORMACION DE HIELO

Cuando una placa limpia, a temperatura bajo cero, es expuesta a un flujo de aire húmedo, pueden ser considerados típicamente tres periodos distintos en el proceso de formación y crecimiento de una capa de hielo sobre su superficie:

- Periodo de crecimiento del cristal. Se caracteriza por la condensación y congelamiento posterior de pequeñas gotas de agua. Luego son generados cristales de hielo sobre dicho núcleo, y crece verticalmente a tasa aproximadamente constante.
- Periodo de crecimiento de la capa de hielo. Presenta un aspecto más uniforme debido a la ramificación e interconexión de los cristales de hielo. La capa de escarcha se torna un material poroso homogéneo hecho de una matriz de hielo sólido y poros llenos de aire húmedo.
- Periodo de crecimiento intenso de la capa de hielo. Este surge cuando la temperatura superficial llega a ser igual a la temperatura del punto triple del agua, debido al aumento de la resistencia térmica del hielo. Ocurre un proceso cíclico de fusión, congelamiento y crecimiento hasta que se alcanza el equilibrio térmico de toda la capa de escarcha.

### 3 MODELO FISICO - MATEMATICO

Se considera un modelo numérico del tipo unidimensional transiente, basado en ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento, energía y especies aplicadas a la escarcha, a la mezcla aire-vapor y a la interfase aire-escarcha.

El sistema analizado, Fig. 1, consiste de una placa plana horizontal, sobre la cual fluye una mezcla de vapor de agua y aire seco (aire húmedo). La placa es isotérmica, con temperatura bajo cero grados y siempre inferior a la temperatura del aire.

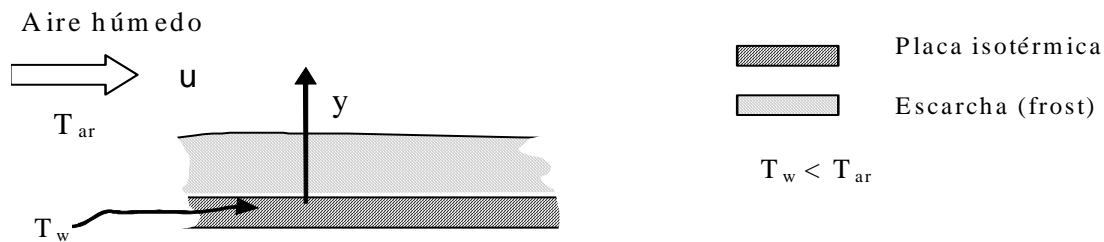


Figura 1. Esquema del sistema en estudio.

La escarcha se asume como un medio poroso. En rigor la fase sólida tendría volumen variable en el tiempo, debido a la solidificación del vapor difundido en los poros, formados por los espacios dejados por la estructura arbórea de la escarcha producida. En la formulación siguiente, el volumen es considerado cuasi-estacionario y de esta manera el proceso de media volumétrica, necesario para la formulación de las ecuaciones de conservación para medios porosos, se simplifica.

La capa de escarcha puede considerarse un medio poroso pseudo-homogéneo, donde la transferencia de calor y masa es descrita, respectivamente, por las leyes de Fourier y de Fick.

Para el modelado físico-matemático, se considera: fluidos incompresibles, aire húmedo forzado sobre la escarcha, propiedades variables del aire en la capa porosa, se desprecia los efectos gravitacionales, presión total constante, aire húmedo en interior de poros saturado, aire húmedo es mezcla de gases ideales, y que la superficie plana refrigerada es impermeable.

Se considera un volumen de control elemental  $V$  donde coexisten el volumen de hielo  $V_I$  y el volumen de aire húmedo  $V_g$ , y se usa la técnica del volumen local medio. Las fracciones volumétricas de aire húmedo y hielo ( $\varepsilon_g$ ,  $\varepsilon$ ), son;

$$\varepsilon_g = V_g/V \quad \text{y} \quad \varepsilon = V_I/V \quad (1)$$

con  $\varepsilon + \varepsilon_g = 1$  y compatibilidad volumétrica

$$\left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right) = - \left( \frac{\partial \varepsilon_g}{\partial t} \right) \quad (2)$$

## 4 ECUACIONES DE ENERGIA Y MASA

### 4.1 Ecuación de la energía

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) - \rho_I I_{ig} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \text{div } k_{\text{eff}} \nabla T \quad (3)$$

### 4.2 Ecuación de difusión de la fase gas-vapor

$$\frac{\partial}{\partial t}(1 - \varepsilon)\rho_v + \rho_I \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \text{div}[D_{\text{eff}} \nabla \rho_v] \quad (4)$$

### 4.3 Ecuaciones para las condiciones de contorno

- Junto a la placa fría, impenetrable, se tiene

$$D_{\text{eff}} \left. \frac{\partial \rho_v}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \quad (5)$$

- En la interfase escarcha-aire húmedo

$$D_{\text{eff}} \left. \frac{\partial \rho_v}{\partial y} \right|_{y=y_s} = h_m (\rho_{v\infty} - \rho_v|_{y=y_s}) - \left( \rho \frac{\partial y}{\partial t} \right) \Big|_{y=y_s} \quad (6)$$

- Junto a la placa fría,

$$T = T_w \quad (7)$$

- En la superficie en contacto con la corriente de aire húmedo

$$h_{cv} (T_{\text{ar}} - T|_{y=y_s}) = k_{\text{eff}} \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=y_s} - I_{ig} \left( \rho \frac{\partial y_s}{\partial t} \right) \Big|_{y=y_s} \quad (8)$$

El sistema de ecuaciones diferenciales parciales para ser resuelto necesita cerrarse, para ésto necesita de las propiedades termo-físicas, algunas se detallan enseguida.

Para evitar la fase de cristalización, se parte inicialmente con un reducido espesor de escarcha con temperatura uniforme igual a la de la placa fría.

