

exped. 312-95116/97



FACULTAD DE INGENIERIA  
Dpto. INGENIERIA QUIMICA  
BIBLIOTECA  
LA PLATA

*Facultad de Ingeniería*  
*Universidad Nacional de La Plata*

# DISEÑO DE EQUIPOS PARA LA CONGELACION DE ALIMENTOS

**ANTONIO DE MICHELIS**

Tesis presentada como requisito para la obtención del grado de

**DOCTOR EN INGENIERIA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA**

**- DICIEMBRE de 1999 -**

DPTO. DE INGENIERIA QUIMICA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
- UNLP -

Inventario Biblioteca:

1577  
664.037

Signatura Topográfica:

DZ

El presente trabajo de tesis para optar al título de Doctor en Ingeniería fue realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos – Facultad de Ciencias Exactas – Universidad Nacional de La Plata y en INTA AER El Bolsón – EEA San Carlos de Bariloche – Macroregión Patagonia Norte, bajo la dirección del **Dr. Rodolfo Horacio Mascheroni**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la **Ing. Analía Vázquez**, quien me interesó para dedicarme a esta temática y quien, además, aportó parte de sus desarrollos en lecho fluidizado para hacer posible éste trabajo

A los **Dres. Alfredo Calvelo y Rodolfo H. Mascheroni**, quienes dedicaron muchas horas a mi formación en transferencia de calor y materia en tecnología de alimentos

A la **Dra. María Cristina Añón**, al **Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (C.I.D.C.A.)**; y a la **Estación Experimental Agropecuaria San Carlos de Bariloche del INTA (EEA Bariloche)** por facilitar permanentemente mi tarea

Al **Ing. Raúl O. Reynoso**, quien ha colaborado con largas jornadas de trabajo experimental y de discusión de resultados

A la **Dra. Viviana O. Salvadori**, quien colaboró en los últimos desarrollos de tiempos de congelación que forman parte de éste trabajo

A la **Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional La Plata**, por la formación de pregrado recibida

Al **Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (C.O.N.I.C.E.T)** por el apoyo económico recibido

Al **Dr. Jorge Wagner** quien realizó parte de los gráficos

A todos mis **compañeros y amigos** del CIDCA y de la AER El Bolsón del INTA, quienes de alguno u otro modo han colaborado al desarrollo de éste trabajo

*A mi familia*

*Cristina, Andrés, Valeria y Juan Martín*

Parte de los resultados presentados en ésta tesis han sido publicados en los siguientes trabajos:

Freezing time predictions for brick and cylindrical-shaped foods. A. De Michelis y A. Calvelo. *J. Food Sci.* 48:909-934 (1983)

Prediction rate optimization in continuous fluidized bed freezers. A. De Michelis y A. Calvelo. *J. Food Sci.* 50:669:673 (1985)

Obtención de tiempos de congelación a través de un método gráfico. R.O. Reynoso, V.O. Salvadori, A. De Michelis y R.H. Mascheroni. *La Técnica del Frío y del Calor.* (XXV) 380:34-39 (1987)

Freezing time predictions for regular shaped foods: a simplified graphical method. V.O. Salvadori, R.O. Reynoso, A. De Michelis y R.H. Mascheroni. *Int. J. Refrig.* 9:357-361 (1987)

Longitudinal dispersion coeficients for the continuous fluidization of different shaped foods. A. De Michelis y A. Calvelo. *J. Food Eng.* 21:331-342 (1994)

Métodos simples y precisos para predicción de tiempos de congelación de alimentos con formas regulares multidimensionales. V.O. Salvadori, G.J. Siri, A. De Michelis y R.H. Mascheroni. *Proceed. I Cong. Iberoamericano Ing. Alimentos. Tomo III. Cálculo de equipos y procesos.* pp 200-211 (1996)

Freezing of strawberry pulp in large containers. Experimental determinations and prediction of freezing times. V.O. Salvadori, R.H. Mascheroni y A. De Michelis. *Int. J. Refrig.* 19:87-94 (1996)

Prediction of freezing times for regular multidimensional foods using a simple formulae. V.O. Salvadori, A. De Michelis y R.H. Mascheroni. *Lebens. U-Wiss. U-Technol.* 30:30-35 (1997)

**INDICE****Capítulo 1: INTRODUCCION**

1.1.- Presentación del tema	2
1.2.- Descripción de contenidos y objetivos	7
1.2.1.- Contenidos	7
1.2.2.- Objetivos	14

**Capítulo 2: TIEMPOS DE CONGELACION**

2.1.- Introducción	19
2.2.- La dinámica de la congelación	21
2.3.- Métodos de cálculo de tiempos de congelación	24
2.3.1.- Soluciones analíticas de sistemas simplificados	26
2.3.2.- Soluciones numéricas que tienden a ser exactas	27
2.3.3.- Soluciones aproximadas	33
2.4.- Método desarrollado	66
2.4.1.- Resultados	73
2.4.1.1.- Experiencias de congelación de bloques de carne bovina	75
2.4.1.1.1.- Descripción de las experiencias	75
2.4.1.1.2.- Resultados obtenidos de las experiencias de congelación de bloques de carne bovina	79
2.4.1.2.- Experiencias de congelación de pulpa de frutilla en grandes recipientes	82
2.4.1.2.1.- Obtención de la pulpa de frutilla	83
2.4.1.2.2.- Recipientes utilizados para la congelación	84
2.4.1.2.3.- Descripción de las experiencias de congelación de la pulpa de frutilla	85

2.4.1.2.4.- Estimación de los coeficientes de transferencia de calor $h$ , para la congelación de la pulpa de frutilla	86
2.4.1.2.5.- Condiciones operativas y tiempos de congelación experimentales para la congelación de pulpa de frutilla	88
2.4.1.2.6.- Propiedades de la pulpa de frutilla	91
2.4.2.- Comparación del método desarrollado con los resultados experimentales	96
2.5.- Conclusiones	110
<b>Capítulo 3: DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA DE ALIMENTOS PARTICULADOS EN LECHO FLUIDIZADO</b>	
3.1.- Introducción	112
3.2.- Fluidodinámica del lecho fluidizado	116
3.3.- Coeficientes de transferencia de calor en lecho fluidizado	124
3.3.1.- Coeficientes de transferencia de calor gas – partícula individual	124
3.3.2.- Coeficientes efectivos de transferencia de calor gas – partícula en lechos fluidizados	129
3.4.- Movimiento de las partículas en el lecho fluidizado	131
3.5.- Comportamiento de partículas no esféricas en lechos fluidizados	136
3.5.1.- Fluidodinámica del lecho fluidizado para partículas no esféricas	137
3.5.1.1.- Descripción del equipo experimental para las experiencias fluidodinámicas	137
3.5.1.2.- Descripción de las partículas utilizadas en las experiencias	139



3.5.1.3.- Descripción de las técnicas utilizadas para las experiencias fluidodinámicas	140
3.5.1.3.1.- Pérdida de carga del lecho de partículas	140
3.5.1.3.2.- Porosidad del lecho de partículas	141
3.5.2.- Distribución de tiempos de residencia de partículas no esféricas en lecho fluidizado continuo	142
3.5.2.1.- Descripción del equipo experimental	142
3.5.2.2.- Descripción de las partículas utilizadas en las experiencias	144
3.5.2.3.- Descripción de las técnicas utilizadas para las experiencias de distribución de tiempos de residencia	145
3.6.- Resultados obtenidos	146
3.6.1.- Pérdida de carga de la grilla	146
3.6.2.- Pérdida de carga del lecho	147
3.6.3.- Porosidad de lecho y fracción de burbujas	154
3.6.3.1.- Porosidad de lecho	154
3.6.3.2.- Calculo de la fracción de burbujas en el lecho	158
3.6.4.- Distribución de tiempos de residencia para partículas no esféricas	161
3.6.4.1.- Comprobación de la aplicabilidad del modelo descrito en el apartado 3.4.- de éste capítulo para partículas no esféricas	161
3.6.4.1.1.- Comprobación de la definición de tiempo mínimo de residencia	162
3.6.4.1.2.- Comprobación de que las partículas no esféricas satisfacen la ec. (3.31)	163
3.6.4.2.- Obtención de los coeficientes de mezclado longitudinal para cubos y bastones	170
3.6.4.3.- Obtención de una correlación generalizada para $D_z$	176

3.6.4.4.- Estimación de la producción en congeladores de lecho fluidizado continuo	179
3.6.4.5.- Verificación de la correlación generalizada de $D_p$ para otras partículas	180
3.7.- Comparación de los tiempos de congelación y producciones de éste modelo con datos experimentales de equipos comerciales	182
3.8.- Conclusiones	183
 <b>Capítulo 4: OPTIMIZACION DE LA PRODUCCIÓN EN CONGELADORES CONTINUOS DE LECHO FLUIDIZADO</b>	
4.1.- Introducción	188
4.2.- Análisis de la influencia de las variables de operación sobre la producción de congeladores continuos de lecho fluidizado	189
4.2.1.- Efecto de la altura de lecho expandido sobre la producción	193
4.2.2.- Efecto de la velocidad superficial del aire sobre la producción	195
4.2.3.- Efecto conjunto de la velocidad superficial del aire y la altura de lecho sobre la producción	198
4.2.4.- Influencia de la longitud de lecho sobre la producción óptima en congeladores continuos de lecho fluidizado	201
4.2.5.- Influencia de la temperatura del aire de entrada al lecho sobre la producción óptima en congeladores continuos de lecho fluidizado	205
4.2.6.- Influencia del diámetro de partícula sobre la producción óptima en congeladores continuos de lecho fluidizado	205
4.3.- Optimización de la producción en congeladores continuos de lecho fluidizado	206
4.4.- Comparación de las ecuaciones de diseño con datos experimentales	214
4.5.- Aplicación de las ecuaciones de diseño para otros productos y otras formas de alimentos	218

4.6.- Comparación de la producción de lecho fluidizado y lecho fijo	221
4.7.- Comparación de tiempos de congelación y producción experimentales de lecho fijo con los modelos presentados en éste trabajo	234
4.8.- Conclusiones	235
Capítulo 5: CONCLUSIONES GENERALES	238
NOMENCLATURA	245
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	255

## **Capítulo 1**

### **INTRODUCCION**

### 1.- Introducción

#### 1.1.- Presentación del tema

El desarrollo de productos congelados en el ámbito mundial, principalmente en países de alto poder adquisitivo, es altamente significativo como consecuencia de que la congelación se considera como uno de los mejores métodos para la conservación a largo plazo de alimentos.

Asimismo, los alimentos congelados permiten disponer de gran variedad de platos de relativamente compleja preparación a nivel hogareño y en los casos en que se consumen pocas porciones no se justifica su preparación.

El crecimiento y la gran diversificación de la oferta de alimentos congelados es posible gracias al fuerte desarrollo de equipamiento para la congelación en países altamente industrializados. La evolución abarca tanto a equipos discontinuos que transfieren calor en una sola dirección como a aquellos con transferencia de calor multidireccional, y que pueden instalarse en líneas de producción continuas, brindando altas capacidades de producción con relativamente cortos tiempos de procesamiento.

En nuestro país el consumo de productos congelados es importante, con un significativo aporte de importado, aunque todavía los niveles de producción son relativamente bajos probablemente debido a:

- ✓ No se ha establecido una cadena de frío confiable

- ✓ La “cultura” de manejo del producto congelado recién se está desarrollando en el ámbito de transportistas, distribuidores, mayoristas, minoristas y consumidores
- ✓ La falta de educación del consumidor en el manejo de estos productos, y la relativamente baja inversión nacional en equipos hogareños de conservación de alimentos congelados (freezers)
- ✓ El alto precio de los productos de buena calidad
- ✓ La muy alta inversión inicial en equipos de congelación, importados, y con servicios de repuestos y mantenimiento de alto costo, para los niveles de producción actuales

Sin embargo, es posible observar que los cuatro primeros factores se han comenzado a resolver mediante:

- ✓ La relativamente reciente aparición de super e hipermercados, con capacidad de inversión para contar con los equipos de frío necesarios para la conservación y exposición de productos congelados, y que exigen, además, que la cadena de frío se establezca con normalidad
- ✓ Los fabricantes, distribuidores y minoristas de productos congelados están capacitando a su personal, como consecuencia de la fuerte competencia entre cadenas de super e hipermercados. Asimismo, hoy es posible mediante pequeñas inversiones conocer con certeza la historia térmica del producto congelado, desde que sale de la planta elaboradora hasta que lo adquiere el consumidor final.

- ✓ Los equipos para almacenamiento y conservación hogareña de estos productos hoy se encuentran, como consecuencia de la relativa estabilidad económica y la aparición de líneas de financiación de muy fácil acceso para la adquisición de electrodomésticos, a disposición de muchos hogares, lo que ha aumentado sensiblemente la posibilidad de contar con almacenamiento hogareño de alimentos congelados.

En este sentido, la oferta de refrigeradores de dos fríos y de freezers se ha incrementado significativamente con la consecuente disminución de precios.

En la Tabla 1.1 se muestra la evolución de la producción nacional de los mencionados electrodomésticos:

**Tabla 1.1: Evolución de la producción nacional de refrigeradores y freezers entre los años 1987 y 1997**

<b>PRODUCCION NACIONAL</b>					
<b>Año</b>	<b>REFRIGERADORES</b>		<b>FREEZERS</b>		<b>Total</b>
	<b>1 Frío</b>	<b>2 Fríos</b>	<b>Horizontal</b>	<b>Vertical</b>	
<b>1987</b>	160.080	209.890	86.670	17.100	<b>473.740</b>
<b>1988</b>	44.532	167.942	82.792	24.460	<b>319.726</b>
<b>1989</b>	104.171	137.589	52.574	18.402	<b>312.736</b>
<b>1990</b>	118.440	146.435	50.415	11.585	<b>326.876</b>
<b>1991</b>	210.908	227.909	116.087	21.529	<b>576.433</b>
<b>1992</b>	198.000	355.480	187.740	19.650	<b>760.950</b>
<b>1993</b>	270.000	410.200	139.350	11.480	<b>831.030</b>
<b>1994</b>	155.700	337.900	121.200	5.550	<b>620.350</b>
<b>1995</b>	111.200	278.000	93.060	6.690	<b>488.950</b>
<b>1996*</b>	144.000	234.000	70.000	13.000	<b>461.000</b>
<b>1997*</b>	150.000	260.000	82.000	10.000	<b>510.000</b>
<b>TOTAL</b>	<b>1.667.032</b>	<b>2.765.347</b>	<b>1.081.888</b>	<b>159.446</b>	<b>5.681.791</b>

\* estimado. Fuente: CAIRAA, 1998

En el mismo rubro, la cantidad de equipos de importación, se muestra en la Tabla 1.2.

**Tabla 1.2: Importación de refrigeradores y freezers entre los años 1992 y 1997**

<i>IMPORTACION</i>					
Año	REFRIGERADORES		FREEZERS		TOTAL
	1 Frío	2 Fríos	Horizontal	Vertical	
1992	97.700	37.510	26.075	31.015	192.300
1993	160.330	46.190	37.975	39.385	283.880
1994	96.650	45.575	15.705	29.105	186.035
1995	70.170	62.860	20.440	22.320	175.790
1996	82.575	116.890	18.065	17.815	235.345
1997	121.500	140.090	20.360	21.970	303.920
<b>TOTAL</b>	<b>628.926</b>	<b>449.117</b>	<b>138.620</b>	<b>161.610</b>	<b>1.377.270</b>

Fuente: CAIRAA, 1998

De las Tablas 1.1 y 1.2 se desprende que en los últimos años se han producido e importado 3.214.464 refrigeradores de dos fríos, es decir, con gabinete para congelados; y 1.541.564 freezers con preponderancia del tipo horizontal (80 % del total de freezers).

Si se efectúa una estimación rápida, tomando como promedio 30 litros de capacidad para congelados en los refrigeradores de dos fríos y 150 litros para los freezers, se obtiene una capacidad de almacenamiento hogareña de productos congelados de 327.668 m<sup>3</sup>, sin contar con este tipo de electrodomésticos que existían antes de 1987.

Considerando, también como una simple estimación, que se puede almacenar 250 kg de producto congelado por m<sup>3</sup> de capacidad, se obtiene que la capacidad de



almacenamiento hogareño de congelado ha crecido en los últimos años en 81.917 toneladas, lo que equivale a, aproximadamente, 2,3 kg per cápita.

- ✓ A su vez el consumidor está siendo “educado” desde muchos ángulos en el manejo del congelado. Así se recibe información a través de los medios masivos de difusión que cada día incorporan más y más recetas para la elaboración y/o utilización del alimento congelado. Las cámaras de fabricantes de equipos, los elaboradores del producto, los comercios minoristas, las organizaciones intermedias creadas para el fomento como la Fundación del Congelado, y hasta los Centros de Investigación y Universidades que trabajan en estos temas ayudan, a través de la extensión, a brindar información al consumidor.
  
- ✓ El alimento congelado siempre se vende “listo para usar”, lo que facilita la labor de preparación y cocción en los hogares. Si se realizan simples cálculos de los costos de preparación, de los rendimientos desde la adquisición de la materia prima hasta el producto “listo para usar”, es posible indicar que la incidencia de la diferencia de precios entre la materia prima y los productos congelados disponibles para usar inmediatamente, en el costo de la canasta familiar es poco significativa.
  
- ✓ El último factor, la muy alta inversión inicial para la instalación de equipos en línea, aún sigue vigente. Este inconveniente es provocado por el muy alto costo de los equipos importados y por el riesgo que implica hacer grandes inversiones para productos que se encuentran en la etapa de desarrollo comercial. Es posible disminuir significativamente la incidencia de estos costos si fuera posible construir equipos nacionales.

Nuestro país posee amplia experiencia en la construcción de equipos para la agroindustria, con buena capacidad para implementar nuevos proyectos si dispone de la información necesaria para su desarrollo.

### **1.2.- Descripción de contenidos y objetivos**

#### **1.2.1.- Contenidos**

El diseño de equipos para la congelación de alimentos comprende tres componentes:

- ✓ Diseño de la transferencia de calor entre el producto y el medio de enfriamiento
- ✓ Diseño del movimiento del producto dentro de los equipos, principalmente en aquellos en que el mezclado de alimentos particulados, en el sentido de avance del producto, posee magnitud medible
- ✓ Diseño de detalle en la parte mecánica, la cual tiene en cuenta el soporte para el alimento y/o transporte del mismo, el movimiento del fluido refrigerante, la posición y descongelación de los evaporadores, parámetros para asegurar una construcción que tenga en cuenta normas de sanidad y limpieza, etc.

Todas ellas deben confluir en tratar de obtener la mejor calidad de producto con un mínimo en la inversión energética, que es la variable de costo operativo más relevante en los procesos de congelación.

El diseño de la transferencia de calor entre el producto y el medio de enfriamiento, y el diseño del movimiento relativo del producto dentro del equipo

determinan, en función de las variables de operación, el tiempo de residencia del producto en el equipo. En este trabajo se abordarán estos dos primeros aspectos del diseño.

Los equipos para la congelación de alimentos se pueden clasificar, según su forma de uso en: **discontinuos y continuos**.

Dentro de los **discontinuos** se pueden agrupar de acuerdo al tipo de sistema y de refrigerante en: **Túneles estáticos con aire forzado; Congeladores de contacto con superficies enfriadas (de placas) y Gabinetes criogénicos**. Los dos primeros utilizan refrigeración mecánica y los últimos líquidos criogénicos (CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> líquidos), que evaporan a muy baja temperatura en condiciones de presión ambiente.

Los **continuos** se suelen agrupar, según: **Túneles de cajas, contenedores o vagonetas; Túneles de cinta arrastrada y Túneles de lecho fluidizado; Congeladores de placas horizontales; Túneles criogénicos por inmersión y/o aspersión**. Los primeros utilizan refrigeración mecánica y los últimos líquidos criogénicos.

También es posible combinar sistemas para obtener túneles de doble cinta arrastrada; de placas y cinta; criogénicos - mecánicos, etc..

Cualquiera sea el sistema, los diseñadores de equipos deben tener como objetivos básicos, en orden decreciente de importancia (Mascheroni, 1997, Cleland y Ozilgen, 1998), los siguientes:

- ✓ La obtención de productos de máxima calidad final

- ✓ El cumplir con normas muy estrictas de sanidad incluyendo la facilidad de limpieza de los equipos
- ✓ La reducción de los costos fijos y operativos a mínimos compatibles con los dos primeros objetivos

Siempre la mejor calidad se obtiene con buenas prácticas previas y posteriores a la congelación, con altas velocidades de congelación o bajos tiempos de proceso y condiciones operativas de los equipos constantes y controladas.

Los parámetros que determinan la velocidad de congelación son:

- ✓ Temperatura del medio refrigerante
- ✓ Coeficiente de transferencia de calor efectivo
- ✓ Forma y tamaño del producto
- ✓ Propiedades físicas del alimento
- ✓ Temperatura inicial y final de congelación del alimento

El tiempo de congelación es aproximadamente proporcional a la inversa de la diferencia de temperaturas inicial del alimento y del medio refrigerante, por lo tanto el tiempo de congelación disminuye con la disminución de la temperatura del medio refrigerante.

En la congelación industrial la disminución de la temperatura del medio refrigerante presenta los siguientes límites: en refrigeración mecánica se puede alcanzar hasta  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  por razones de rendimiento energético, y en refrigeración criogénica la temperatura está limitada por el punto de ebullición, a presión atmosférica, del fluido utilizado.

Cuando se usa  $\text{CO}_2$  líquido se puede alcanzar alrededor de  $-79\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y con  $\text{N}_2$  líquido hasta  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, estas tan bajas temperaturas se encuentran limitadas, también, por razones económicas como el consumo de fluido criogénico, y por el comportamiento de algunos alimentos cuando se los expone a dichos niveles de temperatura.

El coeficiente de transferencia de calor efectivo, que es una medida de la posibilidad de transferir calor en la interfase medio refrigerante – producto. Su valor es determinado por la fluidodinámica del medio refrigerante (velocidad y régimen de flujo), tipo de contacto medio refrigerante – alimento, la existencia o no de materiales de empaque, los espacios huecos entre el producto y el paquete, la forma del producto, su tamaño y la distribución espacial del mismo en el equipo. Como regla general altas velocidades y regímenes turbulentos del flujo del medio refrigerante incrementan el valor de este coeficiente aumentando así la velocidad de congelación. Asimismo, el coeficiente de transferencia de calor crece, mejorando el contacto producto - medio refrigerante, evitando materiales de empaque muy aislantes y/o de difícil adhesión al alimento.

La influencia del coeficiente de transferencia sobre el tiempo de congelación es muy marcada para coeficientes relativamente bajos, e incide mucho menos cuando el coeficiente es muy alto.

En cuanto al tamaño del producto, el tiempo de congelación puede llegar a depender del cuadrado de la dimensión característica (en realidad entre 1 y 2), medida representativa del tamaño del alimento. Es decir, que duplicar el tamaño del producto significaría aumentar el tiempo de congelación aproximadamente cuatro veces.

Respecto de la forma y la disposición del alimento en el equipo, siempre es más rápido congelar productos enfriados en todas sus caras que en algunas de ellas; y algunas formas congelan más rápido que otras ya que presentan mayor superficie expuesta para el mismo espesor, una esfera de igual diámetro que el espesor de una placa plana se enfría más rápido que la placa.

Si se tienen en cuenta las propiedades físicas, el tiempo de congelación es inversamente proporcional a la difusividad térmica. En el mejor de los casos, solo es posible influenciar las propiedades físicas en situaciones muy particulares, como en el caso de productos empaquetados, eliminando huecos de aire si los hubiera, etc.

También el tiempo de congelación es función de la temperatura inicial del producto, cuanto mayor es ésta más alto es el tiempo de congelación. En algunos casos de la práctica industrial es posible manejar el valor de la temperatura inicial, como en el caso de líneas de producción de alimentos precocidos con estaciones de preenfriamiento previas al congelador.

Asimismo, la temperatura final de congelación del alimento influye el tiempo de congelación. En muchos casos se puede detener el proceso de congelación sin alcanzar la temperatura prefijada en el punto más caliente del alimento. Esto es posible dada la existencia de gradientes negativos de temperatura entre la superficie del producto y cualquier punto interior. La superficie generalmente se encuentra bastante más fría que el interior, permitiendo que la temperatura se uniformice en las

cámaras de almacenamiento congelado, sin costo adicional de energía. Esto permite disminuir los tiempos de proceso hasta un 15 %, lo que implica ahorros de energía y, lo más importante, permite aumentar la productividad del equipo en la misma proporción.

Como se mencionó, todas estas variables influyen sobre el tiempo de congelación. Por ello la estimación de los mencionados tiempos se constituye en el punto de partida del diseño de congeladores. Este punto se tratará en el capítulo 2 de este trabajo.

Otra variable, que no influye sobre el tiempo de congelación pero sí en los tiempos de proceso efectivos de los equipos, que hace al diseño de los congeladores fundamentalmente en aquellos que funcionan con aire enfriado, es la humedad relativa de trabajo. En las condiciones de trabajo industrial la humedad relativa de la corriente de aire es muy baja, esto lleva a que se elimine agua de los alimentos. El agua condensa y se congela en los evaporadores de los equipos aumentando el gasto energético y disminuyendo los tiempos de funcionamiento efectivo de los equipos debido a la necesidad de eliminar el agua congelada de los evaporadores para que no disminuya su rendimiento.

También, este fenómeno, influye negativamente sobre la calidad final de los productos. Esta variable, que en general no se tiene en cuenta en los cálculos relativos al diseño, depende de la condición del producto en el equipo, empaquetado o no, del tiempo que se tarda en congelar la superficie y del tiempo total de congelación. Cuanto menor sea el tiempo de congelación menor influencia tendrá esta variable de operación.

En lo que respecta al movimiento relativo del producto dentro del equipo, que como se mencionó influye sobre el tiempo de proceso, es posible indicar que en los congeladores discontinuos el producto permanece quieto, y en los continuos se presentan dos situaciones bien diferenciadas: en la mayoría de los equipos el producto se mueve con “flujo pistón”, normalmente arrastrado por el sistema mecánico de tracción que posee el equipo. Es decir, si se coloca el eje de coordenadas sobre el producto que ingresa al equipo y se mueve con él, el alimento permanece “quieto”.

En los congeladores de lecho fluidizado, el alimento particulado se comporta, en su mezcla íntima con el aire de enfriamiento, como si fuera un líquido burbujeante (más adelante se detallará este fenómeno), sin sistemas de tracción mecánicos. Las burbujas que se generan en estos sistemas al llegar a la superficie del lecho proyectan partículas hacia todas las direcciones. Por ende siempre existirán partículas que se proyectan hacia atrás y hacia delante de un punto que se mueve con la corriente principal, existiendo entonces mezclado en el sentido de avance del flujo de producto. Esto se denomina mezclado longitudinal y genera una distribución de tiempos de residencia de las partículas.

Esta distribución afecta el tiempo de permanencia de las partículas en el equipo ya que algunas abandonarán el equipo sin haber completado su congelación, y otras saldrán más frías que lo necesario. La distribución de tiempos de residencia es necesario medirla y relacionarla con las variables de operación de los equipos porque influyen sobre la productividad de los mismos. Este tema se tratará en el capítulo 3 de este trabajo.

Además, mediante el análisis de las variables de operación que influyen la productividad de los equipos, se intentará obtener las condiciones operativas que



maximicen y eventualmente optimicen la producción de los congeladores continuos de lecho fluidizado. Este aspecto se abordara en capítulo 4 de este trabajo.

Para finalizar en el capítulo 5 se presentarán las conclusiones generales.

### 1.2.2.- Objetivos

El objetivo de este trabajo, entonces, es proveer la ingeniería básica para el desarrollo de distintos tipos de equipos de congelación de alimentos de formas diversas que van desde el congelado discontinuo en cámaras convencionales con corriente de aire enfriado hasta equipos continuos de lecho fluidizado.

Para ello es necesario contar con:

- ✓ **Características y propiedades térmicas de los alimentos y su variación con la temperatura de procesamiento. En este sentido es muy amplia la información publicada internacionalmente, ya sea en forma de tablas o ya sea en forma de modelos de utilización relativamente sencilla para predecir propiedades en un amplio rango de condiciones para la congelación de alimentos,**
- ✓ **Modelos y/o correlaciones para estimar los coeficientes de transferencia de calor medio congelador - alimento en las diversas condiciones prácticas de congelación, y para los distintos equipos, a los efectos de poder calcular los tiempos de congelación. Estos coeficientes pueden ser encontrados y adaptados de la bibliografía,**
- ✓ **Modelos para el cálculo de tiempos de congelación de las partículas para distintas geometrías y tamaños, incluyendo transferencia de calor en una, dos**

y tres direcciones,

- ✓ **Modelos que permitan estimar las condiciones “fluidodinámicas” del producto en su movimiento dentro de los equipos congeladores, principalmente en aquellos continuos de lecho fluidizado, como ser:**

**Parámetros característicos de la fluidización:**

- Pérdida de carga del fluido congelador a través del lecho de partículas
  - Velocidad de mínima fluidización
  - Expansión del lecho de partículas en distintas condiciones de flujo del fluido congelador y distintas formas de las partículas de alimentos
  - Etc., etc.
- 
- ✓ **Modelos que simulen satisfactoriamente la distribución de tiempos de residencia y el grado de mezclado de las partículas en su recorrido longitudinal a través del congelador, en los equipos que corresponda, a los efectos de obtener correlaciones, de fácil manejo práctico, para calcular los coeficientes de mezclado para partículas de diferentes geometrías y distintos tamaños.**

De la información necesaria para el desarrollo de éste trabajo es posible encontrar en la bibliografía:

- ✓ **Las características y propiedades térmicas de los alimentos y su variación con la temperatura. Existen propiedades tabuladas o modelos que permiten su estimación.**
- ✓ **Se encuentran en la bibliografía correlaciones y/o modelos que permiten estimar coeficientes de transferencia de calor medio congelador - alimento en un amplio rango de condiciones de congelación y para los diversos sistemas de congelación existentes.**
- ✓ **Se han publicado diversos modelos para la estimación de tiempos de congelación de alimentos con transferencia de calor unidireccional.**
- ✓ **Existen modelos que permiten simular las condiciones fluidodinámicas del producto en su movimiento dentro de congeladores continuos, desarrollados para partículas esféricas.**
- ✓ **Se dispone de modelos que permiten simular la distribución de tiempos de residencia en congeladores continuos para partículas esféricas.**

*No se dispone del resto de la información y que es objeto de éste trabajo:*

- ✓ *El desarrollo y comprobación experimental de modelos de predicción de tiempos de congelación para alimentos de formas regulares con transferencia de calor en más de una dirección.*

- ✓ *Desarrollo y comprobación experimental de modelos de distribución de tiempos de residencia para partículas no esféricas, de distintas geometrías y tamaños, en congeladores continuos de lecho fluidizado.*
- ✓ *Búsqueda de correlaciones que permitan estimar coeficientes de mezclado para partículas de distintas geometrías y tamaños en congeladores continuos.*
- ✓ *Desarrollo de métodos que posibiliten determinar las condiciones de proceso que maximicen la producción de equipos congeladores continuos.*

Tanto los parámetros característicos como los distintos modelos y correlaciones se han o serán comprobados experimentalmente, con el objeto de proveer ecuaciones relativamente sencillas para el dimensionado de equipos de congelación.

## **Capítulo 2**

### **TIEMPOS DE CONGELACION**

## 2.- Tiempos de congelación

### 2.1.- Introducción

De los métodos de conservación de alimentos que se aplican a grandes cantidades de producto, probablemente la congelación sea el mejor si el objetivo es lograr buenos productos y almacenarlos durante relativamente largos periodos de tiempo y con muy alta calidad textural y organoléptica si se compara con otras alternativas de conservación.

Como en todos los procesos de conservación, también en la congelación es necesario contemplar varios aspectos para lograr el mejor producto. En este sentido para evaluar la congelación de un alimento con el objeto de obtener un producto de máxima calidad hay que considerar la posibilidad de procesarlo a la mayor velocidad posible. Para ello resulta imprescindible conocer todas las características del producto que tengan relación con su posibilidad de transferir calor y que son: **composición; forma; tamaño y tipo de empaque;** y los detalles constructivos del equipo de congelación y sus condiciones operativas, que resumidas son: **temperatura del medio refrigerante; movimiento del producto dentro del equipo, posibilidades de contacto del medio de enfriamiento con el producto y su influencia en los coeficientes de transferencia de calor; posibilidad de enfriar el producto en una o más direcciones;** etc.

Todos los parámetros mencionados influyen sobre el tiempo de residencia del producto en el equipo. El tiempo de residencia incide, a su vez, sobre la calidad final del alimento; sobre la capacidad de producción del equipo y por ende sobre el insumo

más importante desde el punto de vista de los costos operativos: el consumo energético.

Para diseñar y optimizar el funcionamiento de los equipos, entonces, resulta relevante contar con métodos de predicción de los tiempos de residencia o, lo que es lo mismo, que permitan calcular los tiempos de congelación de los distintos alimentos que pueden ser congelados.

Como es bien conocido, durante la congelación de alimentos ocurre el cambio de fase del agua de líquido a sólido. Teniendo en cuenta que un alimento se puede considerar formado por una matriz sólida y agua con sólidos disueltos, el cambio de fase no ocurre a una única temperatura sino que, por el contrario, la temperatura de cambio de fase disminuye permanentemente durante la congelación. Este fenómeno indica que aún a temperaturas muy bajas es posible la existencia de agua en estado líquido, en los alimentos congelados.

La cantidad de agua sin congelar, y su concentración de sólidos disueltos determina, entre otros, la actividad acuosa del mismo y por ende influye sobre la estabilidad del alimento (Cheftel y Cheftel, 1976).

Por otra parte, durante el transcurso de la congelación la temperatura del producto no es uniforme, siendo mínima en su superficie y máxima en el punto interior más “alejado” del medio de enfriamiento. Este punto, el más caliente del sistema, se denomina centro térmico.

La posición del centro térmico, depende de la forma del producto y de las condiciones a las que se someten las superficies expuestas del mismo. Cuando el producto es de geometría irregular, y/o las condiciones de congelación son

asimétricas, y/o las propiedades cambian con la dirección del flujo de calor, el centro térmico normalmente no coincide con el centro geométrico. Caso contrario, en productos de geometría regular, con isotropía en las propiedades térmicas y con simetría de tratamiento en todas sus caras, el centro térmico coincide con el centro geométrico.

Por ello, durante el procesamiento de alimentos por congelación, es necesario enfriar el producto hasta temperaturas tales que permitan alcanzar los parámetros de estabilidad en todos sus puntos. Además, la proporción de agua congelada a una misma temperatura cambia con la composición del producto, aún para un mismo producto obtenido en distintos tiempos y/o en distintos lugares; por lo tanto también cambia la condición térmica de estabilidad.

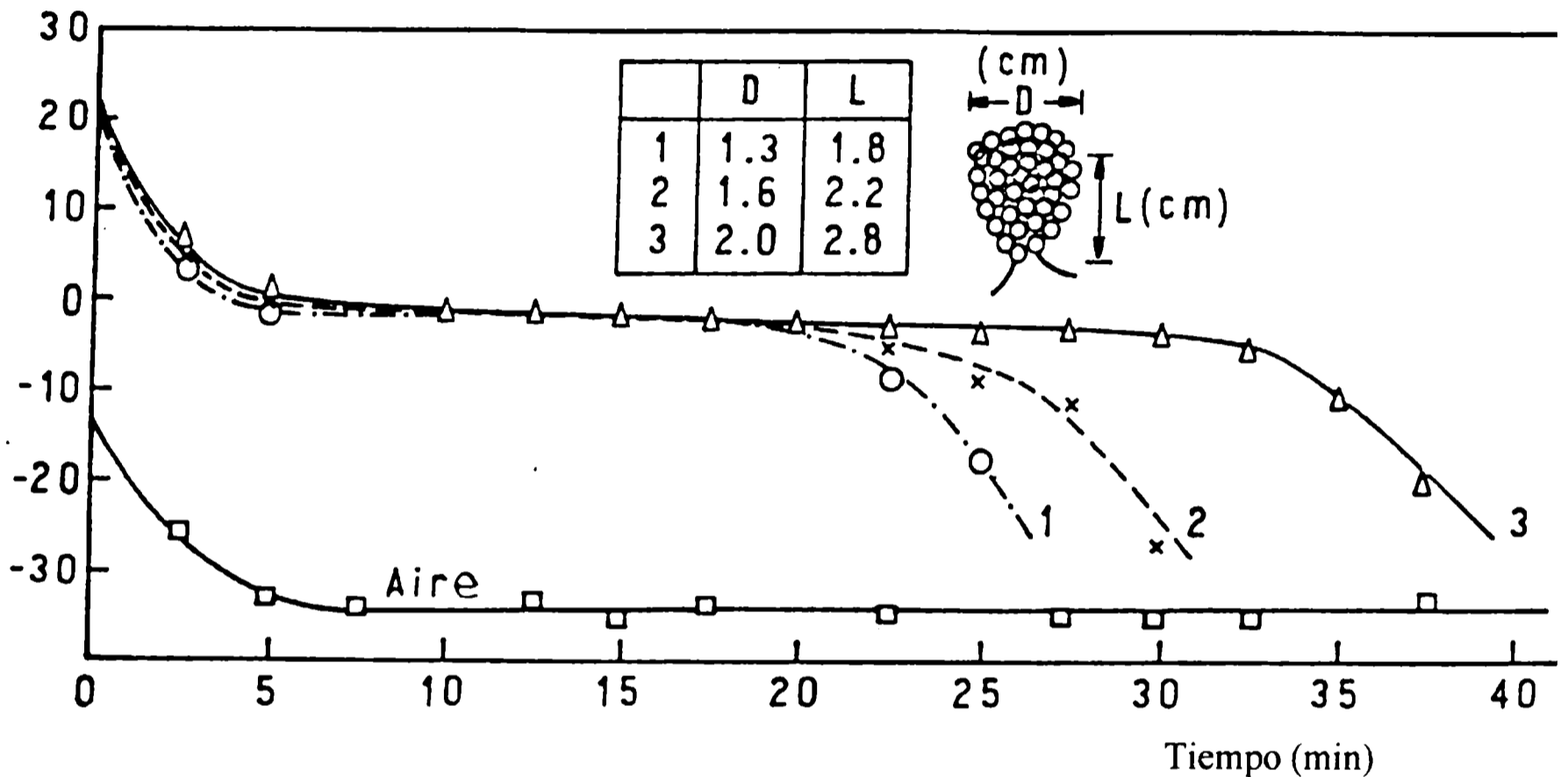
Todo ello implica que no se pueda contar con una definición clara y precisa del tiempo de congelación. En general se admite: El tiempo efectivo de congelación es el tiempo requerido para disminuir la temperatura desde su valor inicial a un valor dado en el centro térmico.

### **2.2.- La dinámica de la congelación**

En la Fig. 2.1 se presentan curvas de congelación experimental de frambuesas de distinto tamaño, en bandejas perforadas con una monocapa de producto, obtenidas en un congelador estático con aire forzado a - 35 °C.



**Fig. 2.1: Curvas de congelación de frambuesas en un congelador estático con aire forzado.** (Adaptado de Reynoso y De Michelis, 1993)



Si bien, en la Fig. 2.1 se han presentado las curvas de congelación de un determinado producto, con la temperatura medida en un punto (en este caso el centro térmico) y sometido a determinadas condiciones de procesamiento, para todos los alimentos y en todos los puntos de los mismos, la dinámica de la congelación presenta un patrón similar que se describirá a continuación.

A los efectos de considerar los cambios físicos producidos, y por ende tratar de comprender los fenómenos involucrados a lo largo del proceso de congelación, varios autores han considerado dividir la curva de enfriamiento, tratando de acercarse a la

realidad física, en tres etapas (en realidad las etapas se superponen y es imposible independizarlas) bien diferenciadas que son:

**Preenfriamiento:** en esta etapa el producto se enfría desde su temperatura inicial hasta la temperatura de inicio del cambio de fase, siempre menor que 0 °C.

**Cambio de fase:** ésta se considera como la etapa en que toda el agua que es posible congelar cambia del estado líquido al estado sólido. La característica más importante la constituye la temperatura a la cual la fase cambia, siendo cada vez más baja a medida que se congela más agua. Esto hace que las propiedades térmicas: densidad, calor específico y conductividad térmica cambien considerablemente a medida que avanza la congelación.

Estos cambios son muy pronunciados, en todos los alimentos de relativamente alto contenido de agua (la mayoría de los que se congelan), entre la temperatura de inicio del cambio de fase y  $-5$  °C, ya que en el mismo rango de temperaturas se produce justamente la mayor proporción de agua congelada (Plank, 1963; Mascheroni, 1977; Mascheroni, Ottino y Calvelo, 1977; Calvelo, 1981; Cleland, 1990).

**Atemperado:** en ésta, la última etapa, se considera que el alimento ya congelado se enfría hasta la temperatura final de congelación. Si bien la temperatura final de congelación se puede seleccionar de forma arbitraria, los valores más aceptados internacionalmente son  $-10$  y  $-18$  °C aunque actualmente se prefiere  $-18$  °C.

### 2.3.- Métodos de calculo de tiempos de congelación

Todos los métodos desarrollados para el cálculo de tiempos de congelación se basan en distintas soluciones encontradas para resolver el balance diferencial de energía térmica, que para un alimento sólido se plantea:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \quad (2.1)$$

$T$  es la temperatura;  $t$  el tiempo;  $\rho$ ,  $C_p$  y  $k$  la densidad, calor específico y conductividad térmica respectivamente.

La resolución de la ecuación (2.1) depende de las características del alimento y las condiciones operativas del equipo de congelación a la que se encuentra expuesto. Entre ellas poseen especial importancia la geometría, regular o irregular, y la transferencia de calor que puede efectuarse en una o más direcciones.

El problema para formas regulares y transferencia de calor en una única dirección ha sido tratado y extensamente desarrollado en un muy buen trabajo de Salvadori, 1994.

Si bien, en éste trabajo se considerará el problema de las geometrías regulares con transferencia de calor en más de una dirección, se presentará una breve revisión de los métodos existentes para transferencia de calor en una dirección haciendo énfasis en aquellos que poseen posibilidades de ser extendidos a transferencia de calor en más de una dirección.

Como ya se mencionó, las propiedades físicas relacionadas al fenómeno de transferencia de calor varían considerablemente durante el proceso de congelación. Los cambios más significativos se encuentran en la  $k$ , alrededor de tres veces mayor en el producto congelado que en el fresco, y en el calor específico que cambia a aproximadamente a la mitad entre el producto fresco y el congelado, y se producen muy fuertes cambios si se involucra en él el calor latente de congelación (calor específico aparente), como es habitual en el cálculo numérico, en un rango de temperaturas muy estrecho, entre la temperatura de inicio del cambio de fase,  $T_{ce}$ , aproximadamente  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Una de las dificultades principales para resolver la ec. (2.1) justamente se encuentra en como considerar el mencionado cambio de las propiedades.

Las condiciones que es necesario definir para resolver la ec. (2.1) son:

**Condición de temperatura inicial:** la más frecuente encontrada en la práctica es la temperatura inicial,  $T_i$ , uniforme en el producto y mayor que la de inicio del cambio de fase,  $T_{ce}$ .

**Condiciones de contorno:** éstas están definidas por la interacción producto – medio refrigerante (equipo de congelación), y pueden ser:

- ✓ Temperatura de la superficie del producto,  $T_s$ , constante y conocida. Denominada condición de contorno de tipo 1.
- ✓ El flujo de energía en la superficie del producto se conoce y no varía durante el proceso. Denominada condición de contorno de tipo 2.

- ✓ El flujo de calor en la superficie del producto es del tipo:  $k (dT/dr) = h (Ta - Ts)$ , donde  $r$  es la dimensión característica,  $h$  el coeficiente de transferencia de calor convectivo,  $Ta$  la temperatura del medio refrigerante y  $Ts$  la temperatura de la superficie del producto, variable en el tiempo. Esta se conoce como ley de enfriamiento de Newton y considerada como condición de contorno de tipo 3.
- ✓ La temperatura de la superficie del producto es una función conocida del tiempo. Condición de contorno de tipo 4.

La ec. (2.1) no posee solución analítica exacta, que abarque todas las situaciones posibles en la práctica de la congelación, principalmente debido a la fuerte dependencia de las propiedades con la temperatura.

A los efectos de considerar las aproximaciones que se han intentado para resolver la ec. (2.1), se puede agrupar las soluciones propuestas según:

### **2.3.1.- Soluciones analíticas de sistemas simplificados**

### **2.3.2.- Soluciones numéricas que tienden a ser exactas**

### **2.3.3.- Soluciones aproximadas**

### **2.3.1.- Soluciones analíticas de sistemas simplificados**

La mayoría de las conocidas, obtenidas para transferencia de calor en una dirección, generalmente placa plana infinita, consideran un frente móvil de congelación con temperatura constante de cambio de fase. En ningún caso se utilizó una condición de contorno de tipo 3, la más usual en la práctica. Se encuentran publicadas las de Stefan y de Newton (Carslaw y Jaeger, 1959) y las de Frederick y Grief (1985). Estas no han encontrado aplicación práctica.

Otra es la solución de Plank propuesta en 1913 y modificada por el mismo autor en 1941. Tiende a generalizar la solución para transferencia de calor unidireccional en geometrías de placa plana, cilindro y esfera y utilizó por primera vez una condición de contorno de tipo 3 (Plank, 1963).

La propuesta de Plank, también simplificada y bastante alejada de la realidad, constituyó un aporte muy importante ya que fue la primera con un fuerte respaldo teórico, y la mayoría de las soluciones aproximadas que hoy se utilizan se basan en ella.

### **2.3.2.- Soluciones numéricas que tienden a ser exactas**

Las soluciones numéricas, que comenzaron a desarrollarse y evolucionaron con el mejoramiento de las computadoras, presentan las siguientes características:

- ✓ No efectúan simplificaciones al balance de la ec. (2.1).
- ✓ Se aplican a los sistemas discretizando las derivadas.
- ✓ Pueden usar ecuaciones teóricas o regresiones de datos experimentales para considerar la dependencia de las propiedades con la temperatura.
- ✓ No presentan limitaciones en cuanto al rango de condiciones operativas
- ✓ Es posible trabajar con cualquier condición inicial y de contorno

- ✓ Se obtienen, además del tiempo total de proceso, los perfiles de temperatura del producto en función del tiempo, balances localizados de energía para cualquier instante, etc.
  
- ✓ Los errores más importantes son:
  - Los derivados de la truncación y redondeo
  - De la forma de discretizar las condiciones de contorno
  - De la forma en que se expresa la funcionalidad que vincula las propiedades termofísicas con la temperatura

El primer error depende, y los dos últimos son independientes, del método numérico utilizado.

Estas características hacen que sean los métodos más generales, y los que mayor información proveen sobre el sistema.

La ec. (2.1) puede resolverse utilizando diferencias finitas o elementos finitos. También se han presentado modelos fundamentados en la integración de una ecuación diferencial ordinaria que expresa la posición del frente móvil de congelación (Hayakawa y col., 1986), pero se consideran menos realistas en la consideración del fenómeno, que los fundamentados en la resolución del balance de energía discretizado por diferencias o elementos finitos.

Cuando la pieza a congelar es irregular resulta más conveniente plantear esquemas de elementos finitos, debido a que en los métodos de diferencias finitas hay que utilizar una grilla distorsionada que tenga en cuenta el contorno del material (Salvadori, 1994; Mascheroni, 1995).

Cuando se intenta resolver el balance para geometrías regulares tanto las diferencias como los elementos finitos proveen los mismos resultados, pero los esquemas en diferencias finitas son más simples, necesitan menos memoria y el tiempo de cálculo es menor.

Un buen detalle de los diversos esquemas utilizados ha sido publicado por A. C. Cleland, 1990, y los de mayor aplicación en la práctica por Salvadori, 1994 y Mascheroni, 1995. En estos trabajos se explica cada esquema y se analiza la forma en que cada autor lo ha utilizado.

Aquí se presentara un breve resumen de los que más se han aplicado, en diferencias finitas.

### **Transferencia de calor unidireccional**

**Esquema explícito:** la ventaja más relevante es que permite despejar fácilmente la variable desconocida, en congelación: la temperatura. El inconveniente más importante consiste en que se debe trabajar con intervalos de tiempo muy pequeños para cumplir la condición de convergencia del método y minimizar el error que se comete al evaluar el producto  $\rho C_p$  en el intervalo de tiempo actual y no en el instante medio entre el actual y el siguiente. Ha sido empleado con éxito por Mascheroni y Calvelo, 1982; Bazán y Mascheroni, 1984 para condiciones de congelación simétricas; y por De Michelis y Calvelo, 1982, para condiciones de congelación asimétricas.

**Esquema de Lees:** este es implícito (Lees, 1966), trabaja en tres niveles de tiempo, el actual, un intervalo anterior y otro posterior, y es totalmente centrado en la discretización espacial. Aunque es implícito no requiere calculo iterativo porque



todos los coeficientes se calculan en el tiempo actual. El error de truncación es relativamente pequeño. La convergencia del método es incondicional por lo que se puede trabajar con intervalos de tiempo relativamente grandes, pero se corre el riesgo de ignorar parte del gran cambio del  $C_p$  aparente (peak jumping) con lo que el balance total del calor extraído resultará menor que el real y por ende los tiempos de proceso serán subdimensionados.

Ha sido utilizado con buenos resultados por Bonacina y Comini, 1971; Cleland y Earle, 1977, 1979a; Wilson y Singh, 1987; y Pham, 1985. Este último autor para evitar el inconveniente del peak jumping calcula el calor específico mediante un balance entálpico y luego plantea el esquema de Lees para obtener los perfiles de temperatura.

**Esquema de Crank – Nicolson:** es un esquema implícito que efectúa el balance medio intervalo de tiempo desplazado. Ha sido utilizado por Succar y Hayakawa, 1984, Campañone y col., 1998.