## 5 PROPIEDADES TERMOFISICAS (Unidades SI)

### 5.1 Propiedades del aire seco y del vapor de agua

Conductividad térmica del aire<sup>8</sup>, con  $180 \leq T \leq 600$  [K]

$$k_a = -3.381E-08 \cdot T^2 + 9.814E-05 \cdot T - 1.308E-04 \quad (9)$$

Coefficiente de difusión efectiva<sup>13</sup>, tiene la forma

$$D_{\text{eff}} = (1-\varepsilon)D_{AB}(1+F) \quad \text{o} \quad D_{\text{eff}} = (1-\varepsilon)D_{AB}(1+F_s) \quad (10)$$

para ambos casos<sup>8</sup>,

$$D_{AB} = 1.451E-04 \frac{T^{1.72}}{P_{\text{atm}}} \quad (11)$$

Son calculadas<sup>1</sup> además las propiedades psicrométricas del aire. Entretanto, se obtienen los coeficientes convectivos<sup>12</sup> de transferencia de calor y masa, este último a través de la relación de Lewis para la mezcla aire-agua.

### 5.2 Propiedades térmicas del hielo y de la escarcha

Conductividad térmica del hielo<sup>4</sup>, válida para  $100 \leq T \leq 273$  [K]

$$k_I = 630/T \quad (12)$$

Calor específico del hielo<sup>8</sup>,

$$Cp_I = 2109 + 3.66(T - 273.15) \quad (13)$$

Densidad del hielo<sup>6</sup>,

$$\rho_I = 1/(0.0010907 + 1.4635E - 07T) \quad (14)$$

Calor latente de sublimación

$$I_{\text{ig}} = (-0.04667(1.8(T-273.15)+32)+1220.1) \cdot 2322 \quad (15)$$

Densidad de la capa de escarcha<sup>8</sup>,

$$\rho = \varepsilon\rho_I + (1 - \varepsilon)(\rho_a + \rho_v) \quad (16)$$

Calor específico de la escarcha

$$Cp = (\varepsilon_I\rho_I Cp_a(T) + (1 - \varepsilon_I)(\rho_a Cp_a + \rho_v Cp_v))/\rho \quad (17)$$

La conductividad térmica efectiva de la escarcha, es calculada como

$$k_{\text{eff}} = \varepsilon k_I + (1 - \varepsilon)k_a \quad (18)$$

La porosidad de la escarcha, es calculada<sup>9</sup>,

$$\sigma = \frac{\rho_I - \rho}{\rho_I - \rho_p} \quad \text{con} \quad \rho_p = \rho_v + \rho_a \quad (19)$$

## 6 SOLUCION NUMERICA

El sistema de ecuaciones diferenciales parciales descrito, junto con las condiciones de contorno, y las ecuaciones constitutivas recientemente presentadas, es un sistema no lineal acoplado por la fracción volumétrica del hielo,  $\varepsilon$ , la cual se calcula iterativamente a través de la ecuación de conservación de la cantidad de vapor difundida en la escarcha.

Esta última ecuación diferencial es de primer orden lo que provoca una sensible rigidez cuando se intenta obtener la solución numérica en su forma conservativa y genera aproximaciones por diferencias finitas también con la misma propiedad.

Un esquema implícito es usado para las dos ecuaciones principales, siendo que el sistema de ecuaciones algebraicas generado por la discretización de la ecuación de la energía generó una matriz tridiagonal con una aproximación de primer orden en el tiempo y segundo orden en el espacio (a excepción del contorno donde también fue empleada una aproximación de primer orden en el espacio). Para la fracción volumétrica el sistema generado es no-lineal y para su solución se recurre a la subrutina del paquete IMSL, DNEQNF

Las no-linealidades debido a la dependencia de las propiedades con la temperatura se tratan con un atraso en su cálculo con posterior corrección iterativa hasta satisfacer la tolerancia especificada. Finalmente, con una subrelajación se garantiza una mejor estabilidad en la obtención de la solución.

## 7 DISCUSION Y RESULTADOS

### 7.1 Factor de resistencia a la difusión

Si consideramos un poro, formado en el interior de la estructura arbórea del hielo, próximo a la superficie fría, veremos que con el tiempo quedará deficiente de vapor de agua, por su transformación en hielo en la superficie de la estructura antes mencionada. De esta forma, el vapor de agua en mayor concentración en las capas superiores de la escarcha y principalmente en la superficie, se difunde para suplir el desequilibrio provocado por la ablación.

La difusividad molecular del vapor en el aire,  $D_{AB}$ , es bien conocida y la literatura presenta diversos resultados. En el caso presente, esta propiedad no gobierna el proceso difusivo ya que el hielo ofrece una resistencia a la difusión.

Una interesante discusión es hecha<sup>5</sup> en relación al factor de resistencia a la difusión  $\mu$  lo cual llevó a desestimar una propuesta<sup>8</sup> considerada y retomar entonces la utilización de los parámetros,  $F$  para el interior de la escarcha y  $F_s$  para la superficie de la capa de escarcha<sup>13</sup>. Fue verificada una fuerte dependencia<sup>5</sup> en el valor de dichos parámetros, generando diversos espesores finales y provocando saltos en la densidad, si bien físicamente posibles, no coherentes con las propiedades del modelo físico matemático estudiado.

Fue necesario entonces buscar valores de  $F_s$  que no produzcan saltos en la densidad, siendo que su validez sería avalada por los resultados de la evolución del espesor producido.

Este problema sufre expansión en su dominio a cada paso en el tiempo debido al aumento de espesor de la escarcha. Este aumento genera una redefinición de la malla, a cada paso en el

tiempo, obteniéndose los valores de las propiedades en los nuevos nodos por interpolación con los valores anteriores obtenidos.

La inicialización parte suponiendo un espesor inicial de escarcha con una fracción volumétrica y temperatura dadas, ambas uniformes.

## 7.2 Definición de la malla

A través de un análisis de optimización de mallas<sup>5</sup>, fue determinado el uso de incrementos de tiempo de 0.5 segundos y un tamaño de malla 30.

## 7.3 Validación del programa de simulación

Con la finalidad de validar el programa de simulación, la formulación computacional fue generada para las mismas condiciones impuestas en la obtención de los resultados experimentales, presentes en la literatura. En los gráficos acumulados siguientes, Figura 2 y Figura 3, se hace una primera comparación con variados datos experimentales<sup>11</sup>. El tiempo de simulación es de 6 horas (21600 segundos).

Puede observarse que en cada una de dichas figuras, ocurre una buena concordancia entre los valores de la simulación y los valores experimentales para las mismas condiciones.

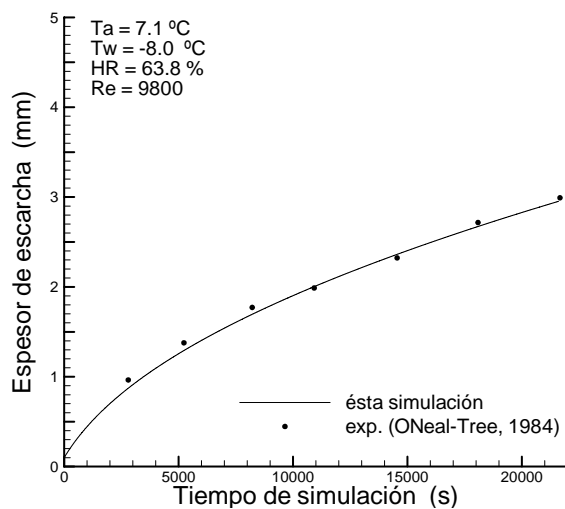


Figura 2-a

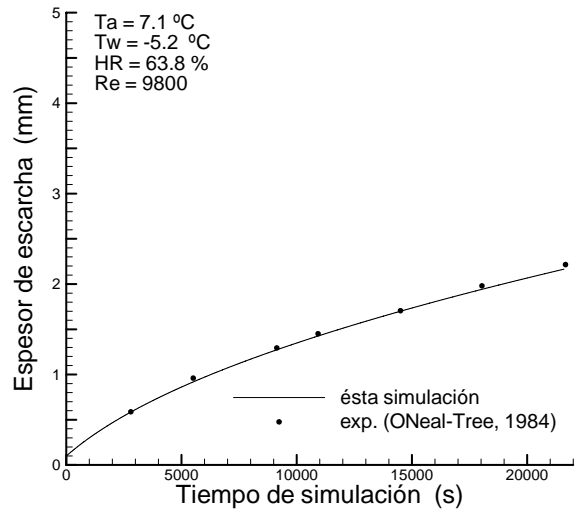


Figura 2-b

Figura 2: Comparación con valores experimentales de O'Neal e Tree (1984)