**Esquema entálpico:** es un esquema explícito con la ventaja de que la variación de entalpía es más suave que la del producto  $\rho C_p$ ; presenta el inconveniente que en cada paso hay que convertir la entalpía a temperatura. Ha sido usado por Joshi y Tao, 1974; Sastry, 1984; Mannapperuma y Singh, 1988, Delgado y col., 1992, y Agnelli y Mascheroni, 1998.

Un buen análisis de los esquemas antes indicados fue realizado por Cleland y Earle, 1984a. Los autores encontraron que todos son buenos y tienden a los mismos resultados cuando el intervalo de tiempo es pequeño. La única diferencia, ya indicada, es que los esquemas explícitos deben trabajar con intervalos de tiempo de 0,5

segundos o menores, y los implícitos con intervalos de 1,5, y de 6 segundos si se trabaja con el esquema de Crank – Nicolson, y un tamaño de grilla de 1 mm.

### **Transferencia de calor en más de una dirección**

Para transferencia de calor multidireccional y geometrías regulares, se pueden adaptar todos los esquemas mencionados, con el consecuente aumento de complejidad en la formulación del problema, sin grandes modificaciones en la lógica de los algoritmos de cálculo y sin otras necesidades de información sobre las propiedades del sistema.

**Esquemas explícitos:** Con estos esquemas se puede contemplar distintas propiedades en las distintas direcciones de transferencia de calor, como también distintos coeficientes de transferencia y/o distintas temperaturas de refrigerante.

Cuando se expresa la ec. (2.1) en diferencias finitas para cilindros finitos y paralelepípedos rectángulos, y se despeja la condición de estabilidad del método, para propiedades homogéneas evaluadas a  $T_a$  (condición más desfavorable), congelación simétrica e iguales intervalos espaciales, se obtiene, para los puntos más expuestos:

Para paralelepípedo rectángulo:

$$\Delta t \leq \frac{\rho C_p \Delta x^2}{6(h \Delta x + k)} \quad (2.2)$$

Para cilindro finito o varilla rectangular infinita:

$$\Delta t \leq \frac{\rho C_p \Delta x^2}{4(h \Delta x + k)} \quad (2.3)$$

Para una placa plana infinita:

$$\Delta t \leq \frac{\rho C_p \Delta x^2}{2(h \Delta x + k)} \quad (2.4)$$

Si se comparan las condiciones de estabilidad para las tres formas consideradas, en los esquemas explícitos, a iguales intervalos espaciales ( $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta r$ ), propiedades homogéneas (evaluadas a  $T_a$ ) y congelación en condiciones de simetría, la relación de los intervalos de tiempo:  $\Delta t$ , que dan la condición de estabilidad es: **1 : 2 : 3 para placa plana infinita : cilindro finito (o varillas rectangulares infinitas) : paralelepípedo rectángulo**, respectivamente. Es decir, que a medida que se transfiere calor en más direcciones más restrictiva es la condición de estabilidad, o lo que es lo mismo, menores deberán ser los intervalos de tiempo. Esto, que era un inconveniente hace unos años hoy no tiene mucha relevancia si se tiene en cuenta la capacidad y velocidad de cálculo de las computadoras modernas.

**Esquemas implícitos:** existen varios esquemas implícitos derivados de los planteos iniciales de Crank – Nicolson y Lees. Estos métodos calculan en dos pasos cuando se transfiere energía en dos direcciones, y en tres pasos cuando la transferencia es en tres direcciones. En cada paso se calcula en una dirección dejando constantes las temperaturas de las otras, generando valores de temperaturas intermedias que sólo sirven para calcular el paso siguiente, y no tienen significado físico. En el último paso se obtienen las temperaturas “verdaderas”.

Estos métodos también introducen errores de truncación adicionales, cuando se los compara con los planteos para transferencia de calor en una dirección, como consecuencia de despreciar las derivadas cruzadas de alto orden. Pero, al igual que en transferencia de energía unidireccional, a igual tamaño de incrementos de espacio y tiempo, los errores de los esquemas implícitos son menores que en los esquemas explícitos. Dicho de otro modo, con los métodos implícitos para obtener la misma precisión se puede trabajar con incrementos de tiempo mayores, para iguales incrementos de las coordenadas espaciales.

El esquema de Lees en dos direcciones fue utilizado por Bonacina y Comini, 1973. Se le puede aplicar las correcciones sugeridas por Pham, 1985, a los efectos de amortiguar el efecto del peak jumping corrigiendo el planteo con un desarrollo explícito del balance entálpico, con el objeto de utilizar todavía intervalos de tiempo mayores. También fue usado por Cleland y Cleland, 1991, el cual no difiere en la práctica con el propuesto por Bonacina y Comini, 1973.

El esquema de Lees tridimensional fue aplicado por Cleland y Earle, 1979b para paralelepípedos rectangulares, y obtuvieron buenos resultados cuando lo comparaban con datos experimentales de sistemas modelo de tilosa y con la solución analítica obtenida para propiedades constantes.

### **2.3.3.- Soluciones aproximadas**

El desarrollo de soluciones aproximadas surge de la necesidad concreta de facilitar el cálculo de tiempos de proceso en forma simple y rápida, tendiendo a la situación ideal de corregir sobre la marcha los tiempos de residencia de los productos en los equipos cuando por algún motivo cambia alguna condición operativa.

Las características sobresalientes de estas soluciones se pueden describir (Salvadori, 1994; Mascheroni, 1995):

- ✓ Realizan simplificaciones de la ecuación diferencial o regresionan mediante ecuaciones o gráficos valores obtenidos con métodos numéricos o experimentales.
- ✓ Calculan el tiempo total de proceso y no la evolución temporal de la temperatura.
- ✓ En general toman valores promedio de las propiedades.
- ✓ Su aplicación práctica se restringe al rango de condiciones operativas en que fueron desarrollados.
- ✓ Generalmente no pueden aplicarse con condiciones operativas variables.
- ✓ Dependen de la forma del alimento y muchos han sido desarrollados para un alimento en particular.
- ✓ La mayoría son aplicables a condiciones de congelación simétricas. Muy pocos han sido desarrollados para condiciones asimétricas (distintos coeficientes de transferencia de calor y/o distintas temperaturas del medio de enfriamiento).
- ✓ Presentan la gran ventaja de su cálculo sencillo y sin uso de computadoras.

La predicción de tiempos de proceso mediante soluciones aproximadas fue y sigue siendo preocupación permanente en tecnología de alimentos. Cleland, 1990, en su búsqueda bibliográfica relevó más de 500 trabajos publicados sobre el tema. Sin embargo, son relativamente escasos los métodos que han sido comprobados

experimentalmente y en un rango aceptable de condiciones prácticas de proceso. Y aún más escasos son los que tienen posibilidad de aplicación a problemas de transferencia de energía en más de una dirección y/o a cuerpos de forma irregular.

Todos los métodos se han centrado en alimentos cuyo componente principal es el agua y por ende ésta tiene el efecto más importante sobre la velocidad de transferencia de calor. En este grupo de alimentos se incluyen las carnes, las frutas y las hortalizas. Asimismo, la mayoría han sido aplicados a materiales celulares homogéneos y en los cuales el movimiento de la fase sin congelar es prácticamente despreciable y se lo ignora.

Para el resto de los alimentos: helados, jugos de fruta, productos de humedad intermedia (30 a 50 % de agua), etc., se ha publicado muy poca información experimental que permita contrastar los métodos aproximados, por eso prácticamente no existen métodos confiables de cálculo para ellos.

A los efectos de tratar de clasificarlos, estos métodos se pueden dividir en: **analíticos y empíricos.**

Los primeros, mediante simplificaciones en el planteo y/o la resolución del problema proponen fórmulas analíticas de predicción intentando acercarse al fenómeno real.

Los empíricos recurren total o parcialmente al ajuste de datos numéricos y/o experimentales, y/o proponen algún tipo de decisión empírica sobre los datos a utilizar. Los distintos métodos de este tipo se basan en enfoques muy diversos, con el objeto de su tratamiento ordenado se pueden agrupar en tres categorías (Mascheroni, 1995): **Mejoras a la ecuación original de Plank; Regresiones empíricas; y Diagramas térmicos generalizados.**

### Métodos analíticos

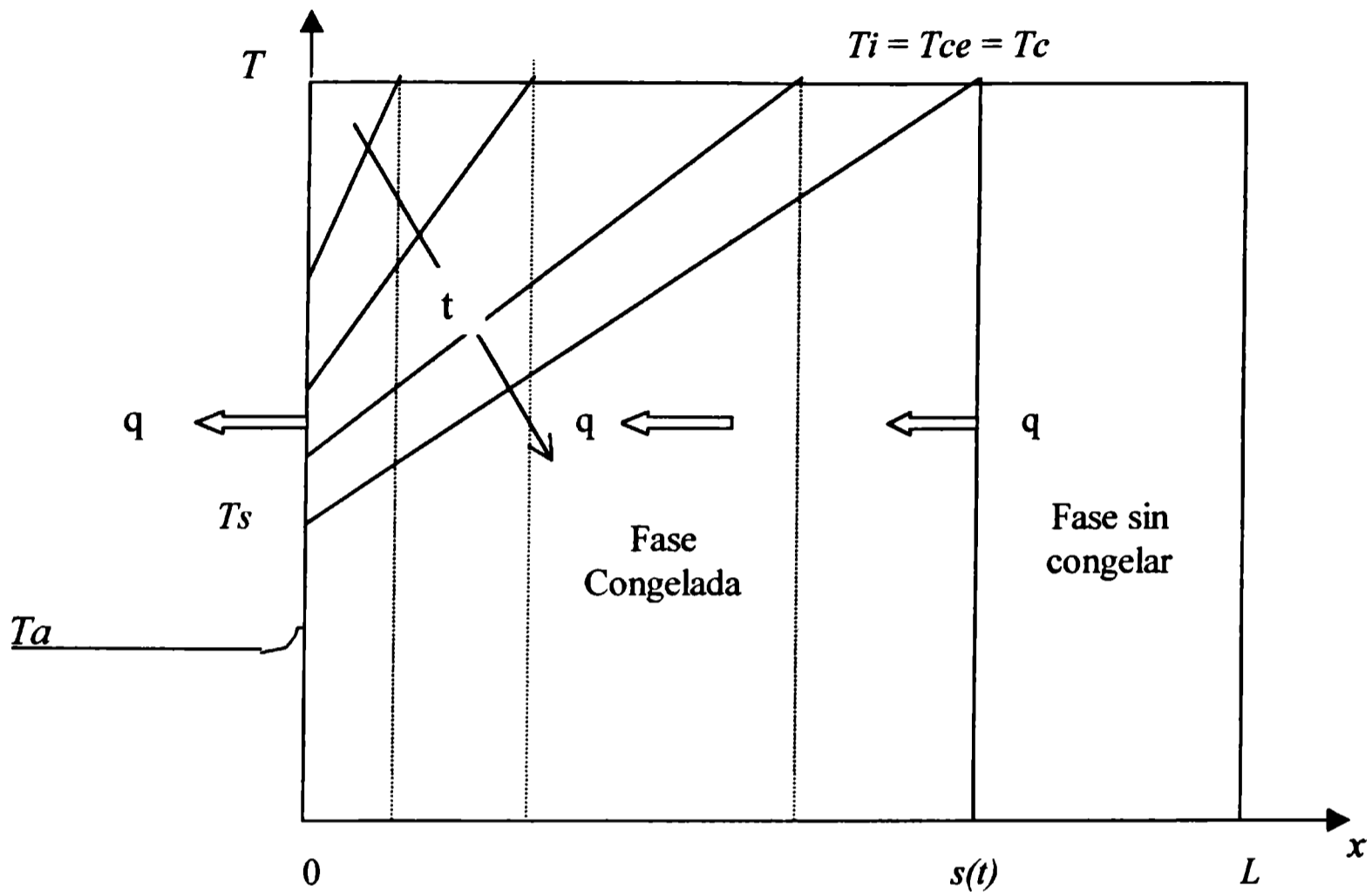
De todos, el más importante por su fundamento teórico y porque se constituyó en la base de muchos de los métodos que hoy se usan, es el de Plank (Plank, 1913), modificado posteriormente por el mismo autor en 1941 (Plank, 1963), por ello se describirá con cierto detalle.

Este realiza las siguientes suposiciones para simplificar el balance de la ec. (2.1):

- ✓ La  $T_i$  del producto es uniforme e igual a la de cambio de fase  $T_{ce}$ , y el cambio de fase ocurre a una única temperatura.
- ✓ La diferencia entálpica sólo involucra calor latente, no existe enfriamiento posterior al cambio de fase.
- ✓ El producto  $\rho C_p$  de la fase ya congelada es muy pequeño respecto al de la fase sin congelar, con lo que se alcanza un estado pseudoestacionario, siendo lineal el perfil de temperaturas en la fase congelada.
- ✓ Las propiedades térmicas son constantes en cada una de las fases.
- ✓ El punto final del proceso, o el tiempo de congelación, se define como el momento en el que el frente de congelación alcanza el centro térmico del sistema.
- ✓ Propone que el flujo de calor en la superficie del producto puede expresarse con una condición de contorno de tipo 3, utilizando la ley de enfriamiento de Newton.

Esquemáticamente se presenta en la Fig. 2.2:

Fig. 2.2: Simplificaciones de Plank para resolver la ec. (2.1). (Adaptado de Mascheroni, 1995).



En  $x = 0$  (superficie del producto):

$$q = h A (T_a - T_s) = -A k_i \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.5)$$

En la fase congelada:

$$q = -A k_i \frac{\partial T}{\partial x} = A k_i \frac{(T_s - T_{ce})}{s(t)} \quad (2.6)$$

En el frente de congelación,  $x = s(t)$ :



$$q = -A \lambda_f \rho_i \frac{ds(t)}{dt} \quad (2.7)$$

Como el calor no se acumula, se genera en el frente de congelación y se trasmite a través de la fase congelada, puede eliminarse la temperatura de superficie  $T_s$  de las ecs. (2.5) y (2.6), quedando:

$$q = -\frac{A(Ta - Tce)}{\frac{1}{h} + \frac{s(t)}{k_i}} \quad (2.8)$$

Reemplazando en la (2.7), reordenando e integrando entre  $s(t) = 0$  y  $s(t) = L$  y entre  $t = 0$  y  $t = t_{fp}$ . Despejando  $t_{fp}$  y expresando en términos de la longitud total  $D = 2L$  y  $Bi = h D/k$  se obtiene:

$$t_{fp} = \frac{\rho_i \lambda_f D^2}{(Tce - Ta)} \left[ \frac{P}{Bi_i} + R \right] \quad (2.9)$$

$\lambda_f$ , es el calor latente de cambio de fase.  $P$  y  $R$  dependen de la geometría. Se pueden plantear desarrollos similares para cilindro infinito y esfera. Los factores  $P$  y  $R$  de Plank para cada geometría se presentan en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1: Factores  $P$  y  $R$  desarrollados por Plank para la ec. (2.9)**

Forma	$P$ (Plank)	$R$ (Plank)
Placa Plana	0,50000	0,12500
Cilindro infinito	0,25000	0,06250
Esfera	0,16666	0,04166

El modelo de Plank, como se desprende de las simplificaciones efectuadas para su deducción, subestima el tiempo de proceso en hasta un 40 %. Sin embargo, su base teórica es muy sólida y predice adecuadamente la influencia del número de Biot,  $Bi$ , de la temperatura del medio refrigerante,  $T_a$ , y del tamaño del alimento,  $D$ . Por ello, como ya se indicó, se constituyó en la base más importante para los métodos mejorados.

### Métodos empíricos

#### Transferencia de calor unidireccional

**Mejoras a la ecuación original de Plank:** estos se basan en la aplicación de una o más de las siguientes propuestas:

- ✓ Agregado de factores que corrigen las falencias de la formula original.
- ✓ Suma de tiempos que toman en cuenta los períodos de preenfriamiento,  $T_i > T_{ce}$ , y atemperado,  $T_c < T_{ce}$ , ( $T_c$ : temperatura final de congelación en el centro térmico)
- ✓ Cambios en los valores de las propiedades, cambio entálpico  $\Delta H$ ,  $\rho$  y  $k$ , y/o de las constantes  $P$  y  $R$ .

La primera modificación la realizó el mismo Plank (Plank, 1963) en la que intentó corregir la influencia de  $T_i \neq T_{ce}$  y de  $T_c \neq T_{ce}$  sobre el tiempo de proceso. Mantuvo los factores  $P$  y  $R$  originales, introdujo cambios en la forma de tomar  $\Delta H$  y

$Cp$  y, como rasgos principales, propuso factores correctivos que son función del  $Bi$  y que la influencia de la temperatura final de congelación,  $T_c$ , es de tipo logarítmico.

Otras modificaciones similares, pero que no evalúan adecuadamente la influencia de  $T_i$  y  $T_a$  son las de:

Nagaoka y col., 1955 y Levy, 1958, que poco difieren entre sí en cuanto a los resultados que se obtienen. Algunas modificaciones más de este tipo se pueden encontrar en el trabajo de Ramaswamy y Tung, 1984.

Cleland y Earle, 1977, 1979a, han desarrollado otra modificación, utilizando un valor especificado del cambio entálpico por unidad de volumen,  $\Delta H$  (entre  $T_{ce}$  y  $-10$  °C), y regresionando  $P$  y  $R$  como funciones de los números de  $Bi$ ,  $Ste$  y  $Pk$  involucrando en esa dependencia la influencia de  $T_i$ ,  $T_a$ ,  $T_c$  y  $h$ . Las regresiones de  $P$  y  $R$  se efectuaron a partir de un importante número de datos experimentales, obtenidos congelando un sistema modelo de tilosa. Dicho sistema tiene propiedades similares a los alimentos de alto contenido de agua y permitía obtener valores repetitivos de las propiedades del mismo, cosa que no ocurre con un alimento cuya composición cambia considerablemente de una partida a otra.

Los mismos autores, Cleland y Earle, 1984a, volvieron a modificar la ecuación de Plank para considerar distintas temperaturas finales de congelación e introducen el concepto de  $EHTD$  (número de dimensiones equivalentes a la transferencia de calor). Este concepto se desarrollará en detalle, en la consideración de transferencia de calor en más de una dirección.

Mascheroni y Calvelo, 1982, propusieron adicionar al modelo original de Plank, los tiempos de preenfriamiento y atemperado. Definieron al tiempo de

preenfriamiento como el que transcurre durante el enfriamiento del producto, inicialmente a  $T_i$  uniforme, hasta la  $T_{ce}$  en un punto intermedio entre la superficie y el centro térmico.

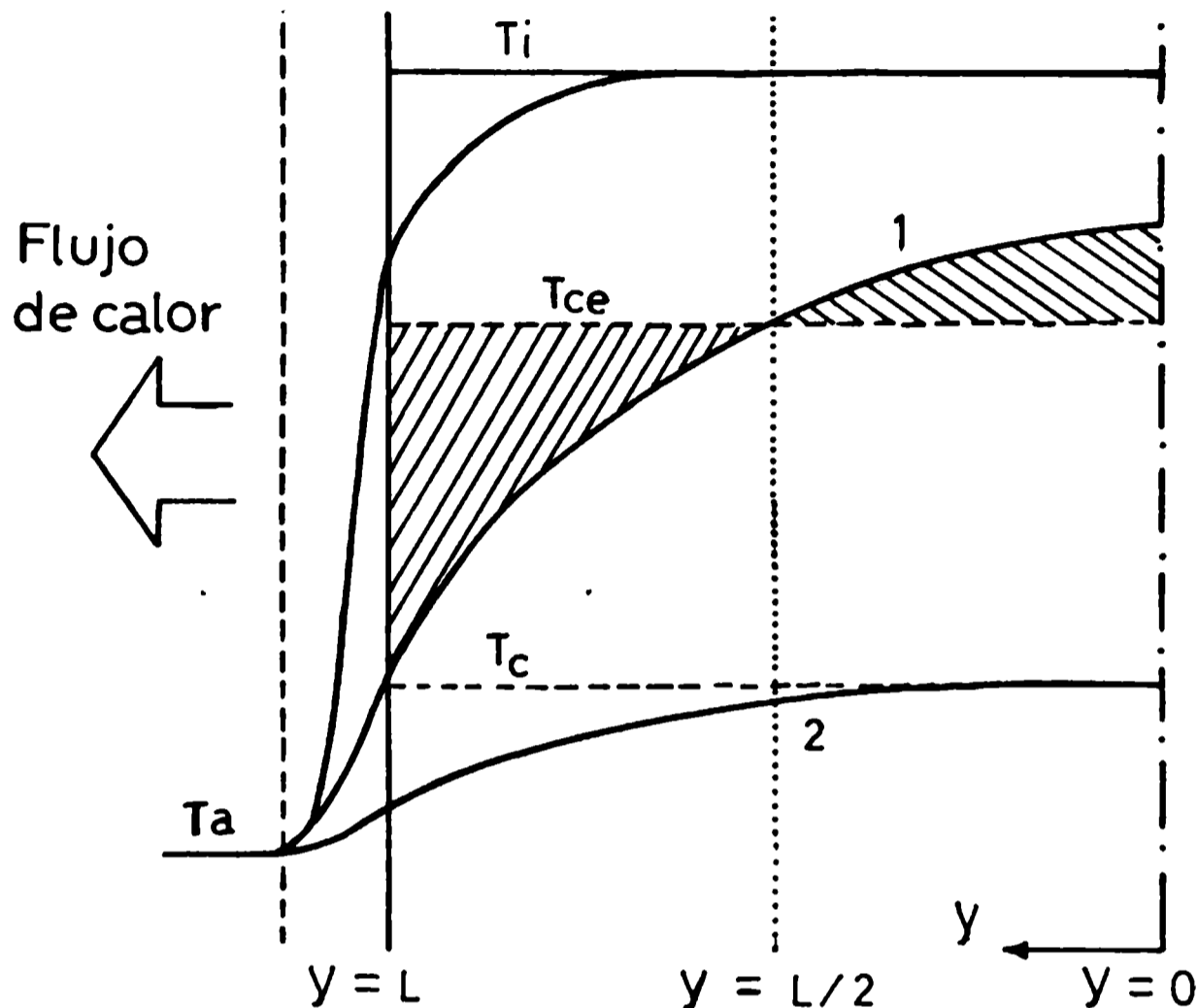
El de atemperado lo consideraron como el tiempo transcurrido para que el producto se enfríe desde  $T_{ce}$  hasta la temperatura final de congelación  $T_c$ , en el centro térmico.

$$t_f = t_p + t_{fp} + t_a \quad (2.10)$$

$t_p$  y  $t_a$  son el tiempo de preenfriamiento y atemperado respectivamente,  $t_{fp}$ , es el tiempo de cambio de fase de Plank. Esta propuesta posee muy buena base teórica, y los tiempos de preenfriamiento y atemperado se obtienen de las soluciones analíticas para placa plana sin cambio de fase. También puede ser aplicado a cilindro infinito y esfera (Pham, 1984; Castaigne y Lacroix, 1985; Lacroix y Castaigne, 1987).

En el período de preenfriamiento, se utilizaron las propiedades,  $k$  y  $\alpha$  (difusividad térmica), promedio entre los de  $T > T_{ce}$  y las del congelado a  $T = (T_{ce} + T_a)/2$ . Esta forma de expresar las propiedades permite considerar un promedio entre la parte del alimento que tiene propiedades del producto fresco y la parte que posee propiedades del congelado. Ya que como se mencionó,  $t_p$  se ha definido como el tiempo necesario para alcanzar  $T_{ce}$  en el punto situado en  $x = L/2$ , siendo  $L$  el semiespesor de la placa plana. Con ello se intentó balancear, aproximadamente, las cargas térmicas por encima y por debajo de  $T_{ce}$ , (ver Fig. 2.3).

Fig. 2.3: Representación esquemática del proceso de congelación (Adaptado de De Michelis y Calvelo, 1982)



En el período de atemperado se ha supuesto que el sistema se encuentra a  $T_{ce}$ , uniforme, y se llega a  $T_c$  en el centro térmico. En este caso, y para el cálculo de  $t_{fp}$ , las propiedades se evaluaron a  $T = (T_{ce} + T_a)/2$ .

Esta propuesta se considera como la más realista en cuanto a que intenta describir el fenómeno tal ocurre en la realidad. Como ventaja adicional permite calcular, aunque sea en forma aproximada, las contribuciones relativas del preenfriamiento, cambio de fase y atemperado en un amplio rango de condiciones de operación de los equipos. Este aspecto es importante ya que permite estimar las contribuciones energéticas del proceso y por ende facilita mucho la toma de decisiones en planta. La principal desventaja práctica se encuentra en el hecho de que los cálculos insumen mucho tiempo.

De Michelis y Calvelo, 1982, han empleado esta metodología para el cálculo de tiempos de congelación para transferencia de calor unidireccional, en condiciones de congelación asimétricas proponiendo, además, un método para determinar la posición del centro térmico.

De Michelis y Calvelo, 1983, asimismo, han extendido la misma para el cálculo de tiempos de proceso cuando existe transferencia de calor en más de una dirección.

Pham, 1984, partió de la idea de Mascheroni y Calvelo, 1982 y la reformuló teniendo en cuenta que para las formas elementales  $P = V / A D$ , y que  $Q = V \Delta H_T$  es la carga térmica a extraer.  $V$  es el volumen del sistema a congelar,  $A$  el área de transferencia de calor y  $D$  la dimensión característica. Logró llegar a una única ecuación para el tiempo total de congelación, en términos del calor total a extraer y de una función del  $Bi$  que es distinta según se trate de los períodos de preenfriamiento, cambio de fase o atemperado. Considerando, además, que en el preenfriamiento y el atemperado existe conducción pura.

Otra modificación a la propuesta de Mascheroni y Calvelo, 1982, fue la realizada por Castaigne y Lacroix, 1985 y Lacroix y Castaigne, 1987, con el objeto de evitar usar soluciones gráficas. Pero tuvieron que encontrar nuevos valores de  $P$  y  $R$ , regresionando datos experimentales, como consecuencia de que utilizaron sólo el primer término de las series infinitas correspondientes a las soluciones analíticas para transferencia de calor por conducción, sin cambio de fase.

**Regresiones empíricas:** Estos aportes en muchos casos están limitados a uno o pocos productos o a rangos muy reducidos de condiciones operativas.

Las contribuciones más relevantes son:

Succar y Hayakawa, 1983, desarrollaron una válida para placa plana, en función de siete parámetros que involucran todas las variables que influyen sobre el proceso.

CSIRO, 1968, basados en los cálculos de Earle presentaron un nomograma muy útil para el cálculo de tiempos de proceso hasta una temperatura final promedio de  $-12,2$  °C, válida para carne deshuesada de 74 % de agua, empaquetada en cajas de cartón y congelada en túneles estáticos de aire forzado.

Herbert y Lovett, 1979, luego de efectuar numerosas pruebas en túneles verificaron la validez del nomograma del CSIRO, y propusieron una serie de factores correctores a los valores obtenidos del mencionado nomograma con el objeto de contemplar restricciones al flujo de aire en el túnel; tipo de cartón de las cajas; arreglo del producto dentro del envase; distintos contenidos de grasa; incorporaron la congelación de hígado, etc.

Moleeratanond y col., 1982, presentaron regresiones de datos experimentales en túneles de aire forzado para carne picada en distintos envases, con temperaturas finales de congelación de hasta  $-18$  °C.

Tocci y Mascheroni, 1994, citan un método desarrollado por Mascheroni (no publicado) en el que obtuvo mediante regresión no lineal de resultados numéricos, una ecuación aplicable a placa plana, carne bovina y  $T_c$  de  $-18$  °C. Esta propuesta

simplifica mucho el cálculo ya que las propiedades consideradas corresponden al producto fresco.

Siri y Mascheroni, 1995, modificando un desarrollo de Arroyo y Mascheroni, 1990, obtuvieron una ecuación de predicción en la cual cada factor o grupo de factores tuvieran en cuenta la influencia de cada parámetro de diseño o de operación. Esta última propuesta también utiliza propiedades del producto fresco, y permite visualizar el peso relativo de cada variable en el tiempo de congelación.

### Diagramas térmicos generalizados

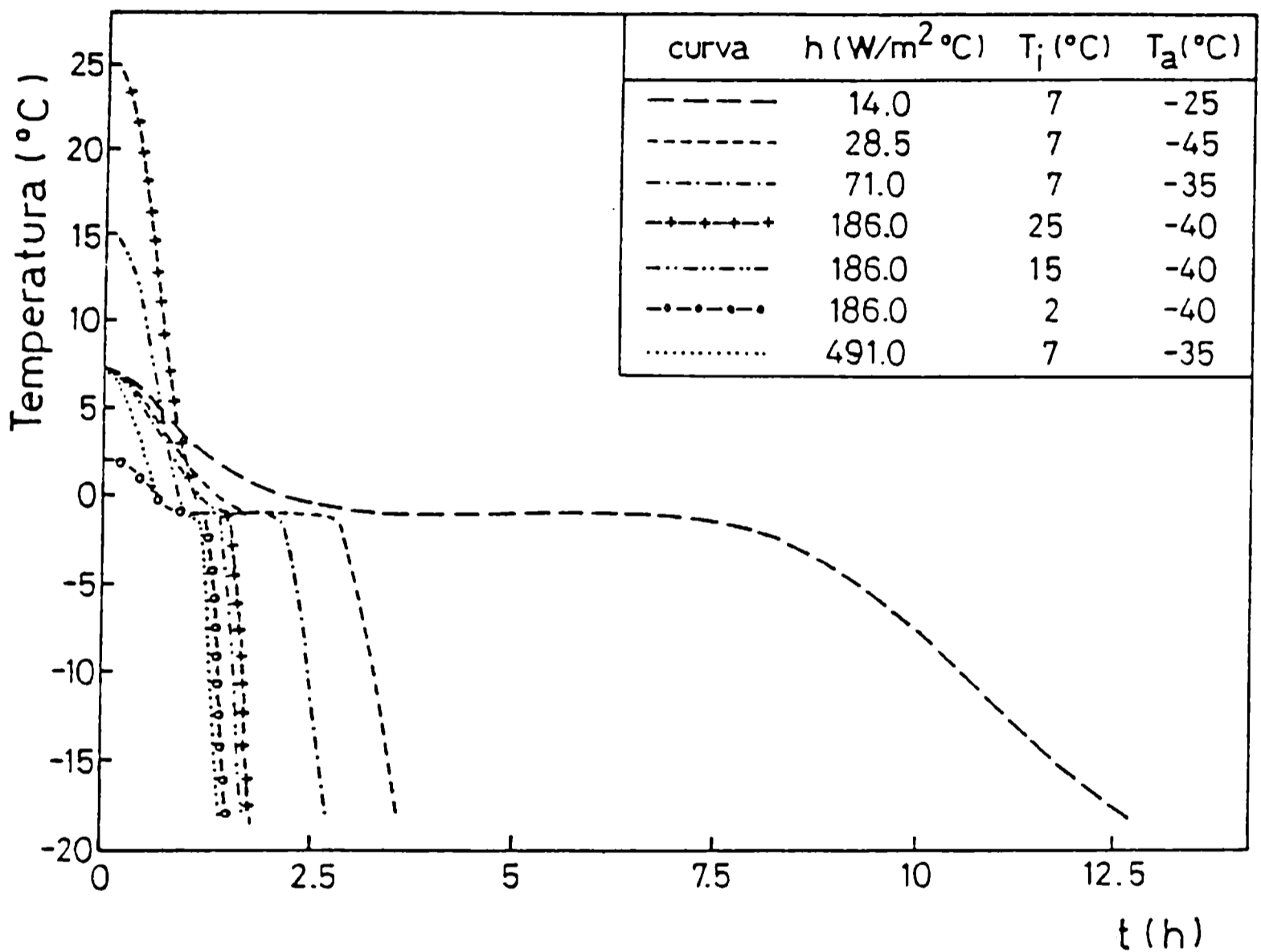
Este enfoque propone generalizar ecuaciones para muchos productos y en un amplio rango de condiciones operativas.

La idea central de estos desarrollos es que si el tiempo de congelación tiene una dependencia como la que ha propuesto Plank con  $T_i$ ,  $T_a$ ,  $h$  y  $L$  es posible que en la zona de temperaturas menores que  $T_{ce}$ , la temperatura del alimento y en particular la del centro térmico,  $T_c$ , tenga una dependencia similar.

Si se estudia un rango amplio de condiciones de congelación, las curvas reales de  $T_c$  en función del tiempo poseen una gran dispersión, como la que se observa en la Fig. 2.4:



**Fig. 2.4: Curvas de congelación de una placa plana de carne vacuna (Adaptado de Salvadori, 1994)**

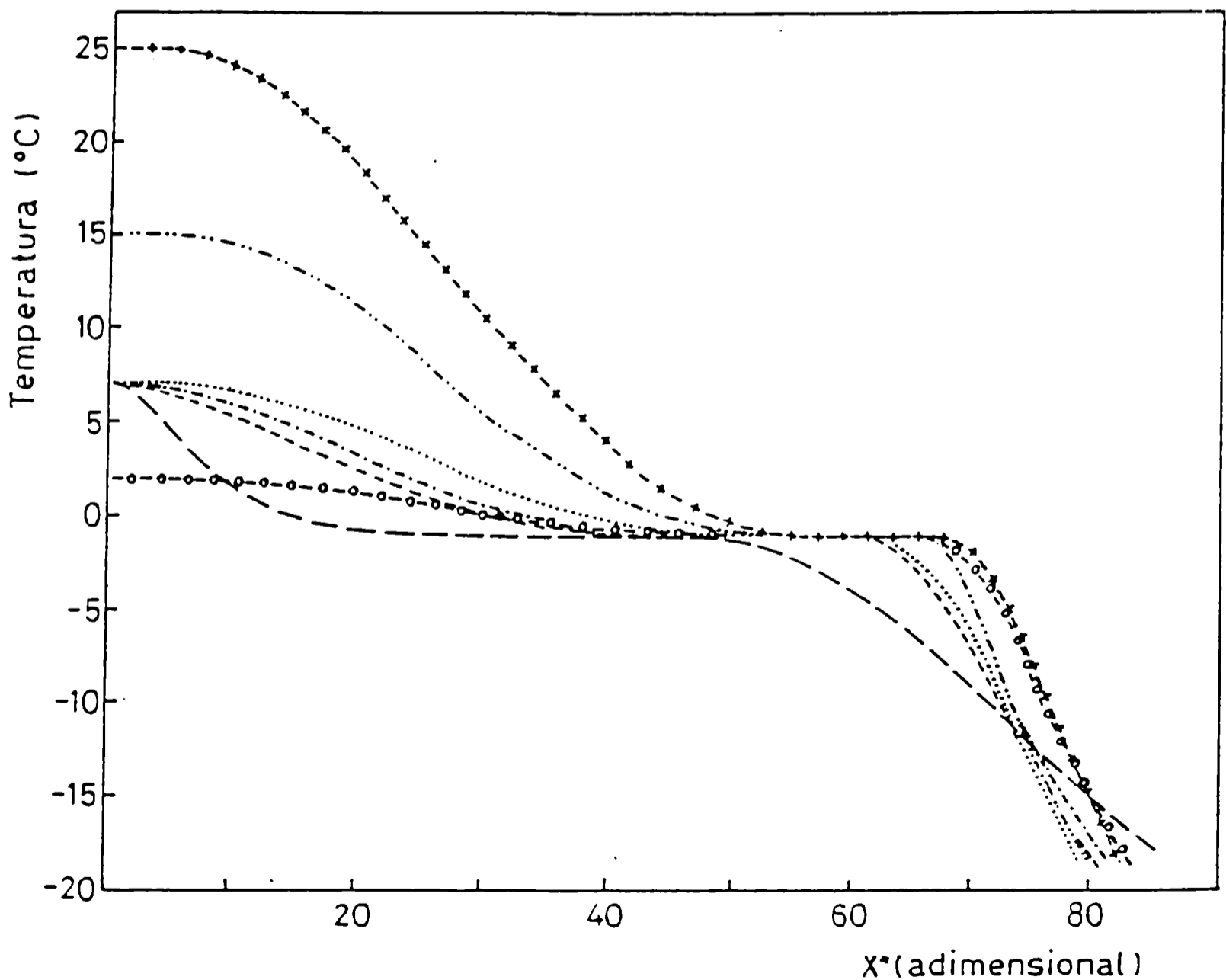


En sucesivos trabajos Salvadori y col., 1987a,b, 1991, y Salvadori, 1994 trataron este enfoque llegando al planteo de una variable adimensional definida como:

$$X^* = \frac{F_0 \left( \frac{T_a - T_{ce}}{T_{ce}} \right)^m}{\left( \frac{1}{Bi_0} + C \right) \left( \frac{T_{ce} - T_i}{T_{ce}} \right)^n} \quad (2.11)$$

Tal que si se representa  $T_c$  en función de  $X^*$  se obtiene el gráfico de la Fig. 2.5:

**Fig. 2.5: Temperatura del centro térmico de una placa plana de carne vacuna, en función de la variable  $X^*$  (ec. (2.11)). (Adaptado de Salvadori, 1994)**



Como se observa en la Fig. 2.5, en el rango de temperaturas  $T_c < T_{ce}$ , todas las curvas se agrupan en un intervalo pequeño de  $X^*$ .

Luego de plantear versiones gráficas y regresiones alrededor de  $T_{ce}$ , Salvadori, 1994, arribó a la forma definitiva que se presenta a continuación: si se representan los valores de dicha zona, a los efectos de evitar errores de acceso al gráfico, mediante una recta del tipo:

$$X^* = a T_c + b \quad (2.12)$$

se reemplaza  $T_{ce}$ , por  $-1$  °C en la ec. (2.11), y se aplica una regresión no lineal en las curvas de la Fig. 2.5, se obtienen los valores de  $a$ ,  $b$ ,  $C$ ,  $m$  y  $n$ , de las ecs. (2.11) y (2.12), que se presentarán más adelante.

Igualando las ecs. (2.11) y (2.12) y despejando  $t_f$  se obtiene:

$$t_f = \frac{L^2}{\alpha_0} (a T_c + b) \left[ \frac{1}{Bi_0} + C \right] (1 + Ti)^n (-1 - Ta)^{-m} \quad (2.13)$$

Esta ecuación fue comparada con datos experimentales de tiempos de congelación en condiciones simétricas y asimétricas, obtenidos por diversos autores, para carne vacuna, y congelada bajo condiciones muy diversas. Los resultados obtenidos permitieron indicar que la ec. (2.13) funcionaba adecuadamente.

Esta propuesta es muy interesante ya que es de cálculo muy sencillo, utiliza propiedades de los productos frescos, no presenta limitaciones en cuanto al rango de operación, y, como se verá más adelante, puede ser extendida a transferencia de calor en más de una dirección.

### Transferencia de calor multidireccional

De la revisión presentada para transferencia de calor unidireccional se puede observar que pocas son las propuestas que pueden ser extendidas a transferencia de calor en más de una dirección.

Si bien Riley y Duck, 1977a,b (ver Cleland y Earle, 1979), habían abordado el problema para paralelepípedos rectangulares, sus estudios no poseen aplicación práctica ya que resolvieron para sistemas con  $T_i$  igual a  $T_{ce}$  y utilizaron una condición de contorno de tipo 1 (temperatura de la superficie conocida y constante).

La primera propuesta con posibilidades de aplicación práctica fue presentada por Cleland y Earle, 1979b. Para un paralelepípedo rectángulo (bloque rectangular) de dimensiones  $D \times \beta_1 D \times \beta_2 D$ , siendo  $D$  la longitud menor, Plank obtuvo (Plank, 1963):

$$P = \frac{\beta_1 \beta_2}{2(\beta_1 \beta_2 + \beta_1 + \beta_2)} \quad (2.14)$$

$$R = \frac{G}{2} \left[ (m_1 - 1)(\beta_1 - m_1)(\beta_2 - m_1) \ln \left( \frac{m_1}{m_1 - 1} \right) \right] - \frac{G}{2} \left[ (n_1 - 1)(\beta_1 - n_1)(\beta_2 - n_1) \ln \left( \frac{n_1}{n_1 - 1} \right) \right] + \frac{1}{72} (2\beta_1 + 2\beta_2 - 1) \quad (2.15)$$

$$\frac{1}{G} = 4 \left[ (\beta_1 - \beta_2)(\beta_1 - 1) + (\beta_2 - 1)^2 \right]^{1/2} \quad (2.16)$$

$$m_1 = \frac{1}{3} \left[ \beta_1 + \beta_2 + 1 + \left( (\beta_1 - \beta_2)(\beta_1 - 1) + (\beta_2 - 1)^2 \right)^{1/2} \right] \quad (2.17)$$

$$n_1 = \frac{1}{3} \left[ \beta_1 + \beta_2 + 1 - \left( (\beta_1 - \beta_2)(\beta_1 - 1) + (\beta_2 - 1)^2 \right)^{1/2} \right] \quad (2.18)$$

Cleland y Earle, modificaron los  $P$  y  $R$  de Plank regresionando, mediante regresión lineal múltiple, 187 datos experimentales, obtenidos congelando un sistema modelo de tilosa; de los cuales 72 correspondían a bloques rectangulares. Los datos experimentales diferían aproximadamente en un 10 % con los valores obtenidos mediante un método numérico de tres niveles expresado en diferencias finitas. Obtuvieron:

$$P_1 = P \left[ 1,026 + 0,5808Pk + Ste \left( 0,2296Pk + \frac{0,0182}{Bi} + 0,150 \right) \right] \quad (2.19)$$

$$R_1 = R [1,202 + Ste(3,410Pk + 0,7336)] \quad (2.20)$$

Donde  $P$  y  $R$  son los factores originales de Plank. A través del  $Bi$  tienen en cuenta el efecto de la resistencia de calor convectiva, con el  $Ste$  evalúan el período de atemperado, y mediante el  $Pk$  evalúan el efecto de la  $Ti$  mayor que  $Tce$ .

Los  $P_1$  y  $R_1$  son valores intermedios de los factores geométricos, para las formas por ellos estudiadas, los factores geométricos modificados toman los valores de la Tabla 2.2:

**Tabla 2.2: Factores de forma  $P$  y  $R$  modificados**

Forma	$P_2$	$R_2$
Placa Plana	$P_1$	$R_1$
Cilindros y esferas	$P_1 + 0,1278 P$	$R_1 - 0,1888 R$
Bloque rectangular	$P_1 + P[0,1136 + Ste(5,776P - 1,242)]$	$R_1 + R[0,7344 + Ste(49,89R - 2,900)]$
Adaptado de Cleland y Earle, 1979b.		

Los valores de  $P_2$  y  $R_2$  se reemplazan en la ecuación de Plank, evaluando el cambio entálpico entre  $T_{ce}$  y  $T_c = -10$  °C. Los mismos autores mencionan en la misma cita el concepto de *EHTD*.

De Michelis y Calvelo, 1983, propusieron extender el modelo de Mascheroni y Calvelo, 1982, para transferencia de calor en más de una dirección, y lo aplicaron a cilindros finitos y bloques rectangulares enfriados en dos y tres direcciones.

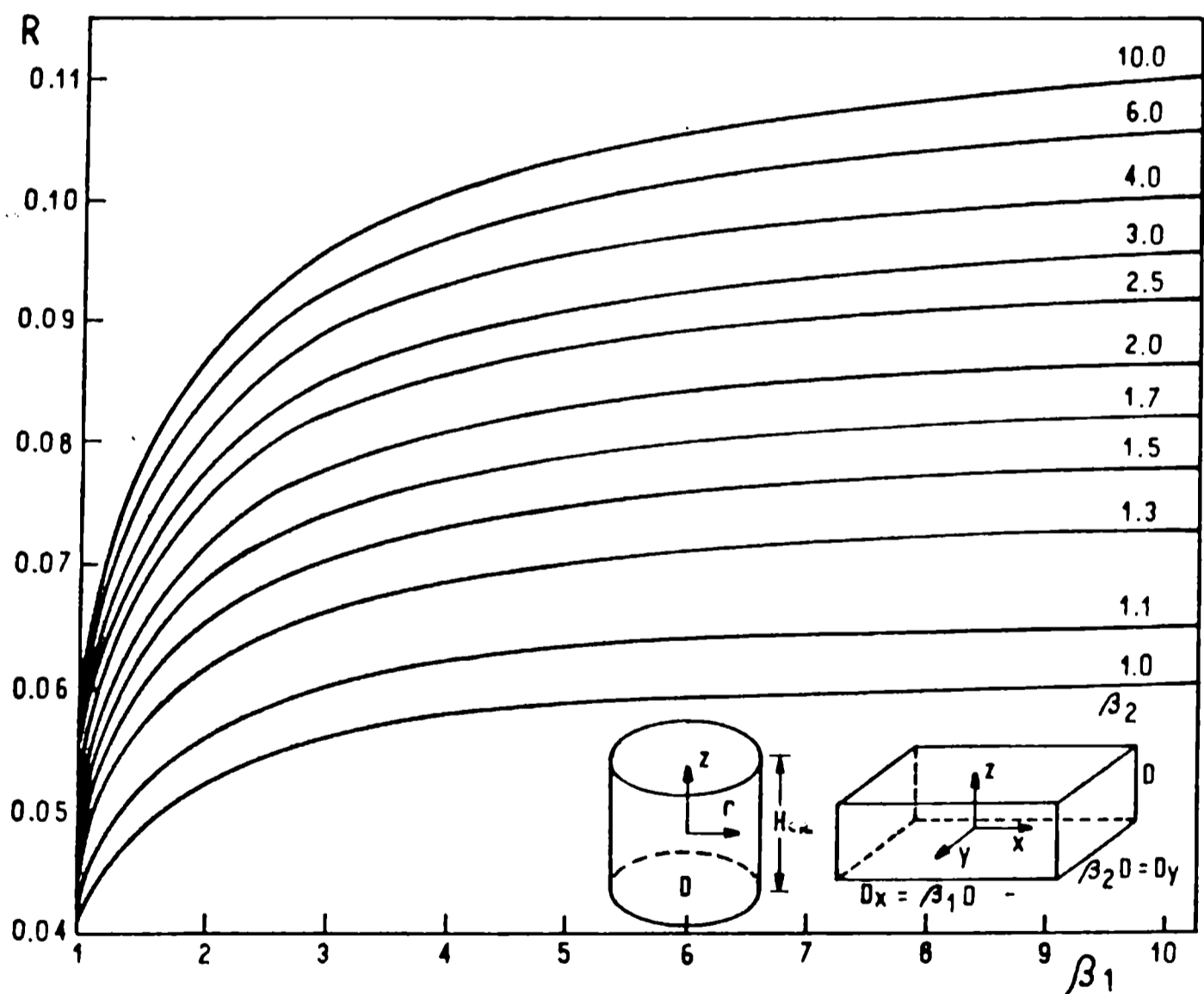
Para la obtención de los tiempos de preenfriamiento y atemperado utilizaron el mismo criterio desarrollado por Mascheroni y Calvelo, 1982 a los efectos de considerar las propiedades térmicas, y de las coordenadas para el cálculo de los tiempos correspondientes.

Para el tiempo correspondiente al período de preenfriamiento calcularon en un punto equidistante del centro, de coordenadas:  $D/4$ ;  $\beta_1 D/4$ ;  $\beta_2 D/4$  para bloques rectangulares enfriados en tres direcciones;  $D/4$ ;  $\beta_1 D/4$  para bloques rectangulares enfriados en dos direcciones y  $H_{cil}/4$ ;  $D/4$ , siendo  $H_{cil}$  la altura del cilindro, para

cilindros finitos. Para el tiempo correspondiente al período de atemperado se calcula en el centro térmico.

Para el cálculo del período de cambio de fase utilizaron los factores  $P$  y  $R$  de Plank, ecs. (2.14) a (2.18).  $R$  se puede obtener gráficamente en función de  $\beta_1$  y  $\beta_2$ , del gráfico de Ede (Ede, 1949), que se presenta en la Fig. 2.6, y  $P$  de la ec. (2.14).

**Fig. 2.6: Factor  $R$  de Plank** (Adaptado de De Michelis y Calvelo, 1983)



Y para el cálculo de los tiempos de preenfriamiento y atemperado plantearon dos posibilidades:

- ✓ Utilizar la regla de Newman con las soluciones de las dos formas simples, y obtener el valor de la forma bi o tridimensional por intersección de las mismas, (Chapman, 1967; Carslaw y Jaeger, 1959). Este método presenta el inconveniente de que es iterativo.
- ✓ Aplicar la solución de la primera raíz de la serie infinita, de la solución analítica para transferencia de calor por conducción sin cambio de fase; el concepto de tiempo medio de vida (Pflug y col., 1965), y el concepto de *EHTD* (number of equivalent heat transfer dimensions) propuesto por Cleland y Earle, 1982, para convertir a transferencia de calor en más de una dirección. Los errores obtenidos comparando las dos posibilidades, para todas las condiciones operativas estudiadas, eran menores que el 2 %. Este es menos preciso que el anterior pero de más fácil uso, por ello lo han adoptado.

El método consiste en admitir que para transferencia de calor en una dirección el tiempo de enfriamiento es suficientemente largo como para utilizar el primer término de la serie infinita, según:

$$\eta = A_1 e^{-\tau^2} \quad (2.21)$$

$$\eta = (T - T_a) / (T_i - T_a) \quad (2.22)$$

$$\tau = 4 \alpha t / D^2 \quad (2.23)$$



$A_1$  depende de la posición, de la forma y del  $Bi$ .  $C_1$  sólo depende de los últimos dos.

Definiendo el tiempo de vida medio  $\tau_{1/2}$  como el requerido para que la temperatura adimensional del sistema,  $\eta$ , disminuya a la mitad, se puede definir el número de tiempos de vida media,  $N$ , como:

$$\tau = \tau_{1/2} N \quad (2.24)$$

De acuerdo a esta definición y a la ec. (2.21) se obtiene:

$$C_1 \tau_{1/2} = \ln 2 \quad (2.25)$$

Esta ecuación muestra que  $\tau_{1/2}$  es función de la geometría y del  $Bi$ , y es independiente de la posición (es el mismo para cualquier punto del sólido).