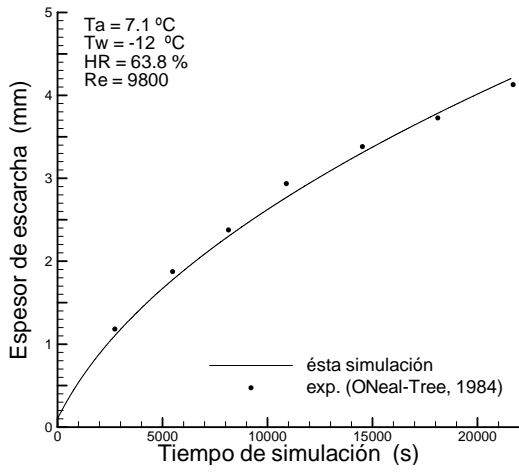


Figura 3-a

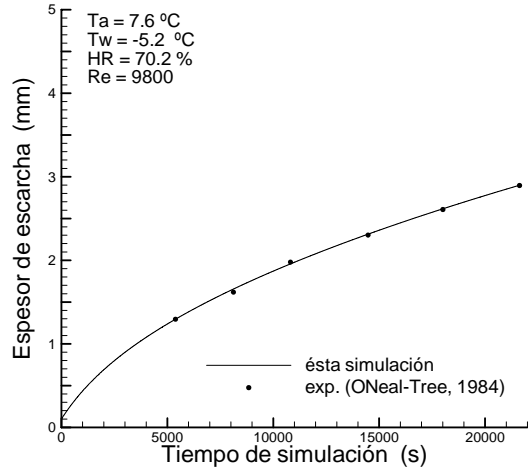


Figura 3-b

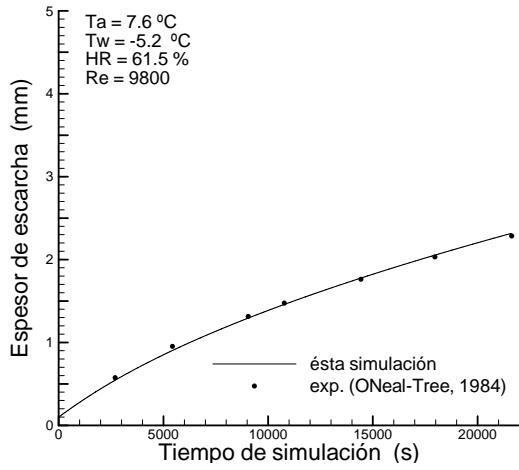


Figura 3-c

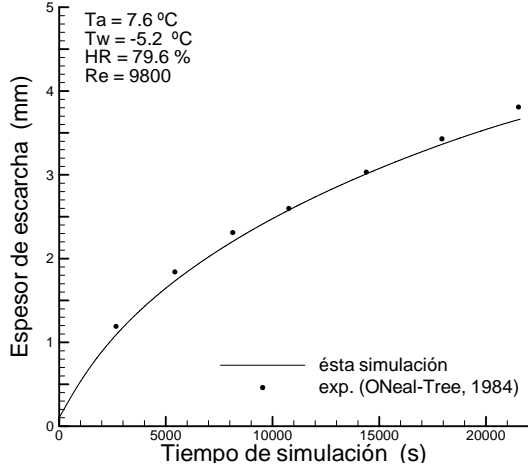


Figura 3-d

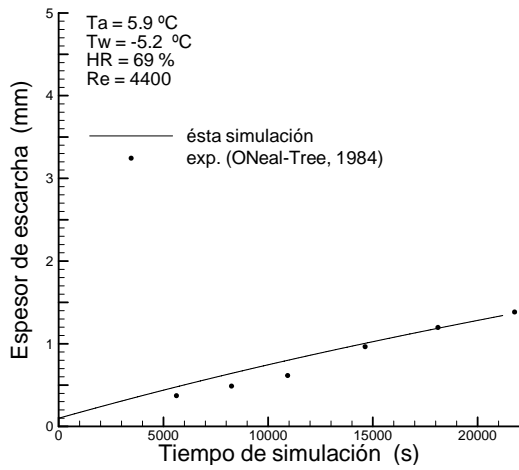


Figura 3-e

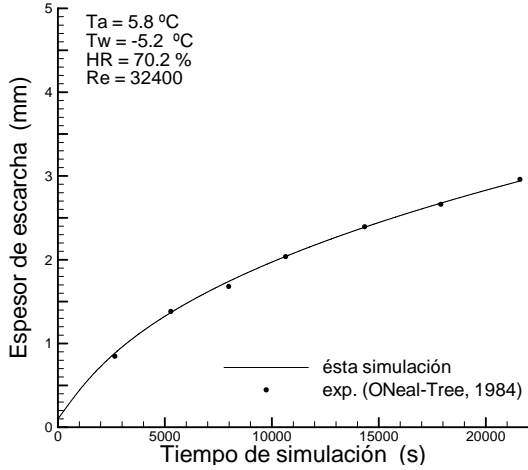


Figura 3-f

Figura 3: Otras comparaciones con valores experimentales de O'Neal e Tree (1984)



En el gráfico siguiente, Figura 4, se compara con datos experimentales<sup>16</sup>

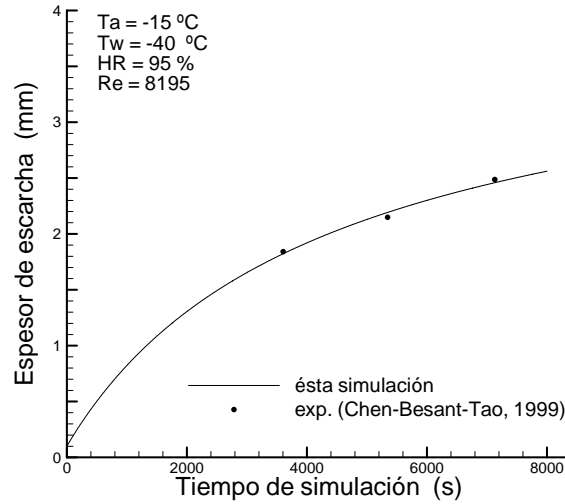


Figura 4: Comparación con valores experimentales de Chen-Besant-Tao (1999)

En los gráficos a continuación, se compara con otros datos experimentales<sup>15</sup>

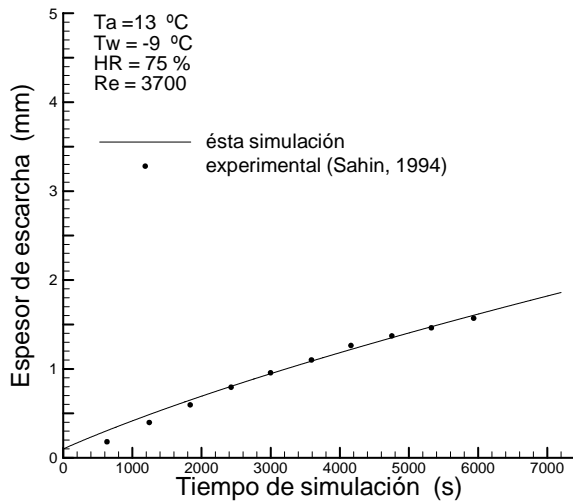


Figura 5-a

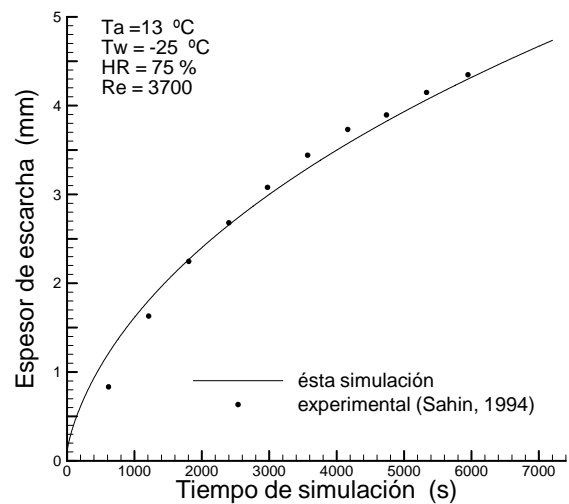


Figura 5-b

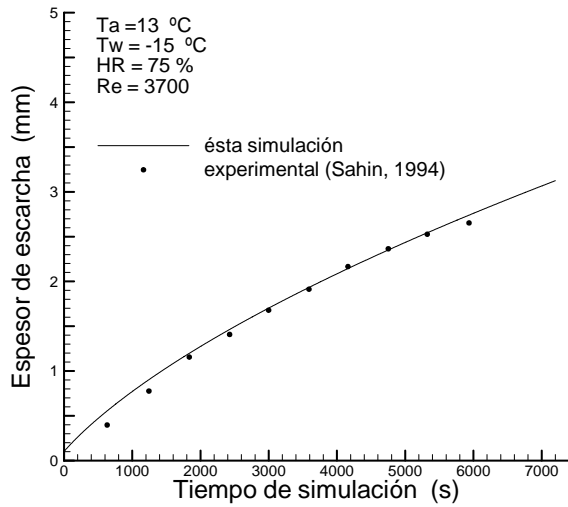


Figura 5-c

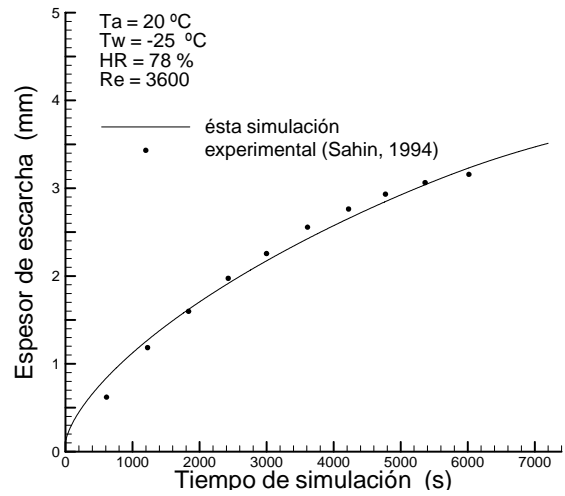


Figura 5-d

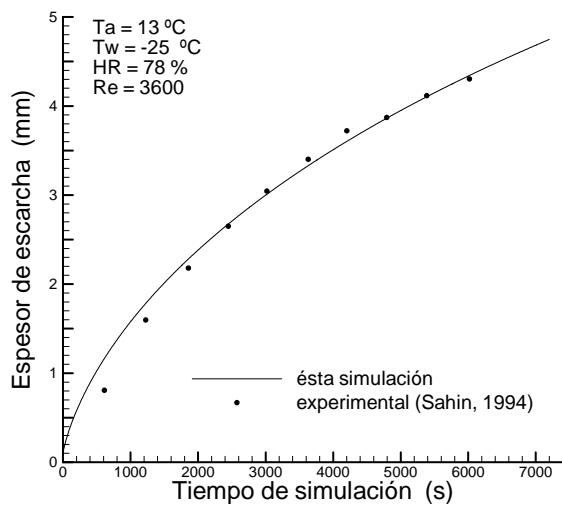


Figura 5-e

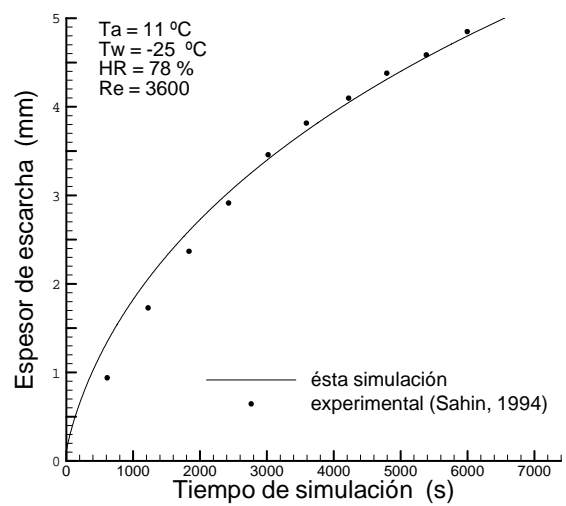


Figura 5-f

Figura 5: Comparación con valores experimentales de Sahin (1994)

El conjunto de gráficos anteriores es de tremenda importancia pues corresponde a un buen número de validaciones del programa de simulación desarrollado y es en base a ellos que finalmente se obtiene la correlación o correlaciones necesarias para los factores de resistencia a la difusión.

## 8 RESULTADOS

### 8.1 Correlación para los factores de resistencia a la difusión

Basándonos en los gráficos obtenidos de validación del programa, se procedió a tabular todos los parámetros considerados relevantes para obtener una correlación que pudiese definir un valor para los factores de resistencia a la difusión.

A diferencia de la propuesta<sup>13</sup> donde se define valores para los factores F y Fs, sólo en función de la temperatura de la placa fría, en este trabajo fueron considerados originalmente los parámetros: número de Reynolds, temperatura de la placa fría, temperatura del aire, humedad relativa y la fracción volumétrica de hielo inicial supuesta.

En la tabla siguiente se establecen los rangos válidos para cada variable dentro de los cuales fueron analizadas posibles correlaciones.

Variable	Valor Mínimo	Valor Máximo
F	-1,000	-0,500
Fs	-1,100	-0,500
F/Fs	0,870	1,250
Tar (K)	258,000	286,000
Tw (K)	233,000	268,000
HR	0,600	0,950
Re	3600,000	32500,000
$\varepsilon_0$	0,016	0,275

Tabla 1: Rango de parámetros

Los análisis desarrollados llevaron a la conclusión que las variables significativas eran sólo las temperaturas del aire húmedo y de la placa fría, llegándose finalmente a la correlación:

$$\frac{F}{F_s} = 1.1258 \left[ \frac{T_{ar}}{T_w} \right]^{-1.6857} \quad (20)$$

### 8.2 Simulación del depósito de escarcha

A continuación se presentan los resultados de simular el depósito por ablimentación del vapor de agua contenido en un flujo de aire húmedo con temperatura de -5 °C y humedad relativa 85%, sobre una placa fría, que se encuentra a temperatura constante de -17 °C. La influencia del número de Reynolds se verifica variando éste entre 5000 y 30000. Los gráficos generados son los siguientes:

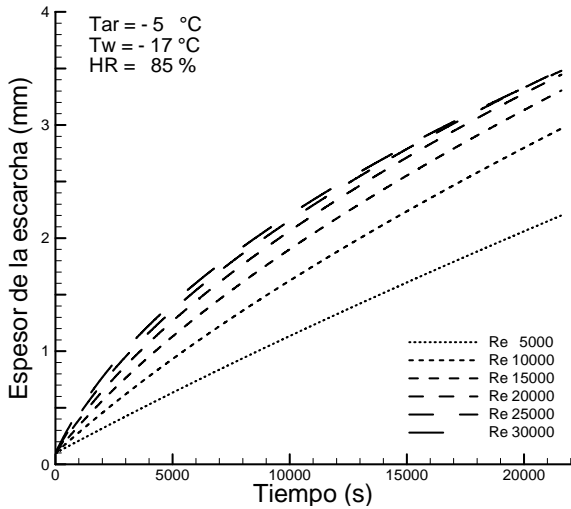


Figura 6: Crecimiento de la capa de escarcha en el tiempo para distintos Reynolds

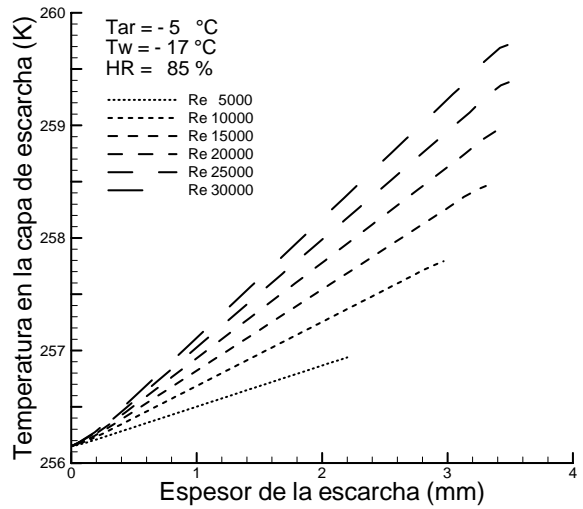


Figura 7: Distribución de temperatura en la capa de escarcha para distintos Reynolds

Originalmente se observa, Figura 6, que se llega a un instante en el cual es despreciable la influencia del número de Reynolds en el crecimiento de la capa de escarcha. En la Figura 7, verificamos un comportamiento físicamente coherente; para mayores Reynolds tendremos mayor difusión de vapor de agua, con consecuente aumento en la temperatura de la superficie por la mayor resistencia térmica.

Posteriormente, en la Figura 8, para las condiciones indicadas, se observa que la densidad crece levemente para los Reynolds menores, tornándose más significativo en el caso de valores altos, hasta completar el tiempo de simulación 21600 s (6 horas).

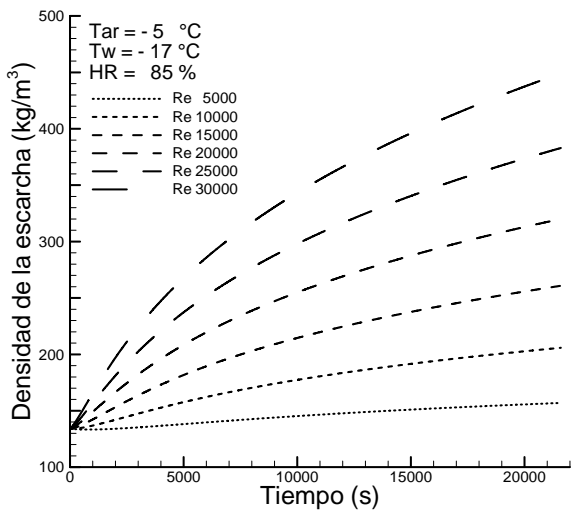


Figura 8: Variación de densidad de la escarcha en el tiempo, para Reynolds distintos

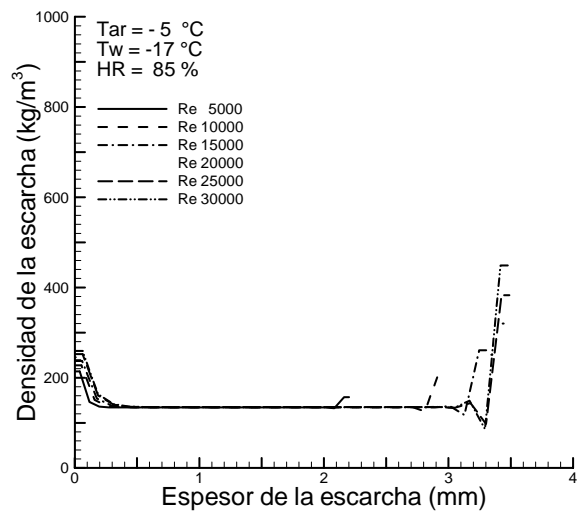


Figura 9: Variación de la densidad de la escarcha en el espesor, para Reynolds distintos

En la Figura 9, la densidad de la escarcha tiene un marcado crecimiento cerca de la pared fría, luego decrece hasta un valor casi constante para finalmente tener comportamiento variable cerca de la superficie de la escarcha.