Reemplazando la (2.24) y la (2.25) en la (2.21), se obtiene:

$$\eta = A_1 e^{-N \ln 2} \quad (2.26)$$

Como ya se indicó:

$$A_1 = A_1(\text{posición}, Bi, \text{geometría})$$

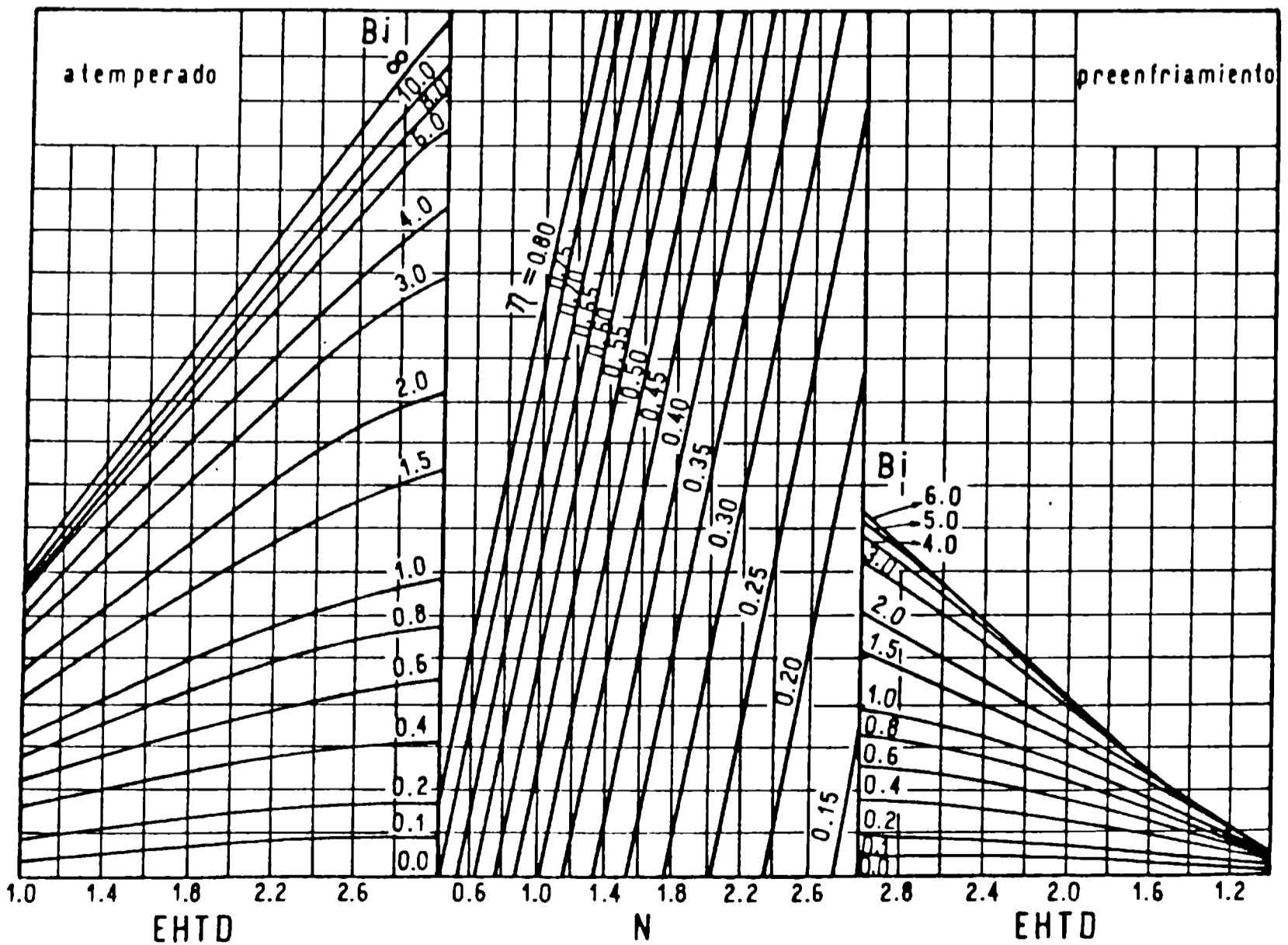
La geometría puede ser considerada mediante el  $EHTD$ . Este valor compara la contribución a la transferencia de calor de todas las dimensiones respecto de la contribución correspondiente a la menor dimensión. Para placa plana infinita contribuye una sola dirección por ende  $EHTD = 1$ . Para una esfera o un cubo las tres direcciones contribuyen por igual, entonces  $EHTD = 3$ . Para cilindro infinito y para

un paralelepípedo rectangular infinito  $EHTD = 2$ . Se puede entonces inferir que para cilindros finitos o paralelepípedos rectangulares el valor de  $EHTD$  estará comprendido entre 1 y 3. Cleland y Earle, 1982, propusieron la siguiente ecuación:

$$EHTD = \frac{Bi}{Bi + 0,1} \left(1 + \frac{1}{\beta_1^2} + \frac{1}{\beta_2^2}\right) + \frac{0,1}{Bi + 0,1} \left(1 + \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2}\right), \text{ Donde } Bi = h D / 2 k \quad (2.27)$$

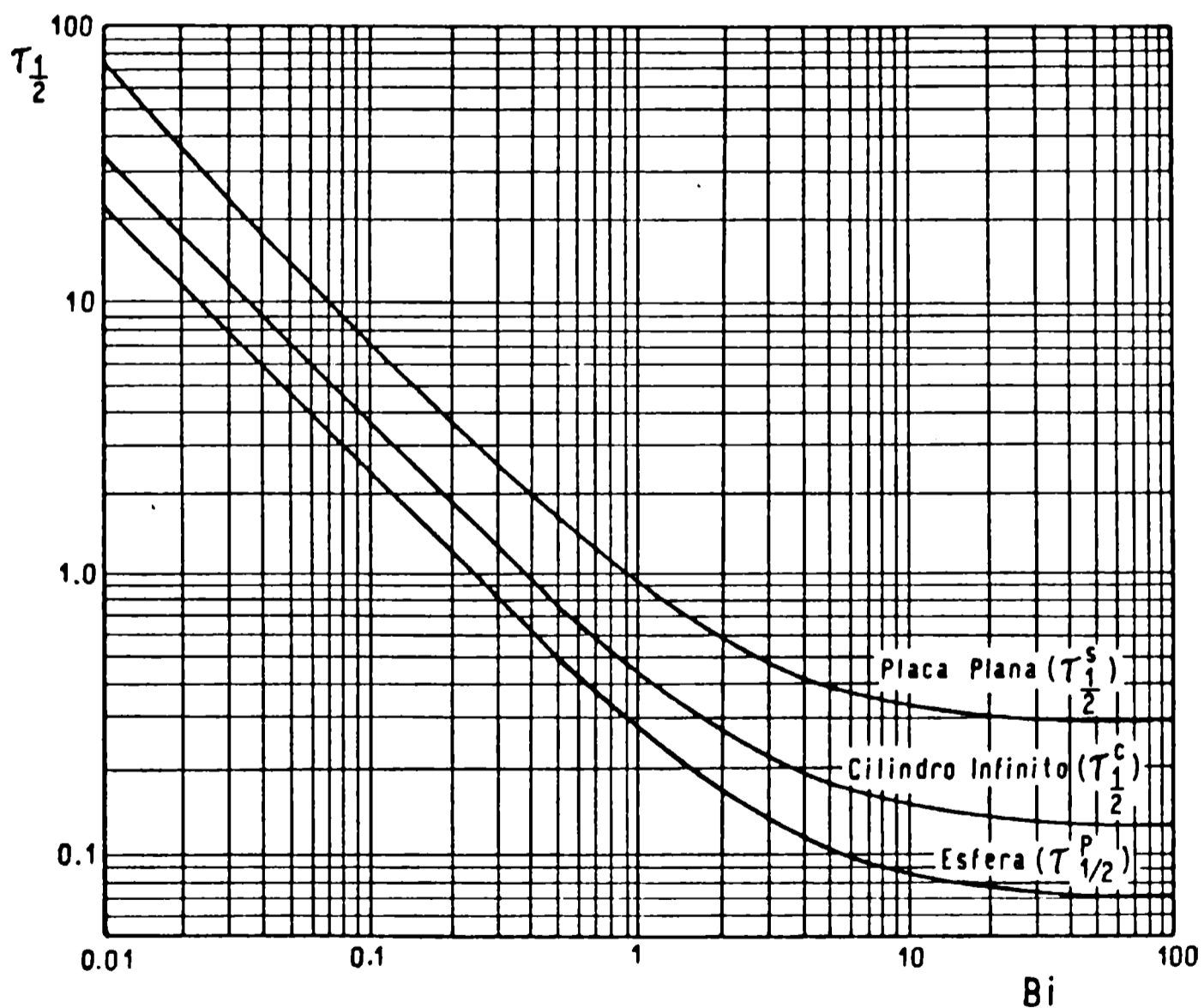
Definida la posición en la ec. (2.26), se puede construir un gráfico de  $A_1$  en función del  $Bi$  y el  $EHTD$ . Si, además, se anexa otro para la obtención de  $N$  en función de la temperatura adimensional,  $\eta$ , se puede, mediante la obtención de  $\tau_{1/2}$ , calcular  $\tau$  y con él estimar el correspondiente tiempo. En la Fig. 2.7 se presenta la forma de obtener  $N$ .

Fig. 2.7: Número de tiempos de vida media:  $N$  (Adaptado de De Michelis y Calvelo, 1983)



Entrando con  $EHTD$  que se calcula con la ec. (2.27), en el sector del preenfriamiento (derecho) o del atemperado (izquierdo), se intercepta verticalmente el correspondiente valor de  $Bi$  (ec. (2.27)). De allí horizontalmente se desplaza hasta el valor de  $\eta$  (ec. 2.22), y con él verticalmente se obtiene  $N$ . El valor de  $\tau_{1/2}$  se obtiene de la Fig. 2.8, para transferencia de calor en una dirección, y de la Tabla 2.3, para transferencia de calor en más de una dirección.

Fig. 2.8: Tiempos de vida media:  $\tau_{1/2}$  (Adaptado de De Michelis y Calvelo, 1983)



**Tabla 2.3: Cálculo de valores de  $\tau_{1/2}$  para transferencia de calor en más de una dirección.** (Adaptado de De Michelis y Calvelo, 1983)

Forma	$\tau_{1/2}$
Cilindro Finito largo ( $H \geq D$ )	$\tau_{1/2}^c / EHTD$
Cilindro finito chato ( $H < D$ )	$\tau_{1/2}^s / EHTD$
Paralelepípedo rectangular enfriado en dos direcciones	$\tau_{1/2}^s / EHTD$
Paralelepípedo rectangular enfriado en tres direcciones	$\tau_{1/2}^s / EHTD$
$\tau_{1/2}^c$ : $\tau_{1/2}$ , correspondiente a cilindro infinito $\tau_{1/2}^s$ : $\tau_{1/2}$ , correspondiente a placa plana infinita	

Luego con la ecuación:

$$\tau = 4\alpha t / D^2 = \tau_{1/2} N \quad (2.28)$$

Se despeja y calcula  $t$ , el tiempo de preenfriamiento y/o atemperado.

$$t_{p,a} = \frac{\tau_{1/2} N D^2}{4\alpha} \quad (2.29)$$

En cuanto a las propiedades se consideró:

Para el cálculo del tiempo de cambio de fase:

$$t_{fp} = \frac{\rho_0 Y_0 \lambda f w D^2}{(T_{ce} - T_a) k_m} \left[ \frac{P}{Bi} + R \right] \quad (2.30)$$

$\rho_0$ ,  $Y_0$ , son la densidad y contenido de agua del producto fresco respectivamente, y  $\lambda_f$ , es el calor de solidificación del agua pura.

$\bar{w} = (w_{ce} + w_a) / 2$  es el promedio de la fracción de agua congelada a  $T_{ce}$  y  $T_a$  respectivamente (Mascheroni y Calvelo, 1978, 1980)

$k_m$  es la conductividad térmica evaluada a  $T_m = (T_{ce} + T_a) / 2$  (Mascheroni y Calvelo, 1982).

En el caso de materiales anisotrópicos, como el músculo bovino,  $k_m$  se tomó según:  $k_m = \sum a_i k_{mi} / \sum a_i$ , donde  $a_i$  es la superficie del área considerada y  $k_{mi}$  la conductividad térmica correspondiente a la dirección perpendicular al área considerada.

Las correspondientes al período de preenfriamiento:  $k = (k_0 + k_m) / 2$  y  $\alpha = (\alpha_0 + \alpha_m) / 2$ . Donde  $k_0$  y  $\alpha_0$  son la conductividad térmica y difusividad térmica del producto fresco, y  $k_m$  y  $\alpha_m$  la conductividad y difusividad térmica evaluadas a  $T_m$ .

Para el período de atemperado se utilizaron  $k_m$  y  $\alpha_m$ .

Este modelo fue comparado con 24 datos experimentales de congelación de carne bovina en bloques rectangulares y cilíndricos, con las propiedades obtenidas de Mascheroni, 1977, y con el siguiente rango de parámetros:

$D$ : entre 4,4 y 12,5 cm

$Bi$ : entre 0,25 y 10,37

$T_i$ : entre 1,90 y 21,7 °C

$T_a$ : entre - 14,7 y - 45,1 °C

$T_c$ : - 10 y - 18 °C

El error promedio de todas las estimaciones fue de  $-2,1\%$ , con mínimos de  $-10,6\%$  y máximos de  $+10\%$ .

Los resultados que se obtuvieron permitieron indicar que el método predecía con muy buena aproximación. Sin embargo, como se vió en el desarrollo, la propuesta presenta dificultades prácticas cuando se requiere su utilización en plantas de elaboración.

Hayakawa y col., 1983, para cilindro finito y paralelepípedo rectangular bidimensional, desarrollaron una regresión empírica del mismo tipo que la que obtuvieron para placa plana, la cual posee 8 parámetros y 25 constantes para cada forma.

Rubiolo de Reinick y Schwartzberg, 1986, desarrollaron un método rápido que puede ser usado en alimentos rectangulares, con dos o cuatro caras expuestas a la transferencia de calor, con condiciones externas simétricas o asimétricas. El método es válido para  $Bi \leq 3$ . Un aporte interesante de este método, además de calcular el tiempo total de proceso, es que presenta un modo simple de calcular la temperatura media entálpica en función del tiempo a medida que transcurre el cambio de fase. Esta temperatura la definieron como la temperatura a la cual el término entálpico de la ecuación desarrollada iguala a la entalpía total del alimento.

### **Formas multidimensionales cualesquiera**

En el intento de generalizar las soluciones aproximadas para cualquier forma multidimensional se han presentado las siguientes propuestas:

Cleland, Cleland y Earle, 1987a,b, partieron de la relación de tiempos de enfriamiento de Plank: **6 : 3 : 2** para **placa plana infinita : cilindro infinito : esfera** respectivamente. Esta relación es válida si toda la superficie del cuerpo a congelar tiene igual temperatura y el flujo de calor es uniforme a través de ella. Esto sólo ocurre para  $Bi = 0$ . Ello surge a partir de que las relaciones de  $V / A L$  ( $L$  es la longitud característica) para **placa plana infinita : cilindro infinito : esfera** valen **1 : 1/2 : 1/3**, y el tiempo de congelación es proporcional a ésta relación. Para cualquier forma del producto la relación  $V / A L$  es exactamente proporcional al tiempo de congelación,  $t_f$ , sólo para  $Bi = 0$ . Para  $Bi > 0$  la temperatura superficial del producto no es uniforme y por lo tanto el flujo de calor tampoco. En consecuencia, la relación entre el tiempo de congelación con transferencia de calor en más de una dirección y el tiempo correspondiente a la misma geometría enfriada en una sola dirección, dependerá de la forma y del  $Bi$ .

Por ello, para generalizar definieron:

$$t_f / t_{fpl} = 1 / EHTD \quad \text{que equivale a} \quad t_f / t_{fe} = 1 / E \quad (2.31)$$

$t_{fpl}$  y  $t_{fe}$  son los tiempos necesarios para la congelación unidireccional de una forma regular y de una forma cualquiera, respectivamente. De las ecs. (2.31) surge que:

$$t_f = t_{fpl} / EHTD = t_{fe} / E \quad (2.32)$$

Es decir, que la relación entre el tiempo de congelación con transferencia de calor en una única dirección y el número de dimensiones equivalentes a la transferencia de calor para formas regulares,  $EHTD$ , se puede generalizar para la congelación de cualquier forma si se puede obtener el valor de  $E$ , siendo  $E$  el equivalente a  $EHTD$  para cualquier forma y que obviamente lo contiene.

Los autores propusieron que  $E$  debe depender de los números de  $Bi$ ,  $Ste$  y  $Pk$  para una dada forma. Regresionaron  $E = E(\text{forma}, Bi)$ , con valores medios de  $Ste$  y

$Pk$ , para  $T_c = -10\text{ °C}$  y propiedades de un sistema modelo de tilosa para distintas geometrías: cilindros cortos y largos, varillas rectangulares infinitas y bloques rectangulares. Observaron que se podía acumular independientemente los efectos de la segunda y tercera dimensión. Generalizaron  $E$  y particularizaron las formas a través de los factores que intervienen en él. Dividieron los resultados para formas geométricas regulares e irregulares.

$$E = G_1 + G_2 E_1 + G_3 E_2 \quad (2.33); \quad E_1 = E_3 \left( \frac{2,32}{\beta_1^{1,77}} \right) \frac{1}{\beta_1} + \left[ 1 - E_3 \left( \frac{2,32}{\beta_1^{1,77}} \right) \right] \frac{0,73}{\beta_1^{2,50}} \quad (2.34)$$

$$E_2 = E_3 \left( \frac{2,32}{\beta_2^{1,77}} \right) \frac{1}{\beta_2} + \left[ 1 - E_3 \left( \frac{2,32}{\beta_2^{1,77}} \right) \right] \frac{0,50}{\beta_2^{3,69}} \quad (2.35) \quad \text{y} \quad E_3(x) = \frac{x}{Bi^{1,3} + x} \quad (2.36)$$

Los valores de  $G$  se presentan en la Tabla 2.4:

**Tabla 2.4: Factores de forma para la ec. (2.33)**

Forma	$G_1$	$G_2$	$G_3$
Placa Plana $\infty$	1	0	0
Cilindro $\infty$	2	0	0
Esfera	3	0	0
Cilindro Chato	1	2	0
Cilindro Alargado	2	0	1
Varilla Rectangular $\infty$	1	1	0
Paralelepípedo rectangular	1	1	1
Formas Bidimensionales	1	1	0
Formas Tridimensionales	1	1	1
Adaptado de Cleland, Cleland y Earle, 1987a,b			



Para  $Bi \rightarrow 0$  la relación  $E$  para formas regulares tiende a  $2 V / A D$ , entonces:

$$E = G_1 + G_2 / \beta_1 + G_3 / \beta_2 \quad (2.37)$$

Para  $Bi \rightarrow \infty$ ,  $E$  debe tender a un valor menor que  $E_{Bi=0}$  y mayor que 1. Esto se logró en la relación de  $E$  con la función  $E_3$  que depende del  $Bi$ . Por ello, los  $E_1$  y  $E_2$  tienen un sumando multiplicado por  $E_3$  ( $Bi \rightarrow 0$ ), y otro por  $(1 - E_3)$  ( $Bi \rightarrow \infty$ ).

Pham, 1985, propuso, a partir de su fórmula de predicción para formas simples:

$$tf_1 = \frac{Q}{h A (T_{ce} - T_a)} \left(1 + \frac{Bi_1}{k_1}\right) \quad (2.38)$$

Y encontró que para cuerpos multidimensionales esta fórmula, donde  $Bi_1 / k_1$  provee una idea de la resistencia interna, no es estrictamente válida porque la temperatura de la superficie no es uniforme. Por ello la ley de enfriamiento de Newton no se puede caracterizar con una sola  $T_a$ . No obstante, continua trabajando con esta formulación ya que permite una mejor visualización del proceso. El valor 1 dentro del paréntesis no lo cambia porque la resistencia externa siempre es  $1 / h A$ . Entonces el efecto de la forma debe contemplarse en el segundo sumando dentro del paréntesis.

El problema residía en la definición de  $D$  para el calculo del  $Bi$ . Eligió el concepto de “senda conductiva promedio” (mean conducting path, MCP),  $D_m$ .

En un rectángulo de dimensiones  $D \times \beta D$ , la  $Dm$  será una función de  $\beta$ ,  $Bi$  y  $D$ , o si define  $r_p = Dm / D = r_p(\beta, Bi)$ . Si el cuerpo fuera tridimensional, de medidas:  $D \times \beta_1 D \times \beta_2 D$ , entonces  $r_p = Dm / D = r_p(\beta_1, \beta_2, Bi)$ ;  $Bi_l = h D / k_l$ .

El valor de  $r_p$  lo obtuvo por prueba y error. Usando una regresión multivariante encontró:

$$r_p = 1 + (f_1^{-m} + f_2^{-m})^{-1/m} \quad (2.39)$$

$$f_1 = 1,5(\beta_1 - 1)^{1/2} \quad (2.40)$$

$$f_2 = (1/\beta_1 + 1/\beta_2)(1 + 4 Bi_0) \quad (2.41)$$

para  $rn = 4$  (que el autor consideró suficiente):

$$Dm = D \left[ 1 + (f_1^{-4} + f_2^{-4})^{-1/4} \right] \quad (2.42)$$

y los  $Bi$  serán:

$$Bi = Bi_0 \left\{ 1 + \left\{ \left[ 1,5 \beta_1^{1/2} - 1 \right]^4 + \left[ \left[ \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} \right] \left[ 1 + \frac{4}{Bi_0} \right] \right]^4 \right\}^{-0,25} \right\} \quad (2.43)$$

Donde la  $k$  que se utiliza en  $Bi_0$  depende de sí se trata de preenfriamiento, cambio de fase o atemperado.

El mismo autor, Pham, 1986, modificó su fórmula general y los factores de forma. Para la fórmula general propuso varias simplificaciones: utiliza  $Bi / 4$  en todas las etapas; agrupa cambio de fase con atemperado; propone valores de  $\Delta T$  lineales y no logarítmicos, obteniendo:

$$t_f = \frac{V}{hA} \left( \frac{\Delta H_1}{\Delta T_1} + \frac{\Delta H_2}{\Delta T_2} \right) (1 + Bi/4) \quad (2.44)$$

$$\Delta H_1 = \rho_0 C_{p_0} (T_i - \bar{T}_f) \quad (2.45)$$

$$\Delta H_2 = \lambda f + \rho_s C_{p_s} (\bar{T}_f - T_c) \quad (2.46)$$

$$\Delta T_1 = (T_0 - \bar{T}_f) / 2 - T_a \quad (2.47)$$

$$\Delta T_2 = \bar{T}_f - T_a \quad (2.48)$$

y

$$\bar{T}_f = 1,8 + 0,263 T_c + 0,105 T_a \quad \text{es la temperatura media de congelación} \quad (2.49)$$

Los valores de  $Dm$  (MCP) son:

$$\text{Para paralelepípedos rectangulares: } Dm = 1,46 (D * D_l)^{1/2} \quad (2.50)$$

Para cilindros finitos obtiene de una analogía con un prisma rectangular de sección  $De \times De$  y un cilindro infinito de diámetro  $D$ :

$$\frac{De}{D} = \frac{3}{2 Bi_{cil}} \left[ -1 + \sqrt{1 + \frac{4}{3} Bi_{cil} + \frac{Bi_{cil}^2}{3}} \right] \quad \text{Con } Bi_{cil} = h D / k_c \quad (2.51)$$

y reemplaza para el caso del prisma  $De \times De \times L$  y para el cilindro  $D \times L$ , asumiendo iguales proporciones de  $De/D$  y  $Dm$ .

Cleland y Earle en su trabajo de generalización de los factores de forma encontraron la equivalencia entre  $Dm$  (MCP) y  $E$  (EHTD), con lo que ambas propuestas son conceptualmente iguales.

Hossain, Cleland y Cleland, 1992a,b,c, propusieron, además, ecuaciones analíticas para el cálculo de  $E$  en formas regulares e irregulares multidimensionales.

Todas estas contribuciones, al igual que la de De Michelis y Calvelo, 1983, presentan dificultades para su uso práctico.

Arroyo y Mascheroni, 1990, utilizaron el producto de distintos factores para modelar la contribución de  $T_i$ ,  $T_a$ ,  $T_c$ ,  $h$ ,  $L$ , forma y propiedades al tiempo de congelación, para transferencia de calor en más de una dirección llegando a una única ecuación. Esta ecuación permite además evaluar el peso relativo de cada variable de operación y propone trabajar con propiedades del producto fresco. La forma se tuvo en cuenta mediante los factores  $V^*$  y  $A^*$ , que son el volumen y área de transferencia adimensionales respectivamente, y obtuvieron:

$$tf = \frac{L^2}{\alpha_0} V^* \frac{Ht - w \lambda f Y_0 (0,46383 - 0016168 T_c)}{Cp_0 (T_i - T_a)} \left( \frac{\ln T^*}{T^* - 1} \right) \left[ \frac{1,7332}{Bi_0} + 0,3200 A^* \right] \quad (2.52)$$

Donde  $T^* = (T_c - T_a) / (T_i - T_a)$ ;  $Ht$  es la diferencia de entalpía entre  $T_i$  y  $T_c$ ;  $w$  es la fracción de agua congelada a  $T_c$  e  $Y_0$  es el contenido de agua del producto.

Los factores  $V^*$  y  $A^*$  son puramente geométricos, de cálculo muy simple, e intentan reflejar la contribución real de cada cara del producto a la transferencia de calor, y sus valores para las distintas formas se presentarán más adelante.

## 2.4 Método desarrollado

De la revisión presentada se puede concluir que todos los métodos desarrollados funcionan relativamente bien en las condiciones, y para los productos en que fueron desarrollados. Cuando se comparan entre sí para todos los datos experimentales publicados (Cleland y Earle, 1984a; Arroyo y Mascheroni, 1990; Salvadori, 1994) se observa que no todos predicen con la misma precisión para todos los datos. Este inconveniente se puede atribuir a:

- ✓ El valor de las propiedades utilizadas y su variación con la temperatura. Todos los métodos dependen sensiblemente del valor de las mismas.
- ✓ De cómo se considera en los diferentes métodos el valor de las distintas propiedades ya que en general éstas intervienen en más de un término y/o factor.
- ✓ Del rango de validez de las condiciones operativas en que el método fue desarrollado, principalmente en aquellos que involucran regresiones empíricas.
- ✓ De la forma en que cada método “interpreta” el proceso de congelación y de la sensibilidad que se le atribuye a cada término de las ecuaciones en función de la variación de las condiciones operativas y las propiedades térmicas.
- ✓ La poca certeza que se tiene al experimentar con materiales biológicos y/o de prueba, en los que asegurar la geometría (el área de transferencia efectiva, la dimensión característica, etc.) no es nada fácil como consecuencia de la expansión de volumen de los productos que ocurre durante la congelación. Este inconveniente suele ser muy importante cuando se congela en más de una dirección, y se agrava cuando, además, se congelan paquetes con trozos de

productos. Asimismo, en el caso de “paquetes” relativamente grandes es extremadamente difícil obtener condiciones de homogeneidad de producto, de área de transferencia, de temperatura del medio refrigerante, de uniformidad de los flujos del medio refrigerante en túneles de aire forzado y por ende del coeficiente de transferencia de calor, etc.

Por otro lado, no todas las propuestas desarrolladas se han puesto al alcance del cálculo en líneas de procesado, que lógicamente requieren herramientas confiables, rápidas y de muy fácil manejo para el personal de planta, debido a la dificultad del cálculo y/o al manejo de información compleja de tablas, gráficos, etc.

Por ello es importante contar con un método de cálculo que:

- ✓ Sea simple y preciso
- ✓ Permita usar propiedades confiables y de fácil obtención
- ✓ Sea válido para cualquier temperatura final de congelación y cualquier condición operativa industrial
- ✓ Sea aplicable a cualquier alimento de estructura homogénea y de relativamente alto contenido de agua

El inconveniente de las propiedades puede ser resuelto en gran medida si se propone trabajar con métodos que utilicen propiedades del producto fresco, ya que son de fácil obtención y su variación con la temperatura en el rango de trabajo industrial es muy pequeña. Se han publicado gran cantidad de valores, y correlaciones

muy simples para el cálculo de las propiedades para productos frescos (Jowitt y col., 1983; Sanz y col., 1989).

El otro inconveniente, la facilidad de cálculo, se podría resolver mediante el desarrollo de una única ecuación, aplicable a todas las formas y que incluya una manera fácil de obtener los factores de corrección para contemplar la geometría.

En este sentido, de todos los métodos publicados existen dos que permitirían obtener los requerimientos indicados: el presentado por Salvadori, 1994, para congelación de formas regulares con una única dirección de transferencia de calor, y el desarrollado por Arroyo y Mascheroni, 1990, para obtener tiempos de proceso, de formas regulares e irregulares, con transferencia de calor en más de una dirección. Los dos presentan una única ecuación, las propiedades que utilizan corresponden al producto fresco, y en el segundo se presenta una forma fácil de calcular los factores geométricos.

Si bien los dos métodos ya han sido abordados, a continuación se describirán algunas características relevantes, para luego de la combinación obtener el propuesto en este trabajo.

Ya se indicó en el apartado 2.1 que la ecuación obtenida por Salvadori, 1994 es:

$$t_f = \frac{L^2}{\alpha_0} (a T_c + b) \left[ \frac{1}{Bi_0} + C \right] (1 + Ti)^n (-1 - Ta)^{-m} \quad (2.53)$$

Con las constantes regresionadas de la Fig. 2.5 y que se muestran en la Tabla 2.5.

**Tabla 2.5: Constantes empíricas de la ec. (2.53) (entre paréntesis la desviación estandar)**

<b>Geometría</b>	<b><i>a</i></b>	<b><i>b</i></b>	<b><i>C</i></b>	<b><i>m</i></b>	<b><i>n</i></b>
Placa plana $\perp$	- 1,272 (0,050)	65,489 (2,057)	0,184 (0,002)	1,070 (0,007)	0,096 (0,010)
Placa Plana //	- 0,996 (0,089)	63,407 (3,884)	0,162 (0,003)	1,043 (0,015)	0,103 (0,007)
Cilindro $\infty$	- 0,750 (0,104)	32,198 (3,766)	0,179 (0,005)	1,032 (0,035)	0,037 (0,026)
Esfera	- 0,439 (0,035)	24,804 (1,171)	0,167 (0,006)	1,078 (0,014)	0,073 (0,003)

Nota: en el caso de congelación de músculo bovino se diferencia entre Placa plana  $\perp$  y Placa Plana // ya que la conductividad térmica cambia con la dirección. Para productos homogéneos se utilizaron los valores de Placa plana  $\perp$ . Adaptado de Salvadori, 1994.

La validez de la ec. (2.53) fue avalada mediante la comparación con datos experimentales para varios productos (Carne vacuna, músculo entero y picado, carne de cordero, hígado de cerdo, carpa, tiburón, camarón, puré de papa, manzana, y sistemas modelo de tilosa); y obtenidos de diversos autores (Cleland y Earle, 1977, 1979a; Pham y Willix, 1990; Hung y Thompson, 1983; Bazán y Mascheroni, 1984; Mascheroni y Calvelo, 1982; Creed y James, 1985; Hense y Kieckbusch, 1991; Wang y Kolbe, 1987; Tocci y Mascheroni, 1994; Ilicali y Saglam, 1987; De Michelis y Calvelo, 1982; Flores y Mascheroni, 1984). Se probó en condiciones de congelación simétrica y asimétrica, con un total de 390 datos experimentales (363 para



congelación simétrica y 27 para congelación asimétrica). El análisis estadístico de los resultados, para congelación simétrica, se presenta en la Tabla 2.6.

**Tabla 2.6: Evaluación estadística de los resultados de la ec. (2.53), para el cálculo de tiempos de congelación con transferencia de calor unidireccional y congelación simétrica.**

<b>Forma</b>	<b>Nro. de datos</b>	<b>Error Prom. (%)</b>	<b>Desviación Estándar (%)</b>	<b>Límite de confianza (95%) superior (%)</b>	<b>Límite de confianza (95%) inferior (%)</b>
Placa Plana infinita	213	- 0.69	8,430	16,00	- 17,38
Cilindro Infinito	36	-2,24	6,248	10,26	- 14,74
Esfera	114	3,41	7,552	18,45	- 11,64
<b>Todos los datos</b>	<b>363</b>	<b>0,44</b>	<b>8,203</b>	<b>16,84</b>	<b>- 15,96</b>
Adaptado de Salvadori, 1994.					

Para congelación asimétrica (distintos  $h$  y distintas  $T_a$ ), para 27 datos experimentales de tres productos y de tres autores obtuvo un error promedio de  $- 2.03$  % con una desviación estándar de 13,93.

**El tamaño de los productos en las experiencias (espesor de la placa y/o radio de cilindro y esfera), variaba entre 1 y 15,76 cm. No se ha comprobado su funcionamiento con paquetes más grandes, ya que prácticamente no existen datos en la bibliografía.**

Como ya se mencionó, en la propuesta de Cleland y col. en sucesivas publicaciones, ya citadas, uno de los caminos para estimar los tiempos de congelación para transferencia de calor en más de una dirección era, conocer bien el tiempo de proceso para la forma unidireccional sometida a las mismas condiciones de congelación que la multidimensional, y luego afectarla por un factor de forma geométrico. Inicialmente trabajaron con el *EHTD* y más recientemente con el *E*, de modo que el tiempo de congelación se podía expresar como:

$$t_f = t_{f, \text{forma regular}} / E \quad (2.54)$$

El valor de *E* fue primeramente propuesto en forma empírica para formas regulares e irregulares y luego fue obtenido analíticamente para formas regulares.

También como ya se indicó, Pham, 1985 (ya citado) presentó un método alternativo proponiendo un espesor equivalente denominado MCP.

Posteriormente Cleland y col. demostraron que el *E* y el MCP eran totalmente equivalentes presentando la fórmula que los relaciona, por lo que éste tipo de aporte queda reducido al de *E*.

Arroyo y Mascheroni, 1990, cambian el enfoque proponiendo a partir de la funcionalidad original de Plank (ec. (2.55)):

$$t_{f, \text{forma regular}} = f(T_i, T_c, T_a) \left( \frac{C_1}{Bi} + C_2 \right) \quad (2.55)$$

y la corrigieron con dos factores de forma geométricos *V\** y *A\**, de acuerdo a:

$$t_{f, \text{forma regular}} = V^* f(T_i, T_c, T_a) \left( \frac{C_1}{Bi} + C_2 A^* \right) \quad (2.56)$$

Partiendo del mencionado concepto, también se puede combinar los factores de forma  $V^*$  y  $A^*$  con la ec. (2.53), para obtener:

$$t_f = V^* \left[ \frac{L^2}{\alpha_0} (a T_c + b) \left( \frac{1}{Bi_0} + C A^* \right) (1 + T_i)^n (-1 - T_a)^{-m} \right] \quad (2.57)$$

Donde los valores de  $a$ ,  $b$ ,  $C$ ,  $m$  y  $n$  se pueden obtener de la Tabla 2.5, para las formas simples.

Los valores de  $V^*$  y  $A^*$  se presentan, para cada forma, en la Tabla 2.7.

Como se puede ver en la Tabla 2.7, los factores de forma  $V^*$  y  $A^*$  son de muy fácil obtención, y la ec. (2.57) entonces es de muy simple utilización.

La ec. (2.57) se puede aplicar a formas cualesquiera, en éste trabajo se aplicará a formas regulares, y se evaluará su aplicabilidad comparándola con datos obtenidos por otros autores y con información experimental obtenida en éste trabajo.

Tabla 2.7: Factores geométricos  $V^*$  y  $A^*$  para la ecs. (2.52), (2.56) y (2.57)

Forma	$V^*$	$A^*$
Placa Plana infinita	1	1
Cilindro Infinito	1/2	1
Esfera	1/3	1
Cilindro Largo $L_1 > D$	$1 / (D / L_1)^2 + 2)$	$(D^2 / L_1^2 + 1)^{1/2}$
Cilindro Chato $L_1 < D$	$1 / (1 + (2L_1/D)^2 / 2)$	1
Varilla Rectangular infinita o Placa Rectangular aislada	$1 / (1 + (L_1/L_2)^2)$	1
Varilla Elíptica infinita	$1 / (2 L_1^2/L_2^2 + 2)^{1/2}$	1
Cilindros Distorsionados infinitos °	$(1 + L_2/L_1) / (2 + 2L_2^2/L_1^2)^{1/2})^+$	1
Forma 4 °	0,719 <sup>+</sup>	1
Forma 8 °	0,843 <sup>+</sup>	1
Manzana	0,335 <sup>+</sup>	1
Pera	0,360 – 0,385 <sup>+</sup>	1
Frutilla	0,434 <sup>+</sup>	1
Huevo °	0,4002 <sup>+</sup>	1
Pirámide Rectangular truncada °	0,528 <sup>+</sup>	1,19
Paralelepípedo Rectángulo	$1 / ((L_1/L_3)^2 + (L_1/L_2)^2 + 1)$	$(L_2^2 + L_3^2)^{1/2} / L_3$
Esferoide Oblato	$4 / (6 + 3(L_1/L_2)^2 \ln((1 + e)/(1 - e))/e)^{++}$	1
Esferoide Prolato	$2 / (3(L_1/L_2 + (1/e)\sin^{-1}(e)))^{++}$	1

<sup>+</sup> Valores aproximados; <sup>++</sup>  $e = \text{excentricidad} = (1 / (L_1/L_2)^2)^{1/2}$ ;  $L_1 < L_2 < L_3$   
 ° de Cleland, Cleland, Earle y Byrne, 1987  
 Adaptada de Arroyo y Mascheroni, 1990

### 2.4.1 Resultados

Para verificar la aplicabilidad de la ec. (2.57) deben compararse los tiempos estimados con tiempos experimentales de congelación.

En éste sentido, es de práctica generalizada relevar todos los datos publicados por distintos autores y en lo posible para distintos productos y contrastarlos con las predicciones del modelo en las condiciones operativas en que fueron obtenidos los valores experimentales.

Este procedimiento es muy útil ya que, no sólo amplia la validez del método a varios alimentos, sino que se lo pone en condiciones de considerar errores experimentales de varias fuentes distintas.

Esto es muy importante debido a que con una única población de datos, se puede caer en el error de que la propuesta funciona bien solamente para esos datos, que pueden contener errores sistemáticos en un mismo sentido.

En la Tabla 2.8 se detallan los resultados obtenidos de la bibliografía.

**Tabla 2.8: Resultados experimentales publicados para congelación de formas regulares, con transferencia de calor en más de una dirección.**

Producto	Forma	Nº datos	Propiedades		Fuente
			$k_0$	$\alpha_0 10^7$	
Carne picada	Bloque	18	0,44	1,302	Ilicali, 1989
Puré de papa		20	0,53	1,45	
Surimi	rectangular	3	0,97	2,74	Matsuda, 1971
Zanahoria	Cilindro largo	3	0,55	1,36	Sheen y Whitney, 1990
Tilosa	Bloque rectangular	72	0,55	1,48	Cleland y Earle, 1979

Los 116 datos experimentales relevados implican productos y/o sistemas modelo cuyos tamaños van desde 1,5 cm hasta 30 cm.

*No se han encontrado datos experimentales para carne sin picar y para productos más grandes. Por ello y a los efectos de generalizar la aplicación del método se efectuaron experiencias de congelación de bloques de carne bovina y de pulpa de frutilla en grandes recipientes.*

#### **2.4.1.1.- Experiencias de congelación de bloques de carne bovina**

##### **2.4.1.1.1.- Descripción de las experiencias**

#### **Congelación de los bloques de carne**

Se utilizó como materia prima para la congelación pecheto magro, el cual era cortado de la forma y el tamaño de los moldes elegidos para su congelación.

Los moldes, rígidos, de aluminio o acrílico con distintos espesores de pared, aseguraban la geometría seleccionada y permitían simular distintas resistencias a la transferencia de calor interfacial.

Se utilizaron moldes con formas de paralelepípedo rectangular y cilindro, de distintas dimensiones. Las tapas de los moldes se construyeron de manera tal que permitían su desplazamiento a los efectos de absorber la expansión volumétrica del producto durante la congelación.

Cuando los paralelepípedos se enfriaban en dos direcciones, la tercera se aislaba con espuma de poliuretano expandido ( $40 \text{ kg/m}^3$ ) de 60 mm de espesor recubierto con polietileno para evitar que se humedezca.

Sobre cada una de las caras de los moldes en contacto con el producto y en el centro térmico de la pieza de carne se colocaban termocuplas de cobre – constantan para medir la temperatura a lo largo del proceso. Las termocuplas se conectaban a un sistema de adquisición de datos multicanal que registraba las temperaturas deseadas a intervalos de tiempo preestablecidos.

Los bloques así montados se sumergían en un baño líquido agitado o se exponían a una corriente de aire frío en cámaras de temperatura controlada.

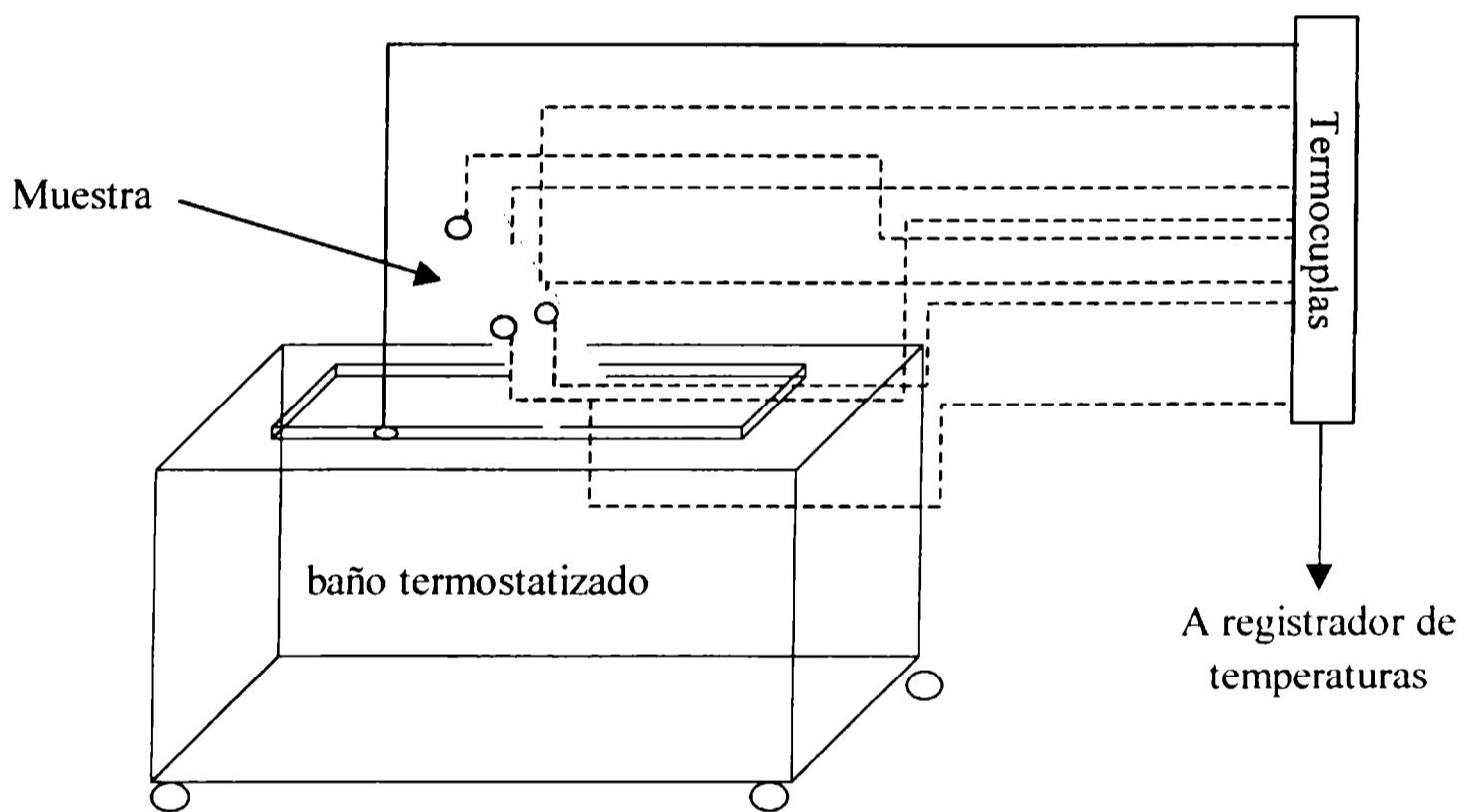
En el último caso el bloque a congelar se montaba sobre un bastidor equipado con forzadores que soplaban una corriente de aire altamente turbulenta sobre cada una de las caras del sistema.

### **Descripción del equipo experimental**

En la Fig. 2.9 se presenta un esquema del equipo experimental utilizado.

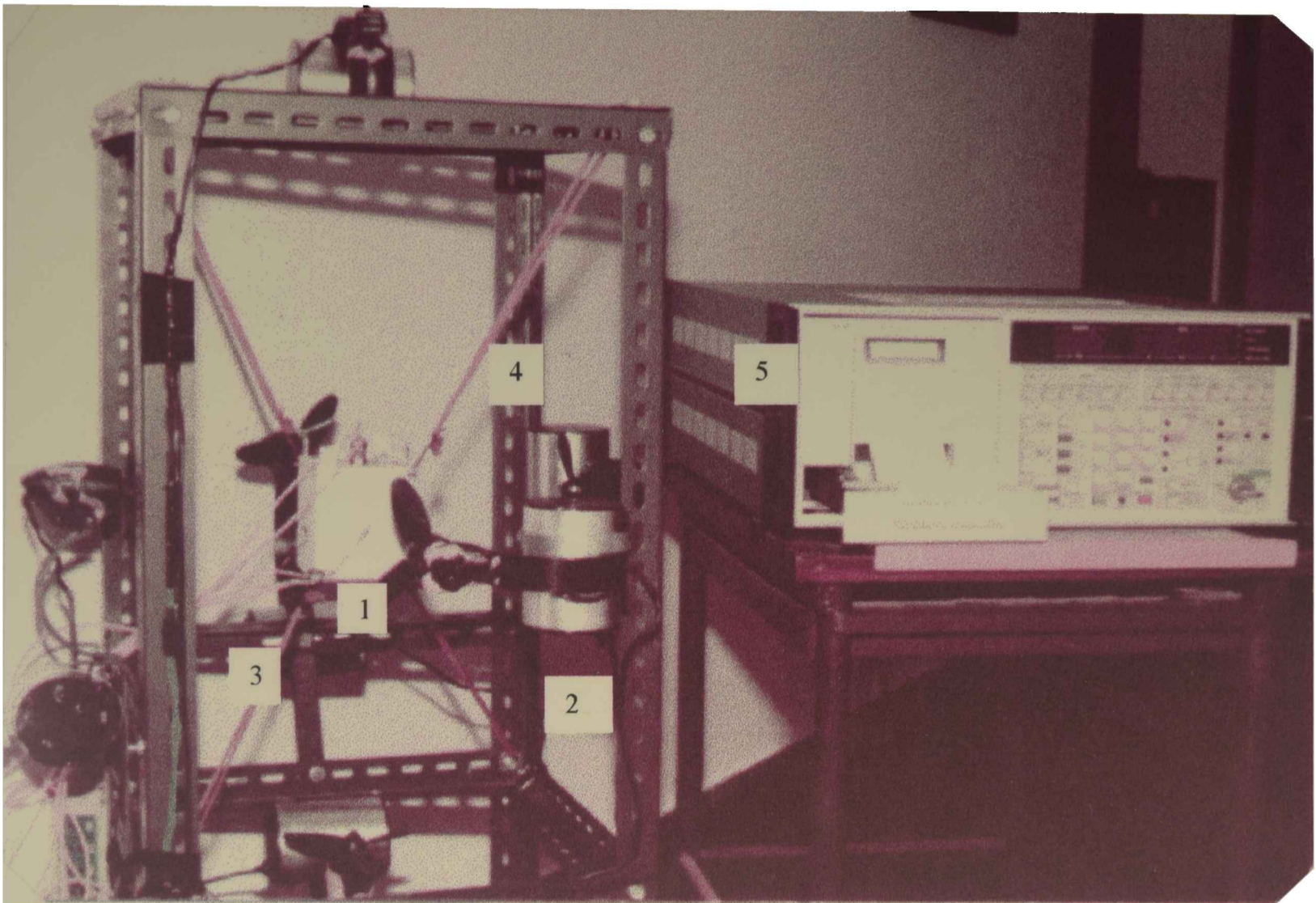
**Fig. 2.9: Esquema del equipo experimental utilizado para la congelación de bloques de carne bovina**

**Fig. 2.9a: Congelación por inmersión en líquidos enfriados**





**Fig. 2.9b: Congelación con aire forzado**



- 1 Muestra
- 2 Forzadores de aire
- 3 Termocuplas
- 4 Estructura de sostén
- 5 Registrador de temperatura

**Obtención de los coeficientes globales de transferencia de calor, congelación bloques de carne**

La determinación de los coeficientes de transferencia de calor se efectuó con el mismo bloque que se utilizaba para medir el tiempo de congelación.