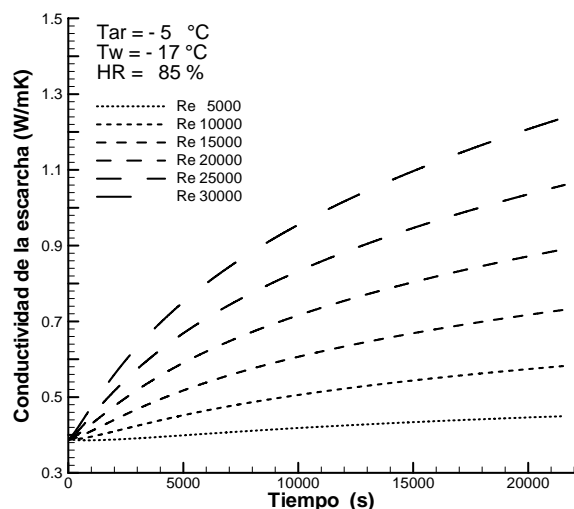


Figura 10: Conductividad de la escarcha vs tiempo para Reynolds distintos

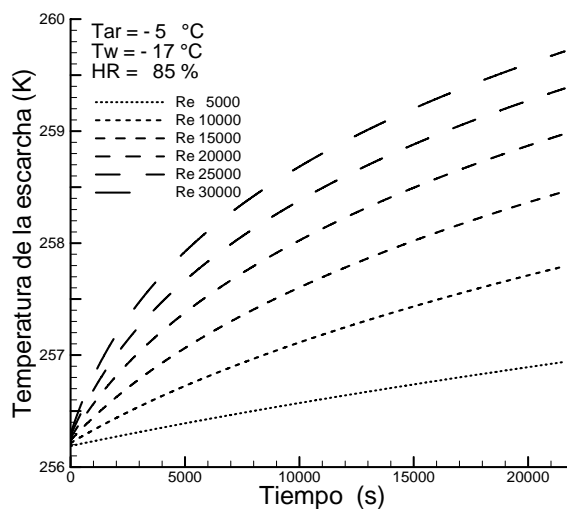


Figura 11: Temperatura de la escarcha en el tiempo para Reynolds distintos

Se observa, en la Figura 10 anterior, que para Reynolds entre 5000 y 30000 la conductividad de la escarcha tiene comportamiento similar al de la densidad. Este hecho no es nuevo pues es sabido que la conductividad es proporcional a la densidad. Por otra parte, en la Figura 11 se verifica la influencia del número de Reynolds en el crecimiento de la temperatura.

A continuación, para todos los Reynolds, en Fig. 12, se observa que la fracción volumétrica de hielo en la escarcha, se comporta similar a la densidad. La influencia del Reynolds es casi nula en la fracción volumétrica de la zona interior de la capa de escarcha, sin desconocer, claro, que los espesores correspondientes en cada caso son diferentes. En la superficie de la escarcha su influencia se nota.

La porosidad de la escarcha en la Fig. 13, presenta comportamiento coherente, opuesto al de la fracción volumétrica del hielo. Permanece casi constante, en este caso con disminución en la superficie de la escarcha para distintos Reynolds. En la literatura no es fácil encontrar información experimental y/o teórica relativa a esta propiedad de la escarcha. Se observa<sup>9</sup> una distribución de porosidad asumida en la superficie de la escarcha, para un Reynolds de 1500, de aproximadamente 95 %. En este trabajo se verificó elevada porosidad cerca de la pared fría, cercana al 70% , llegando a 85% en la zona intermedia y con bastante variabilidad en la superficie de la escarcha, independientemente del Reynolds asumido.

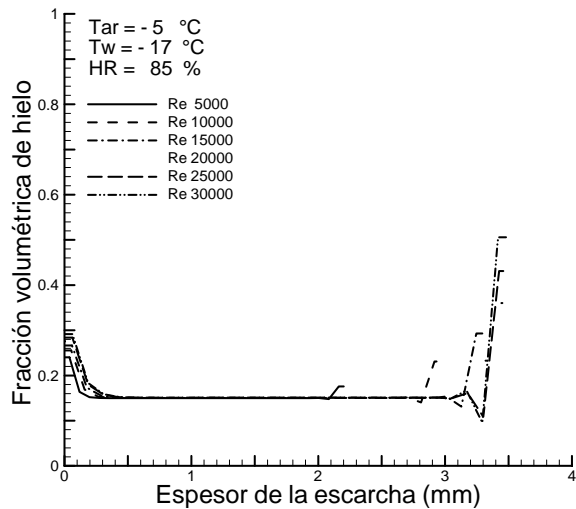


Figura 12: Fracción volumétrica del hielo en la escarcha para Reynolds distintos

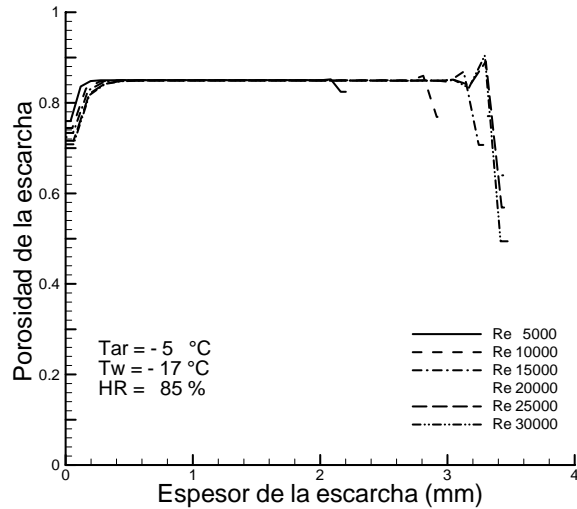


Figura 13: Porosidad de la escarcha para Reynolds distintos

## 9 CONCLUSIONES

Fue presentado un modelo físico que simula el crecimiento y densificación de la capa de escarcha, formada por el depósito de vapor de agua procedente del aire húmedo, cuando sometido a un proceso de transferencia de calor y masa por contacto con una superficie plana suficientemente fría.

Este simulador muestra variaciones temporales, en: espesor, calor específico, conductividad térmica efectiva, densidad, porosidad de la escarcha y fracción volumétrica del hielo.