*Luego de congelados, los bloques eran sumergidos en un baño líquido termostatzado hasta alcanzar  $-20$  ó  $-45$  °C en toda la pieza. Luego se enfriaba o calentaba en el mismo medio y en las mismas condiciones en que se obtenía el tiempo de congelación. Durante el calentamiento o el enfriamiento se registraba la temperatura, en función del tiempo, de cada una de las caras y del centro térmico del bloque de carne en el rango de temperaturas entre  $-20$  y  $-45$  °C.*

*Con las temperaturas obtenidas para cada tiempo, mediante el uso de las soluciones analíticas para transferencia de calor por conducción y la regla de Newman se estimaba el coeficiente global de transferencia de calor, procediendo según:*

*De las experiencias se obtenían:  $T_a$ ,  $T_i$ ,  $T_c$  y  $T_s$  para un tiempo determinado  $t$*

*Se calculaba la temperatura adimensional del centro térmico:  $\eta_c = \frac{T_c - T_a}{T_i - T_a}$*

*Se obtenían las propiedades térmicas, para cada dirección (producto anisotrópico), de Mascheroni, 1977, a la temperatura promedio entre el borde y el centro de la pieza de carne*

*Con el tiempo experimental y las longitudes características se calculaban los tiempos adimensionales para cada dirección*

*Se suponía el coeficiente  $h$*

*Se calculaban los números de  $Bi$  para cada dirección*

*De las soluciones analíticas se obtenían las temperaturas adimensionales para cada dirección*

*Mediante la regla de Newman se calculaba la temperatura adimensional estimada del centro térmico:  $\eta_{ce}$*

*Se comparaban  $\eta_c$  y  $\eta_{ce}$ . Si coincidían se adoptaba el  $h$  supuesto. Caso contrario se suponía un nuevo  $h$  y se volvía a comenzar el cálculo*

Con los coeficientes obtenidos para cada tiempo se calculaba el coeficiente de transferencia promedio para cada experiencia.

#### **2.4.1.1.2.- Resultados obtenidos de las experiencias de congelación de bloques de carne bovina**

En la Tabla 2.9 se presentan los resultados experimentales obtenidos para los tiempos de congelación y los coeficientes de transferencia de calor.

En la misma tabla se indican las condiciones operativas para cada experiencia, la forma y las medidas de los bloques utilizados. Cada resultado es promedio de dos determinaciones efectuadas en las mismas condiciones.

**Tabla 2.9: Resultados experimentales obtenidos para la congelación de bloques de carne bovina.**

$D$ (cm)	$\beta_1 D$ (cm)	$\beta_2 D$ (cm)	$h_{exp.}$ (W/m <sup>2</sup> °C)	$T_a$ (°C)	$T_i$ (°C)	$T_c$ (°C)	$t_{f,exp}$ (h)
<b>Paralelepípedo rectangular enfriado en tres direcciones</b>							
7,1	7,1	10,8	9,8	- 14,7	8,7	- 10	9,08
7,1	7,1	10,8	23,7	- 16,0	9,7	- 10	4,33
7,1	7,1	7,1	25,1	- 45,1	19,8	- 10	1,31
7,1	7,1	7,1	27,2	- 41,9	8,0	- 10	1,42
7,1	7,1	7,1	28,0	- 15,7	7,8	- 10	3,53
7,1	7,1	9,9	37,6	- 40,6	9,9	- 10	1,22
7,3	7,3	7,4	65,1	- 16,0	9,0	- 10	2,13
10,0	12,5	14,0	83,7	- 42,0	1,9	- 10	1,48
7,1	10,6	12,1	96,2	- 34,2	10,3	- 10	1,20
6,2	9,0	10,0	98,3	- 25,2	10,1	- 10	1,27
6,2	9,0	10,0	98,3	- 32,7	8,4	- 10	0,92
7,1	7,1	10,0	106,7	- 40,1	17,2	- 10	0,75
7,1	7,1	7,2	108,8	- 40,1	17,0	- 10	0,64
10,3	12,5	13,7	119,2	- 26,0	10,9	- 10	2,21
7,1	7,1	9,0	138,0	- 42,7	18,0	- 10	0,62
7,1	7,1	7,6	140,2	- 39,8	16,5	- 10	0,64
6,2	9,0	9,7	144,3	- 25,8	11,0	- 10	1,09
<b>Paralelepípedo rectangular enfriado en dos direcciones</b>							
7,1	7,1	∞	34,3	- 32,4	6,0	- 18	2,20
7,1	7,1	∞	31,1	- 16,8	3,4	- 18	4,79
7,1	7,1	∞	34,3	- 25,7	12,0	- 18	2,95
<b>Cilindro enfriado en dos direcciones</b>							
6,3	10,1	----	28,9	- 40,7	21,5	- 18	1,17
4,4	6,6	----	39,3	- 40,9	21,7	- 18	0,62
7,6	5,5	----	33,5	- 43,5	5,0	- 18	0,93
7,6	12,5	----	35,3	- 41,7	3,5	- 18	1,32

### 2.4.1.2 Experiencias de congelación de pulpa de frutilla en grandes recipientes

Entre los productos congelados que es posible encontrar en el mercado, las frutas congeladas ocupan un lugar muy importante. Dentro de las frutas congeladas se encuentra toda la línea de pulpas. El mercado de las pulpas congeladas es creciente debido a la necesidad, cada día más importante, de proveer productos sin conservadores químicos, máxime si las frutas son de alto valor relativo como cereza, frutilla, guinda, frambuesa, moras híbridas y otras bayas. Estas pulpas son utilizadas como materia prima en la elaboración de helados, dulces, yogures, mermeladas, jaleas, conservas, postres y otros productos de pastelería, etc.

El proceso de obtención involucra una cocción previa a los efectos de ablandar la fruta y, principalmente, inactivar enzimas, luego se obtiene la pulpa mediante pulpadoras mecánicas, para finalmente envasarla en recipientes relativamente grandes y finalmente congelarla, sin o con agregado previo de sacarosa que ayuda a conservar el color natural de las pulpas.

De las diferentes opciones para envasar las pulpas de frutas, los envases más comúnmente usados son (Hui, 1992):

- ✓ Cajas de cartón corrugado con bolsas de polietileno en su interior, de aproximadamente 15 kg de capacidad
- ✓ Latas esterilizadas de 5 y 15 kg de capacidad
- ✓ Recipientes plásticos de 10 y 20 litros de capacidad (baldes)

- ✓ Tambores metálicos, con bolsa de polietileno en su interior, de 200 litros de capacidad

### 2.4.1.2.1 Obtención de la pulpa de frutilla

Las experiencias se llevaron a cabo en un lapso de 34 días, con fruta de la misma variedad y cosechada en la misma explotación. Se efectuaron cinco distintas cosechas, controlando el grado de madurez mediante la medición de los sólidos solubles refractométricos (SSR), con un refractómetro manual, sobre una muestra de 3 kg. El punto de cosecha se estableció entre 7 y 8 °Brix, ya que la fruta con ese contenido de SSR presentaba muy buen aspecto, buen sabor y buen color. Si era necesario algún tiempo de espera entre la cosecha y el pulpado, la fruta se mantenía a granel en una cámara con aire enfriado a 0 °C y 85 – 90 % de humedad relativa.

Luego de cosechada y lavada, la frutilla de la variedad Selva, era despalillada manualmente y nuevamente lavada con agua potable. A continuación se la cocinaba en una paila de acero inoxidable, a presión ambiente, de doble camisa calefaccionada con vapor, de 500 litros de capacidad.

A continuación se la volcaba, en caliente, a una pulpadora horizontal de superficie rascada, con tamiz de acero inoxidable perforado con agujeros redondos de 3 mm de diámetro. La pulpa se enfriaba hasta la temperatura ambiente, y se envasaba en los envases seleccionados para la congelación, prestando especial atención para evitar la formación de bolsas de aire.

**2.4.1.2.2 Recipientes utilizados para la congelación**

Las experiencias se llevaron a cabo con cuatro distintos recipientes, sometidos a transferencia unidireccional (placa plana), bidireccional (prisma rectangular y cilindros) y tridireccional (prisma rectangular).

En la Tabla 2.10 se presentan las características de los envases y las condiciones de congelación a que fueron sometidos.

**Tabla 2.10: Características de los envases y condiciones de congelación a los que fueron sometidos**

Envase	$D_1$ (m)	$D_2$ (m)	$D_3$ (m)	$D$ (m)	$H_{cil}$ (m)	Capacidad (Kg)	Experiencia
<b>Dimensiones de los envases</b>							
Bandeja metálica	0,145	0,500	0,520			38	P1,2,3
Balde de 10 l				0,200	0,285	8	C1,2
Balde de 20 l				0,270	0,385	18	C3,4
Tambor de 200 l				0,570	0,850	196	C5,6
<b>Condiciones de congelación</b>							
<b>Bandeja metálica</b>							
Unidireccional	0,145	$\infty$	$\infty$				P1
Bidireccional	0,145	0,500	$\infty$				P2
Tridireccional	0,145	0,500	0,520				P3
<b>Balde de 10 l</b>							
Unidireccional				0,200	$\infty$		C1
Bidireccional				0,200	0,285		C2
<b>Balde de 20 l</b>							
Unidireccional				0,270	$\infty$		C3
Bidireccional				0,270	0,385		C4
<b>Tambor de 200 l</b>							
Unidireccional				0,570	$\infty$		C5
Bidireccional				0,570	0,850		C6

Las condiciones de congelación uni o bidireccionales se obtenían aislando con 20 cm de poliestireno expandido, de  $30 \text{ kg/m}^3$ , en la dirección correspondiente (en la Tabla 2.10 se ha designado como  $\infty$ ).

### 2.4.1.2.3 Descripción de las experiencias de congelación de la pulpa de frutilla

Todas las experiencias se llevaron a cabo en un túnel, montado dentro de una cámara frigorífica, de  $6,50 \times 2,50 \times 3,05 \text{ m}$ .

Los envases a congelar se dispusieron sobre una base metálica, de modo que se enfrentaba a los paquetes con el flujo de aire principal del evaporador aletado que impulsaba el aire enfriado. Cuando se usaban bandejas se colocaban a 2,65 m de altura medidos desde el piso del túnel; los baldes a 2,37 m y los tambores a 1,95 m (Ver Fig. 2.10).

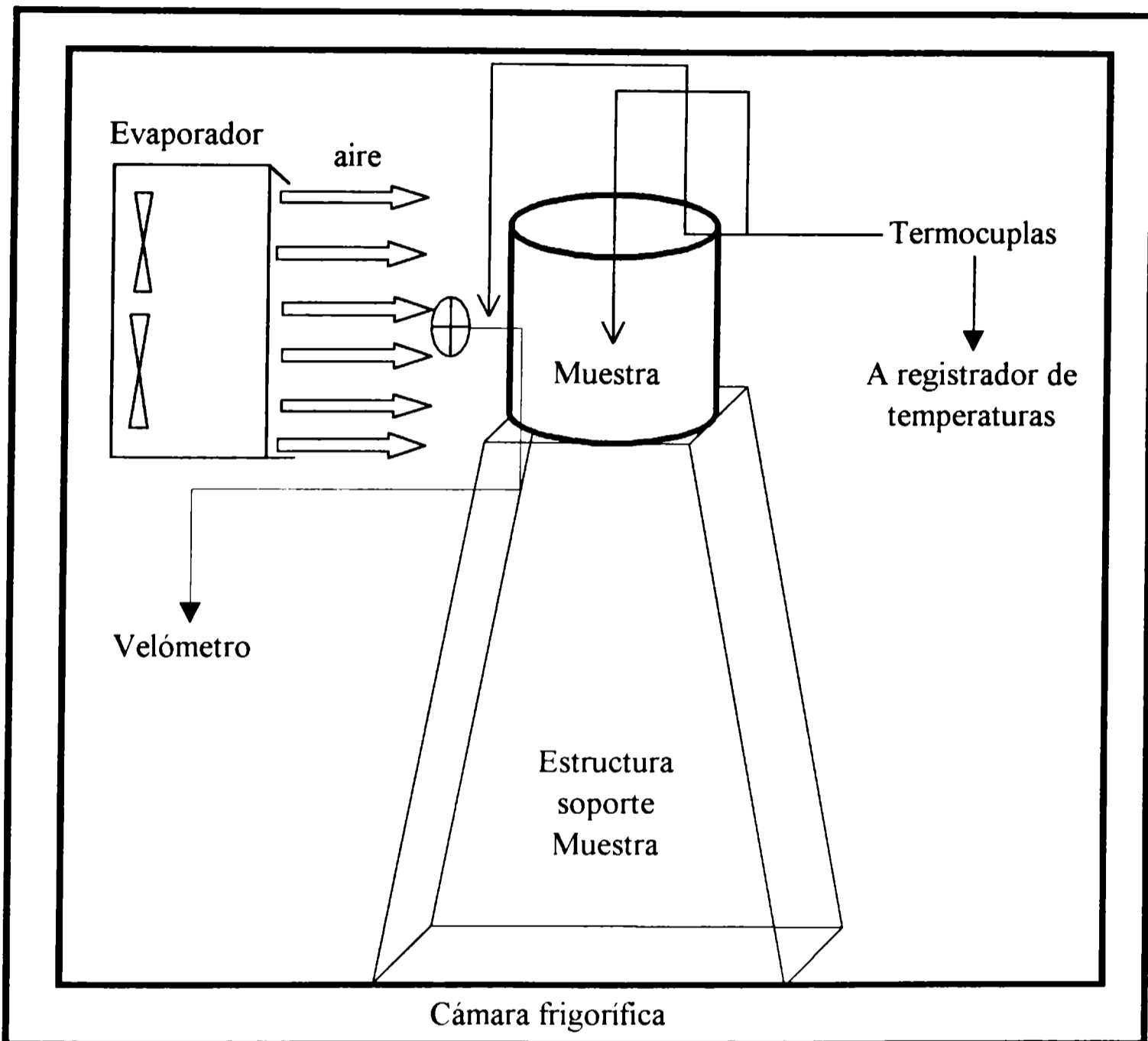
#### Descripción del equipo experimental:

En la Fig. 2.10 se presenta un esquema del equipo experimental utilizado.

La temperatura de las muestras se medía utilizando un termómetro electrónico, digital, con punta metálica la cual se colocaba en el centro de la muestra mediante insertos de madera dura de 0,5 y 1 cm de espesor. La temperatura del aire alcanzaba los  $-35 \text{ }^\circ\text{C}$  y su velocidad en el entorno del paquete era de  $2 \text{ m/s}$  (medida con un anemómetro meteorológico SIAP 264), con esta velocidad del aire de enfriamiento se estimaron los coeficientes de transferencia de calor  $h$ .



Fig. 2.10: Esquema del equipo experimental utilizado para la congelación de pulpa de frutilla en grandes recipientes.



#### 2.4.1.2.4 Estimación de los coeficientes de transferencia de calor $h$ , para la congelación de la pulpa de frutilla

El  $h$  se estimó según:

$$h = \frac{1}{1/ha + 1/hm} \quad (2.58)$$

$h_a$  es la contribución del fluido refrigerante y  $h_m$  la contribución del envase.

$$\text{Para la obtención de } h_a \text{ se utilizó: } h_a = Nu ka / L \quad (2.59)$$

Donde  $Nu$  es el número de Nusselt,  $ka$  la conductividad térmica del aire y  $L$  la longitud característica.

Para placa plana y paquetes rectangulares el  $Nu$  se obtuvo de (Welty, 1974):

$$Nu = 0,664 Pr^{0,33} Re^{0,5} \quad \text{para } Re < 10^5 \quad (2.60)$$

$$Nu = 0,037 Pr^{0,33} Re^{0,8} \quad \text{para } Re > 10^5 \quad (2.61)$$

Para cilindros (Welty, 1974):

$$Nu = 0,193 Pr^{0,33} Re^{0,618} \quad \text{para } Re < 4 \times 10^4 \quad (2.62)$$

$$Nu = 0,027 Pr^{0,33} Re^{0,805} \quad \text{para } Re > 4 \times 10^4 \quad (2.63)$$

La contribución de los materiales de empaque,  $h_a$ , se obtuvo de Reynoso y col., 1987.

Los valores de  $h$  resultantes se presentan en la Tabla 2.11.

**Tabla 2.11: Coeficientes de transferencia de calor ( $W / m^2 \text{ } ^\circ C$ ) obtenidos con las ecuaciones (2.60) a (2.63), y de Reynoso y col., 1987. Para las experiencias de congelación de pulpa de frutilla en grandes recipientes**

<b>Envase</b>	<b><i>hm</i></b>	<b><i>ha</i></b>	<b><i>h</i></b>
Bandeja metálica	69,7	7,5	7,2
Balde de 10 l	69,7	12,2	9,5
Balde de 20 l	42,4	11,2	8,8
Tambor de 200 l	69,7	9,6	7,8

#### **2.4.1.2.5 Condiciones operativas y tiempos de congelación experimentales para la congelación de pulpa de frutilla**

En la Figura 2.11 se muestran las curvas de congelación experimentales para cada condición de congelación.

En todos los casos se ha representado la temperatura del centro térmico en función del tiempo, tomando como tiempo de congelación aquel que corresponde a una  $T_c$  de  $-18 \text{ } ^\circ C$ .

Fig. 2.11: Curvas de congelación de pulpa de frutilla en grandes recipientes, para los recipientes definidos en la Tabla 2.10

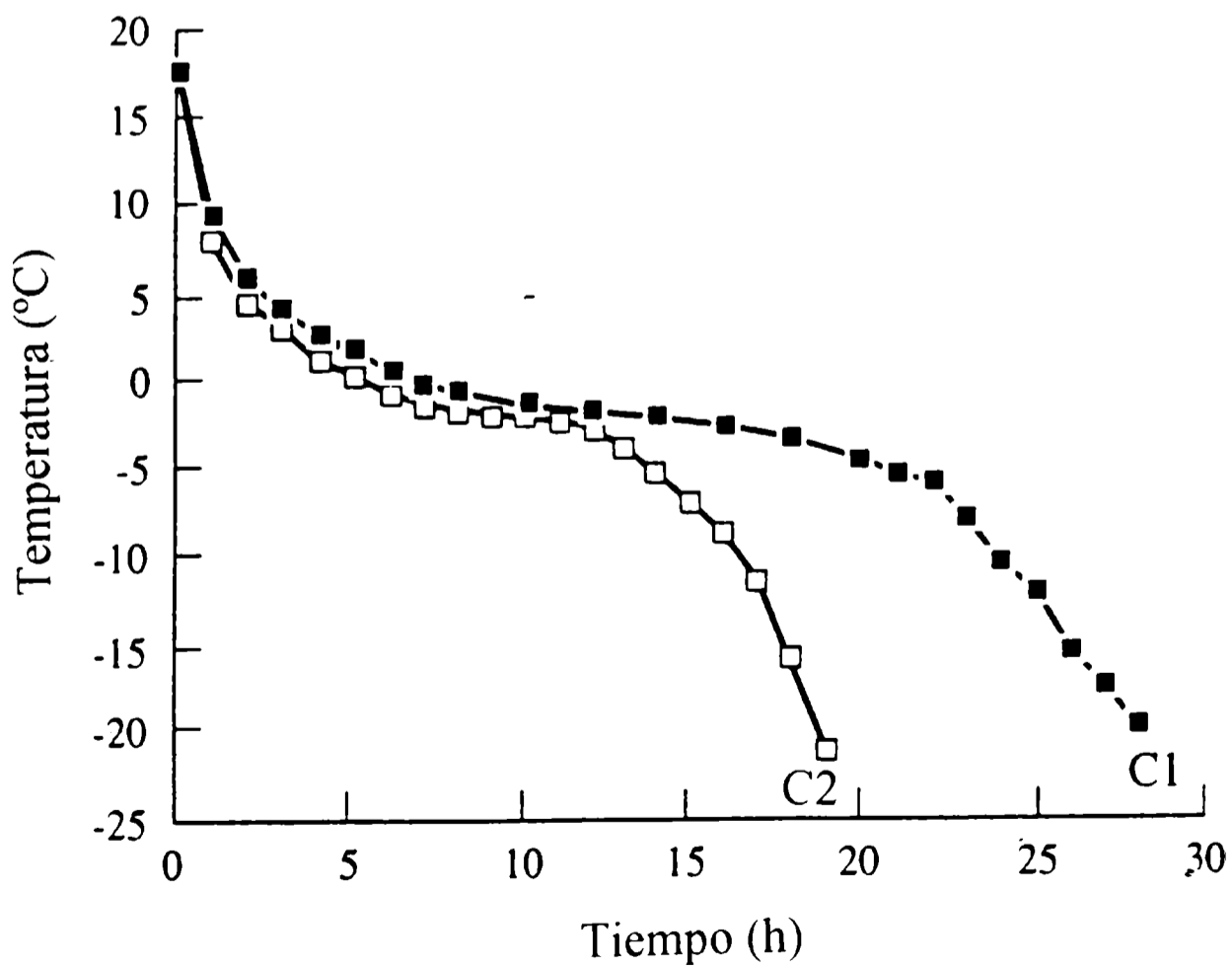
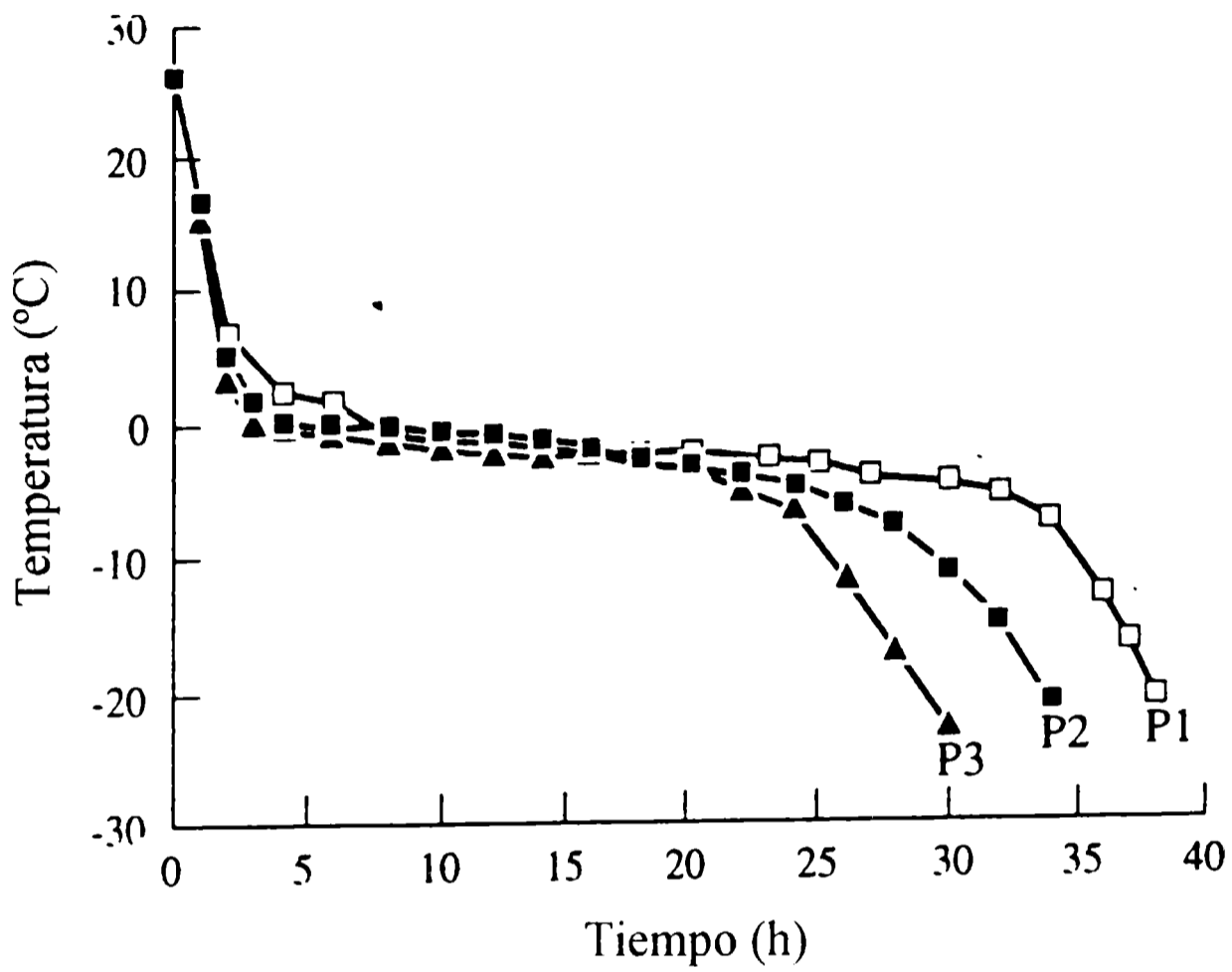
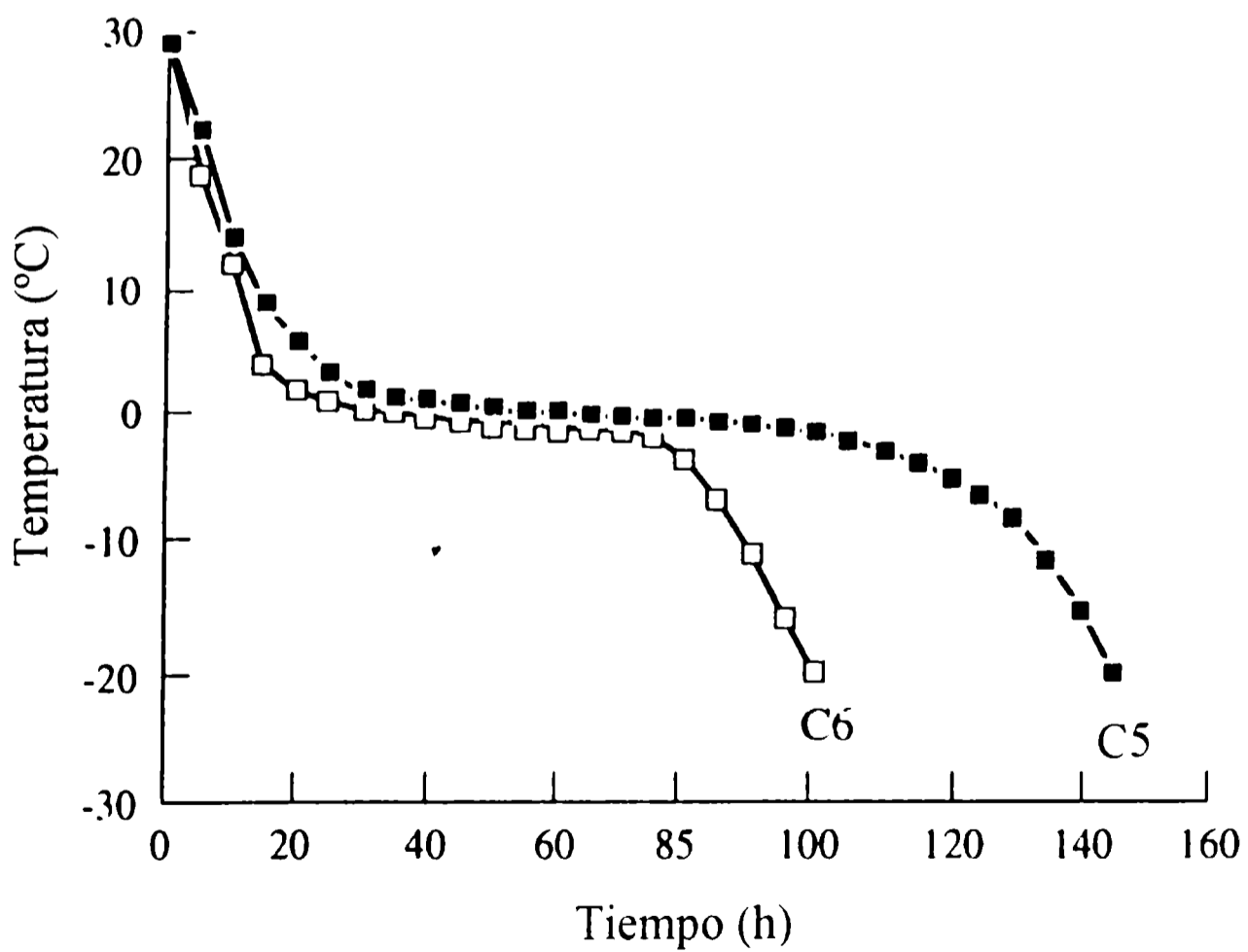
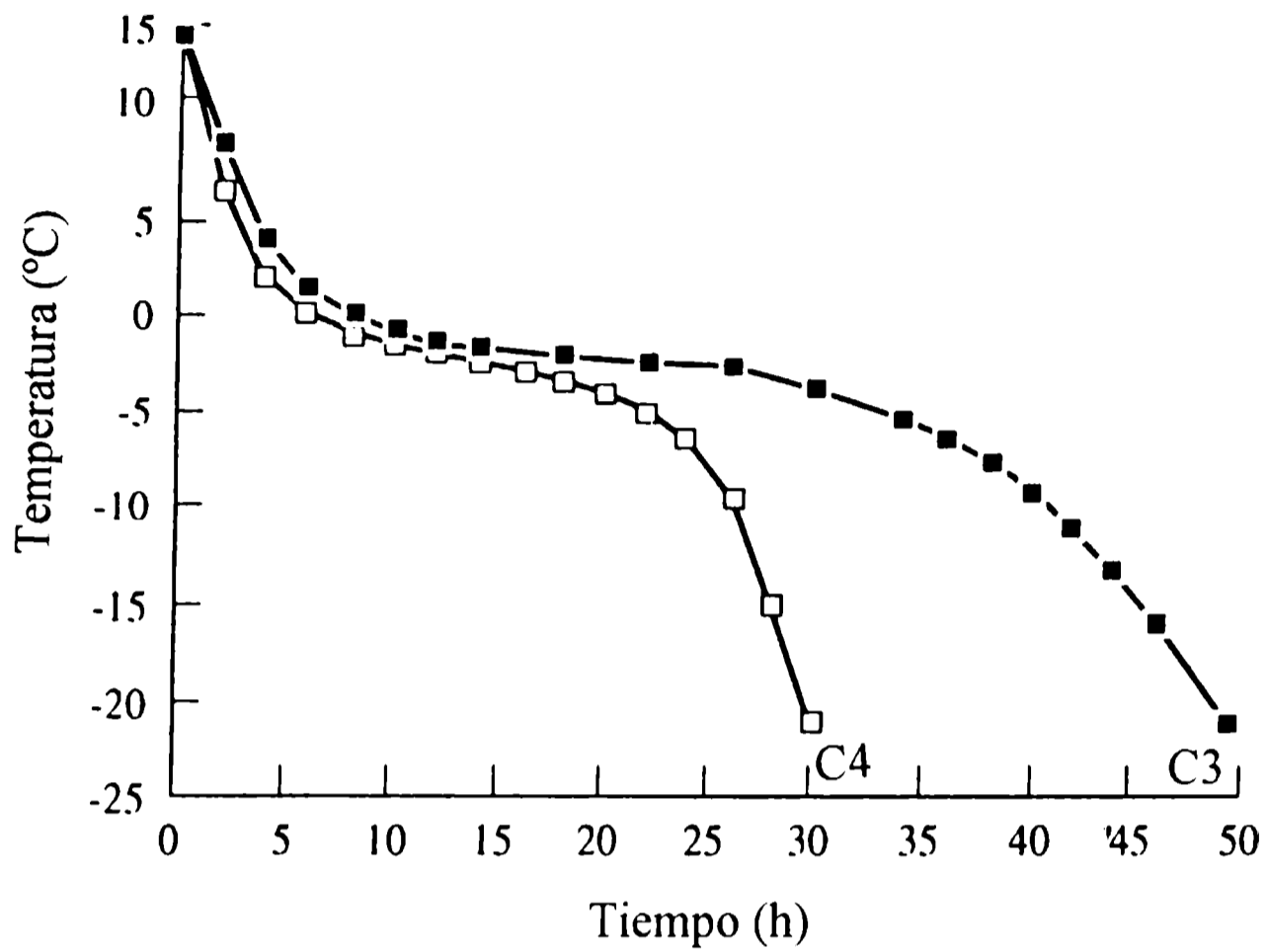


Fig. 2.11: Continuación



Como se puede observar en la Fig. 2.11, todas las curvas presentan la misma forma, con tiempos de proceso relativamente largos, que varían entre las 19 horas (C1) hasta las 142 horas (C5) debido al tamaño de los envases usados y a las condiciones de congelación ( $h$ ).

En la Tabla 2.12 se presentan las condiciones de trabajo y los tiempos de congelación experimentales para cada envase y en cada condición.

**Tabla 2.12: Condiciones de trabajo y tiempos de congelación experimentales obtenidos durante la congelación de pulpa de frutilla en grandes recipientes**

<b>Experiencia</b>	<b><math>L</math> (m)</b>	<b><math>T_i</math> (°C)</b>	<b><math>T_c</math> (°C)</b>	<b><math>T_a</math> (°C)</b>	<b><math>Bi</math></b>	<b><math>t_{f,exp}</math> (h)</b>
P1	0,0725	26,3	- 18	- 35	0,92	37,72
P2	0,0725	26,3	- 18	- 35	0,92	33,10
P3	0,0725	26,3	- 18	- 35	0,92	28,30
C1	0,100	17,6	- 18	- 35	1,76	27,34
C2	0,100	17,6	- 18	- 35	1,76	18,40
C3	0,135	14,7	- 18	- 35	2,20	47,54
C4	0,135	14,7	- 18	- 35	2,20	28,85
C5	0,285	29,4	- 18	- 35	4,12	143,60
C6	0,285	29,4	- 18	- 35	4,12	97,65

#### **2.4.1.2.6 Propiedades de la pulpa de frutilla**

Las propiedades físicas que se utilicen en la comprobación de los métodos de calculo inciden directamente sobre la precisión de los mismos. En este trabajo, no se determinaron experimentalmente las propiedades de la pulpa de frutilla utilizada, sino

que se efectuó un estudio de las propiedades publicadas y su incidencia en los resultados de la estimación de tiempos de congelación que se describe a continuación:

**Predicción de las propiedades físicas de la pulpa de frutilla**

**Contenido de hielo,  $w$ , (Miles y col., 1990):**

$$\text{Para } -T < T_{ce} \quad w = 1 - \frac{T_{ce}}{T} \quad (2.64)$$

**densidad,  $\rho$ , (Miles y col., 1990):**

$$-T \geq T_{ce} \quad \frac{1}{\rho} = \frac{Y}{\rho_w} + \frac{1-Y}{\rho_s} \quad \rho = \rho_0 = 1040 \text{ kg/m}^3 \quad (2.65)$$

$$-T < T_{ce} \quad \frac{1}{\rho} = \frac{Y(1-w)}{\rho_w} + \frac{Y w}{\rho_i} + \frac{1-Y}{\rho_s} \quad (2.66)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_0} + Y \left(1 - \frac{T_{ce}}{T}\right) \left(\frac{1}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_w}\right)$$

**Calor específico,  $C_p$**

**Ecuaciones específicas para pulpa de frutilla (Delgado y Col., 1990):**

$$-T \geq T_{ce} \quad C_p = 3640 + 2,9 T \quad (2.67)$$

$$-T < T_{ce} \quad C_p = 2250 + \frac{235150}{T^2} \quad (2.68)$$

### Ecuaciones generales

Mellor, 1978, en función de los contenidos de agua líquida, hielo y sólidos:

$$-T \geq T_{ce} \quad C_p = C_{p_0} = C_{p_s}(1-Y) + C_{p_w} Y = 3930 \quad (2.69)$$

$$-T < T_{ce} \quad C_p = C_{p_s}(1-Y) + Y C_{p_i} \left(1 - \frac{T_{ce}}{T}\right) + C_{p_w} Y \frac{T_{ce}}{T} - \lambda_f Y \frac{T_{ce}}{T^2} \quad (2.70)$$

Choi y Okos, 1986, consideraron componentes al agua y al resto como carbohidratos:

$$\begin{aligned} -T \geq T_{ce} \quad C_p &= C_{p_c}(1-Y) + C_{p_w} Y \\ C_{p_w} &= 4,1762 - 9,0864 \times 10^{-5} T + 5,4731 \times 10^{-6} T^2 \\ C_{p_c} &= 1,5488 + 1,9625 \times 10^{-3} T - 5,9399 \times 10^{-6} T^2 \end{aligned} \quad (2.71)$$

$$\begin{aligned} -T < T_{ce} \quad C_p &= C_{p_c}(1-Y) + Y w C_{p_i} + Y(1-w)C_{p_w} + Y \lambda_f \frac{T_{ce}}{T^2} \\ C_{p_i} &= 2,0623 + 6,0769 \times 10^{-3} T \\ C_{p_c} &= 4,0817 - 5,0362 \times 10^{-3} T + 9,9516 \times 10^{-4} T^2 \end{aligned} \quad (2.72)$$

### Conductividad térmica, $k$

Ecuación específica correlacionada de datos experimentales (Succar y Hayakawa, 1983):

$$-T \geq T_{ce} \quad k = k_0 = 0,54 \quad (2.73)$$

$$-T < T_{ce} \quad k = 1,93686 - 0,0146 T + \frac{1,269}{T} \quad (2.74)$$



**Correlación general asumiendo dos componentes: agua y carbohidratos (Choi y Okos, 1986):**

$$\begin{aligned}
 -T \geq T_{ce} \quad k &= Y k_w + (1-Y) k_c \\
 k_w &= 0,5711 + 1,7625 \times 10^{-3} T - 6,7076 \times 10^{-6} T^2 \\
 k_c &= 0,2014 + 1,3874 \times 10^{-3} T - 4,3312 \times 10^{-6} T^2 \quad (2.75)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 -T < T_{ce} \quad k &= (1-Y)k_c + Y(1-w)k_w + Y w k_i \\
 k_w &= 0,5711 + 1,7625 \times 10^{-3} T - 6,7076 \times 10^{-6} T^2 \\
 k_c &= 0,2014 + 1,3874 \times 10^{-3} T - 4,3312 \times 10^{-6} T^2 \\
 k_i &= 2,2196 - 6,2489 \times 10^{-3} T + 1,0154 \times 10^{-4} T^2 \quad (2.76)
 \end{aligned}$$

Para evaluar la influencia de las distintas formas de estimar las propiedades (ecuaciones (2.64) a (2.76)) sobre los tiempos de congelación se utilizó un método numérico en diferencias finitas para la muestra P1 (ver Tabla 2.10). Se evaluaron las posibles combinaciones entre  $T_{ce}$  (- 0,9 y - 1,05 °C), dos valores para el contenido de agua ( $Y = 0,89$  e  $Y = 0,93$ ) y las ecuaciones presentadas para el calor específico y la conductividad térmica.

Al mismo tiempo se usaron datos específicos para pulpa de frutilla obtenidos de Delgado y col., 1990 y Succar y Hayakawa, 1983. Los resultados se presentan en la Tabla 2.13.

**Tabla 2.13: Valores de tiempos de congelación obtenidos mediante un método numérico, para la muestra P1, y distintas formas de evaluar las propiedades**

Propiedades	$Y$	$T_{ce}$ (°C)	$t_{f,num}$ (h)
$C_p$ : ecs. (2.69) y (2.70) $k$ : ecs. (2.73) y (2.74)	0,89	- 0,9	43,47
	0,89	- 1,05	43,39
	0,93	- 0,9	44,62
	0,93	- 1,05	44,55
$C_p$ : ecs. (2.69) y (2.70) $k$ : ecs. (2.75) y (2.76)	0,89	- 0,9	43,51
	0,89	- 1,05	43,58
	0,93	- 0,9	44,45
	0,93	- 1,05	44,55
$C_p$ : ecs. (2.71) y (2.72) $k$ : ecs. (2.73) y (2.74)	0,89	- 0,9	43,19
	0,89	- 1,05	42,51
	0,93	- 0,9	44,89
	0,93	- 1,05	44,75
$C_p$ : ecs. (2.71) y (2.72) $k$ : ecs. (2.75) y (2.76)	0,89	- 0,9	42,23
	0,89	- 1,05	43,30
	0,93	- 0,9	44,71
	0,93	- 1,05	44,72
$C_p$ : ecs. (2.67) y (2.68) $k$ : ecs. (2.73) y (2.74)	0,8975	- 0,82	41,78
$C_p$ : ecs. (2.67) y (2.68) $k$ : ecs. (2.75) y (2.76)	0,8975	- 0,82	41,70

De los resultados mostrados en la Tabla 2.13 se puede observar que utilizando diversos modelos y propiedades específicas para pulpa de frutilla, la diferencia entre el menor y el mayor de los tiempos de congelación no excede el 7 %. Esta diferencia es aún menor, aproximadamente 3 %, cuando se comparan valores obtenidos para los mismos  $Y$  y  $T_{ce}$ . Esto verifica que todas las propuestas funcionan razonablemente del mismo modo, por ello se eligió, para la estimación de tiempos de congelación con el método desarrollado, la información más específica del sistema en estudio: las propiedades de las ecuaciones (2.67) y (2.68); (2.73) y (2.74), y los valores

específicos que propusieron Delgado y col., 1990, Succar y Hayakawa, 1983 y Miles y col., 1990. Los correspondientes valores se presentan en la Tabla 2.14.

**Tabla 2.14: Propiedades de la pulpa de frutilla que se utilizaron para el cálculo de  $t_f$  con la ec. (2.57)**

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>	<b>Fuente</b>
Densidad fresco, $\rho_0$	1040 kg/m <sup>3</sup>	Miles y col., 1990
Densidad congelado, $\rho_c$	961 kg/m <sup>3</sup>	
Conductividad térmica fresco, $k_0$	0,54 W/m °C	Succar y Hayakawa, 1983
Conductividad térmica congelado, $k_c$	2,34 W/m °C	
Calor específico fresco, $Cp_0$	3780 J/kg °C	Delgado y col., 1990
Calor específico congelado, $Cp_c$	2280 J/kg °C	
Difusividad térmica fresco, $\alpha_0$	1,374 x 10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s	
Contenido inicial de agua, $Y_0$	89,75 % b.h.	
Temp. de inicio cambio de fase, $T_{ce}$	- 0,82 °C	
Calor latente de cong. efectivo, $\lambda_{f, efec}$	2,81 x 10 <sup>8</sup> J/m <sup>3</sup>	

#### **2.4.2.- Comparación de las predicciones de la ec. (2.57) con los resultados experimentales**

En la Tablas 2.15 a 2.23 se presentan los valores de tiempos de congelación experimentales de diversos autores y los obtenidos en este trabajo en función de las condiciones operativas. Asimismo, en ellas se presentan los resultados predichos por la ec. (2.57) y el correspondiente error porcentual.

**Tabla 2.15: Tiempos de congelación experimentales (este trabajo), y calculados con la ec. (2.57). Cilindros de carne vacuna**

$D$ (cm)	$H$ (cm)	$Bi_0$	$T_a$ (°C)	$T_i$ (°C)	$T_c$ (°C)	$t_{f,exp}$ (h)	$t_{f,pre}$ (h)	$e$ (%)
6,3	10,1	1,9	- 40,7	21,5	- 18	1,17	1,41	20,5
4,4	6,6	1,8	- 40,9	21,7	- 18	0,62	0,70	12,9
7,6	5,5	5,3	- 43,5	5,0	- 18	0,93	0,87	- 6,4
7,6	12,5	2,79	- 41,7	3,5	- 18	1,32	1,52	15,1

**Tabla 2.16: Tiempos de congelación experimentales (Sheen y Whitney, 1990), y calculados con la ec. (2.57). Cilindros de zanahoria**

$D$ (cm)	$H$ (cm)	$Bi_0$	$T_a$ (°C)	$T_i$ (°C)	$T_c$ (°C)	$t_{f,exp}$ (h)	$t_{f,pre}$ (h)	$e$ (%)
2,8	6,0	0,29	- 28,0	26,5	- 20	2,07	2,48	19,5
2,8	6,0	0,98	- 28,0	26,5	- 20	0,94	0,84	- 11,4
2,8	6,0	2,53	- 28,0	26,5	- 20	0,53	0,40	- 24,9

**Tabla 2.17: Tiempos de congelación experimentales (este trabajo) y calculados con la ec. (2.57). Barra rectangular infinita de carne vacuna**

$D$ (cm)	$\beta_1 D$ (cm)	$Bi_0$	$T_a$ (°C)	$T_i$ (°C)	$T_c$ (°C)	$t_{f,exp}$ (h)	$t_{f,pre}$ (h)	$e$ (%)
7,1	7,1	2,54	- 32,4	6,0	- 18	2,20	2,06	- 6,5
7,1	7,1	2,30	- 16,8	3,4	- 18	4,79	4,40	- 8,2
7,1	7,1	2,54	- 25,7	12,0	- 18	2,95	2,82	- 4,3

**Tabla 2.18: Tiempos de congelación experimentales (este trabajo) y calculados con la ec. (2.57). Bloque rectangular de carne vacuna**

$D$ (cm)	$\beta_1 D$ (cm)	$\beta_2 D$ (cm)	$Bi_0$	$T_a$ (°C)	$T_i$ (°C)	$T_c$ (°C)	$t_{f,exp}$ (h)	$t_{f,pre}$ (h)	$e$ (%)
7,1	7,1	10,8	0,725	- 14,7	8,7	- 10	9,08	10,39	14,4
7,1	7,1	10,8	1,753	- 16,0	9,7	- 10	4,33	4,71	8,7
7,1	7,1	7,1	1,856	- 45,1	19,8	- 10	1,31	1,30	- 1,1
7,1	7,1	7,1	2,081	- 41,9	8,0	- 10	1,42	1,23	- 13,5
7,1	7,1	7,1	2,071	- 15,7	7,8	- 10	3,53	3,60	1,8
7,1	7,1	9,9	2,781	- 40,6	9,9	- 10	1,22	1,20	- 2
7,3	7,3	7,4	4,950	- 16,0	9,0	- 10	2,13	2,35	10,5
10,0	12,5	14,0	8,714	- 42,0	1,9	- 10	1,48	1,45	- 1,9
7,1	10,6	12,1	7,115	- 34,2	10,3	- 10	1,20	1,34	11,3
6,2	9,0	10,0	6,349	- 25,2	10,1	- 10	1,27	1,45	13,9
6,2	9,0	10,0	6,349	- 32,7	8,4	- 10	0,92	1,07	15,9
7,1	7,1	10,0	7,891	- 40,1	17,2	- 10	0,75	0,77	2,5
7,1	7,1	7,2	8,0467	- 40,1	17,0	- 10	0,64	0,70	9,8
10,3	12,5	13,7	12,781	- 26,0	10,9	- 10	2,21	2,60	17,5
7,1	7,1	9,0	10,206	- 42,7	18,0	- 10	0,62	0,65	4,7
7,1	7,1	7,6	10,369	- 39,8	16,5	- 10	0,64	0,67	3,9
6,2	9,0	9,7	9,319	- 25,8	11,0	- 10	1,09	1,24	13,7

**Tabla 2.19: Tiempos de congelación experimentales (Ilicali, 1989) y calculados con la ec. (2.57). Bloque rectangular de carne picada**

$D$ (cm)	$\beta_1 D$ (cm)	$\beta_2 D$ (cm)	$Bi_0$	$T_a$ (°C)	$T_i$ (°C)	$T_c$ (°C)	$t_{f,exp}$ (h)	$t_{f,pre}$ (h)	$e$ (%)
2,0	4,0	15,0	1,44	- 23,6	24,2	- 10	0,53	0,55	3,9
2,0	4,0	15,0	1,44	- 23,6	24,2	- 18	0,62	0,62	0,4
2,0	4,0	15,0	1,44	- 29,0	23,8	-10	0,48	0,44	- 8,9
2,0	4,0	15,0	1,44	- 29,0	23,8	- 18	0,52	0,49	- 5,0
2,0	4,0	15,0	1,44	- 34,7	24,6	- 10	0,41	0,36	- 12,2
2,0	4,0	15,0	1,44	- 34,7	24,6	- 18	0,45	0,41	- 9,7
2,0	4,0	15,0	1,59	- 24,3	23,0	- 10	0,47	0,49	4,4
2,0	4,0	15,0	1,59	- 24,3	23,0	- 18	0,52	0,55	6,6
2,0	4,0	15,0	1,59	- 27,7	23,2	-10	0,44	0,42	- 3,5
2,0	4,0	15,0	1,59	- 27,7	23,2	- 18	0,48	0,48	- 0,1
2,0	4,0	15,0	1,59	- 34,5	25,0	- 10	0,34	0,34	- 1,4
2,0	4,0	15,0	1,59	- 34,5	25,0	- 18	0,37	0,38	2,4
2,0	4,0	15,0	1,70	- 23,6	22,0	- 10	0,43	0,48	11,7
2,0	4,0	15,0	1,70	- 23,6	22,0	- 18	0,52	0,54	4,4
2,0	4,0	15,0	1,70	- 27,0	26,6	-10	0,41	0,42	2,6
2,0	4,0	15,0	1,70	- 27,0	26,6	- 18	0,48	0,48	- 0,9
2,0	4,0	15,0	1,70	- 33,1	24,2	- 10	0,34	0,33	- 2,1
2,0	4,0	15,0	1,70	- 33,1	24,2	- 18	0,39	0,38	- 3,4

**Tabla 2.20: Tiempos de congelación experimentales (Ilicali, 1989) y calculados con la ec. (2.57). Bloque rectangular de puré de papa**

$D$ (cm)	$\beta_1 D$ (cm)	$\beta_2 D$ (cm)	$Bi_0$	$T_a$ (°C)	$T_i$ (°C)	$T_c$ (°C)	$t_{f,exp}$ (h)	$t_{f,pre}$ (h)	$e$ (%)
2,0	4,0	15,0	1,19	- 24,5	26,0	- 10	0,60	0,55	- 7,8
2,0	4,0	15,0	1,19	- 24,5	26,0	- 18	0,67	0,63	- 6,6
2,0	4,0	15,0	1,19	- 28,4	23,4	-10	0,52	0,47	- 10,6
2,0	4,0	15,0	1,19	- 28,4	23,4	- 18	0,56	0,53	- 6,1
2,0	4,0	15,0	1,19	- 33,4	26,6	- 10	0,47	0,39	- 16,3
2,0	4,0	15,0	1,19	- 33,4	26,6	- 18	0,50	0,44	- 11,1
2,0	4,0	15,0	1,32	- 24,7	26,6	- 10	0,50	0,51	1,4
2,0	4,0	15,0	1,32	- 24,7	26,6	- 18	0,56	0,57	2,3
2,0	4,0	15,0	1,32	- 28,5	23,6	-10	0,40	0,43	6,9
2,0	4,0	15,0	1,32	- 28,5	23,6	- 18	0,44	0,48	9,8
2,0	4,0	15,0	1,32	- 34,7	27,2	- 10	0,40	0,35	- 12,9
2,0	4,0	15,0	1,32	- 34,7	27,2	- 18	0,43	0,39	- 8,4
2,0	4,0	15,0	1,41	- 24,1	27,2	- 10	0,51	0,50	- 2,8
2,0	4,0	15,0	1,41	- 24,1	27,2	- 18	0,57	0,56	- 1,7
2,0	4,0	15,0	1,41	- 28,3	23,2	-10	0,38	0,41	7,5
2,0	4,0	15,0	1,41	- 28,3	23,2	- 18	0,45	0,46	2,6
2,0	4,0	15,0	1,41	- 28,6	18,8	- 10	0,37	0,40	7,0
2,0	4,0	15,0	1,41	- 28,6	18,8	- 18	0,42	0,45	6,6
2,0	4,0	15,0	1,41	- 32,6	27,2	- 10	0,36	0,35	- 1,5
2,0	4,0	15,0	1,41	- 32,6	27,2	- 18	0,40	0,40	0,2

**Tabla 2.21: Tiempos de congelación experimentales (Matsuda, 1971) y calculados con la ec. (2.57). Bloque rectangular de surimi**

$D$ (cm)	$\beta_1 D$ (cm)	$\beta_2 D$ (cm)	$Bi_0$	$T_a$ (°C)	$T_i$ (°C)	$T_c$ (°C)	$t_{f,exp}$ (h)	$t_{f,pre}$ (h)	$e$ (%)
3,0	3,0	3,0	0,93	- 28,1	10,0	- 18	0,42	0,38	- 9,6
3,0	3,0	3,0	0,29	- 25,9	7,0	- 18	1,00	1,15	15
3,0	3,0	3,0	0,08	- 28,5	9,4	- 18	3,00	3,28	9,3

Tabla 2.22: Tiempos de congelación experimentales (Cleland y Earle, 1979b) y calculados con la ec. (2.57). Bloque rectangular de tilosa

$D$ (cm)	$\beta_1 D$ (cm)	$\beta_2 D$ (cm)	$Bi_0$	$T_a$ (°C)	$T_i$ (°C)	$T_c$ (°C)	$t_{f,exp}$ (h)	$t_{f,pre}$ (h)	$e$ (%)
6,5	6,5	11,5	6,04	- 20,5	28,4	- 10,0	1,34	1,37	2,34
6,5	6,5	11,5	6,04	- 19,7	4,3	- 10,0	1,20	1,22	1,39
6,5	6,5	11,5	6,04	- 30,0	28,3	- 10,0	0,92	0,90	- 2,5
6,5	6,5	11,5	6,04	- 29,8	4,3	- 10,0	0,80	0,77	- 4,2
6,5	6,5	11,5	1,69	- 40,3	18,0	- 10,0	1,28	1,32	3,4
6,5	6,5	11,5	1,69	- 25,0	15,3	- 10,0	2,02	2,21	9,4
9,9	13,9	19,8	96,2	- 20,2	29,0	- 10,0	3,90	4,09	4,8
9,9	13,9	19,8	96,2	- 20,6	4,6	- 10,0	3,40	3,40	0,1
9,9	13,9	19,8	96,2	- 30,2	29,1	- 10,0	2,80	2,61	- 6,7
9,9	13,9	19,8	96,2	- 29,9	1,0	- 10,0	2,32	2,04	- 12,2
9,9	13,9	19,8	29,4	- 40,3	16,7	- 10,0	3,32	3,20	- 3,6
9,9	13,9	19,8	29,4	- 23,4	17,5	- 10,0	5,76	5,86	1,8
8,1	19,4	25,9	83,5	- 20,0	28,8	- 10,0	4,10	4,41	7,5
8,1	19,4	25,9	83,5	- 20,6	4,2	- 10,0	3,46	3,61	4,2
8,1	19,4	25,9	83,5	- 29,8	28,8	- 10,0	3,04	2,82	- 7,1
8,1	19,4	25,9	83,5	- 29,8	1,0	- 10,0	2,32	2,18	- 6,1
8,1	19,4	25,9	28,1	- 39,7	15,8	- 10,0	3,50	3,54	1,1
8,1	19,4	25,9	28,1	- 24,7	15,9	- 10,0	5,72	5,99	4,7
10,5	23,7	23,7	260,0	- 20,0	28,4	- 10,0	4,90	5,17	5,6
10,5	23,7	23,7	260,0	- 20,1	4,0	- 10,0	4,24	4,34	2,3
10,5	23,7	23,7	260,0	- 29,9	29,0	- 10,0	3,40	3,31	- 2,7
10,5	23,7	23,7	260,0	- 29,9	4,3	- 10,0	2,90	2,80	- 3,4
10,5	23,7	23,7	37,5	- 39,0	8,8	- 10,0	4,02	3,98	- 0,9
10,5	23,7	23,7	37,5	- 25,0	20,8	- 10,0	6,76	7,03	4,0
7,2	11,6	16,6	96,3	- 20,3	28,0	- 10,0	2,44	2,70	10,5
7,2	11,6	16,6	96,3	- 20,2	4,2	- 10,0	2,16	2,30	6,4
7,2	11,6	16,6	96,3	- 30,2	30,0	- 10,0	1,70	1,74	2,5
7,2	11,6	16,6	96,3	- 29,7	4,3	- 10,0	1,48	1,50	1,2
7,2	11,6	16,6	29,4	- 39,6	10,8	- 10,0	2,06	2,29	11,0
7,2	11,6	16,6	29,4	- 24,2	11,9	- 10,0	3,44	3,98	15,6
8,6	11,5	21,9	92,0	- 20,8	27,0	- 10,0	3,06	3,10	1,32
8,6	11,5	21,9	92,0	- 20,0	4,2	- 10,0	2,78	2,76	- 0,8
8,6	11,5	21,9	92,0	- 30,0	31,4	- 10,0	2,20	2,09	- 5,0
8,6	11,5	21,9	92,0	- 29,0	3,6	- 10,0	1,94	1,80	- 7,3



Tabla 2.22: continuación

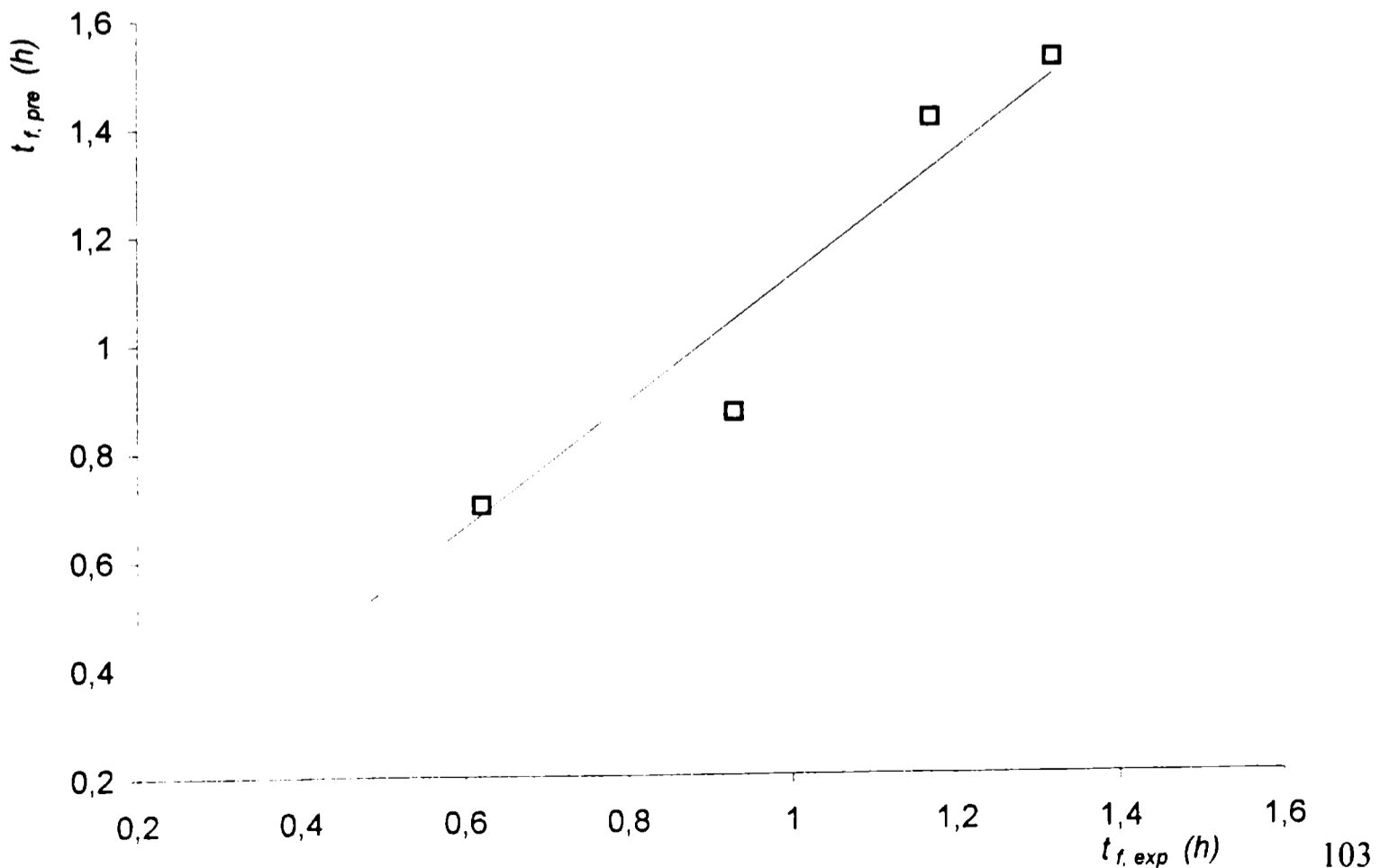
8,6	11,5	21,9	29,0	- 39,6	18,5	- 10,0	2,86	2,74	- 4,1
8,6	11,5	21,9	29,0	- 24,6	15,2	- 10,0	4,30	4,56	6,1
8,5	19,2	26,3	98,5	- 21,3	27,8	- 10,0	4,02	4,03	0,4
8,5	19,2	26,3	98,5	- 20,3	4,7	- 10,0	3,72	3,65	- 2,0
8,5	19,2	26,3	98,5	- 30,0	31,2	- 10,0	3,02	2,78	- 7,8
8,5	19,2	26,3	98,5	- 29,3	4,6	- 10,0	2,52	2,42	- 4,1
8,5	19,2	26,3	29,6	- 39,6	18,5	- 10,0	3,90	3,62	- 7,2
8,5	19,2	26,3	29,6	- 25,0	16,8	- 10,0	5,70	5,96	4,6
13,5	16,4	16,4	260,0	- 20,3	26,8	- 10,0	4,56	4,80	5,2
13,5	16,4	16,4	260,0	- 20,2	4,0	- 10,0	4,08	4,09	0,3
13,5	16,4	16,4	260,0	- 29,6	31,3	- 10,0	3,24	3,20	- 1,4
13,5	16,4	16,4	260,0	- 30,1	4,6	- 10,0	2,82	2,65	-6,0
13,5	16,4	16,4	37,5	- 40,2	12,0	- 10,0	3,56	3,42	- 3,9
13,5	16,4	16,4	37,5	- 24,4	18,1	- 10,0	5,76	6,17	7,1
7,5	7,5	7,5	41,0	- 20,6	29,5	- 10,0	2,32	2,45	5,4
7,5	7,5	7,5	41,0	- 19,9	4,0	- 10,0	2,04	2,14	4,8
7,5	7,5	7,5	41,0	- 29,9	28,9	- 10,0	1,60	1,61	0,7
7,5	7,5	7,5	41,0	- 29,9	4,6	- 10,0	1,36	1,37	0,8
7,5	7,5	7,5	22,1	- 39,6	16,9	- 10,0	1,66	1,68	1,3
7,5	7,5	7,5	20,5	- 24,7	19,6	- 10,0	2,72	3,03	11,5
15,0	15,0	15,0	41,0	- 20,9	30,8	- 10,0	6,90	6,87	- 0,5
15,0	15,0	15,0	41,0	- 20,9	4,6	- 10,0	6,04	5,81	- 3,8
15,0	15,0	15,0	41,0	- 30,6	29,4	- 10,0	4,88	4,47	- 8,4
15,0	15,0	15,0	41,0	- 30,0	4,6	- 10,0	4,16	3,88	- 6,6
15,0	15,0	15,0	20,5	- 39,6	16,8	- 10,0	4,84	4,50	- 7,0
15,0	15,0	15,0	20,5	- 24,6	16,7	- 10,0	7,48	7,61	1,7
7,5	7,5	30,0	41,0	- 20,1	32,1	- 10,0	3,30	3,26	- 1,1
7,5	7,5	30,0	41,0	- 20,5	4,1	- 10,0	2,68	2,67	- 0,4
7,5	7,5	30,0	41,0	- 31,1	31,6	- 10,0	2,20	2,00	- 8,9
7,5	7,5	30,0	41,0	- 29,9	4,7	- 10,0	1,86	1,77	- 4,8
7,5	7,5	30,0	20,5	- 40,7	19,3	- 10,0	2,38	2,35	- 1,1
7,5	7,5	30,0	20,5	-24,8	18,4	- 10,0	3,68	4,05	10,1
5,0	20,0	20,0	41,0	- 20,1	29,7	- 10,0	3,46	3,84	11,1
5,0	20,0	20,0	41,0	- 20,1	5,9	- 10,0	2,86	3,33	16,5
5,0	20,0	20,0	41,0	- 30,8	31,0	- 10,0	2,30	2,40	4,3
5,0	20,0	20,0	41,0	- 30,0	4,7	- 10,0	1,88	2,09	11,3
5,0	20,0	20,0	20,5	- 40,0	18,6	- 10,0	2,62	2,87	9,6
5,0	20,0	20,0	20,5	- 24,6	16,2	- 10,0	4,10	4,85	18,4

**Tabla 2.23: Tiempos de congelación experimentales (este trabajo) y calculados con la ec. (2.57). Pulpa de frutilla en grandes recipientes**

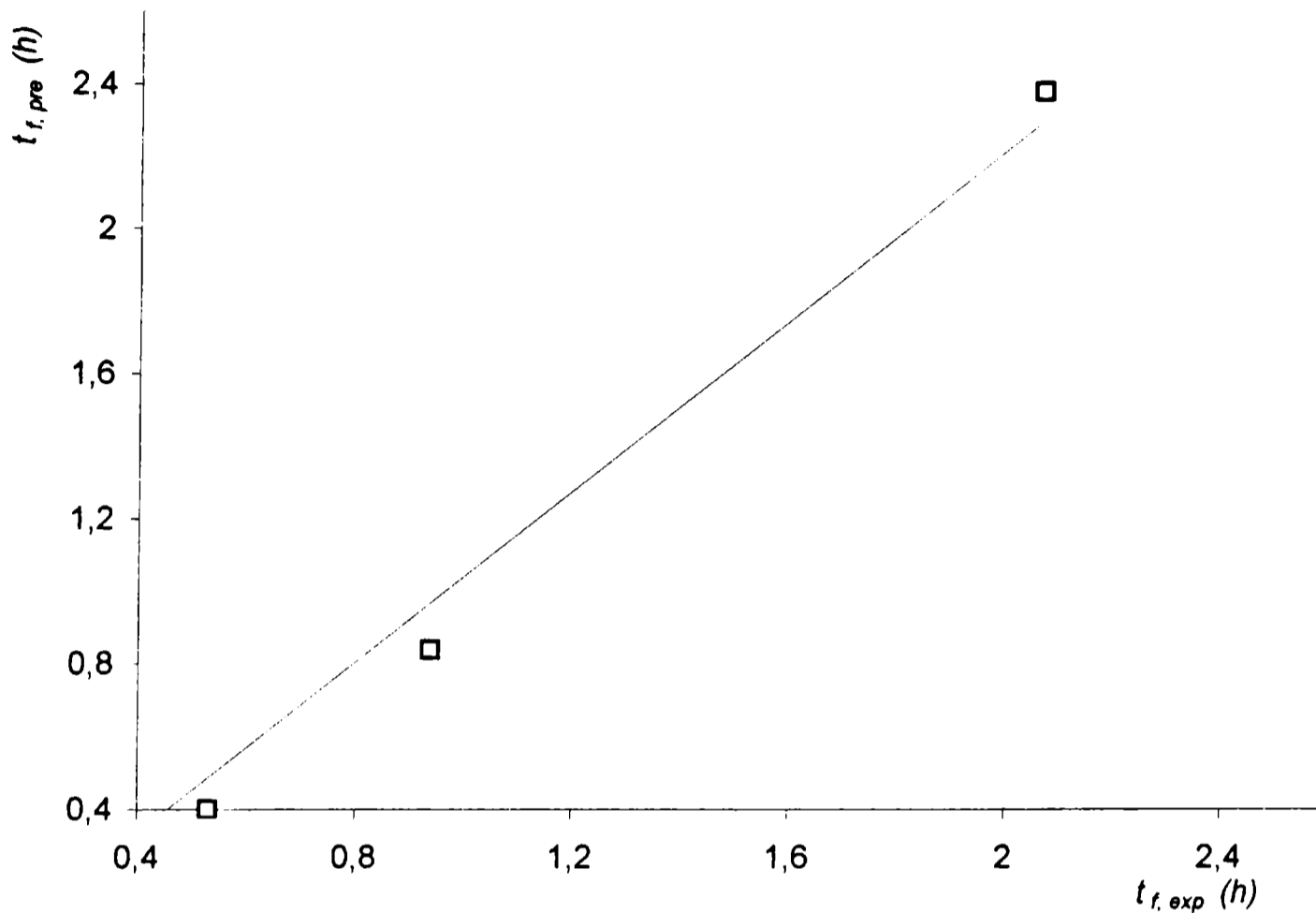
<i>Experiencia</i>	<i>D</i> (cm)	$\beta_1 D$ (cm)	$\beta_2 D$ (cm)	$Bi_0$	<i>T<sub>a</sub></i> (°C)	<i>T<sub>i</sub></i> (°C)	<i>T<sub>c</sub></i> (°C)	<i>t<sub>f,exp</sub></i> (h)	<i>t<sub>f,pre</sub></i> (h)	<i>e</i> (%)
P1	14,5	∞	∞	0,92	- 35,0	26,3	- 18,0	37,72	37,68	- 0,1
P2	14,5	50,0	∞	0,92	- 35,0	26,3	- 18,0	33,10	34,93	5,5
P3	14,5	50,0	52,0	0,92	- 35,0	26,3	- 18,0	28,30	34,26	21,1
C1	20,0	∞	----	1,76	- 35,0	17,6	- 18,0	27,34	20,44	- 25,2
C2	20,0	28,5	----	1,76	- 35,0	17,6	- 18,0	18,40	17,28	- 6,1
C3	27,0	∞	----	2,20	- 35,0	14,7	- 18,0	47,54	31,12	- 34,5
C4	27,0	38,5	----	2,20	- 35,0	14,7	- 18,0	28,85	26,54	- 8,0
C5	57,0	∞	----	4,12	- 35,0	29,4	- 18,0	143,60	98,76	- 31,2
C6	57,0	85,0	----	4,12	- 35,0	29,4	- 18,0	97,65	87,54	- 10,3

En las Figuras 2.12 a 2.20 se presenta gráficamente la concordancia de la ec. (2.57) con los datos experimentales.

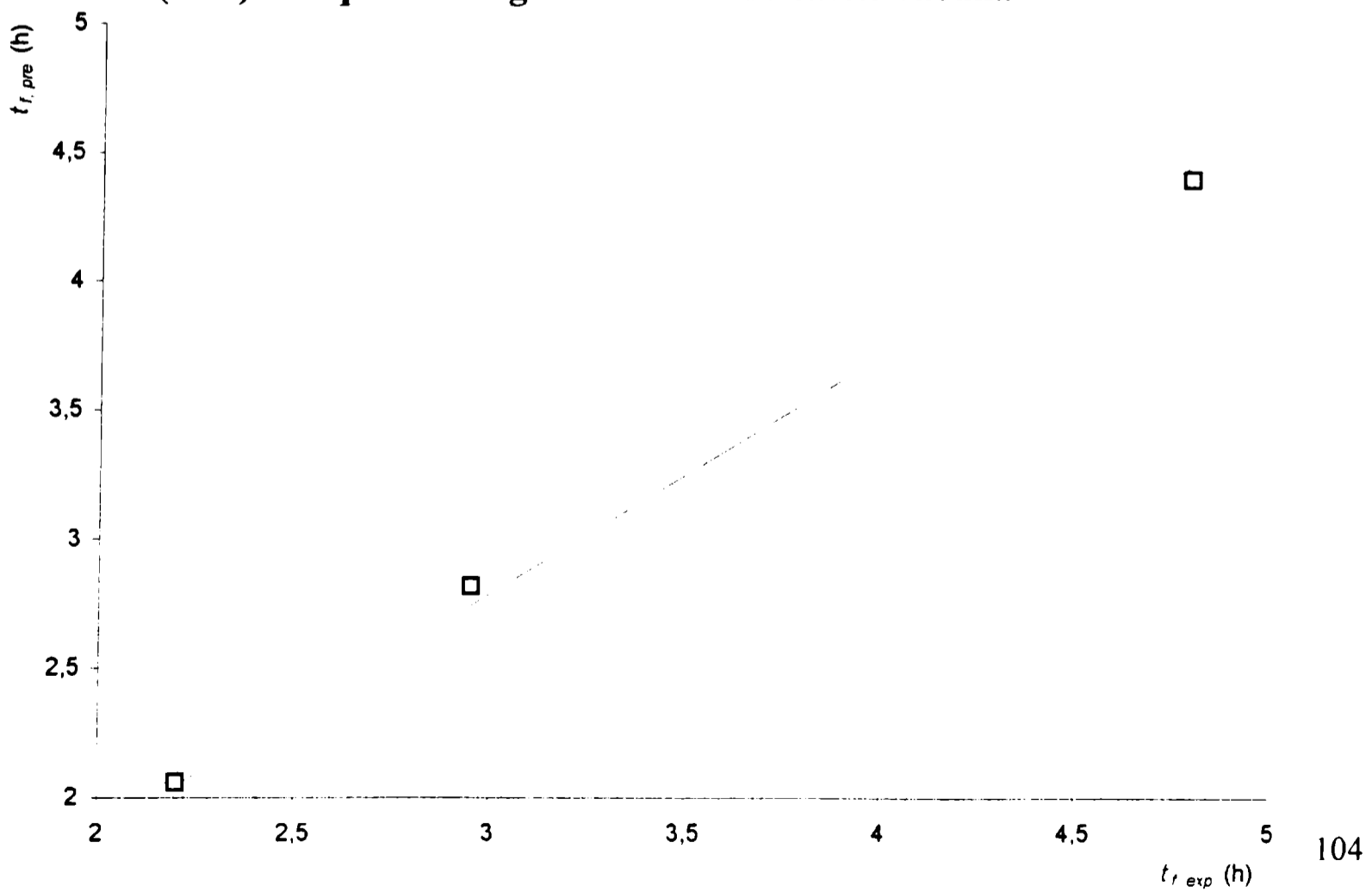
**Fig. 2.12: Tiempos de congelación experimentales (este trabajo), y calculados con la ec. (2.57). Cilindros de carne vacuna**



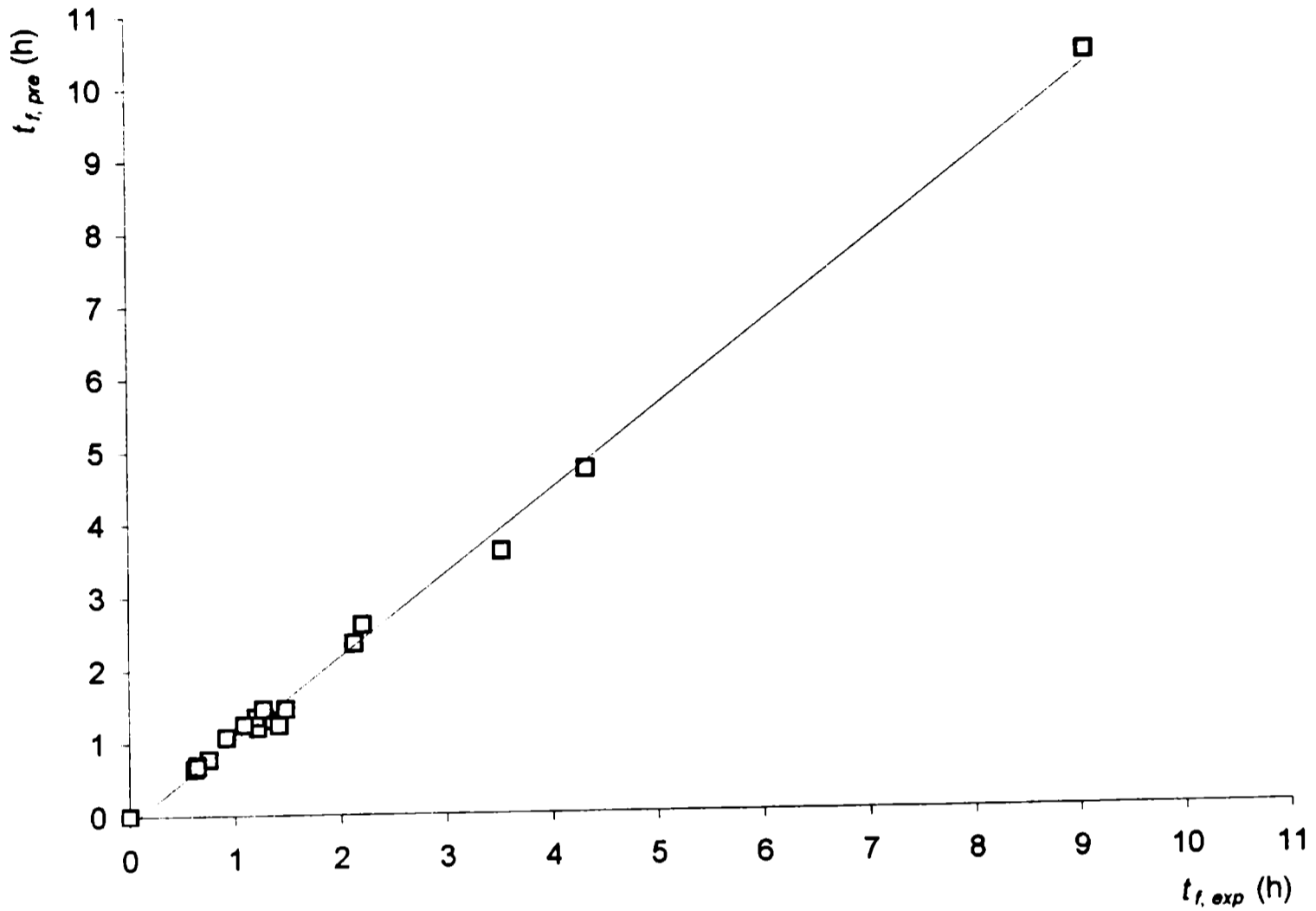
**Fig. 2.13: Tiempos de congelación experimentales (Sheen y Whitney, 1990), y calculados con la ec. (2.57). Cilindros de zanahoria**



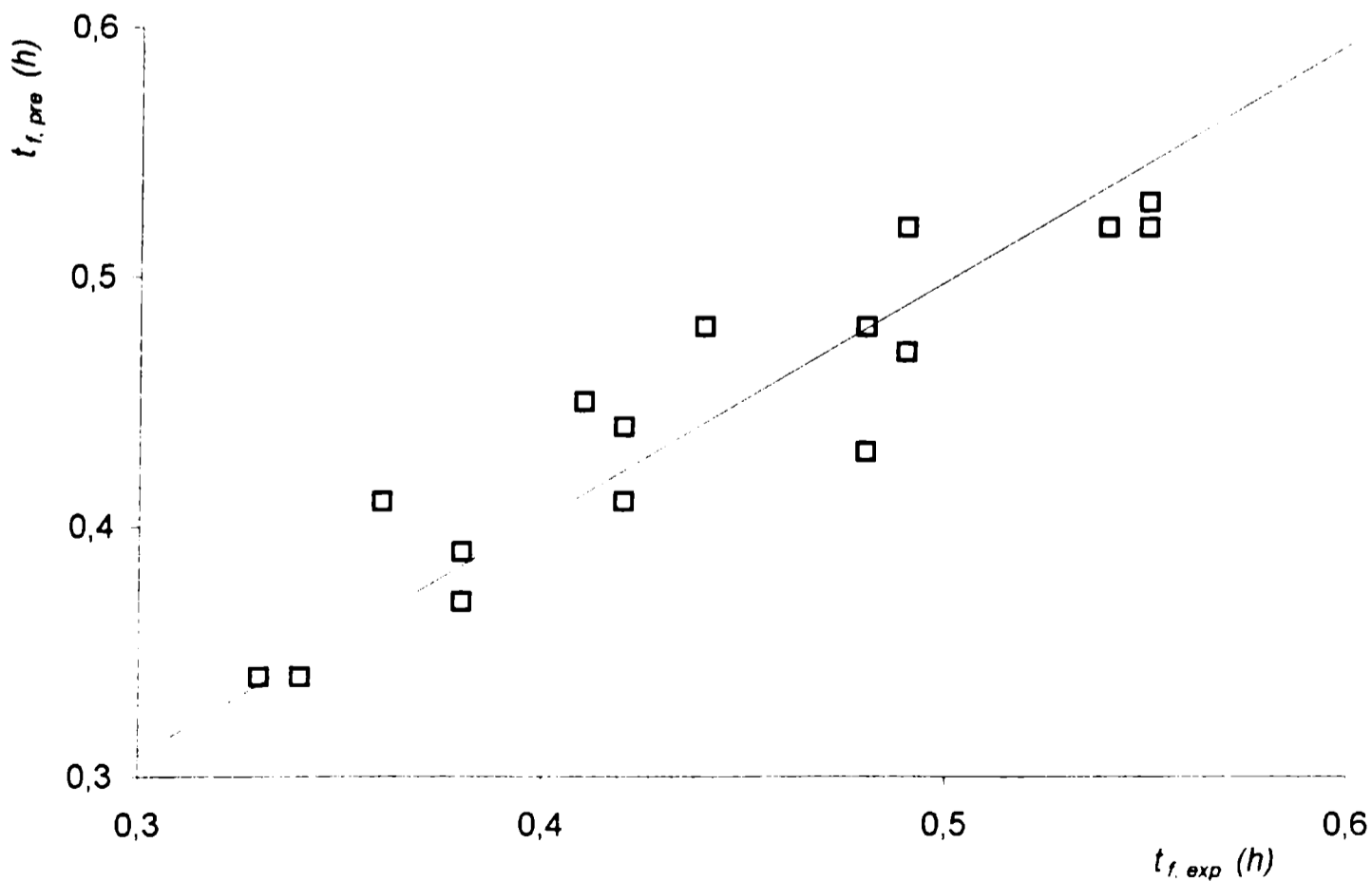
**Fig. 2.14: Tiempos de congelación experimentales (este trabajo) y calculados con la ec. (2.57). Bloque rectangular infinito de carne vacuna**



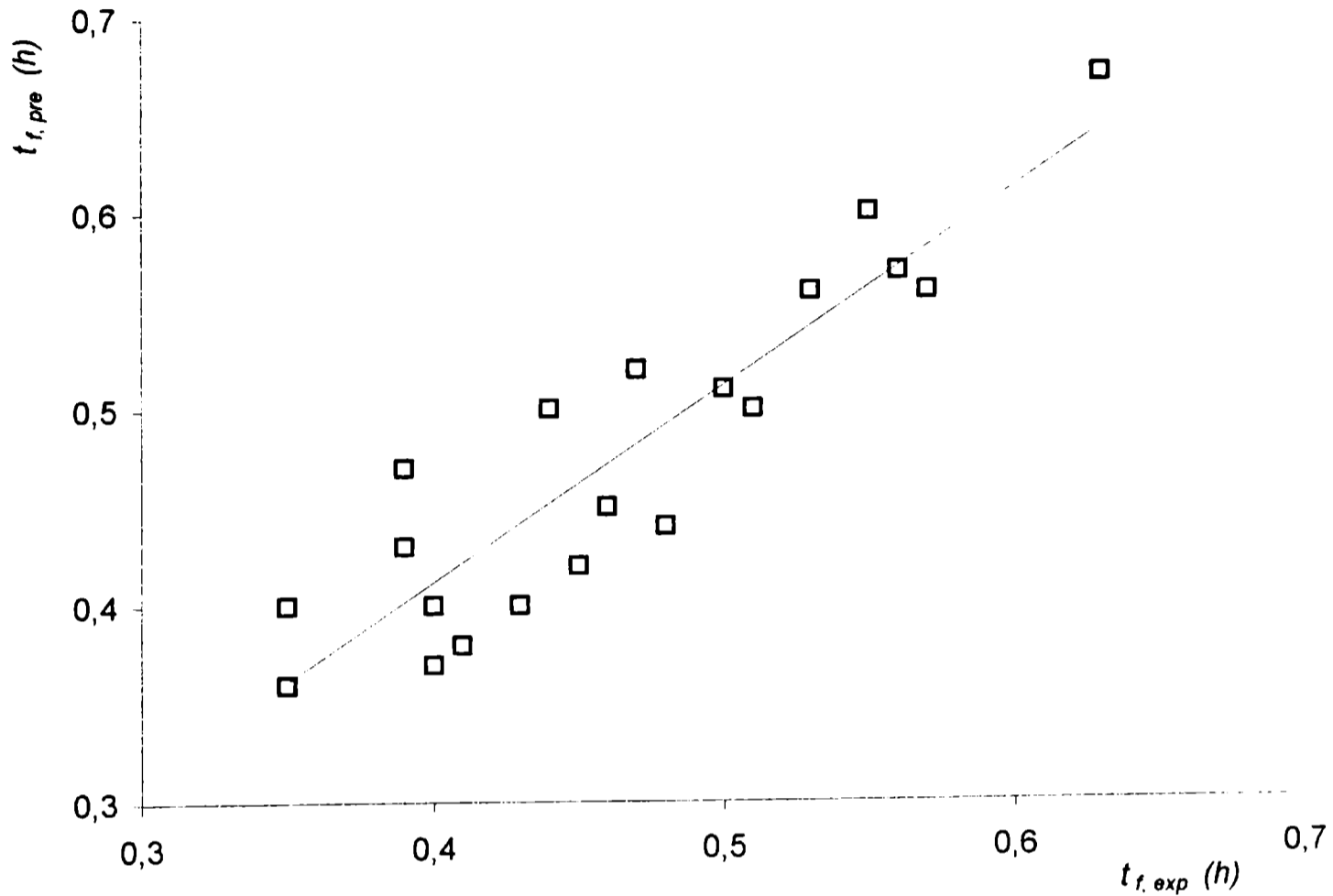
**Fig. 2.15: Tiempos de congelación experimentales (este trabajo) y calculados con la ec. (2.57). Bloque rectangular de carne vacuna**



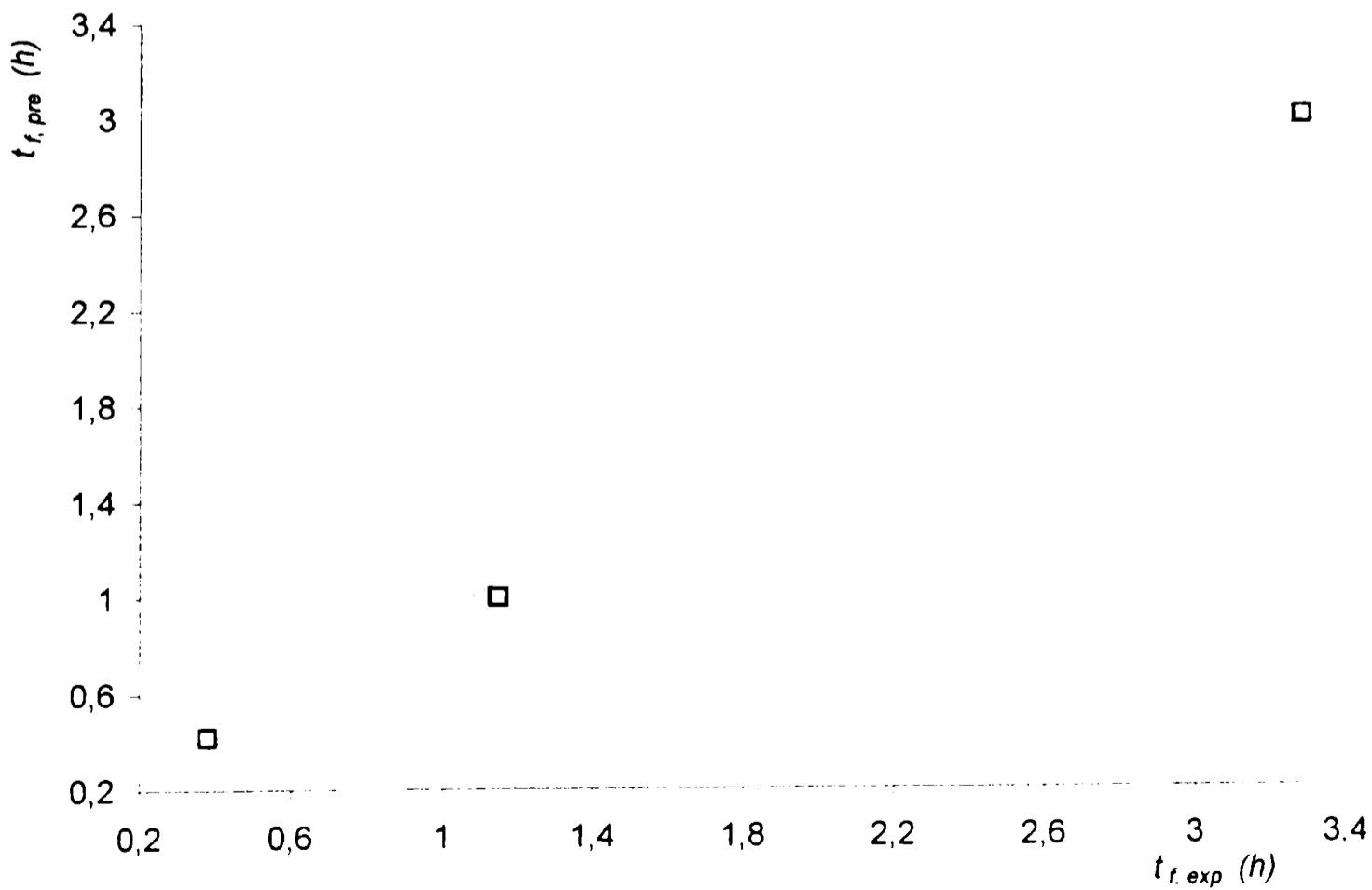
**Fig. 2.16: Tiempos de congelación experimentales (Ilicali, 1989) y calculados con la ec. (2.57). Bloque rectangular carne picada**



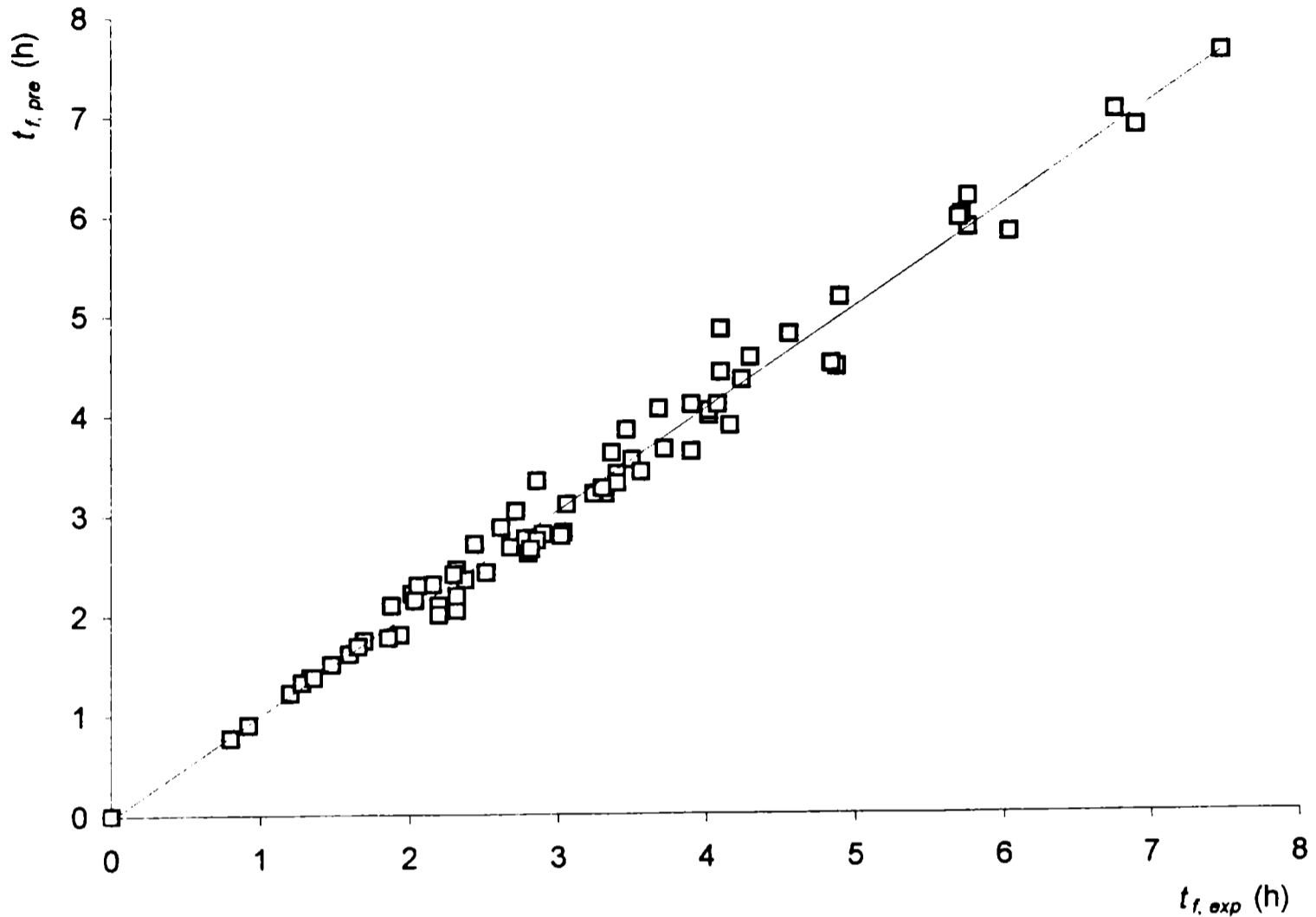
**Fig. 2.17: Tiempos de congelación experimentales (Ilicali, 1989) y calculados con la ec. (2.57). Bloque rectangular puré de papa**



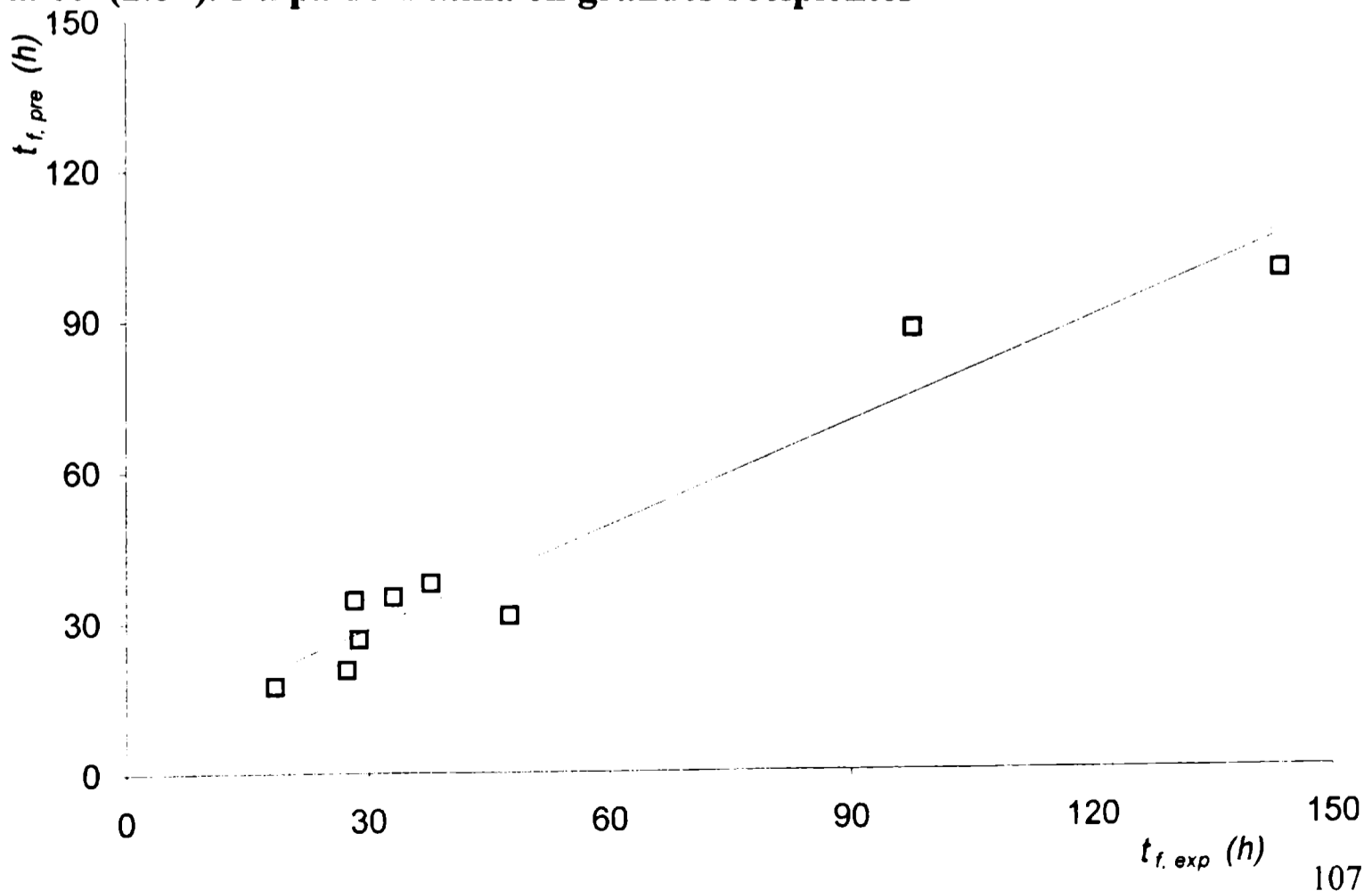
**Fig. 2.18: Tiempos de congelación experimentales (Matsuda, 1971) y calculados con la ec. (2.57). Bloque rectangular surimi**



**Fig. 2.19: Tiempos de congelación experimentales (Cleland y Earle, 1979b) y calculados con la ec. (2.57). Bloque rectangular de tilosa**



**Fig. 2.20: Tiempos de congelación experimentales (este trabajo) y calculados con la ec. (2.57). Pulpa de frutilla en grandes recipientes**



En las Tablas 2.15 a 2.23 y en las Figuras 2.12 a 2.20 se ha comparado la predicción de la ec. (2.57) con los tiempos de congelación experimentales de diversos autores, para distintos productos y los obtenidos en este trabajo. El rango de parámetros involucrados en los datos experimentales se presenta en la Tabla 2.24.

**Tabla 2.24: Rango de los parámetros involucrados en la comparación de la predicción de la ec. (2.57) con resultados experimentales.**

<b>Parámetro</b>	<b>Rango</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
$D$ (cm)		2,0	52,0
$H_{cil}$ (cm)		5,5	85,0
$Bi_0$		0,08	260,00
$T_i$ (°C)		1,0	31,6
$T_a$ (°C)		- 43,5	- 14,7
$T_c$ (°C)		- 20,0	- 10,0

En todos los casos se ha calculado el error porcentual error (%) definido según:

$$error (\%) = \frac{(t_{f,pre} - t_{f,exp})}{t_{f,exp}} \times 100$$

En la Tabla 2.25 se presenta, para cada producto, cada forma evaluada y para el total de las experiencias, el número de datos, el error porcentual promedio y la desviación estándar.