Las conclusiones alcanzadas en este estudio sobre el comportamiento de la escarcha, son:

- El espesor de la escarcha varía en forma directa con el número de Reynolds. Sin embargo, para altos valores de éste es insensible a su variación.*
- El número de Reynolds no es muy influyente en la densidad e igualmente en la fracción volumétrica del hielo en capas internas de la escarcha. Estas distribuciones internas son tremendamente difíciles de medir y dada su importancia práctica, este resultado del simulador es de gran relevancia para posteriores estudios de adhesión y remoción de escarcha.*
- Analizando la densidad, fracción volumétrica y porosidad de la escarcha, se observa gran influencia del factor de resistencia a la difusión. Existe dependencia de las condiciones operacionales externas con el valor asumido para dicho factor cuando queremos reproducir la principal, sino la única, magnitud medida con exactitud en la escarcha sobre una superficie, su espesor.*
- Otro parámetro de gran importancia es la fracción volumétrica inicial considerada. Tiene influencia inversa en el espesor y la temperatura, y directa sobre la densidad de la escarcha.*

## 10 NOMENCLATURA

$C$	=	calor específico ( $J/kg^{\circ}C$ )
$D_{AB}$	=	coeficiente de difusión de masa, ( $m^2/s$ )
$D_{eff}$	=	coeficiente de difusión efectiva ( $m^2/s$ )
$F$	=	factor de corrección del parámetro de resistencia a la difusión
$HR$	=	humedad relativa del aire (%)
$l_{ig}$	=	calor latente de sublimación ( $J/kg$ )
$k$	=	conductividad térmica ( $W/mK$ ).
$k_{eff}$	=	conductividad térmica efectiva de la escarcha ( $W/mK$ )

### Símbolos griegos

$\rho$	=	densidad de la escarcha( $kg/m^3$ ).
$\rho_a$	=	densidad del aire seco ( $kg/m^3$ )
$\rho_v$	=	densidad del vapor de agua del aire húmedo ( $kg/m^3$ ).
$\rho_l$	=	densidad del hielo ( $kg/m^3$ ).
$\varepsilon$	=	fracción volumétrica del hielo en la escarcha
$\varepsilon_g$	=	fracción volumétrica del gas en la escarcha
$\sigma$	=	porosidad de la escarcha
$p_{atm}$	=	presión atmosférica (Pa)
$t$	=	tiempo (s)
$T$	=	temperatura en la capa de escarcha (K)
$T_{ar}$	=	temperatura media del aire ( $^{\circ}C$ )
$T_s$	=	temperatura superficial de escarcha ( $^{\circ}C$ )
$T_w$	=	temperatura de la placa fría ( $^{\circ}C$ )
$u$	=	velocidad media del aire ( $m/s$ )
$y_s$	=	Espesor de la escarcha (m)

### Subíndices

$\infty$	=	en zona no perturbada
$a$	=	del aire seco
$f$	=	de la escarcha (frost)
$g$	=	del gas (aire húmedo)
$l$	=	del hielo (ice)
$p$	=	a presión constante
$s$	=	en la superficie de la escarcha
$v$	=	del vapor de agua

## 11 AGRADECIMIENTOS

El primer y segundo autores, agradecen a la Universidad del Bío-Bío, Chile, por el apoyo financiero a través del proyecto N° 041513 3/RS.

## 12 REFERENCIAS

- [1] ASHRAE, "Psychrometrics". *Fundamentals Handbook*, Cap. 6. (1997).
- [2] H. Auracher, "Water vapor diffusion and frost formation in capillaries". Annex 1972 –1. In. *Bulletin of the International Institute of Refrigeration*. Communications B1, B2 , and E1, Freudenstadt, p. 477-488 (1972).
- [3] H. Chen, L. Thomas, and R. Besant, "Modeling frost characteristics on heat exchanger fins: Part II, Model validation and limitations", *Ashrae Transactions*, v. 106, part. 2, 1-9, (2000).
- [4] M. Dietsberger, "Generalized correlation of the water frost thermal conductivity", *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, v. 26, n. 4, 607-619 (1983).
- [5] J.A. Gatica, "Um modelo para crescimento da geada". Tese de doutorado. PEM/COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil , 2003.
- [6] K.A.R. Ismail and C.S. Salinas, "Modeling of frost formation over parallel cold plates", *International Journal of Refrigeration*, v. 22, 425-441 (1999).
- [7] K.S. Lee, W.S. Kim and T.H. Lee, "A one-dimensional model for frost formation on a cold flat surface", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 40, n. 18, 4359-4365 (1997).
- [8] R. Le Gall, J.M. Grillo and C. Jallut, "Modeling of frost growth and densification", *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 40, n. 13, 3177-3187 (1997).
- [9] A. Luer and H. Beer, "Frost deposition in parallel plate channel under laminar flow conditions", *Int. J. Thermal Science*, v. 39, 85-95 (2000).
- [10] Y. Mao, R.W. Besant and H. Chen, "Frost characteristic and heat transfer on a flat plate under freezer operating conditions: Part I, Experimentation and Correlations", *Ashrae Transactions*, v. 99, n. 1, 739-745 (1999).
- [11] D.L. O'Neal and D.R. Tree, "Measurement of frost growth and density in a parallel plate geometry", *Ashrae Transactions*, v.90, part. 2, 278-290 (1984).
- [12] D.L. O'Neal and D.R. Tree, "A review of frost formation in simple geometries", *Ashrae Transactions*, Vol.91, part. 2A, pp. 267-281 (1985).
- [13] Y.X. Tao, R.W. Besant and K.S. Rezkallah, "A mathematical model for predicting the densification and growth of frost on a flat plate ", *Int. J. Heat Mass Transfer*, v. 36, n. 2, 353-363 (1993).
- [14] R. Yun, Y. Kim and M. Min, "Modeling of frost growth and frost properties with airflow over a flat plate ". *Int. J. of Refrigeration*, v. 25, 362-371 (2002).
- [15] A.Z. Sahin, "An experimental study on the initiation and growth of frost formation on a horizontal plate". *Experimental heat transfer*, 7, 101-119 (1994).
- [16] H. Chen, R. Besant and Y. Tao, "Frost characteristics and heat transfer on a flat plate under freezer operating conditions: Part II, Numerical modeling and comparison with data". *Ashrae Transactions*, v. 105, 252-259 (1999).