**Tabla 2.25: Evaluación de la ecuación de predicción (ec. (2.57)) de tiempos de congelación para formas regulares sometidas a transferencia de calor en mas de una dirección**

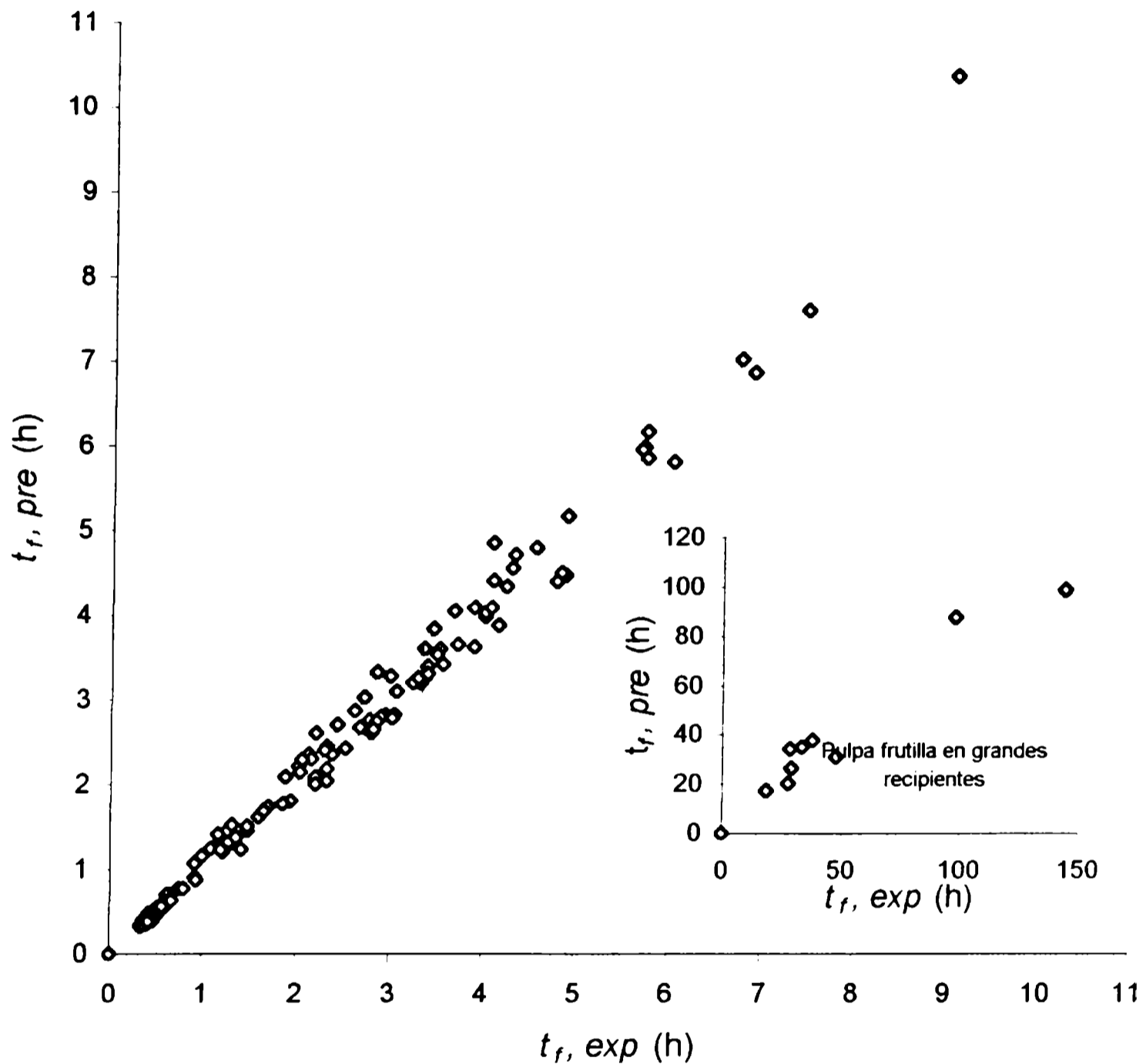
<b>Producto</b>	<b>Forma</b>	<b>N° de datos</b>	<b>Error % promedio</b>	<b>Desviación estándar %</b>
Carne vacuna	Cilindro	4	10,5	11,76
Zanahoria	Cilindro	3	- 6,7	20,04
Carne vacuna	Bloque rectangular ∞	3	- 6,3	1,87
Carne vacuna	Bloque rectangular	17	6,6	8,21
Carne picada	Bloque rectangular	18	- 0,6	5,88
Puré de papa	Bloque rectangular	20	- 2,0	7,83
Surimi	Bloque rectangular	3	4,9	12,84
Tilosa	Bloque rectangular	72	1,1	6,34
Pulpa de frutilla en grandes recipientes	Placa plana	9	- 9,9	18,06
	Cilindro			
	Bloque rectangular			
<b>Todos los datos</b>		<b>149</b>	<b>0,46</b>	<b>7,90</b>

Y en la Fig. 2.21, se presenta gráficamente la predicción de la ec. (2.57) con todos los datos experimentales utilizados.



Fig. 2.21: Tiempos de congelación experimentales y calculados con la ec. (2.57).

Todos los datos



## 2.5.- Conclusiones

Se ha presentado una revisión de la mayoría los métodos publicados para el cálculo de tiempos de congelación. Dentro de ellos se ha puesto el énfasis en aquellos que se pueden utilizar para estimar tiempos de proceso para formas regulares con

transferencia de calor en más de una dirección, y en uno que permite calcular tiempos para transferencia de calor en una única dirección con una sola ecuación muy simple. Sobre la base de éste último y tomando los factores de forma más sencillos que se han publicado, se ha propuesto un método de cálculo de tiempos de congelación para formas regulares con transferencia de calor multidireccional. La fórmula obtenida es de uso muy sencillo con la gran ventaja adicional de utilizar propiedades termofísicas de los productos frescos.

El método desarrollado se ha comparado con datos experimentales de tiempos de congelación publicados por diversos autores, y se han efectuado experiencias para ampliar su validez a productos no encontrados en la bibliografía y para congelación de alimentos en grandes recipientes, en un rango de condiciones de operación que cubren prácticamente todas las posibilidades de congelación industrial.

Las comparaciones se efectuaron para diversos productos, de composición, estructura y propiedades diferentes como: carne vacuna entera y picada, puré de papa, zanahorias enteras, surimi, pulpa de frutilla y un sistema modelo. Los productos fueron congelados simulando o utilizando distintos equipos: túneles estáticos con aire forzado, inmersión en líquidos preenfriados y lechos fluidizados.

Los resultados obtenidos de las comparaciones permiten indicar que el método es adecuado para la predicción de tiempos de congelación de formas regulares sometidas a transferencia de calor en una o más direcciones, y para alimentos de relativamente alto contenido de agua.

Además, es adecuado para ser utilizado en plantas de producción contando solamente con valores fácilmente obtenibles de propiedades de alimentos frescos.

## **Capítulo 3**

# **DISTRIBUCION DE TIEMPOS DE RESIDENCIA DE ALIMENTOS EN LECHO FLUIDIZADO**

### **3.- Distribución de tiempos de residencia de alimentos particulados en lecho fluidizado**

#### **3.1.- Introducción**

Como ya se anticipó en el capítulo 1 de este trabajo, para el diseño de equipos de congelación de alimentos es necesario contar con:

- ✓ Modelos para el cálculo de tiempos de congelación, y
- ✓ Modelos para evaluar el movimiento relativo de las partículas de alimentos dentro del equipo

Ambos conforman el tiempo de permanencia del producto en el congelador.

Asimismo, se mencionó que en la mayoría de los congeladores industriales el producto permanece “quieto” respecto de un eje de coordenadas definido sobre el producto y que se mueve con él, excepto en la congelación de productos particulados en equipos de cinta arrastrada múltiple y en equipos de lecho fluidizado.

En los equipos de dos o más cintas arrastradas, el producto permanece quieto en cada una de las cintas y se produce un cierto grado de mezclado cuando una cinta vuelca sobre otra. En realidad, en los pasajes de una cinta a otra no se pretende mezclar totalmente las partículas de alimentos sino que por el contrario se intenta “invertir” el lecho fijo, es decir que las partículas superiores en la cinta anterior sean las inferiores en la próxima. De éste modo se tiende a minimizar la diferencia de tratamiento entre las partículas superiores (las menos frías) e inferiores (las más frías)

del lecho fijo, y así disminuirá el tiempo de residencia del producto en el equipo y será más eficiente desde el punto de vista del aprovechamiento energético.

En los equipos de lecho fluidizado mediante el mismo fluido se logra la fluidización y la congelación de los alimentos. El producto se alimenta por un extremo del lecho y circula sin ayuda mecánica adicional, horizontalmente, hacia la descarga por el extremo opuesto.

En estos sistemas ocurre un alto grado de mezclado en todas las direcciones, y en general en la dirección del flujo del fluido fluidizante se considera en la práctica mezclado total. Esto hace que cada partícula en dicho sentido recibe idéntico tratamiento, característica deseable dada la uniformidad de tratamiento de todas las partículas.

También es necesario indicar que el alto grado de mezclado en el sentido de avance global de los sólidos trae aparejado otros inconvenientes como se verá más adelante.

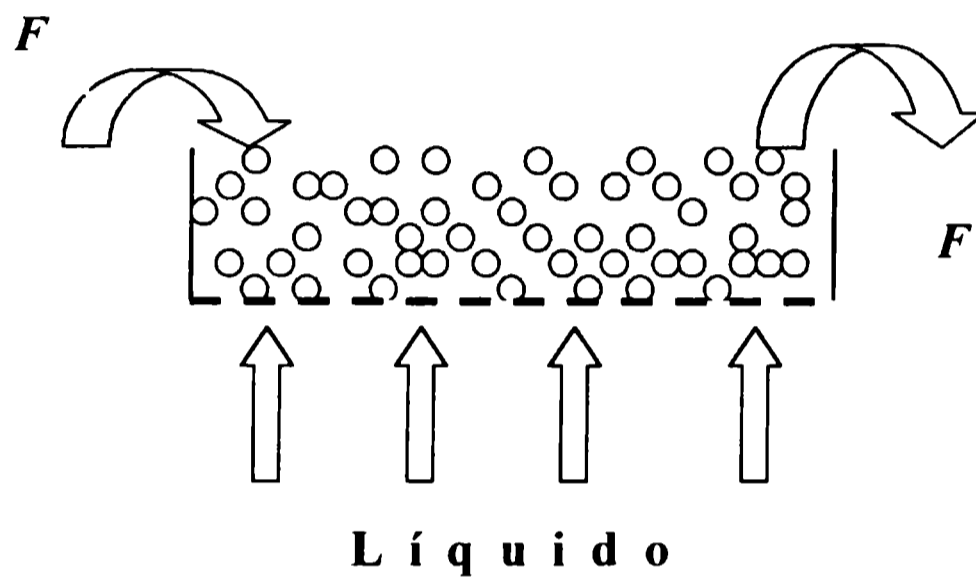
En la Fig. 3.1 se muestra esquemáticamente el mecanismo de funcionamiento de este tipo de congeladores.

En ella se puede advertir el flujo cruzado de las corrientes del fluido y de los sólidos. Por efecto de la corriente de fluido ascendente las partículas se separan y se mantienen flotando, rotando y desplazándose erráticamente.

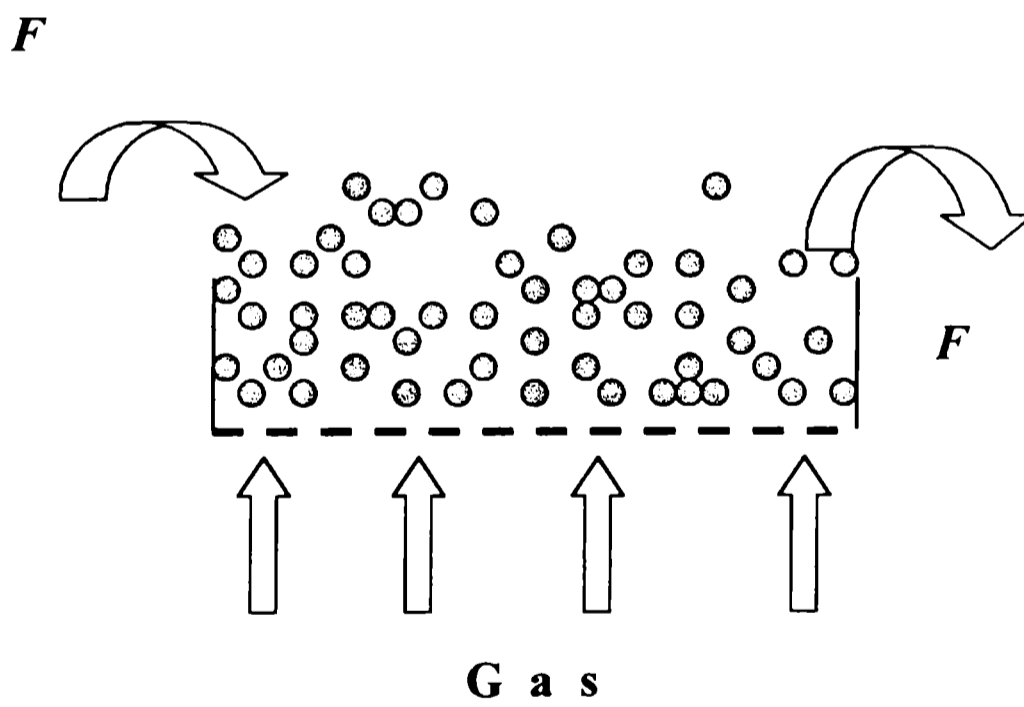
Fig. 3.1: Esquema de funcionamiento de un lecho fluidizado.

3.1.a: fluidización con líquidos. 3.1.b: fluidización con gases

3.1.a



3.1.b



En estas circunstancias, la velocidad lineal del fluido circulando entre las partículas es mucho mayor que en el espacio por encima del lecho (menor sección) por lo que las partículas que superan en su movimiento la altura del lecho pierden sustentación y caen nuevamente al mismo.

Los lechos fluidizados presentan similares propiedades que un fluido. Así por ejemplo los sólidos "fluyen" de un extremo al otro del equipo, "desbordando" en la salida como si se alimentara un líquido en un canal.

La congelación en lecho fluidizado continuo puede aplicarse a productos de hasta aproximadamente 5 cm de diámetro y además de las ventajas propias de los productos IQF (Individually Quick Frozen), presenta las siguientes características:

- ✓ Se logran tiempos de congelación menores por lo que es menor el tamaño de equipo para una dada producción ocupando, por ende, menor área de piso.
- ✓ Debido a la alta velocidad de congelación, las pérdidas de peso son considerablemente más bajas que en otros equipos de congelación, y también, por la misma razón, se ve favorecida la calidad de producto en cuanto a textura, color y exudado.
- ✓ Facilita mucho la mecanización y automatización posterior del flujo de producto en las líneas de producción.
- ✓ Se puede humedecer superficialmente el producto previo a su ingreso al lecho, lo que permite formar un "glaseado" que no sólo mejora su aspecto y color sino que, además, lo protege de reacciones de oxidación por contacto con el aire y/o de eventuales contaminaciones de origen microbiano.

Debido al principio de funcionamiento de estos equipos se convierten en los más complicados para su diseño y optimización, ya que hay que estudiar, además de las propiedades de las partículas individuales, las propiedades del lecho de partículas y todos los parámetros de diseño que varían con ellas.

Como consecuencia de ello es necesario evaluar el comportamiento “fluidodinámico” del lecho formado por una mezcla de partículas sólidas y el aire fluidizante y de enfriamiento.

### 3.2.- Fluidodinámica del lecho fluidizado

El comportamiento de un lecho fluidizado depende del tamaño de partícula, de la densidad del sólido y de la naturaleza del fluido fluidizante (Kunii y Levenspiel, 1969). Así cuando el fluido es un líquido, el lecho se comporta como una fase continua homogénea dando lugar a lo que se denomina como fluidización particulada.

Por el contrario cuando el fluido es un gas (en congeladores siempre es aire previamente enfriado) se produce la denominada fluidización agregativa. Esta se caracteriza por la formación de burbujas de gas que ascienden a través de la fase continua constituida por las partículas fluidizadas. Al llegar a la parte superior del lecho las burbujas se rompen proyectando partículas hacia todas las direcciones, como se muestra esquemáticamente en la Fig. 3.1. b.

Las burbujas son una característica de los lechos fluidizados con gases y no pueden evitarse a menos que se compliquen demasiado los equipos como por ejemplo agregando vibración mecánica vertical del lecho.

Asimismo, los lechos fluidizados pueden presentar comportamientos anormales originados generalmente en defectos mecánicos como las canalizaciones de



flujo. Por ello es necesario comprobar si los equipos producen una correcta fluidización. Para tal fin la técnica más adecuada es determinar la pérdida de carga del lecho de partículas para distintas velocidades del fluido fluidizante, en adelante aire (Vázquez y Calvelo, 1980).

La pérdida de carga en un lecho fijo de partículas sólidas se puede representar mediante la ecuación de Ergun (Bird y col, 1964; Kunii y Levenspiel, 1969), de acuerdo a:

$$\frac{\Delta P}{(1-\varepsilon)H} = \frac{150 \mu (1-\varepsilon)}{D_p^2 \varepsilon^3} v_0 + \frac{1,75 \rho}{D_p \varepsilon^3} v_0^2 \quad (3.1)$$

Donde  $\Delta P$  es la pérdida de carga,  $\varepsilon$  es la porosidad del lecho (volumen de huecos/volumen de lecho),  $\rho$  es la densidad del aire,  $\mu$  es la viscosidad del aire,  $H$  es la altura de lecho,  $D_p$  es el diámetro de partícula y  $v_0$  es la velocidad superficial del aire que circula en el lecho tomada en la misma sección del lecho sin partículas. La ec. (3.1) muestra que en coordenadas doble logarítmicas la representación de  $\Delta P$  en función de la velocidad  $v_0$  se aproxima a una línea recta de pendiente entre 1 y 2 según el régimen de flujo existente.

Si la  $v_0$  aumenta gradualmente se alcanzará una situación en que la fuerza de arrastre del aire sobre las partículas que constituyen el lecho iguala a su peso, haciendo que comiencen a reacomodarse llegando a una condición de empaquetamiento más suelto. Como la porosidad  $\varepsilon$  aumenta, se altera la pendiente de la curva como prevé la ecuación de Ergun (ec. (3.1)). En este punto, las partículas se empaquetan en la condición más suelta posible pero aún permanecen en contacto entre sí. Bajo esta condición de flujo la velocidad superficial del aire y la porosidad

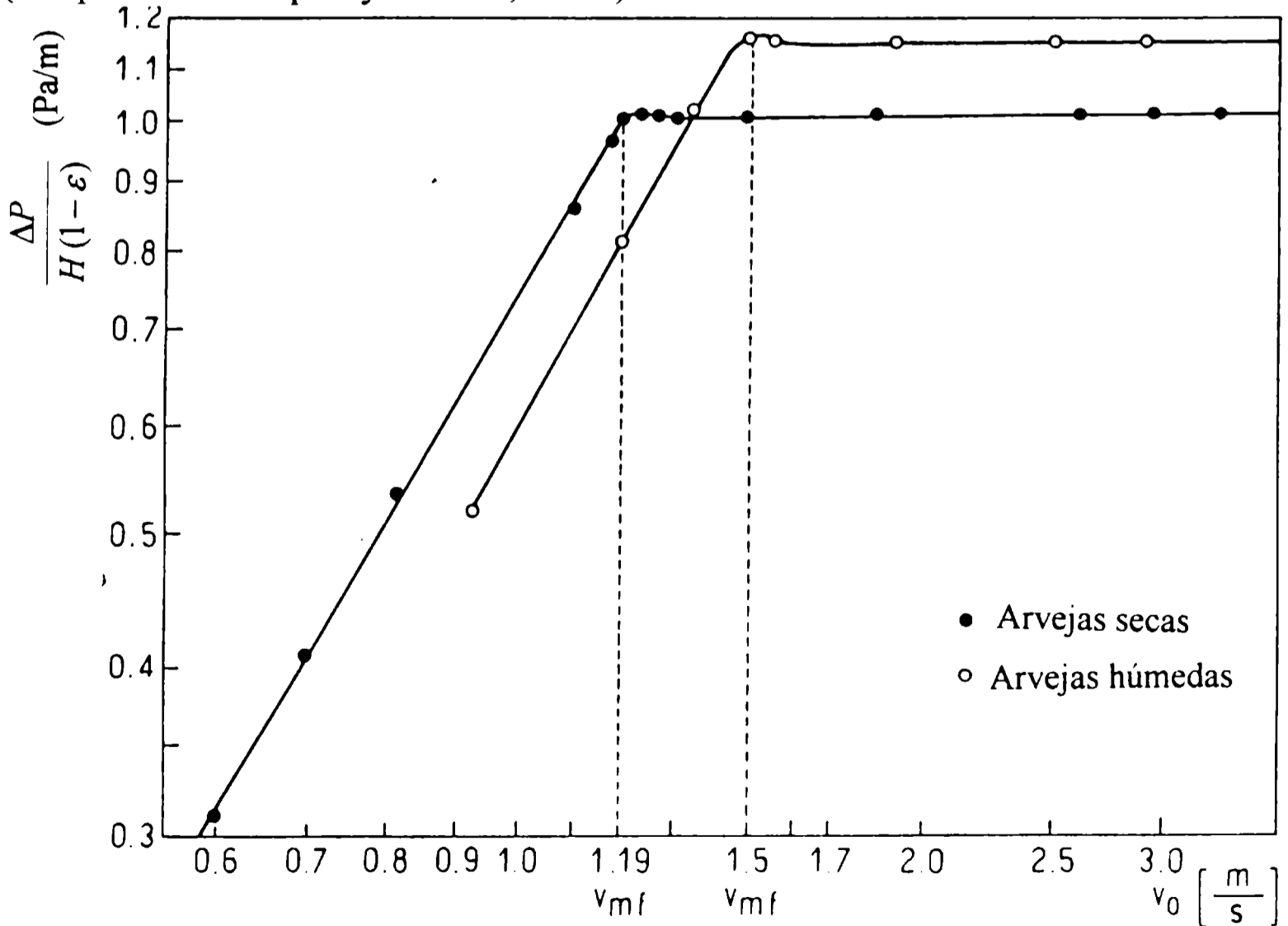
del lecho se denominan de mínima fluidización, ya que a partir de ella comienza la fluidización propiamente dicha. En la condición de mínima fluidización todavía es válida la ec. (3.1), y como la fuerza de arrastre iguala al peso de las partículas se puede escribir:

$$\frac{\Delta P}{(1 - \varepsilon_{mf}) H_{mf}} = (\rho_s - \rho) g \quad (3.2)$$

Donde  $\varepsilon_{mf}$  y  $H_{mf}$  corresponden a la porosidad y altura de lecho respectivamente en condiciones de mínima fluidización,  $\rho_s$  es la densidad de las partículas y  $g$  la fuerza de atracción gravitacional. Si se representan las ecs. (3.1) y (3.2) en gráficos doble logarítmico se obtienen curvas como las que se presentan en la Fig. 3.2.

**Fig. 3.2: Representación de las ecs. (3.1) y (3.2) para arvejas secas y húmedas.**

(Adaptado de Vázquez y Calvelo, 1980.)



Igualando las ecs. (3.1) y (3.2) y ordenándolas como proponen Kunii y Levenspiel, 1969, se obtiene:

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3} \left[ \frac{D_p v_{mf} \rho}{\mu} \right]^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \left[ \frac{D_p v_{mf} \rho}{\mu} \right] = \frac{D_p^3 \rho (\rho_s - \rho) g}{\mu^2} \quad (3.3)$$

La ec. (3.3) permite calcular la velocidad de mínima fluidización ( $v_{mf}$ ) en función de las propiedades del lecho y la porosidad de mínima fluidización ( $\varepsilon_{mf}$ ), si el lecho cumple con la ec. (3.1).

Si se tiene en cuenta que la porosidad de mínima fluidización es una característica de las partículas y de su tipo de empaquetamiento, la ec. (3.3) indica que la velocidad de mínima fluidización es independiente de las dimensiones del lecho. Si aumenta la velocidad del fluido por encima de la de mínima fluidización, las partículas se separan más y comienza la fluidización, con las partículas rotando y trasladándose erráticamente. Esta separación de las partículas entre sí, tanto mayor cuanto mayor sea la velocidad del aire, conduce a una expansión del lecho con el consiguiente aumento de la porosidad. Un balance de masa de sólidos en el lecho predice:

$$(1 - \varepsilon_{mf}) H_{mf} = (1 - \varepsilon_0) H_0 = (1 - \varepsilon) H \quad (3.4)$$

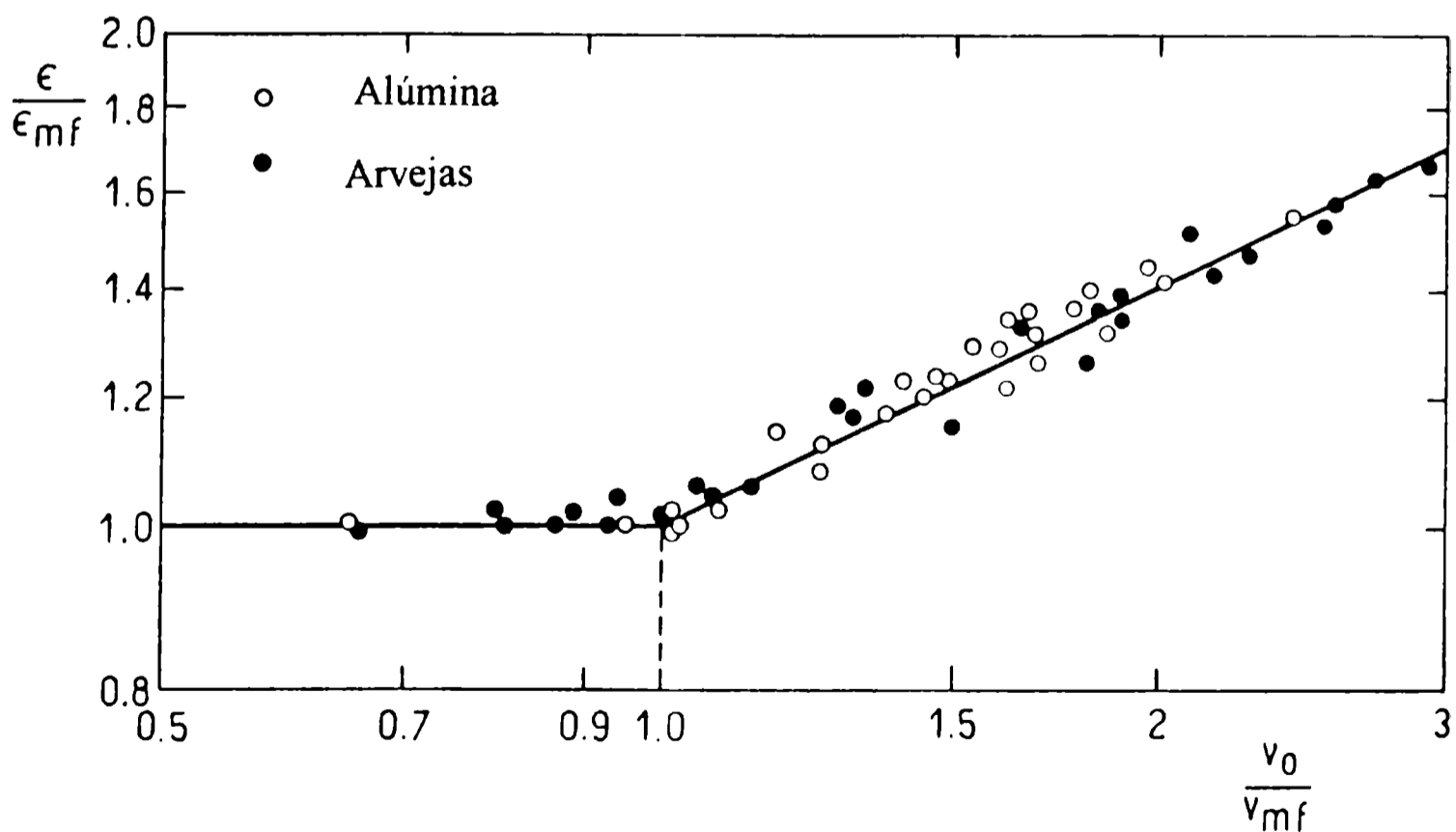
Donde  $\varepsilon$  y  $H$  corresponden a la porosidad y altura de lecho expandido respectivamente, y  $\varepsilon_0$  y  $H_0$  las mismas propiedades pero del lecho fijo. Reemplazando la ec. (3.4) en la ec. (3.2):

$$\frac{\Delta P}{(1-\epsilon)H} = (\rho_s - \rho)g \quad (3.5)$$

La ec. (3.5) indica que en condiciones de fluidización la pérdida de carga por unidad de altura de lecho es una constante sólo dependiente de las densidades de las partículas y el fluido. Ello implica que cada producto presentará una curva característica de pérdida de carga en función de la velocidad superficial del fluido.

Para utilizar la ec. (3.3) es necesario conocer la porosidad de mínima fluidización, y para la (3.4) la porosidad del lecho expandido. No existen ecuaciones teóricas para su estimación, por ello siempre debe determinarse experimentalmente. En la Fig. 3.3 se muestra una curva típica de la porosidad en función de la relación velocidad superficial del fluido/velocidad de mínima fluidización.

**Fig. 3.3: Curva experimental de la porosidad ( $\epsilon$ ) de lechos de arvejas y esferas de alúmina en función de  $v_0/v_{mf}$ . (Adaptado de Vázquez y Calvelo, 1980).**



Asimismo, como se observó en el tratamiento de las ecs. (3.3) a (3.5), la  $v_{mf}$  se puede obtener de la representación de la pérdida de carga en función de  $v_0$  o directamente de la ec. (3.3) si se conoce la porosidad de mínima fluidización.

Como se verá más adelante la ecuación de Ergun es muy útil para partículas esféricas. Cuando las partículas se alejan mucho de la forma esférica ocurre, en el entorno de la velocidad de mínima fluidización, una zona de transición producto de un reacomodamiento de las partículas.

Ello hace que no se pueda utilizar con precisión la ec. (3.3) y por ende siempre es necesario obtener experimentalmente las curvas de pérdida de carga en función de la velocidad superficial del aire para obtener la velocidad de mínima fluidización. Es decir, para cada partícula de alimento hay que realizar experiencias para obtener  $\varepsilon$  y  $v_{mf}$ .

Otro aspecto que es necesario considerar en la fluidodinámica de los lechos fluidizados es la fracción de volumen de lecho ocupado por las burbujas características de la fluidización agregativa cuando el fluido es un gas como en el caso de la congelación de alimentos.

Este fenómeno está relacionado con la necesidad de considerar un modelo de ajuste para el coeficiente de transferencia de calor en la interfase gas - partícula dado que parte del gas fluidizante es transportado por las burbujas cambiando la velocidad del mismo entre las partículas.

Davidson y Harrison, 1963, 1971, propusieron, en su modelo de lecho burbujeante, que la fracción de volumen de lecho ocupado por las burbujas ( $\delta$ ) se puede estimar:

$$\delta = \frac{\varepsilon - \varepsilon_{mf}}{1 - \varepsilon_{mf}} \quad (3.6)$$

Los mismos autores indicaron que la porosidad del lecho se puede relacionar con la velocidad superficial según:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{mf}} = \left( \frac{v_0}{v_{mf}} \right)^d \quad (3.7)$$

Donde  $d$  se regresa de datos experimentales como se indicará más adelante.

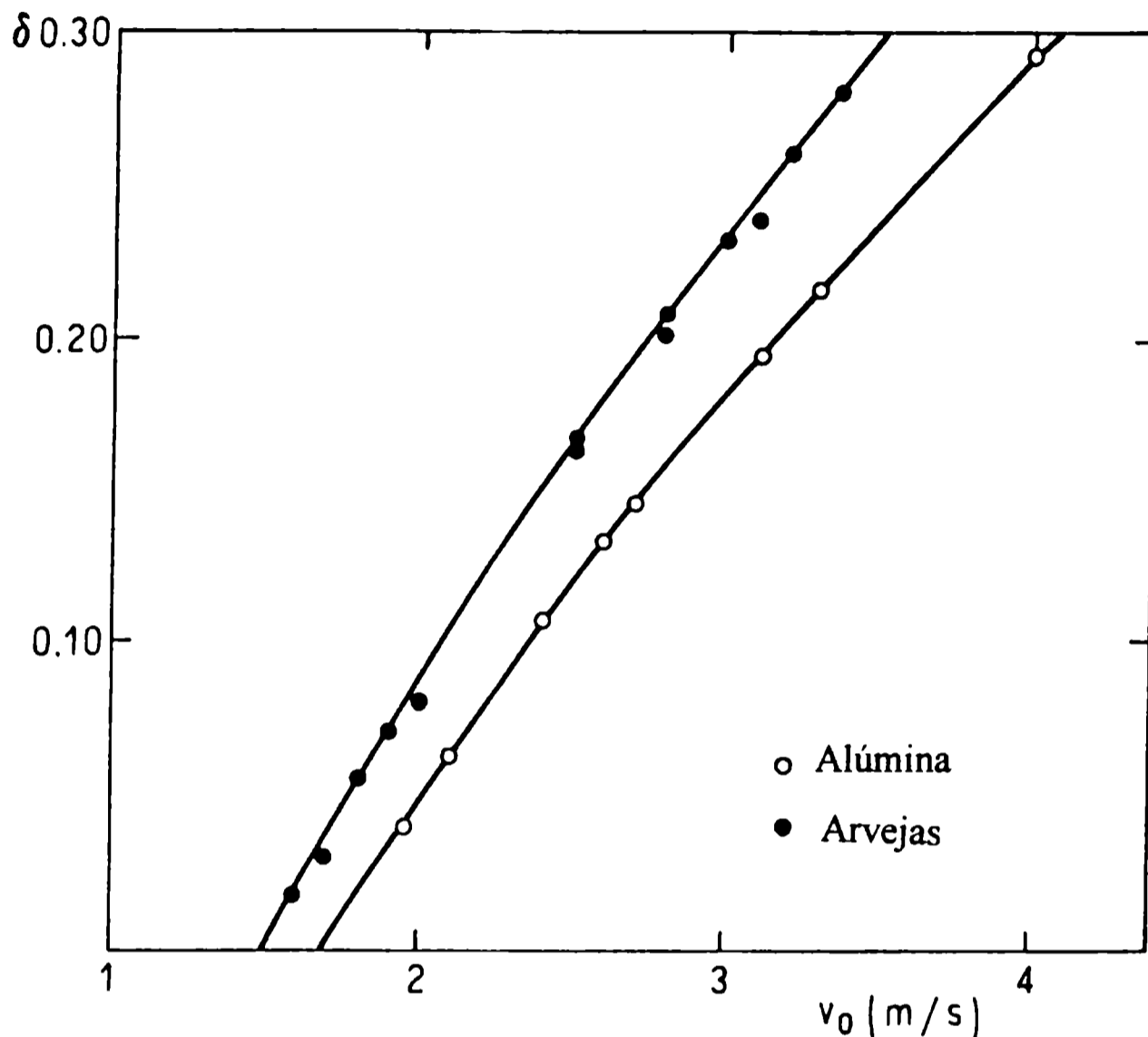
Reemplazando la (3.7) en la (3.6) se obtiene:

$$\delta = \frac{\varepsilon_{mf} \left[ \left( \frac{v_0}{v_{mf}} \right)^d - 1 \right]}{1 - \varepsilon_{mf}} \quad (3.8)$$

Vázquez y Calvelo, 1980, aplicaron la ec. (3.8) a resultados experimentales obtenidos con arvejas y pellets esféricos de alúmina, y encontraron que la fracción de lecho ocupado por las burbujas puede llegar a 0,3 para velocidades superficiales de aire cercanas a 3 m/s.

Asimismo, informaron que  $\delta$  es mayor para partículas que presentan menor velocidad de mínima fluidización. Los resultados obtenidos por Vázquez y Calvelo, 1980, se presentan en la Fig. 3.4.

Fig. 3.4: Fracción de burbujas en lechos fluidizados de arvejas y pellets de alúmina esféricos. (Adaptado de Vázquez y Calvelo, 1980).



Esta tendencia de  $\delta$  muestra que una importante cantidad de aire, que obviamente contribuye a  $v_0$ , circula a través de las burbujas. Este fenómeno evidentemente modifica la velocidad del gas en torno a las partículas y por ende se puede prever que influirá sobre la transferencia de calor gas – partícula, y naturalmente sobre el correspondiente coeficiente de transferencia de energía en el lecho.

Es decir, que los fenómenos fluidodinámicos influyen sobre el movimiento de las partículas y sobre las características de la transferencia de calor gas – partícula.

### **3.3.- Coeficientes de transferencia de calor en lecho fluidizado**

#### **3.3.1.- Coeficientes de transferencia de calor gas – partícula individual**

La transferencia de calor aire – partícula, como se indicó más arriba, está condicionada por el comportamiento fluidodinámico de los lechos fluidizados descrito en el apartado 3.2 de este trabajo. Esto significa que para el estudio de la transferencia de energía se debe tener en cuenta los mencionados fenómenos, lo que agrega complejidad al problema.

La transferencia calórica gas – partícula ha sido estudiada profusamente y ha generado una importante bibliografía. La información fué bien sumariada en los trabajos de Davidson y Harrison, 1963, 1971; Barker, 1965; Kunii y Levenspiel, 1969; Gutfinger y Abuaf, 1974.

En general los coeficientes de transferencia fueron evaluados bajo diferentes condiciones, alternando técnicas en estado estacionario con medidas en estado transitorio y, adoptando diferentes métodos para obtener la temperatura superficial de las partículas. Tal vez por ello, existen grandes discrepancias en la información predictiva de los mismos.

Paralelamente en las condiciones de trabajo imperantes en los lechos fluidizados para la congelación de alimentos: esto es relativamente pequeñas alturas de producto en el lecho y números de Reynolds superiores a 1.000, el número de contribuciones se reduce notablemente (Bradshaw y Myers, 1963; Chang y Wen, 1966; Lindauer, 1967; Persson, 1967; Mann y Feng, 1968; Bhattachariyya y Pei, 1974, Gruda y Postolski, 1986), con diferencias no sólo en el valor puntual de los



coeficientes de transferencia sino también en la dependencia de los coeficientes con los parámetros del sistema.

En términos generales el origen de las discrepancias reside en la dificultad experimental para evaluar con precisión la temperatura de la superficie de las partículas (Kettering y col, 1950; Wansley y Johanson, 1954; Heertjes y McKibbins, 1956; Bradshaw y Myers, 1962; Lindauer, 1967; Persson, 1967; Mann y Feng, 1968; Bhattachariyya y Pei, 1974, Vázquez y Calvelo, 1980, Gruda y Postolski, 1986).

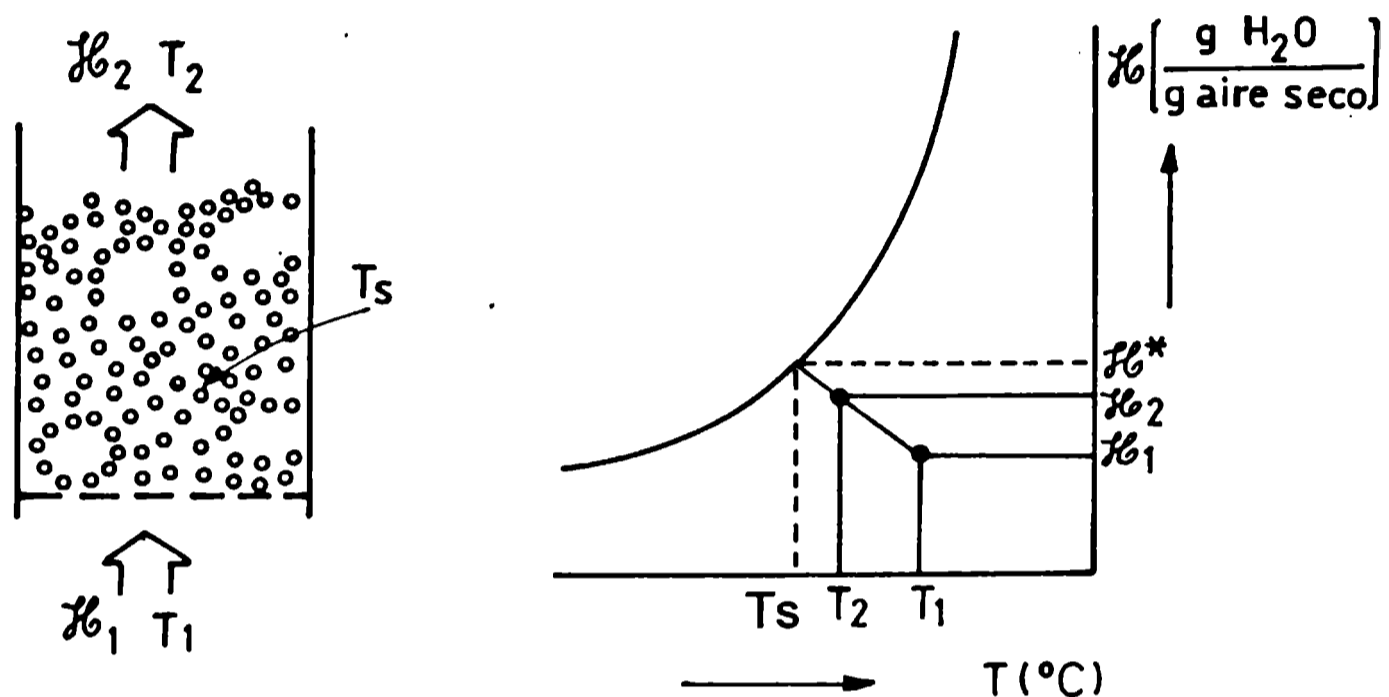
Vázquez y Calvelo, 1980, 1983a, propusieron una metodología muy segura para la determinación de la temperatura superficial de los sólidos.

Utilizaron técnicas de deshidratación de las partículas en el período de velocidad de secado constante. Los sólidos se colocaban húmedos en el lecho y se secaban por tiempos cortos para permanecer en el período indicado.

Bajo dichas condiciones el calor transferido por el aire igualaba el calor latente del agua evaporada, pudiendo alcanzarse el estado estacionario, y fundamentalmente se mantenía la temperatura de la superficie de los sólidos igual a la de bulbo húmedo, moviéndose la temperatura del aire en su recorrido a través del lecho aislado térmicamente del medio, por la correspondiente adiabática del diagrama psicrométrico.

El esquema de funcionamiento de las experiencias se muestra en la Fig. 3.5.

Fig. 3.5: Esquema de las condiciones de operación utilizadas en las experiencias para la determinación de los coeficientes de transferencia gas – partícula en lecho fluidizado. (Adaptado de Vázquez y Calvelo, 1980).



De acuerdo al esquema planteado, midieron las temperaturas de bulbo seco y húmedo del aire de secado. Además, consideraron que en condiciones de fluidización agregativa la fase homogénea sólido – gas se mantiene en condiciones de mínima fluidización y que el exceso de aire circula a través de las burbujas (Davidson y Harrison, 1971).

Entonces calcularon la velocidad del aire alrededor de las partículas mediante:

$$v_{mf}' = v_{mf} / \epsilon_{mf} \quad (3.9)$$

velocidad esta necesaria para estimar el coeficiente de transferencia de calor gas – partícula,  $h$ .

$$\ln \frac{(T_s - T_2)}{(T_s - T_1)} = \frac{6h(1 - \varepsilon_{mf}) H_{mf}}{G_0 C_p D_p} \quad (3.13)$$

En la que se ha reemplazado  $H(1 - \varepsilon)$ , por su igual  $H_{mf}(1 - \varepsilon_{mf})$  de la ec. (3.4).

Con las medidas efectuadas, en un lecho aislado térmicamente del entorno, calcularon  $h$  con la ec. (3.13).

En un primer trabajo, Vázquez y Calvelo, 1980, obtuvieron los  $h$  para partículas esféricas y propusieron una correlación en términos del factor de Colburn,  $J_H$ . En otro trabajo posterior, Vázquez y Calvelo, 1983b, extendieron la metodología a la obtención del  $h$  para partículas no esféricas (cubos y bastones), obteniendo una correlación generalizada, también en términos del factor de Colburn, según:

$$J_H = 0,204 \text{Re}^{-0,563} \text{Ar}^{0,179} \quad (3.14)$$

En la cual,

$$J_H = Nu \text{Re}^{-1} \text{Pr}^{-1/3}$$

$Nu = h D_p / k$ ;  $k$  es la conductividad térmica del aire

$$\text{Re} = G_0 D_p / \mu \quad (3.15)$$

$$\text{Re}' = G_0 D_p / \mu(1 - \varepsilon)$$

$$\text{Ar} = D_p^3 g \rho (\rho_s - \rho) / \mu^2$$

En las correlaciones de las ecs. (3.15)  $D_p$ , el diámetro efectivo de las partículas, era definido como:  $D_p = D_e \Psi$  (3.16), donde  $D_e$  es el diámetro equivalente (diámetro de una esfera de igual volumen que la partícula) y  $\Psi$  es el factor de

esfericidad (la relación entre el área de una esfera de igual volumen que la partícula y el área de la partícula).

La correlación de la ec. (3.14) permite estimar los coeficientes de transferencia de calor gas – partícula para partículas de distintas formas, en términos del  $D_p$ , y para distintas temperaturas de trabajo en el lecho consideradas a través de las propiedades térmicas del sistema.

### 3.3.2.- Coeficientes efectivos de transferencia de calor gas – partícula en lechos fluidizados

Ya se comentó que para el diseño de equipos de congelación es necesario, entre otros, contar con modelos para el cálculo de tiempos de congelación de las partículas individuales.

Todos los modelos existentes para ello (ver capítulo 2 de este trabajo) proponen el cálculo en términos de una partícula expuesta a una temperatura de refrigerante constante ( $T_a$ ) y el coeficiente de transferencia de calor definido como:

$$q = h (T_s - T_a) \quad (3.17)$$

Donde  $q$  es el flujo calórico en la interfase y  $T_s$  la temperatura de la superficie del sólido a congelar.

En un lecho fluidizado prevalecen otras condiciones ya que el medio refrigerante ingresa al lecho a una temperatura  $T_1$  y lo abandona a otra temperatura distinta  $T_2$  (ver Fig. 3.5), variando a través de la altura del lecho.

La temperatura de salida del aire  $T_2$ , varía con la altura y la longitud del lecho ya que el alimento en su avance hacia la salida cambia permanentemente su estado térmico. Además, las partículas no permanecen en una posición estacionaria sino que se mueven en forma aleatoria y por lo tanto estarán expuestas a distintas temperaturas.

A los efectos de utilizar los modelos de cálculo de tiempos de congelación existentes se puede asumir la variación de la temperatura del medio refrigerante en términos de una temperatura constante,  $T_1$ , la de ingreso del aire al lecho, y un coeficiente de transferencia de calor efectivo,  $h_e$ , como función de la altura de lecho.

Vázquez y Calvelo, 1983b, propusieron:

$$q = h_e (T_s - T_a) \quad (3.18)$$

Supusieron flujo pistón en el aire y mezclado total en los sólidos, y efectuaron un balance macroscópico diferencial de energía en un diferencial de longitud de lecho en el sentido de avance global de los sólidos,  $dz$ , de acuerdo a:

$$Q = G W dz C_p (T_2 - T_1) \quad (3.19)$$

Donde  $Q$  es la cantidad total de calor que se transfiere y  $W$  es el ancho del lecho considerado.

Del mismo modo en un diferencial de altura de lecho,  $dy$ :

$$G C_p dT = h a (T_s - T) dy \quad (3.20)$$

Integrando la ec. (3.20) entre la entrada y salida del lecho ( $y = 0$  e  $y = H$ ), y sustituyendo  $T_2$  en la ec. (3.19), obtuvieron:

$$Q = G W dz C_p (T_s - T_1) \left[ 1 - e^{-haH/GC_p} \right] \quad (3.21)$$

Como la cantidad total de energía se transfiere a una temperatura constante  $T_1$ , definieron el coeficiente efectivo de transferencia de calor, como:

$$Q = h_e a W H dz (T_s - T_1) \quad (3.22)$$

Igualando las ecs. (3.21) y (3.22) y despejando  $h_e$ , queda:

$$h_e = G C_p \left[ 1 - e^{-(haH/GC_p)} \right] / a H \quad (3.23)$$

Con las ecs. (3.14), (3.15) y (3.23), se puede obtener el coeficiente de transferencia de calor efectivo que puede utilizarse para el cálculo de los tiempos de congelación de las partículas en lecho fluidizado.

En este trabajo se utilizarán las ecs. (3.14), (3.15) y (3.23), para el cálculo de  $h_e$  y la ec. (2.57) (ver capítulo 2 de este trabajo) para la estimación de los tiempos de congelación.

### 3.4.- Movimiento de las partículas en el lecho fluidizado

La información descrita en el capítulo 2 de este trabajo y la desarrollada en los apartados 3.2 y 3.3 de este capítulo es suficiente para diseñar equipos de

congelación en los que el alimento permanece quieto en el equipo o avanza en flujo pistón, es decir en los cuales no existe mezclado de sólidos en la dirección de avance del producto.

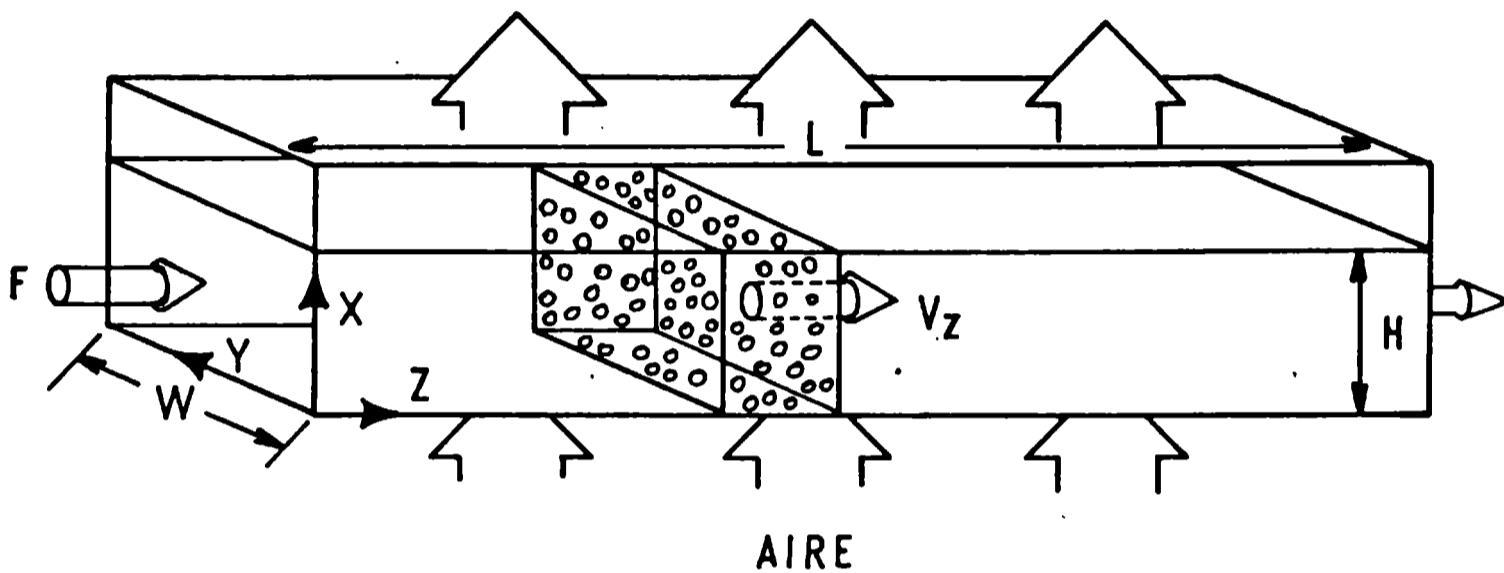
Como ya se anticipó, debido a las características de la fluidización agregativa en lechos fluidizados con gases, las burbujas al llegar a la superficie del lecho proyectan partículas hacia atrás y hacia delante del flujo principal del sistema. Por ende se genera una distribución de tiempos de residencia, debido a ello no es suficiente el cálculo de los tiempos de congelación para obtener el tiempo de permanencia del producto en estos equipos.

Respecto de este tema la bibliografía existente es muy escasa. Se ha encontrado un sólo trabajo en el que se estudia la distribución de tiempos de residencia en lechos fluidizados continuos para alimentos.

El mencionado trabajo, Vázquez y Calvelo, 1983b, propuso estudiar la distribución de tiempos de residencia mediante la comprobación experimental de un balance de materia para partículas marcadas, convenientemente alimentadas a un lecho fluidizado continuo funcionando en estado estacionario con el mismo material sin marcar.

Considerando un esquema del funcionamiento del lecho fluidizado como el que se muestra en la Fig. 3.6, si en el lecho se alimentan partículas en forma continua hasta alcanzar el estado estacionario y a partir de ese momento se alimenta un escalón de partículas marcadas, se puede plantear un balance de partículas marcadas (Vázquez y Calvelo, 1983b), según:

Fig. 3.6: Esquema del volumen de control para un lecho fluidizado continuo.



$$\frac{\partial w}{\partial t} + v_z \frac{\partial w}{\partial z} = D_z \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \quad (3.24)$$

Donde  $w$  es la fracción másica de partículas marcadas,  $v_z$  es la velocidad global de los sólidos a través del lecho y  $D_z$  es el coeficiente que caracteriza el grado de mezclado de las partículas en el sentido del flujo de los sólidos y que se denomina coeficiente de mezclado longitudinal.

Las correspondientes condiciones de contorno son.



## Distribución de tiempos de residencia de alimentos en lecho fluidizado

---

$$\begin{aligned}
 t \leq 0 & \quad w = 0 & \quad z > 0 \\
 t > 0 & \quad v_z (1 - w) = -D_z \frac{\partial w}{\partial z} & \quad z = 0 \\
 t > 0 & \quad w = 0 & \quad z = \infty
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

Definiendo una coordenada móvil adimensional:

$$j = (z - v_z t) / \sqrt{4 D_z t} \tag{3.26}$$

Las ecs. (3.24) y (3.25) se pueden escribir:

$$2 j \frac{\partial w}{\partial j} + \frac{\partial^2 w}{\partial j^2} = 0 \tag{3.27}$$

$$j = -v_z t / \sqrt{4 D_z t} \quad w - 1 = \frac{1}{v_z} \left( \sqrt{\frac{D_z}{4t}} \right) \frac{\partial w}{\partial j} \tag{3.28}$$

$$j = \infty \quad w = 0$$

La ec. (3.27) y las condiciones de contorno (3.28) fueron resueltas para la fracción másica de partículas marcadas a la salida del lecho,  $w_L$ , según:

$$w_L = \frac{1 - \operatorname{erf} \left[ (1 - \tau) / (2 \sqrt{\tau / Pe}) \right]}{1 + \operatorname{erf} \left[ \frac{\sqrt{\tau Pe}}{2} \right] + \frac{e^{-(\tau Pe/4)}}{\sqrt{\pi Pe}}} \tag{3.29}$$

## Distribución de tiempos de residencia de alimentos en lecho fluidizado

---

Donde  $\tau = v_z t / L$  y  $Pe = v_z L / D_z$ , siendo  $Pe$  el número de Peclet y  $L$  la longitud del lecho.

La velocidad  $v_z$  puede ser definida en función del flujo másico global de sólidos,  $F$ , a través de:

$$v_z = \frac{F}{\rho_s (1 - \varepsilon) HW} \quad (3.30)$$

Los autores definieron que una buena performance del lecho fluidizado se obtenía considerando que el 95 % de las partículas abandonarían el lecho con un tiempo de residencia mayor o igual que el tiempo de congelación.

Entonces se puede reemplazar  $\tau = \tau_{min}$  para  $w_L = 0,05$  en la ec. (3.29), y considerando números de  $Pe > 2$ , se obtuvo:

$$Pe = \frac{5,41 \tau_{min}}{(1 - \tau_{min})^2} \quad (3.31)$$

Donde  $\tau_{min}$  es el tiempo adimensional mínimo de residencia.

Vázquez y Calvelo, 1983b, comprobaron experimentalmente el modelo indicado trabajando con partículas esféricas, y propusieron la siguiente correlación para  $D_z$ , en función de la velocidad superficial del aire,  $v_0$ , y de la altura de lecho expandido,  $H$ :

$$D_z = 9,51 \times 10^{-2} H^{2,60} v_0^{3,54} \quad (3.32)$$

Con un coeficiente de correlación de 0,98.

La correlación de la ec. (3.32) se puede utilizar para la obtención del coeficiente de mezclado longitudinal,  $D_z$ , pero sólo es válido para partículas esféricas. A los efectos de contar con información para diseñar y optimizar equipos de congelación en lecho fluidizado se requiere modelos de cálculo de  $D_z$  que contemple la mayoría de los alimentos que se puedan procesar en lechos fluidizados.

### **3.5.- Comportamiento de partículas no esféricas en lechos fluidizados**

A los efectos de obtener una correlación que permita obtener los coeficientes de dispersión longitudinal para varias formas de producto, se propuso realizar experiencias, adoptando la metodología presentada en los apartados anteriores de este capítulo, y tratando de verificar si el modelo propuesto por Vázquez y Calvelo, 1983b, se puede aplicar a partículas no esféricas. Si se observa la correlación de la ec. (3.32), a los efectos de estimar los coeficientes de dispersión longitudinal es necesario obtener la altura de lecho expandido,  $H$ .

Esta es función de las propiedades de las partículas estudiadas, y de las características del lecho fluidizado.

Por ende es imprescindible realizar experiencias fluidodinámicas para obtener  $H$ , que a la vez son necesarias para verificar que ocurra una buena fluidización.

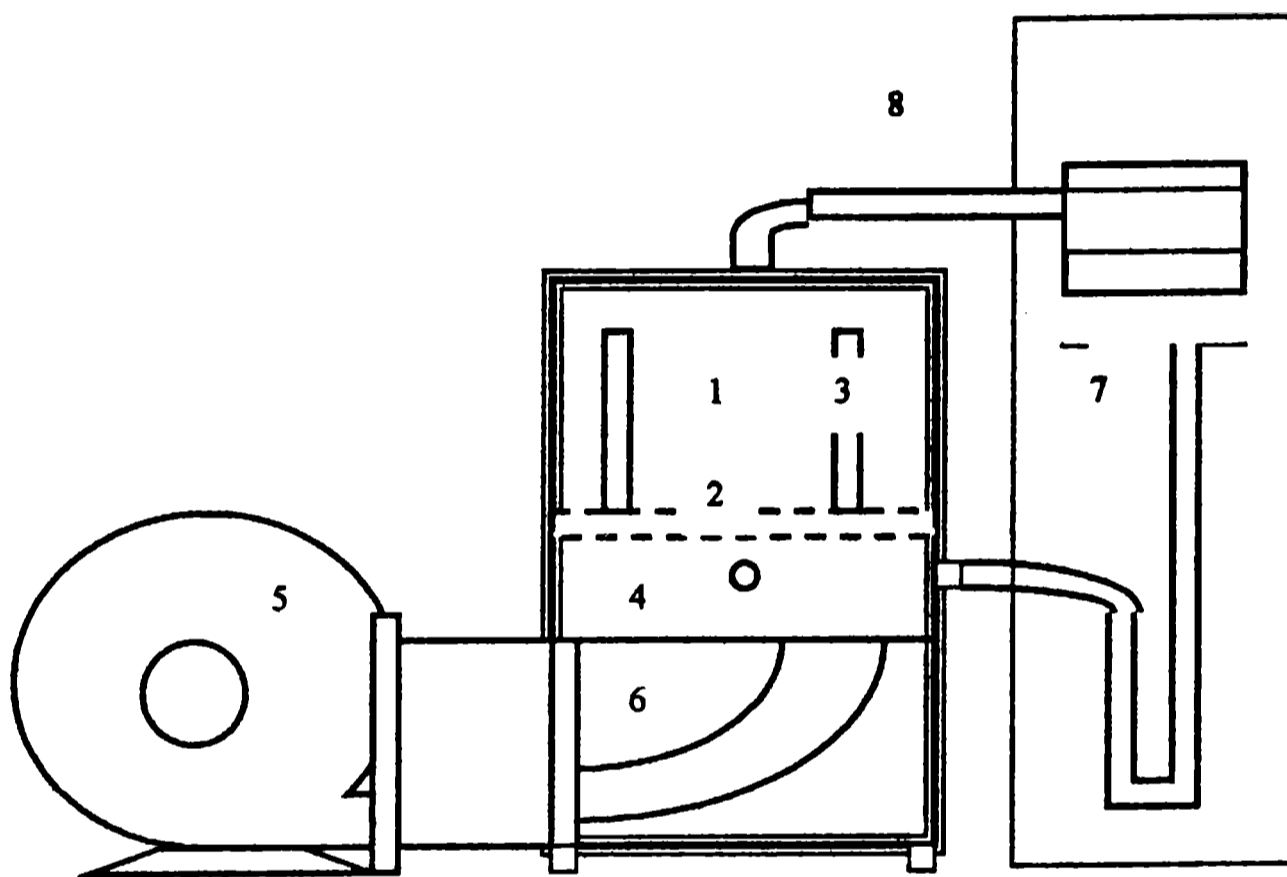
#### **3.5.1.- Fluidodinámica del lecho fluidizado para partículas no esféricas**

Esta se determinó efectuando experiencias con partículas de madera y de papa, con formas de cubo y paralelepipedo rectangular (bastón), en un lecho fluidizado discontinuo que se describe a continuación.

### 3.5.1.1.- Descripción del equipo experimental para las experiencias fluidodinámicas

El esquema del equipo utilizado en las experiencias fluidodinámicas se muestra en la Fig. 3.7.

**Fig. 3.7: Esquema del lecho fluidizado discontinuo utilizado para las experiencias fluidodinámicas**



1 Sector de medición

2 Grilla

3 Escalas graduadas para medir la altura de lecho

4 Cámara inferior a la grilla donde se conectaron las tomas de presión

5 Soplador de aire

6 Cámara para uniformizar el flujo de aire

7 Medidor de presión

8 Medidor de velocidad de aire

## **Distribución de tiempos de residencia de alimentos en lecho fluidizado**

---

El lecho discontinuo de sección rectangular, 24,5 x 32,0 cm, construido con paredes de vidrio que permitían visualizar el comportamiento del lecho y medir la altura del mismo, contaba en su base con una grilla metálica con 23 % de área libre, perforada con agujeros de 1,25 mm de diámetro, en arreglo triangular.

El sistema se conectaba a un soplador centrifugo, de 1,5 HP con un flujo máximo de aire de 70 m<sup>3</sup>/min a una presión de descarga de 28 mm de columna de agua.

Mediante una cámara de mezclado del flujo provista de deflectores orientadores del flujo de aire se lograba una buena distribución del fluido debajo de la grilla.

El soplador contaba con una válvula en la succión para regular la velocidad de aire en el lecho.

El lecho fluidizado discontinuo se equipó con un manómetro de columna de agua, conectado a cuatro tomas ubicadas debajo de la grilla (una en cada pared).

Este permitía medir la pérdida de carga a través de la grilla y del lecho de partículas, mediante el desplazamiento de la columna de agua que se leía en escalas graduadas adosadas al manómetro.

La velocidad superficial del aire se medía en la sección del lecho vacío, suficientemente alejado de la superficie de las partículas para evitar la interferencia de las burbujas en las medidas, con un velómetro ubicado en la parte superior del equipo.

La altura del lecho fijo y expandido de las partículas se media a través de escalas graduadas fijadas en las paredes de vidrio, dos escalas en cada pared, del equipo.

### **3.5.1.2.- Descripción de las partículas utilizadas en las experiencias**

Para llevar a cabo las experiencias fluidodinámicas se utilizaron las partículas que se describen en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1: Características de las partículas utilizadas en este trabajo**

<b>Partículas</b>			
<b>Forma</b>	<b>Material</b>	<b>Medidas (cm)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Cubos	Madera	1,00	559
Cubos	Madera	1,50	949
Bastones	Madera	1,00 x 1,00 x 5,00	559
Cubos	Papa	0,89	1070
Cubos	Papa	1,05	1070
Bastones	Papa	1,05 x 1,05 x 5,00	1070

### **3.5.1.3.- Descripción de las técnicas utilizadas para las experiencias fluidodinámicas**

#### **3.5.1.3.1.- Pérdida de carga del lecho de partículas**

La pérdida de carga medida correspondía a la suma de la pérdida de carga de la grilla y del lecho de partículas. Por ello fue necesario medir la pérdida de carga de la grilla para descontarla de la total y así obtener la correspondiente al lecho de partículas.

**Pérdida de carga de la grilla:** El equipo vacío, sin sólidos, se colocaba en estado estacionario a la velocidad deseada y se obtenía la diferencia de presión entre la parte inferior de la grilla y la ambiente, leyendo el desplazamiento de la columna de agua en el manómetro. Para cada velocidad de aire se efectuaban 10 lecturas siempre comenzando con el equipo apagado. Las diferencias entre las lecturas mínimas y máximas del desplazamiento de la columna de agua no superaban el 5 %.

La velocidad superficial del aire se medía con un velómetro, en la sección libre del lecho a una distancia de la superficie de las partículas tal que la corriente no era influenciada por las burbujas características de estos lechos.

Los valores de pérdida de carga correspondientes a cada velocidad de aire se expresaban como promedio de las 10 repeticiones y en cm de columna de agua.

**Pérdida de carga del lecho de partículas:** Se cargaba el lecho con cantidades de sólidos suficientes para obtener determinadas alturas de lecho fijo. Se fluidizaban durante 2 minutos, se dejaban decantar sin corriente de aire. Luego se colocaba el

equipo en estado estacionario, a la velocidad superficial de aire deseada y se medía la pérdida de carga del mismo modo que la correspondiente a la grilla.

Del valor obtenido se descontaba el valor correspondiente a la grilla para la misma velocidad, para obtener la pérdida de carga del lecho de sólidos. Se efectuaron experiencias para alturas de lecho fijo de entre 3 y 10 cm. Cada valor que se informa es promedio de 5 repeticiones.

En el caso de las experiencias con partículas de papa, para cada experiencia se partía de materia prima fresca dado que durante las mediciones sufrían deshidratación parcial.

### **3.5.1.3.2.- Porosidad del lecho de partículas**

La determinación experimental de la porosidad de lecho fijo se efectuaba colocando en el equipo de medición una masa conocida de partículas, las cuales se fluidizaban durante 2 minutos y luego, apagando el soplador, se dejaban decantar hasta su estado de reposo. En dicha condición se leían las alturas de partículas en cada una de las 8 escalas colocadas en las paredes de vidrio del equipo. La altura correspondiente se obtenía promediando las 8 lecturas.

Para medir la porosidad del lecho expandido, se colocaba en el lecho una masa de partículas conocida, se fluidizaban durante 2 minutos, se dejaban decantar sin corriente de aire y luego se prendía el soplador dejando circular aire a la velocidad superficial elegida.

En estas condiciones se efectuaba la lectura de las 8 escalas como en el caso anterior y la altura correspondiente se obtenía promediando los 8 valores obtenidos.



## **Distribución de tiempos de residencia de alimentos en lecho fluidizado**

---

La velocidad superficial del aire se medía con un velómetro, en la sección libre del lecho a una distancia de la superficie de las partículas tal que la corriente no era influenciada por las burbujas características de estos lechos.

En el caso de las experiencias con partículas de papa, para cada experiencia se partía de materia prima fresca dado que durante las mediciones sufrían deshidratación parcial.

Con las lecturas realizadas, la masa de partículas y sus correspondientes propiedades se calculaba la porosidad del lecho según:

$$\varepsilon = 1 - \frac{m_s}{\rho_s S H} \quad (3.33)$$

Donde  $m_s$  es la masa de partículas,  $S$  es la sección del lecho y  $H$  la altura de lecho medida. Se trabajó con alturas de lecho fijo comprendidas entre 3 y 10 cm y con velocidades superficiales de aire de hasta 3 m/s.

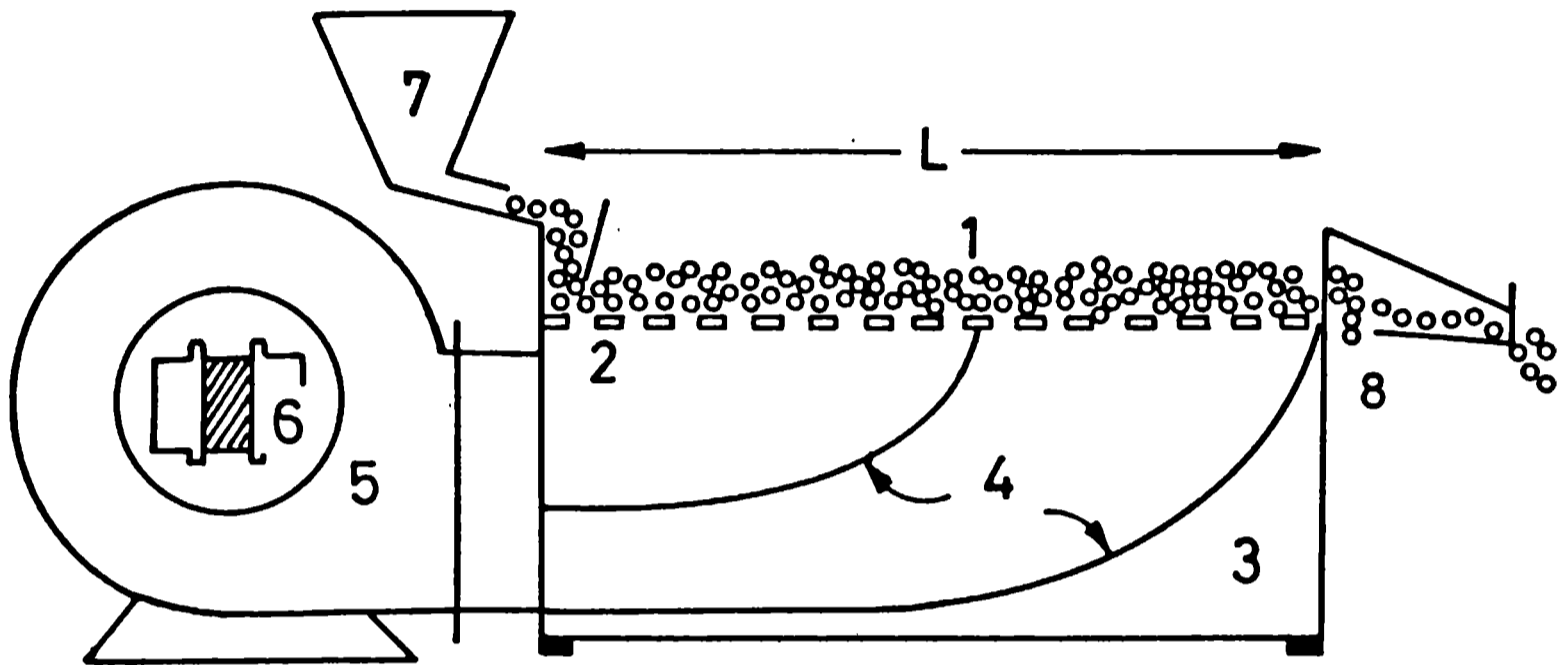
Cada punto de porosidad informada es promedio de tres determinaciones en las mismas condiciones.

### **3.5.2.- Distribución de tiempos de residencia de partículas no esféricas en lecho fluidizado continuo**

#### **3.5.2.1.- Descripción de equipo experimental**

El esquema del equipo experimental utilizado se muestra en la Fig. 3.8.

**Fig. 3.8: Esquema del lecho fluidizado continuo utilizado para la determinación de los tiempos de residencia de partículas no esféricas**



- 1 Lecho fluidizado de partículas
- 2 Grilla
- 3 Cámara para uniformizar el flujo de aire
- 4 Deflectores
- 5 Soplador
- 6 Válvula para regular el flujo de aire
- 7 Alimentador vibratorio de partículas
- 8 Compuerta de altura regulable

Se utilizaron dos lechos continuos uno de 40 cm de ancho y 160 cm de longitud y el otro de 25 x 60 cm. Ambos contaban en su base con una grilla metálica,

## **Distribución de tiempos de residencia de alimentos en lecho fluidizado**

---

igual a la utilizada en el equipo discontinuo descrito en 3.5.1.1 de este capítulo, con 23 % de área libre, perforada con agujeros de 1,25 mm en arreglo triangular.

El aire era inyectado a una cámara ubicada debajo del lecho, mediante dos sopladores centrífugos, montados perpendicularmente a la dirección de flujo de los sólidos (perpendiculares a la longitud del lecho) que impulsaban un flujo máximo de aire de 155 m<sup>3</sup>/min a una presión de descarga de 95 mm de columna de agua.

Mediante la utilización de deflectores se orientaba el aire de modo tal que por sobre la grilla la velocidad superficial del aire era uniforme en todos los puntos.

Los sopladores contaban con válvulas en la succión que permitían regular la velocidad de aire en el lecho.

El lecho fluidizado continuo se equipó con una tolva de alimentación, que vibraba con distintas frecuencias mediante la acción de un motor excéntrico de velocidad regulable. Esta permitía, con la ayuda de una válvula, regular el flujo de la alimentación de las partículas en el lecho.

En la salida del lecho continuo se instaló una compuerta de altura regulable que permitía asegurar la altura del lecho de partículas que abandonaban el mismo, rebalsando sobre la mencionada compuerta.

La velocidad superficial del aire se medía con un velómetro, en la sección libre del lecho, a una distancia de la superficie de las partículas tal que la corriente no era influenciada por las burbujas características de estos lechos.

### **3.5.2.2.- Descripción de las partículas utilizadas en las experiencias**

## Distribución de tiempos de residencia de alimentos en lecho fluidizado

---

Para llevar a cabo las experiencias de distribución de tiempos de residencia se utilizaron las partículas que se describen en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2: Características de las partículas utilizadas en este trabajo**

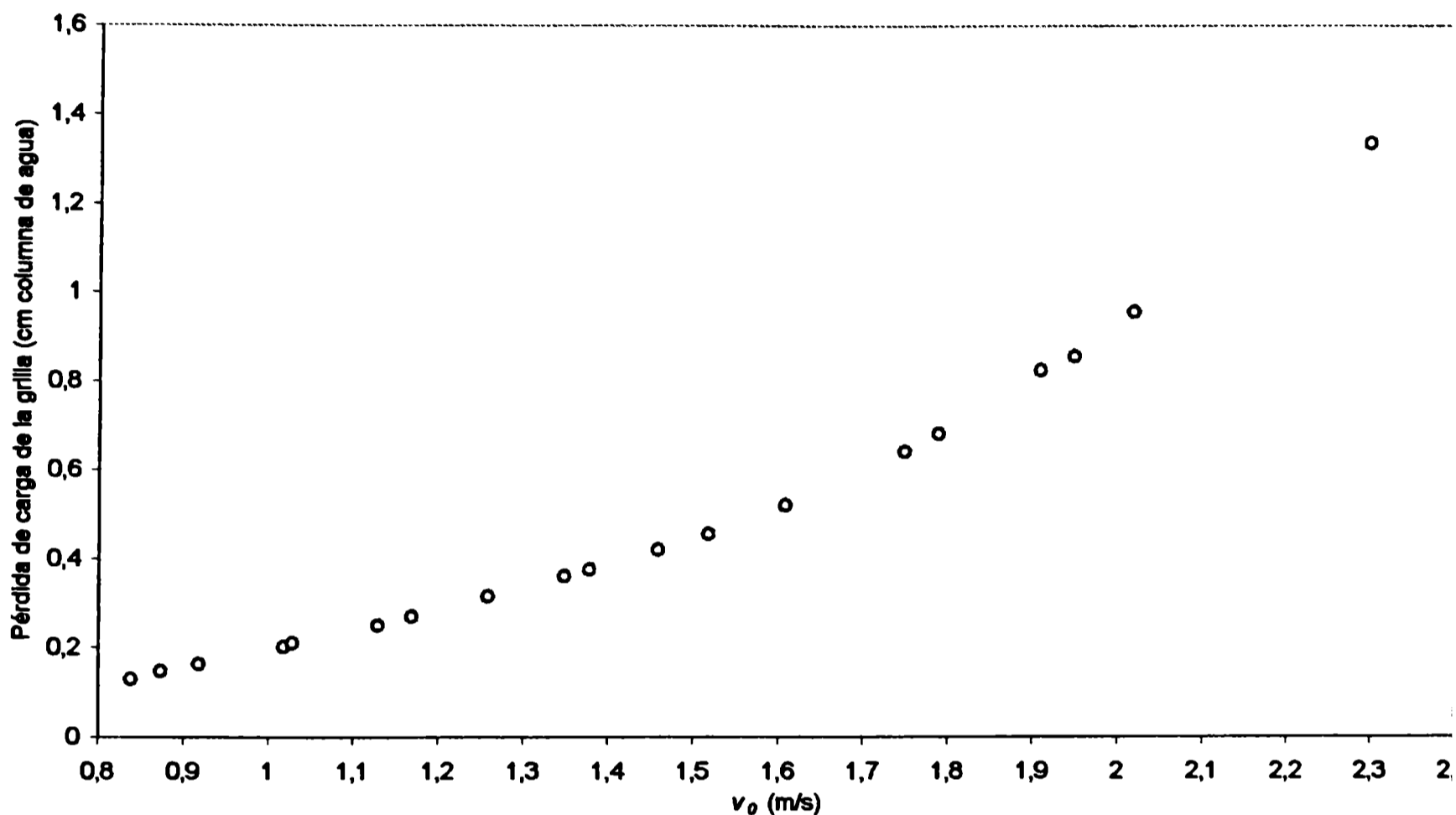
<b>Partículas</b>			
<b>Forma</b>	<b>Material</b>	<b>Medidas (cm)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Cubos	Madera	1,00	559
Bastones	Madera	1,00 x 1,00 x 5,00	559

Parte de las partículas se utilizaban sin colorear y parte coloreadas. Las partículas coloreadas se obtenían tiñéndolas mediante inmersión en soluciones de violeta de genciana, durante 4 horas. Luego de teñidas se escurrían convenientemente y se dejaban secar al ambiente hasta alcanzar el mismo peso que las partículas sin teñir.

### **3.5.2.3.- Descripción de las técnicas utilizadas para las experiencias de distribución de tiempos de residencia**

Para la medición de la distribución de tiempos de residencia se procedía de la siguiente manera: se colocaba el lecho fluidizado en la condición de velocidad de aire deseada. Se comenzaba a alimentar partículas sin marcar, previa regulación de la altura deseada de lecho mediante la compuerta instalada a la salida del mismo. A continuación se verificaba que el equipo funcionara en estado estacionario, el cual se controlaba pesando el material sólido recolectado a la salida por intervalos regulares.

Fig. 3.9: pérdida de carga de la grilla en función de la velocidad superficial del aire



Para facilitar el uso de estos datos y evitar el error de lectura en el gráfico de la Fig. 3.9, se regresionaron los valores de pérdida de carga mediante una función polinómica que se presenta en la ec. (3.34):

$$\Delta P \text{ (cm col. agua)} = -0,1754 + 0,5124v_0 - 0,3029v_0^2 + 0,1596v_0^3 \quad (3.34)$$

Con un coeficiente de regresión de 0,9995.

### 3.6.2.- Pérdida de carga del lecho

En las Figuras 3.10 y 3.11 se presentan los resultados obtenidos para la pérdida de carga del lecho, por unidad de altura de lecho, en función de  $v_0$ , para las partículas utilizadas en este trabajo. En la Fig. 3.10 se muestran los datos obtenidos para las partículas de madera, y en la Fig. 3.11 los correspondientes a las partículas de papa.

**Fig. 3.10: Pérdida de carga para lechos de partículas de madera en función de  $v_0$ .**

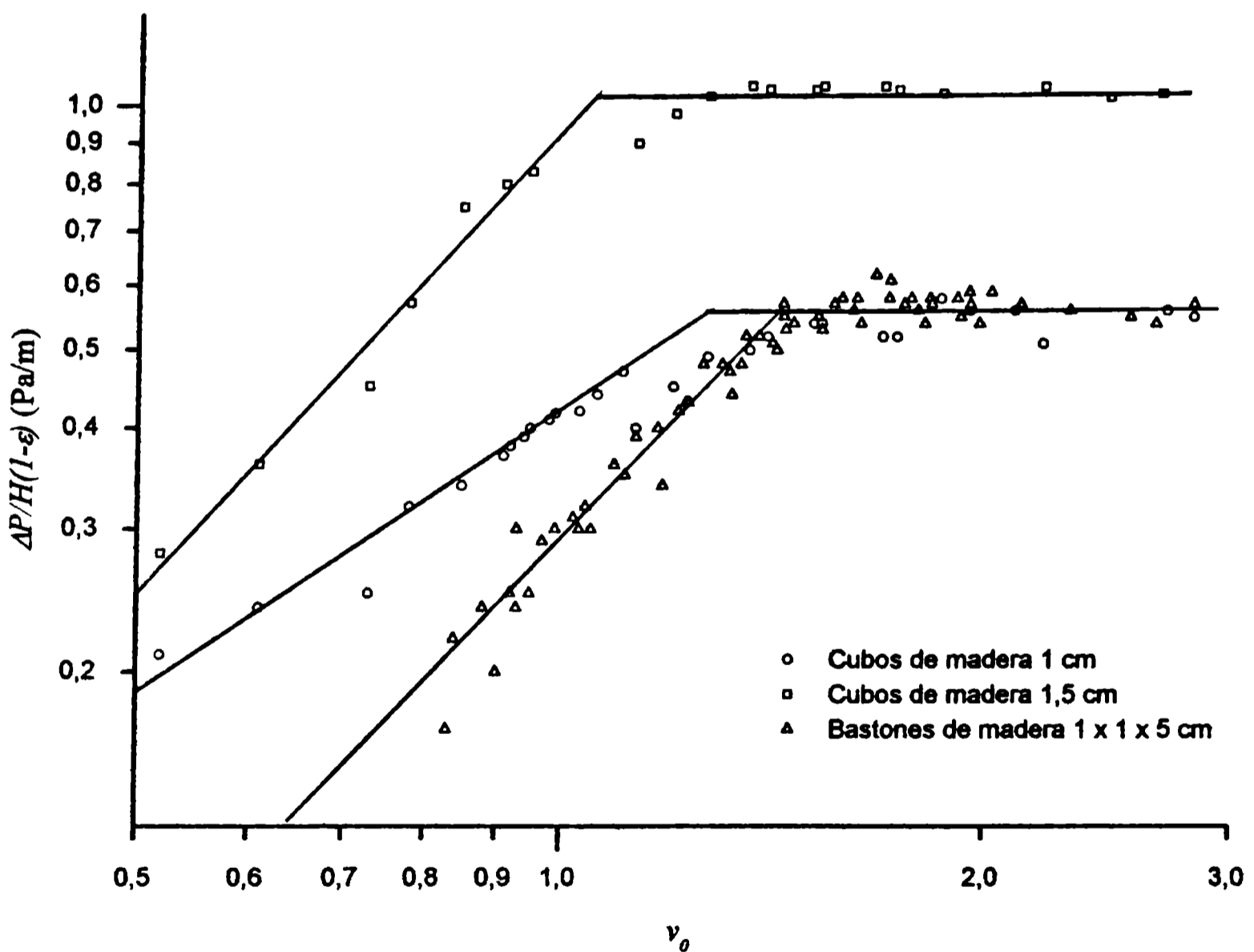
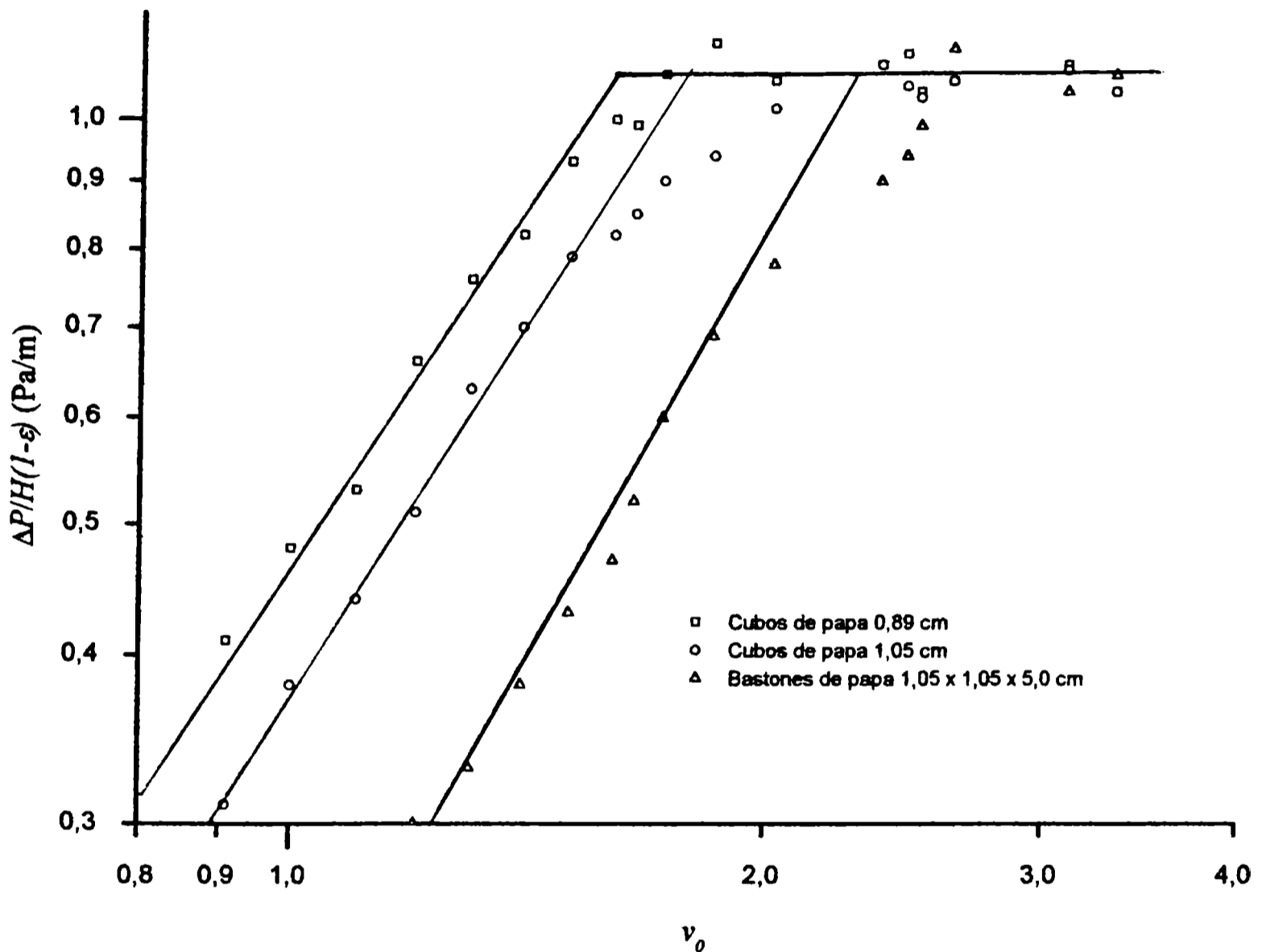


Fig. 3.11: Pérdida de carga para lechos de partículas de papa en función de  $v_0$ .



Para todos los sólidos se observa, en las Figs. 3.10 y 3.11, que los valores experimentales para la pérdida de carga por unidad de altura de lecho se pueden agrupar según tres zonas bien definidas.

## Distribución de tiempos de residencia de alimentos en lecho fluidizado

---

Una primera zona, que tiende a ser recta, para velocidades de aire menores que la de mínima fluidización. Los valores comprendidos en esta zona, de lecho fijo, correlacionan bien con ecuaciones del tipo de la de Ergun para lechos rellenos:

$$\frac{\Delta P}{(1-\varepsilon)H} = \frac{K_1 \mu (1-\varepsilon)}{Dp^2 \varepsilon^3} v_0 + \frac{K_2 \rho}{Dp \varepsilon^3} v_0^2 \quad (3.35)$$

Mediante regresión lineal, por el método de Marquardt (Marquardt, 1963), de ésta primera zona se obtuvieron los valores de las constantes  $K_1$  y  $K_2$  de la ec. (3.35) para todas las partículas. Los valores regresionados se presentan en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3: Valores de las constantes  $K_1$  y  $K_2$  de la ec. (3.35), y el correspondiente coeficiente de regresión.**

Partícula	Medidas (cm)	$K_1$	$K_2$	$R$
Cubos madera	1	263	1,97	0,982
Cubos de madera	1,5	287	2,07	0,977
Bastones madera	1 x 1 x 5	400	3,75	0,965
Cubos papa	0,89	302	2,13	0,980
Cubos papa	1,05	299	2,09	0,986
Bastones papa	1,05 x 1,05 x 5	387	3,67	0,959
Arvejas	0,7	159	1,86	0,994

En las Figs. 3.10 y 3.11 la ec. (3.35) está representada por la línea llena, con las constantes presentadas en la Tabla 3.3.



## Distribución de tiempos de residencia de alimentos en lecho fluidizado

---

Los valores correspondientes a la pérdida de carga en lechos fijos de arvejas se aproximan razonablemente a la ecuación de Ergun, ya que  $K_1 = 159$  y  $K_2 = 1,86$  son muy próximos a los propuestos por dicho autor ( $K_1 = 150$  y  $K_2 = 1,75$ , respectivamente). Los cubos y los bastones no se apartan de la ecuación de Ergun en su dependencia con  $v_0$  y  $\varepsilon$ , sino en las constantes  $K_1$  y  $K_2$ . Este apartamiento ya había sido observado por Escardino y col., 1970, para granos y semillas no esféricas. Cuanto más baja es la esfericidad más altos son los valores de las constantes  $K_1$  y  $K_2$ .

El apartamiento a la ecuación de Ergun que presentan las partículas no esféricas puede ser atribuido a que la porosidad del lecho es anisotrópica, debido a lo cual se produce una mayor tortuosidad en la dirección de circulación del aire, con un mayor recorrido total y, por ende, mayor pérdida de carga.

**La segunda zona**, para valores de velocidad próximos a la de mínima fluidización, no presenta una tendencia lineal. Los datos comprendidos en ella corresponden a estados del lecho en el cual las partículas comienzan a separarse sin perder el contacto entre sí. Esta zona es tanto más extendida cuanto más se alejan las partículas de la forma esférica.

**La tercera zona**, para velocidades de aire superiores a la de mínima fluidización, también tiende a una recta horizontal. Esta corresponde a la zona de fluidización plena, en donde debe cumplirse la ec. (3.2), por ende la pérdida de carga por unidad de altura de lecho debe tender a permanecer constante. La línea llena, que fue trazada en esta zona en las Figs. 3.10 y 3.11, corresponde a:  $(\rho_s - \rho) g$ , que es un valor constante para cada sólido. De la intersección de las líneas llenas, en las Figs. 3.10 y 3.11, se obtuvo la velocidad de mínima fluidización. Los valores correspondientes se presentan en la tabla 3.4.

**Tabla 3.4: Velocidad de mínima fluidización para las partículas estudiadas en este trabajo**

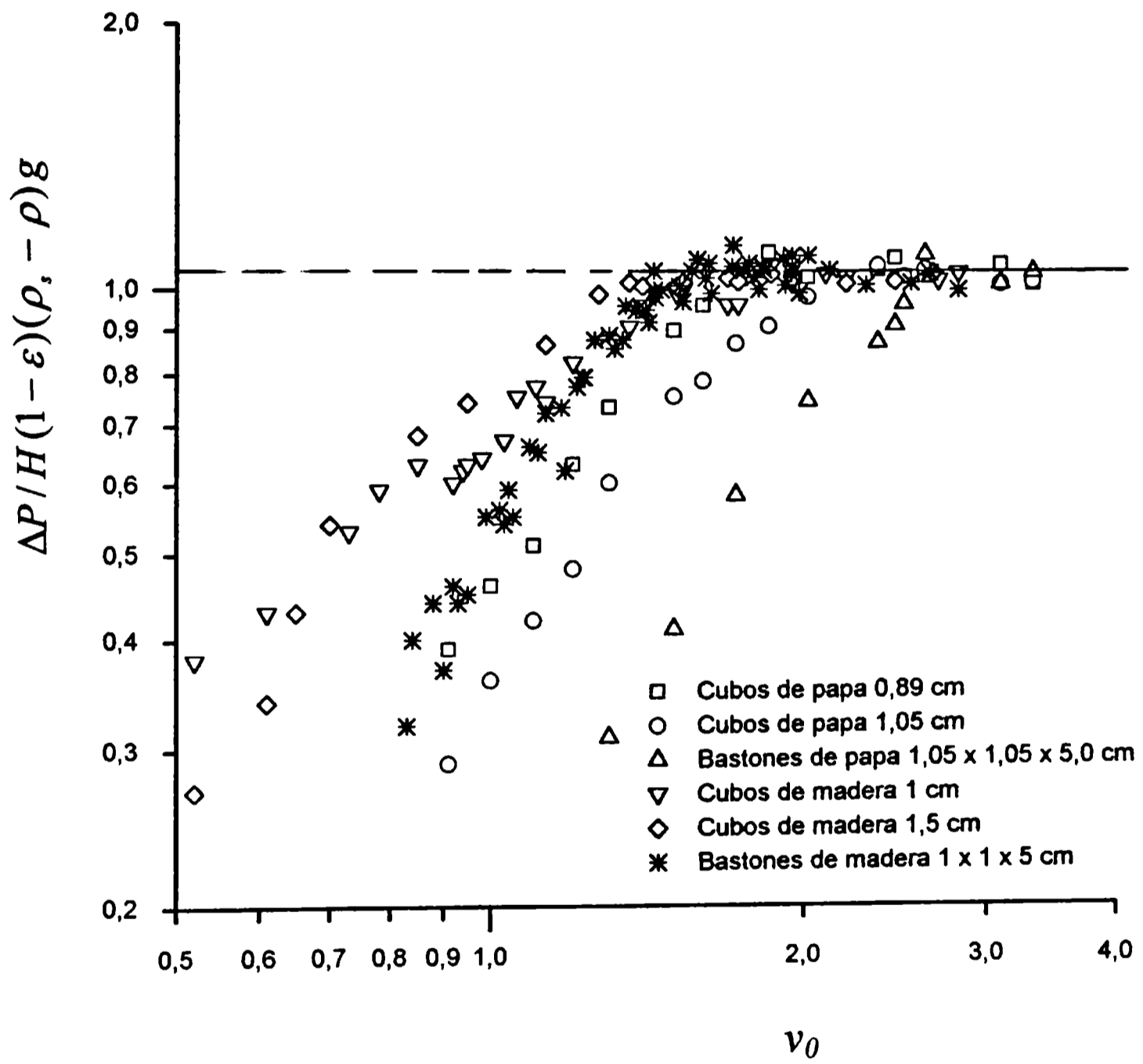
<b>Partícula</b>	<b>Medidas (cm)</b>	<b><math>v_{mf}</math> (m/s)</b>
Cubos madera	1	1,25
Cubos de madera	1,5	1,30
Bastones madera	1 x 1 x 5	1,40
Cubos papa	0,89	1,57
Cubos papa	1,05	1,70
Bastones papa	1,05 x 1,05 x 5	2,36
Arvejas (Vázquez y Calvelo, 1980)	0,7	1,19

Asimismo, y a los efectos de comparar el comportamiento de las distintas partículas y del sistema elegido, se ha representado en la Fig. 3.12 la pérdida de carga en función de la velocidad del aire, expresada según:

$$\frac{\Delta P}{H(1-\varepsilon)(\rho_s - \rho)g} \leq 1 \quad (3.36)$$

Si se tiene en cuenta la ec. (3.2) se puede ver que la ec. (3.36) toma el valor 1 cuando el lecho esta fluidizado. Regresionando por el método de Marquardt los valores experimentales de pérdida de carga de la Fig. 3.12 para velocidades de aire más altas que la de mínima fluidización y para todas las partículas se obtuvo el valor 1,022 con un coeficiente de regresión de 0,984. Este valor es sólo 2,2 % más alto que el que predice la ec. (3.36). Esto comprueba que los lechos de las partículas utilizadas presentan un comportamiento normal para velocidades de aire en las que los sólidos se encuentran totalmente fluidizados.

Fig. 3.12: Pérdida de carga por unidad de altura de lecho y masa de partículas en función de  $v_0$ .



Estos resultados permiten asegurar, además, que la grilla soporte de los sólidos y distribuidora del aire de fluidización funciona bien, y que las técnicas utilizadas para las mediciones experimentales propuestas funcionan adecuadamente.

### 3.6.3.- Porosidad de lecho y fracción de burbujas

#### 3.6.3.1.- Porosidad de lecho

En la Fig. 3.13 se presenta la porosidad de lecho ( $\epsilon$ ), para las partículas de madera, en función de la relación de velocidades superficial del aire y de mínima fluidización de los sólidos ( $v_0 / v_{mf}$ ). En la Fig. 3.14, del mismo modo que en la Fig. 3.13, se muestran los resultados obtenidos para las partículas de papa y arvejas.

Para todas las partículas estudiadas, como se puede observar en las Figuras 3.13 y 3.14, la porosidad de lecho fijo ( $\epsilon_0$ ) permanece constante hasta valores de la relación  $v_0 / v_{mf}$  próximos a 0,8. A partir de allí se ve una zona “inestable” la cual se atribuye a un acomodamiento de los sólidos, previo a la fluidización. Es decir, que en la zona “inestable” el lecho alcanza un empaquetamiento más suelto pero las partículas permanecen aún en contacto entre sí, de igual modo que el efecto observado en las curvas experimentales de pérdida de carga.

Esta zona de transición entre el lecho fijo y fluidizado es más pronunciada en los cubos que en los bastones y las esferas. En el caso de las arvejas, la menos pronunciada, es de esperar ya que las partículas casi esféricas son las que mejor se empaquetan y siempre tienden a tocarse en un punto.

En el caso de los bastones, si el arreglo de los mismos fuera realmente al azar debiera ser la más importante. Sin embargo, los bastones tienden a presentar la

máxima área posible al flujo, con una fuerte tendencia a permanecer acostados aún en estado de fluidización plena.

Fig. 3.13: Porosidad de lecho de cubos y bastones de madera en función de  $v_0 / v_{mf}$

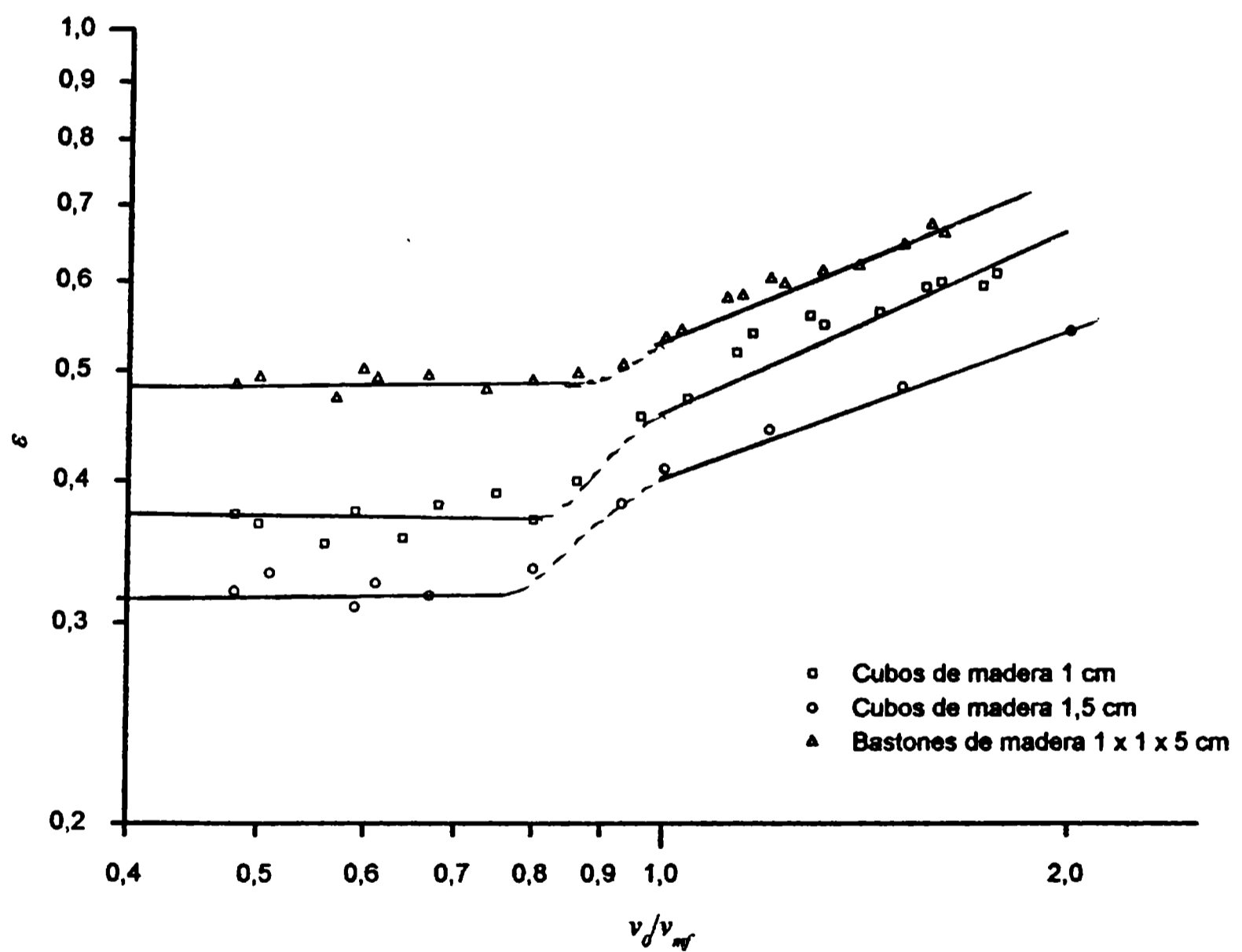
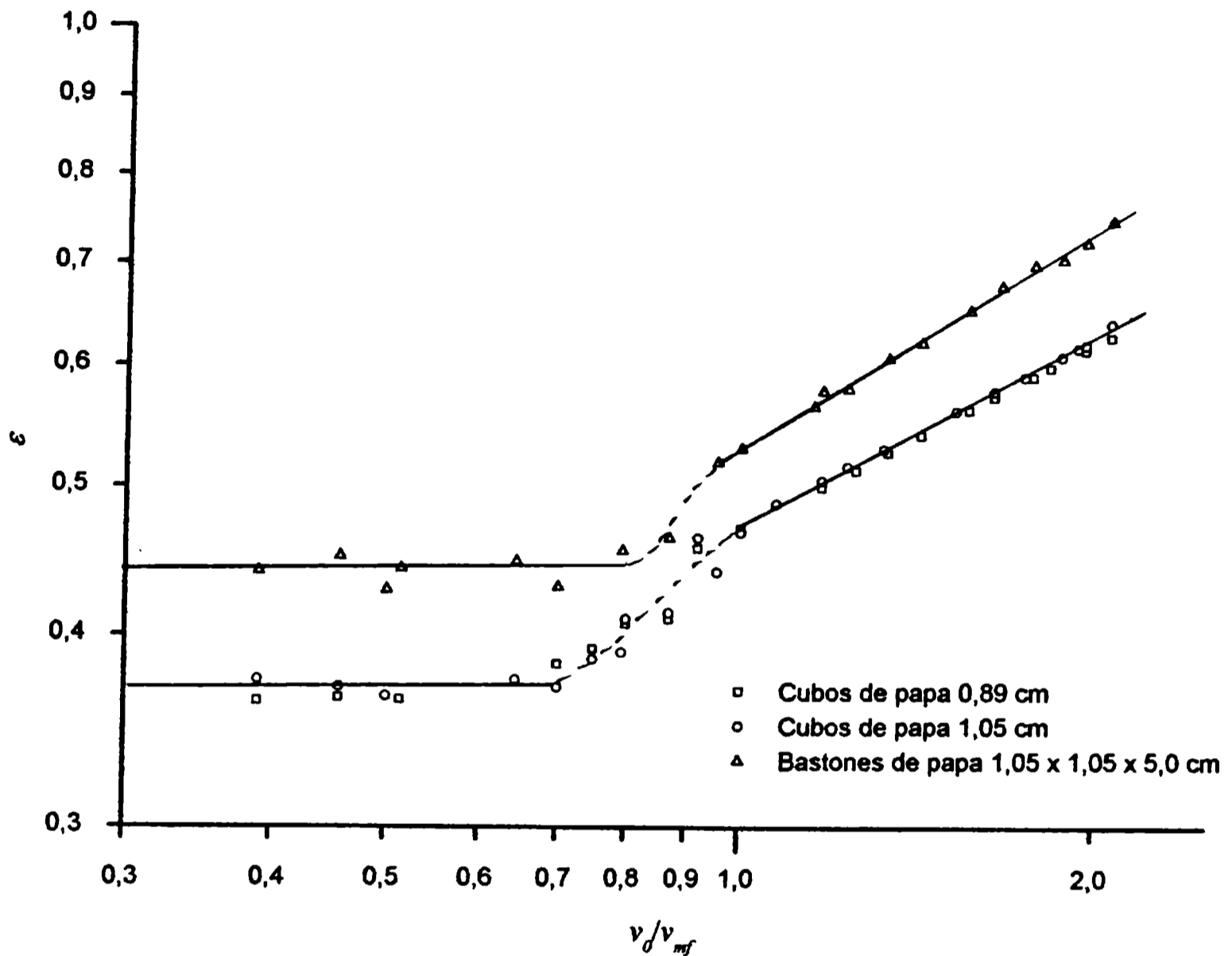


Fig. 3.14: Porosidad de lecho de partículas de papa en función de  $v_0 / v_{mf}$



Al finalizar la zona “inestable”, el lecho alcanza la máxima expansión sin que las partículas se “despeguen”. Este punto, asimilado a la relación  $v_0 / v_{mf} = 1$ , se denomina porosidad de mínima fluidización ( $\epsilon_{mf}$ ).

Si aumenta la velocidad del aire la expansión del lecho continúa pero ya con los sólidos en condición de fluidización plena. La variación de  $\epsilon$  con la relación  $v_0/v_{mf}$ , en escala doble logarítmica, presenta un comportamiento lineal.

Este comportamiento coincide con lo informado por Davidson y Harrison, 1963, 1971, y Vázquez y Calvelo, 1980, 1983a,b, quienes comprobaron que la porosidad de lecho expandido sigue un comportamiento del tipo (ya citado):

$$\varepsilon = \varepsilon_{mf} \left( \frac{v_0}{v_{mf}} \right)^d \quad (3.37)$$

Efectuando entonces, una regresión lineal de los valores experimentales obtenidos para  $v_0/v_{mf} \geq 1$ , se puede obtener el coeficiente  $d$ .

Con él y el valor de  $\varepsilon_{mf}$ , que se obtiene de la intersección de la ec. (3.37) con el valor  $v_0/v_{mf} = 1$ , se cuenta con una función adecuada para predecir la porosidad de lecho expandido necesaria para el diseño de estos equipos.

A los efectos de obtener  $d$  y  $\varepsilon_{mf}$ , se efectuó una regresión lineal por el método de Marquardt. También, mediante regresión lineal por el mismo método se obtuvo el valor de  $\varepsilon_0$ , la porosidad de lecho fijo.

En la Tabla 3.5 se presentan los valores experimentales obtenidos para las partículas utilizadas en este trabajo.

## Distribución de tiempos de residencia de alimentos en lecho fluidizado

**Tabla 3.5: Parámetros de la expansión del lecho para las partículas utilizadas en este trabajo (entre paréntesis se muestra el correspondiente coeficiente de regresión)**

<b>Partícula</b>	<b>Medidas (cm)</b>	<b>Porosidad lecho fijo (<math>\epsilon_0</math>)</b>	<b>Porosidad mínima fluidización (<math>\epsilon_{mf}</math>)</b>	<b>Parámetro (<math>d</math>) ec. (3.34)</b>
Cubos madera	1	0,36 (0,972)	0,49	0,385 (0,969)
Cubos madera	1,5	0,33 (0,967)	0,42	0,38 (0,974)
Bastones madera	1 x 1 x 5	0,49 (0,959)	0,56	0,380 (0,980)
Cubos papa	0,89	0,38 (0,986)	0,47	0,400 (0,957)
Cubos papa	1,05	0,38 (0,974)	0,47	0,400 (0,985)
Bastones papa	1,05 x 1,05 x 5	0,43 (0,959)	0,53	0,469 (0,957)
Arvejas	0,7	0,35* (0,989)	0,36*	0,437* (0,993)

\* Adaptado de Vázquez y Calvelo, 1980

De los valores presentados en la Tabla 3.5 se puede indicar que cuando la esfericidad de las partículas decrece la porosidad de mínima fluidización se incrementa, y el valor de  $d$  (parámetro de la ec. (3.37)) es muy similar para todas las partículas.

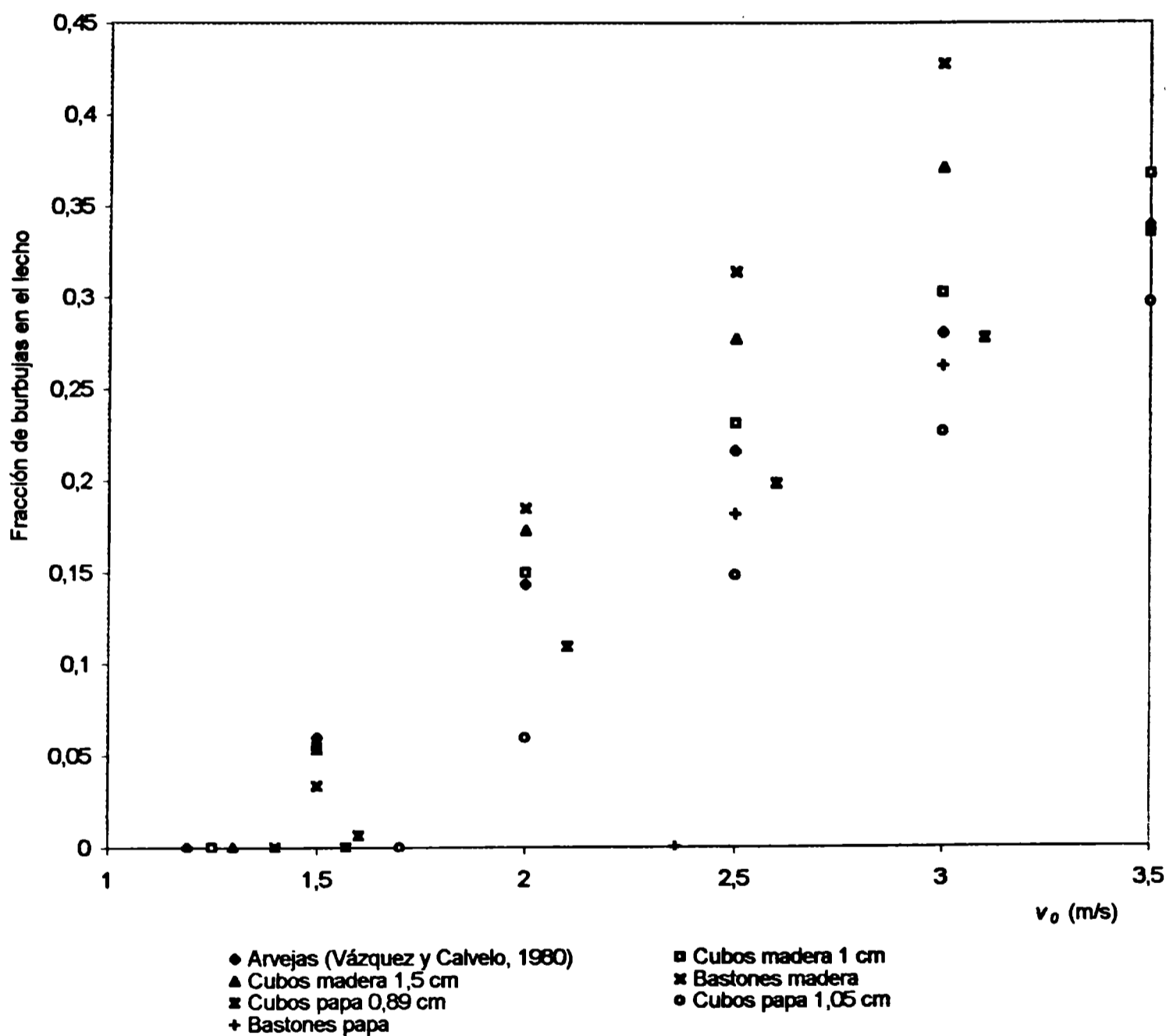
### 3.6.3.2.- Cálculo de la fracción de burbujas en el lecho

La fracción de burbujas puede calcularse como se indicó en la ec. (3.37) en función de la porosidad del lecho expandido, la de mínima fluidización y el



parámetro  $d$  obtenido experimentalmente y presentado en la Tabla 3.5. En la Fig. 3.15a se representa la fracción de burbujas para las partículas tratadas en este trabajo en función de la velocidad superficial del aire, y se incluyen además, los resultados obtenidos por Vázquez y Calvelo, 1980 para arvejas.

**Fig. 3.15a: Fracción de burbujas en lechos fluidizados para las distintas partículas estudiadas en este trabajo, en función de  $v_0$ .**

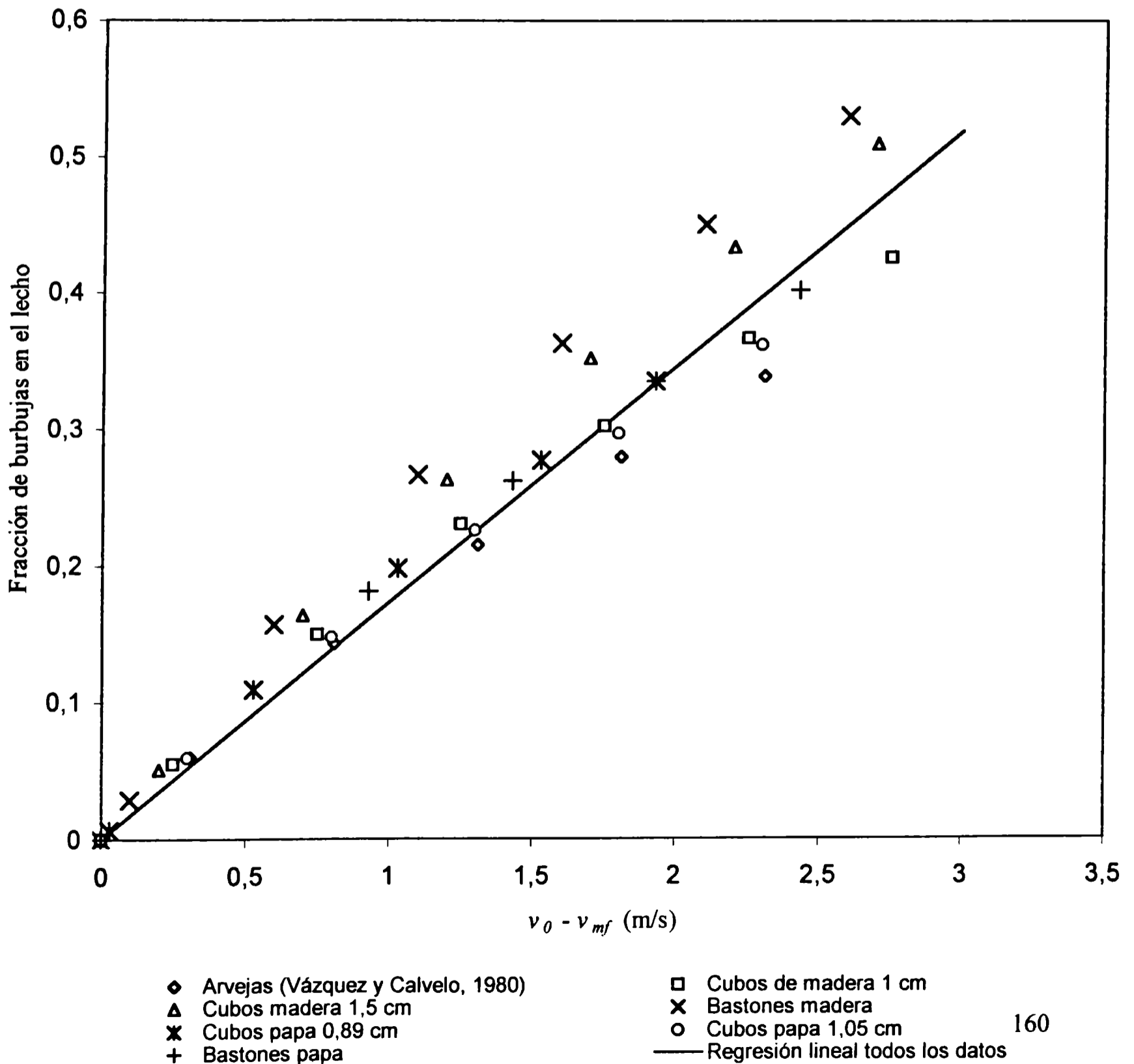


En la Fig. 3.15a se puede observar que los lechos fluidizados presentan valores altos de las fracciones de lecho ocupado por las burbujas. Así se puede ver que a una velocidad de aire de 3 m/s la fracción de burbujas para los lechos de las distintas

## Distribución de tiempos de residencia de alimentos en lecho fluidizado

partículas esta comprendida entre 0,23 y 0,43. También se puede ver que las distintas partículas presentan distintas fracciones de burbujas. Si se grafica la fracción de burbujas en función de la diferencia  $v_0 - v_{mf}$ , Fig. 3.15b, se puede, sin demasiado error, representar a los mismos mediante la recta:  $\delta = 0,1731(v_0 - v_{mf})$  con un coeficiente de regresión de 0,955 obteniéndose una forma simple y generalizada para las partículas estudiadas de estimar la fracción de burbujas en lechos fluidizados de alimentos.

**Fig. 3.15b: Fracción de burbujas en lechos fluidizados para las distintas partículas estudiadas, en función de  $v_0 - v_{mf}$ .**



Este fenómeno que se confirma experimentalmente con partículas no esféricas y de distintos materiales, verifica la necesidad de calcular los coeficientes efectivos de transferencia de calor en lechos fluidizados de alimentos, tal como propusieron Vázquez y Calvelo, 1983a, e indicado en el apartado 3.2.2 de éste capítulo.

### **3.6.4.- Distribución de tiempos de residencia para partículas no esféricas**

#### **3.6.4.1.- Comprobación de la aplicabilidad del modelo descrito en el apartado 3.4.- de éste capítulo para partículas no esféricas**

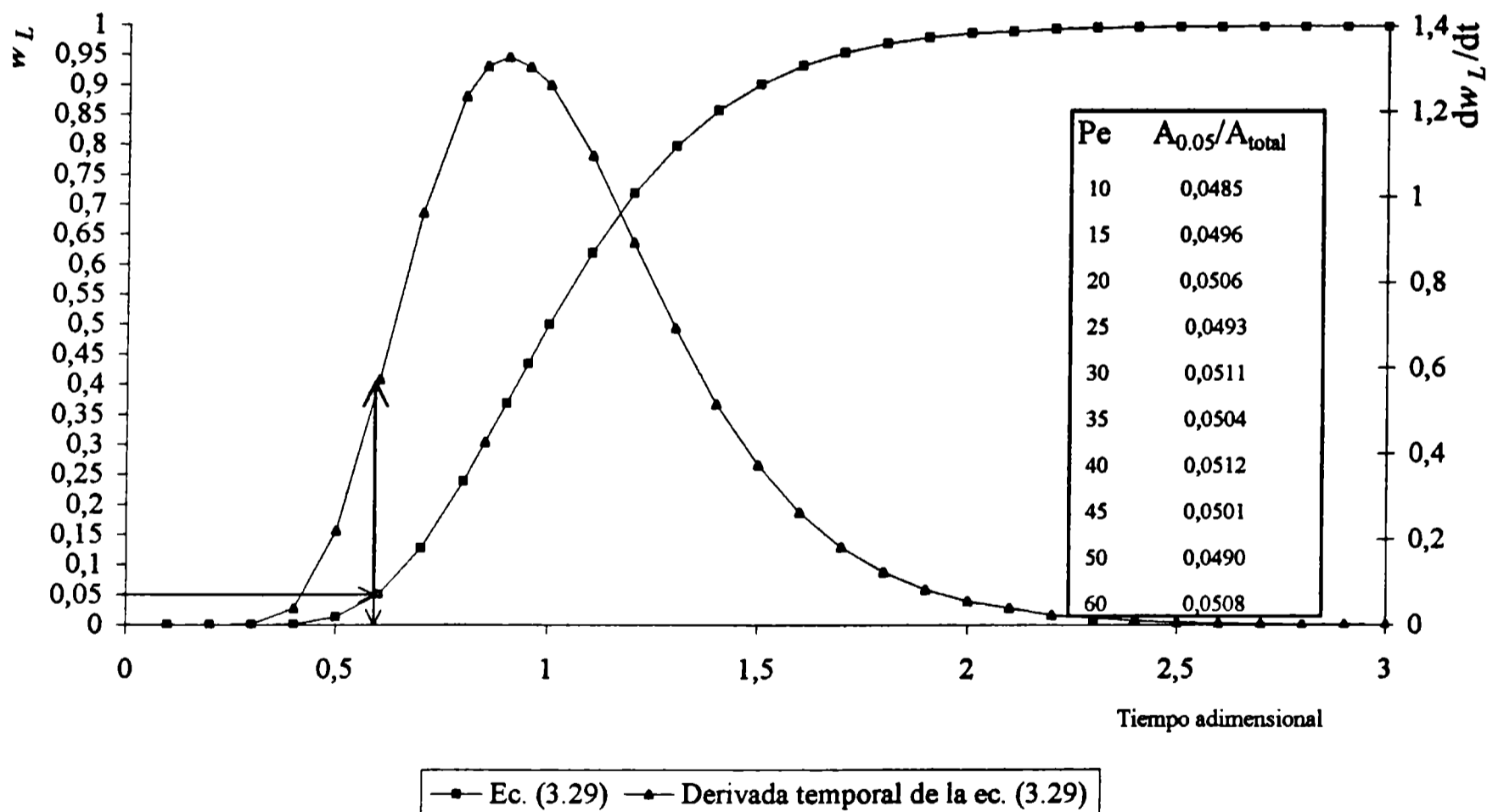
Con el objeto de verificar la aplicabilidad del modelo de mezclado descrito por la ec. (3.29) y su simplificación indicada en la ec. (3.31), fue necesario efectuar experiencias de acuerdo a como se indicó en el apartado 3.5.2.3.-, para:

- ✓ Medir la fracción másica experimental de partículas marcadas a la salida del lecho continuo, en función del tiempo, con el objeto de verificar si la ec. (3.29) la representa adecuadamente.
- ✓ Comprobar si la definición de tiempo mínimo de residencia, propuesta por Vázquez y Calvelo, 1983b como el tiempo para el cual la fracción másica de partículas marcadas a la salida del lecho vale 0,05, asegura que el 95 % de los sólidos permanecen en el lecho un tiempo igual o mayor que el mínimo.
- ✓ Verificar la simplificación de la ec. (3.29), expresada por la ec. (3.31) para  $Pe > 2$  y que el error cometido frente al modelo completo era menor que el 2 %. Asimismo, garantizar que para condiciones normales de fluidización el  $Pe$  es realmente mayor que 2.
- ✓ Asegurar que las partículas no esféricas satisfacen la ec. (3.31)

3.6.4.1.1.- Comprobación de la definición de tiempo mínimo de residencia

En la Fig. 3.16 se ha representado la fracción másica de partículas marcadas, en función del tiempo adimensional, predicha por la ec. (3.29) para  $Pe = 20$ . En la misma se incluye la definición de tiempo adimensional mínimo de residencia que corresponde a una  $w_L$  de 0,05.

Fig. 3.16: Fracción másica de partículas marcadas a la salida del lecho fluidizado en función del tiempo adimensional, predicha por la ec. (3.29).



Para comprobar si para  $w_L = 0,05$  el 95 % de las partículas permanece dentro del lecho un tiempo igual o mayor que el mínimo se pueden comparar las áreas debajo de la curva de la Fig. 3.16 para la fracción 0,05 y la total  $w_L = 1$ , la relación entre dichas áreas debe ser 0,05.

El problema de tomar las áreas en la representación de la ec. (3.29) es que se comete mucho error tanto en la zona de fracciones másicas pequeñas como de las altas (ver Fig. 3.16), el área correspondiente a  $w_L = 0,05$  es muy pequeña frente al área total.

El inconveniente se resolvió trazando la derivada temporal de la función escalón de la ec. (2.29), con lo que se convierte en una función pulso (Delta de Dirac). Esta última tiene la propiedad de tender a 0 cuando  $w_L = 0$  y cuando  $w_L = 1$ . Al tender la función a cero en ambas puntas los errores que se cometen son mínimos. Asimismo, el área correspondiente a  $w_L = 0,05$  es mucho más alta que la obtenida con la función original. En la Fig. 3.16 se presenta, también ésta última curva.

De curvas trazadas como se mostró en la Fig. 3.16 se midieron las correspondientes áreas, siguiendo los límites con un planímetro, para varios valores del número de  $Pe$  y se relacionaron entre sí.

Los resultados obtenidos, para 10 curvas que se presentan en la misma Fig. 3.16, permiten afirmar que la definición de tiempo mínimo de residencia es válida.

### **3.6.4.1.2.- Comprobación de que las partículas no esféricas satisfacen la ec. (3.31)**

## Distribución de tiempos de residencia de alimentos en lecho fluidizado

---

La técnica consistía en medir la fracción másica de partículas marcadas en función del tiempo a la salida del lecho y mediante su representación gráfica se obtenía el tiempo mínimo de residencia.

En el modelo de la ec. (3.31) el tiempo se expresaba en forma adimensional de acuerdo a:

$$\tau = v_z t / L \quad (3.38)$$

Para facilitar el cálculo del tiempo adimensional la ec. (3.38) se transformó reemplazando  $v_z$  por su igual de la ec. (3.30), obteniéndose:

$$\tau = \frac{F t}{\rho_s (1 - \varepsilon) H W L} \quad (3.39)$$

El denominador de la ec. (3.39) es la masa de sólidos en el volumen total del lecho,  $M_s$

$$M_s = \rho_s (1 - \varepsilon) H W L \quad (3.40)$$

Si se reemplaza en la ec. (3.39), el tiempo adimensional queda definido:

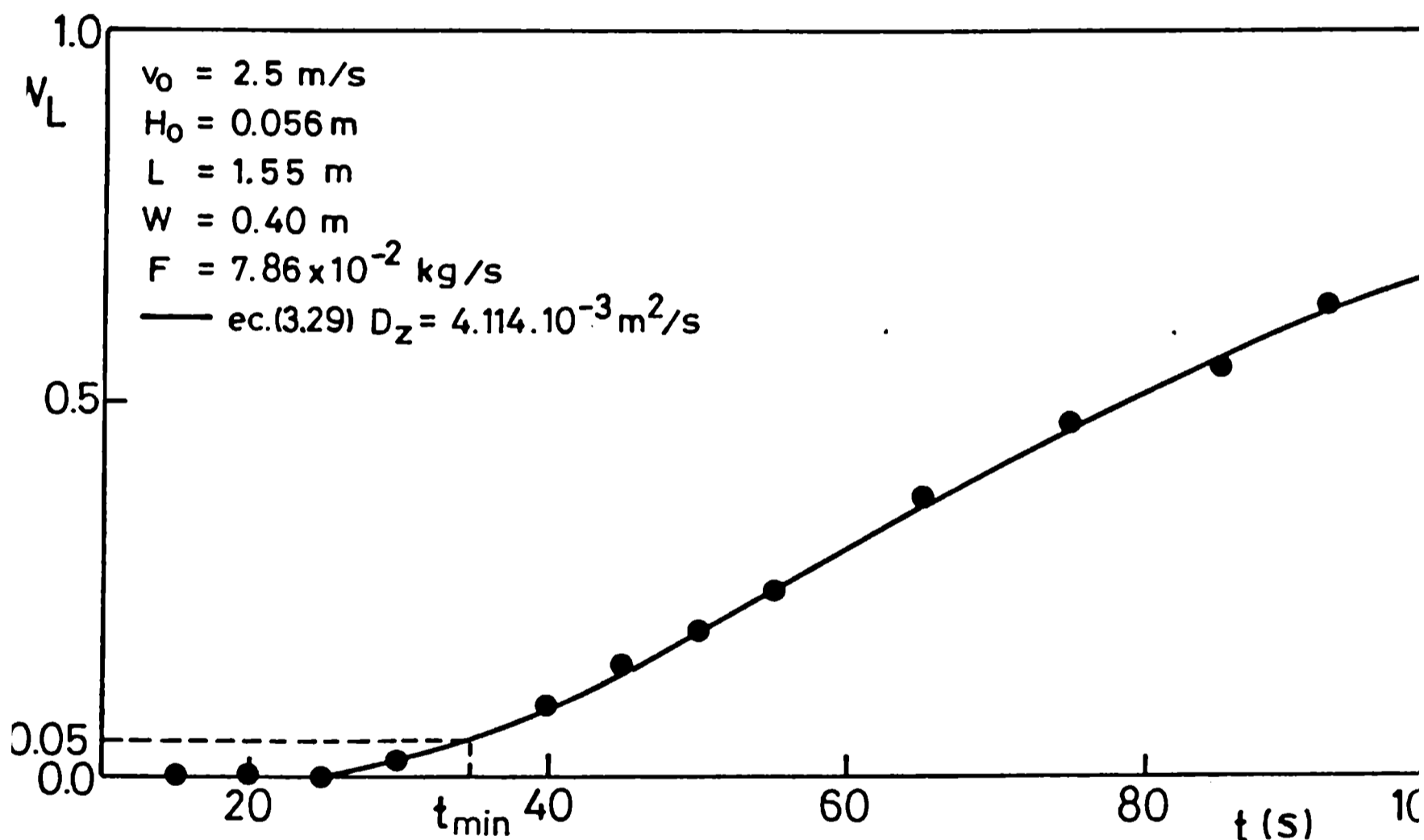
$$\tau = \frac{F t}{M_s} \quad (3.41)$$

Por ende conociendo la velocidad de alimentación de las partículas y pesando la masa de sólidos retenida en el lecho al final de la experiencia se calculaba el tiempo adimensional con la ec. (3.41) que es equivalente a la ec. (3.38).

## Distribución de tiempos de residencia de alimentos en lecho fluidizado

En la Fig. 3.17 se presentan los resultados obtenidos para una experiencia típica para bastones. Se representó la fracción másica de partículas marcadas a la salida del lecho ( $w_L$ ) en función del tiempo.

**Fig. 3.17: fracción másica de partículas marcadas a la salida del lecho ( $w_L$ ) en función del tiempo.**



En la Fig. 3.17 se ha marcado la forma de obtener el tiempo de residencia mínimo  $t_{min}$ .

Si las partículas no esféricas cumplen con el modelo de la ecuación (3.31), los  $\tau_{min}$  obtenidos experimentalmente deben ser representados por el modelo. Si en la ec. (3.31) se reemplaza el  $Pe$ , queda:

$$\frac{v_z L}{D_z} = 5,41 \frac{\tau_{min}}{(1 - \tau_{min})^2} \quad (3.42)$$

Si los  $\tau_{min}$  se obtienen manteniendo constante la velocidad superficial del aire y la altura de lecho,  $D_z$  se puede considerar constante de acuerdo a la ec. (3.32), agrupando las constantes se obtiene.

$$v_z L = Cte. \frac{\tau_{min}}{(1 - \tau_{min})^2} \quad (3.43)$$

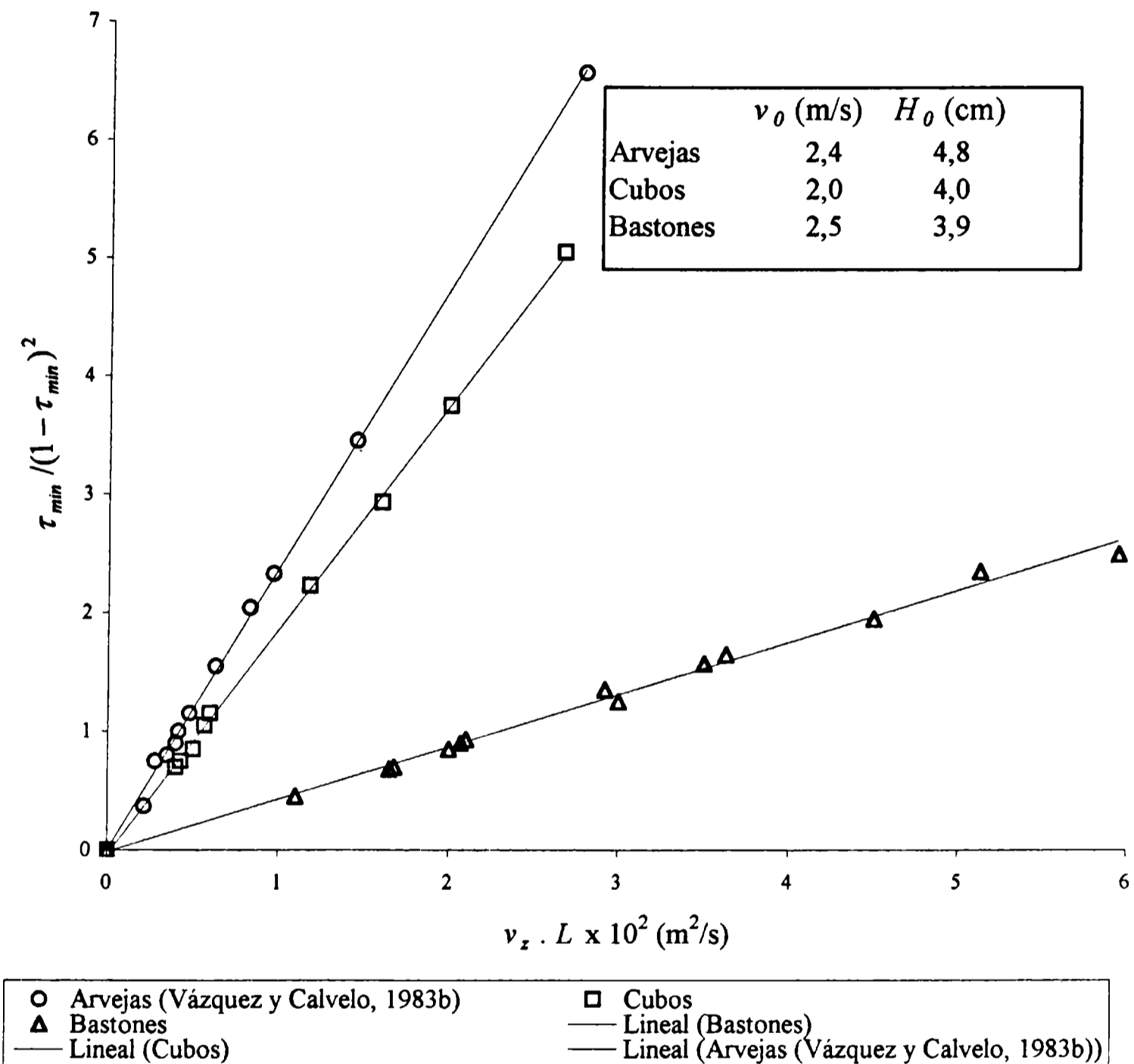
$L$ , la longitud del lecho no se ha considerado constante ya que se incluyen datos experimentales para dos longitudes de lecho.

La ec. (3.43) indica que los valores experimentales de  $\frac{\tau_{min}}{(1 - \tau_{min})^2}$  deben tender a una recta cuando se representan en términos de dicha ecuación.

En la Fig. 3.18 se presentan los valores de  $\frac{\tau_{min}}{(1 - \tau_{min})^2}$  en función de  $v_z L$ , para cubos y bastones, y se incluyeron también valores de  $\tau_{min}$  para arvejas adaptados de Vázquez y Calvelo, 1983b, a los fines de comparación.



Fig. 3.18: Comprobación del modelo propuesto por la ec. (3.31) para cubos, bastones y arvejas deshidratadas.



Los coeficientes de correlación fueron: arvejas: 0,999; cubos: 0,993; Bastones: 0,994.

Estos resultados permiten indicar que la ec. (3.31) representa adecuadamente el mezclado longitudinal, de los sólidos estudiados, en lechos fluidizados continuos.

## Distribución de tiempos de residencia de alimentos en lecho fluidizado

---

Como ya se dijo, la ec. (3.31), es una simplificación de la ec. (3.29) aplicable a sistemas con  $Pe$  mayor que 2, y que para el caso de arvejas producía errores menores que el 2 %.

A los efectos de verificar si la mencionada simplificación es adecuada para las partículas no esféricas se calculaba  $D_z$  de la pendiente de las rectas de la Fig. 3.18 (para minimizar el efecto del error experimental) y con el se calculaba  $w_L$  con la ec. (3.29). La  $w_L$  calculada se comparaba con 0,05 y se obtenía el error porcentual.

En la Tabla 3.6 se presentan valores de  $w_L$  calculados con la ec. (3.29) con valores de  $D_z$  y  $\tau_{min}$  experimentales y el error porcentual respecto de  $w_L = 0,05$ .

**Tabla 3.6: Valores de  $w_L$  calculados con la ec. (3.29) y error porcentual respecto de  $w_L = 0,05$ .**

$D_z$ (m <sup>2</sup> /s)	$\tau_{min}$	$w_L$ ec. (3.29)	$error(\%) = \frac{w_L - 0,05}{0,05} 100$
<b>Cubos</b>			
9,739 x 10 <sup>-4</sup>	0,47	0,0491	- 1,8
	0,40	0,0502	0,4
	0,35	0,0500	0,0
<b>Bastones</b>			
4,191 x 10 <sup>-3</sup>	0,45	0,0505	1,0
	0,37	0,0498	- 0,4
	0,35	0,0499	- 0,2
	0,28	0,0507	1,4

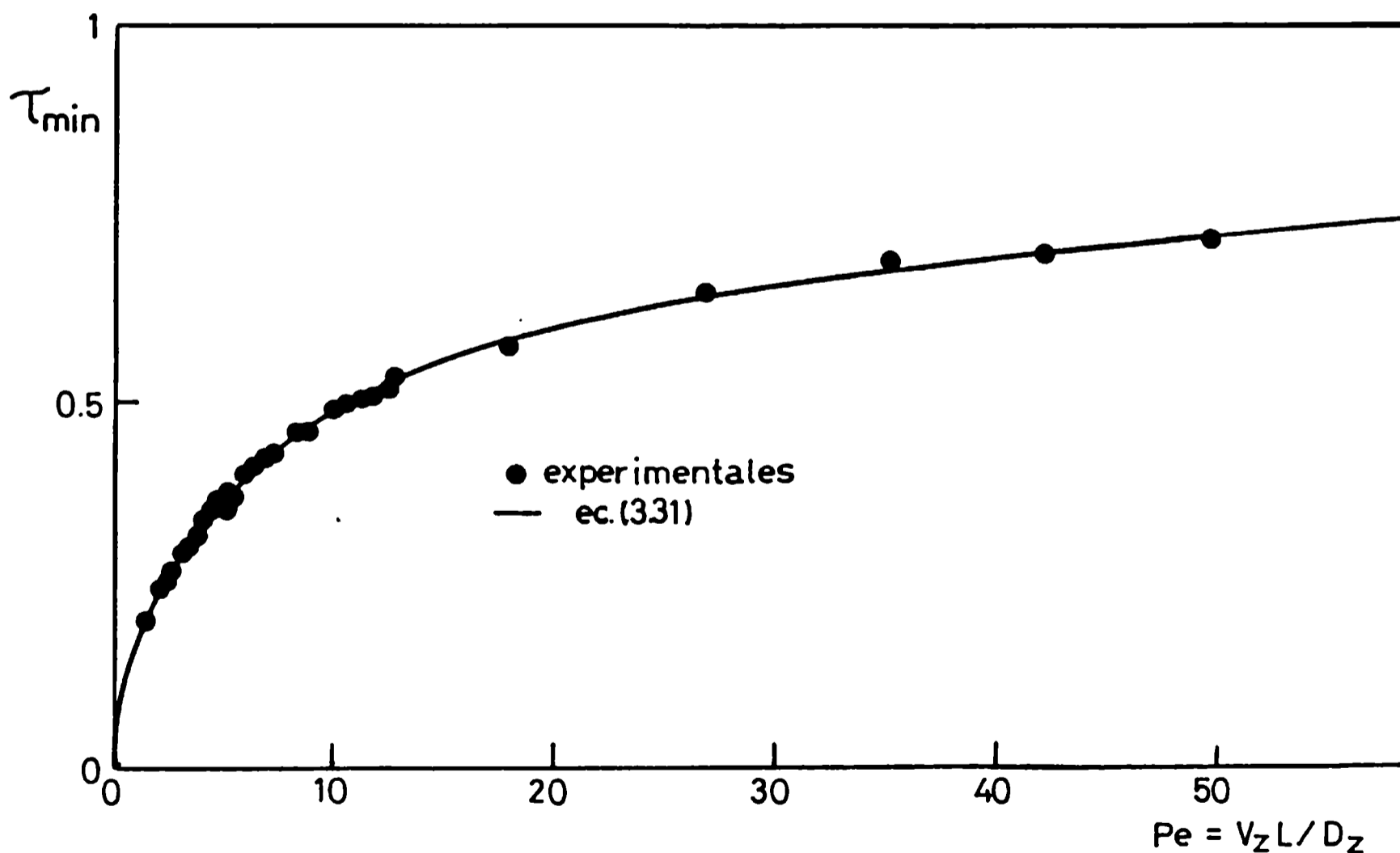
## Distribución de tiempos de residencia de alimentos en lecho fluidizado

De acuerdo a los errores presentados en la Tabla 3.6 (menores que el 2 %), las partículas no esféricas utilizadas en éste trabajo cumplen con la simplificación de la ec. (3.29) para  $Pe > 2$ .

También, se requiere verificar que los números de Peclet que normalmente se obtienen en la fluidización de partículas no esféricas son efectivamente mayores que 2.

En la Fig. 3.19 se representaron los valores de  $\tau_{min}$  en función del  $Pe$ , para un rango muy amplio de condiciones de operación.

**Fig. 3.19: Valores de  $\tau_{min}$  experimentales en función del número de  $Pe$ , en línea llena ec. (3.31)**



Como se puede ver en la Fig. 3.19, los valores de  $Pe$  siempre se mantiene por encima del valor 2, y los valores de  $\tau_{min}$  siguen muy bien la tendencia de la ec. (3.31) tal cual se había mostrado en la Fig. 3.18.

Otra verificación necesaria para evaluar el funcionamiento del modelo de mezclado utilizado, es sí el modelo teórico representa toda la curva de  $w_L$  en función del tiempo ya que, para facilitar el trabajo experimental, sólo se obtenía una parte de la curva.

En la Fig. 3.17, se representó con línea llena la predicción de la ec. (3.29) con el valor de  $D_z$  obtenido experimentalmente de la pendiente de la Fig. 3.18. Según se puede ver la concordancia es buena (coeficiente de correlación 0,958).

De todos los resultados obtenidos en éste apartado se puede concluir que el modelo de mezclado utilizado es adecuado para describir el mezclado longitudinal de las partículas no esféricas utilizadas en lechos fluidizados continuos.

### 3.6.4.2.- Obtención de los coeficientes de mezclado longitudinal para cubos y bastones

Comprobado el funcionamiento del modelo propuesto por la ec. (3.31), se efectuaron experiencias para cubos y bastones variando  $F$ ,  $H$ ,  $v_0$ ,  $W$  y  $L$ . Los  $W$  y  $L$  utilizados son los dos juegos de ancho y longitud de lecho indicados en la descripción del equipo experimental en el apartado 3.5.2.1.-. Los coeficientes de dispersión longitudinal se calculaban de los datos experimentales mediante la ec. (3.44) que se presenta a continuación:

De la ec. (3.21), despejando  $D_z$ :

$$D_z = \frac{v_z L (1 - \tau_{min})^2}{5,41 \tau_{min}} \quad (3.42)$$

Reemplazando  $v_z$  de la ec. (3.30):

$$D_z = \frac{F L (1 - \tau_{min})^2}{\rho_s (1 - \epsilon) H W 5,41 \tau_{min}} \quad (3.43)$$

Con la ec. (3.40) y la (3.43) se puede escribir:

$$D_z = \frac{F L^2 (1 - \tau_{min})^2}{5,41 M_s \tau_{min}} \quad (3.44)$$

Midiendo entonces, además de  $F$  y  $\tau_{min}$ , la masa de sólidos retenida en el lecho al final de la experiencia se calculaba el coeficiente experimental con la ec. (3.44).

En la Tabla 3.7 se presentan los resultados obtenidos para los cubos y en la Tabla 3.8 los correspondientes a los bastones.

**Distribución de tiempos de residencia de alimentos en lecho fluidizado**

**Tabla 3.7: Coeficientes de dispersión longitudinal experimentales para cubos, en función de las condiciones operativas.**

<b><i>L</i> (cm)</b>	<b><i>v</i><sub>0</sub> (m/s)</b>	<b><i>H</i><sub>0</sub> (cm)</b>	<b><i>D</i><sub>z</sub> (m<sup>2</sup>/s) x 10<sup>4</sup></b>
<b>40</b>	1,80	4,12	6,491
	1,72	4,32	6,434
	1,87	4,20	6,685
	1,7	3,14	2,770
	1,75	3,08	3,132
	1,72	4,80	8,781
	1,66	5,25	1,006
	1,81	4,93	1,069
	2,07	4,05	9,802
	1,98	3,97	9,176
	2,10	4,10	10,803
	2,01	3,83	9,232
	2,45	3,01	15,607
	2,53	3,97	32,020
	2,61	4,91	56,008
	2,21	3,14	8,931
	2,30	2,99	9,043
2,26	3,21	10,211	
<b>160</b>	1,73	4,12	5,863
	1,75	5,60	13,109
	2,53	3,56	23,058
	2,42	4,43	32,617
	2,61	6,34	108,892
	2,14	4,02	11,812

**Distribución de tiempos de residencia de alimentos en lecho fluidizado**

**Tabla 3.8: Coeficientes de dispersión longitudinal experimentales para bastones, en función de las condiciones operativas.**

<b><math>L</math> (cm)</b>	<b><math>v_0</math> (m/s)</b>	<b><math>H_0</math> (cm)</b>	<b><math>D_z</math> (m<sup>2</sup>/s) x 10<sup>3</sup></b>
<b>160</b>	2,54	3,75	4,346
	2,52	3,69	4,114
	2,40	3,77	4,160
	2,38	4,12	4,250
	2,54	3,77	4,320
	2,52	3,79	4,372
	2,52	3,85	4,098
	2,52	3,43	4,325
	2,50	3,92	4,622
	2,50	3,81	4,456
	2,53	4,03	4,675
	2,50	3,78	4,575
	2,45	5,00	8,591
	2,52	4,85	8,518
	2,45	4,70	8,828
	2,54	5,14	7,696
	2,20	4,00	2,811
	2,17	3,82	2,463
	2,27	3,78	2,658
	2,25	2,93	1,412
2,22	3,20	1,378	
2,10	3,04	1,180	
3,20	3,14	12,721	

**Distribución de tiempos de residencia de alimentos en lecho fluidizado**

<b>Tabla 3.8: Continuación</b>			
<b>160</b>	3,20	3,18	11,743
	3,25	2,96	10,600
	3,20	3,11	11,750
	2,85	4,10	11,096
	2,83	3,22	5,950
	2,75	3,10	4,581
	2,87	2,36	7,692
	2,90	4,54	17,832
	2,82	4,02	11,485
	2,52	4,72	9,010
	2,69	4,74	12,225
<b>40</b>	2,85	5,70	27,895
	2,93	4,34	17,237
	3,05	6,09	50,314
	3,34	4,56	40,688
	3,22	4,50	32,716
	3,41	4,35	44,158

Los valores de los coeficientes experimentales se regresionaron con el método de Marquardt mediante una ecuación similar a la ec. (3.32):

$$D_z = K_3 H^{K_4} v_0^{K_5} \tag{3.45}$$



## Distribución de tiempos de residencia de alimentos en lecho fluidizado

---

Los valores obtenidos para las constantes de la ec. (3.45) se presentan en la Tabla 3.9. En la misma Tabla se incluyeron valores para arvejas de la ec. (3.32).

**Tabla 3.9: Constantes de la ec. (3.45) obtenidos regresionando los valores de los coeficientes indicados en las Tablas 3.7 y 3.8.**

Partícula	$K_3$	$K_4$	$K_5$
Arvejas (Vázquez y Calvelo, 1983b)	0,095	2,60	3,54
Cubos	0,110	2,46	3,13
Bastones	0,256	2,58	3,34

Como se observa en la tabla 3.9, las constantes  $K_4$  y  $K_5$  son muy próximas para todas las formas, lo que indica que las mismas prácticamente no afectan la dependencia de  $D_z$  con  $H$  y  $v_0$ . Mientras que la constante  $K_3$  se incrementa notablemente a medida que disminuye la esfericidad de la partícula.

Ello implica que a medida que los sólidos se alejan de la forma esférica el grado de mezclado longitudinal es mayor. Este resultado es consistente con la fracción de burbujas en los lechos fluidizados, que como se mencionó en el apartado 3.6.3.2.- de este capítulo.

Las correlaciones obtenidas para los coeficientes de mezclado longitudinal, ec. (3.45), se restringen a las partículas estudiadas ya que en ellas no se contempla la posibilidad de variar la forma, la densidad, la temperatura, etc.

Si el modelo utilizado representa convenientemente el mezclado longitudinal de los sólidos evaluados es posible que también represente el movimiento de otras partículas.

Por ello resulta útil obtener una correlación que permita generalizar los resultados obtenidos para interpolar valores de los coeficientes para otras formas, y extrapolarlos para otras densidades de partícula.

### 3.6.4.3.- Obtención de una correlación generalizada para $D_z$

Al no disponer de información publicada para éste caso, se intentaron diferentes correlaciones empíricas definiendo las variables por similitud con otros problemas de transferencia de calor y materia. La influencia de las distintas variables se describe a continuación:

- ✓ Se ha considerado la influencia del tamaño y la forma de los sólidos a fluidizar a través del diámetro efectivo,  $D_p$ .
- ✓ El efecto de la densidad de partícula fue propuesta en términos del número de Arquímedes ( $Ar$ ), utilizando el exponente 0,179 por analogía con la dependencia informada por Chang y Wen, 1966 y Vázquez y Calvelo, 1980, 1983a, para transferencia de calor.
- ✓ La dependencia con la velocidad superficial del aire fue incluida mediante el número de Reynolds ( $Re'$ ) modificado.
- ✓ La altura de lecho ha sido considerada con un factor geométrico  $R_H$ , definido en la ec. (3.47), elevado a la 2,5 por similitud con la constante  $K_4$  de la ec. (3.45).
- ✓ La temperatura, se incluye a través de las propiedades de los sólidos y el aire fluidizante.

- ✓ El coeficiente de dispersión longitudinal fue incluido mediante el número de Peclet modificado ( $Pe'$ ) usando la velocidad superficial del aire como valor característico.

La correlación propuesta fue:

$$Pe' R_H^{2,5} Ar^{0,179} = K_6 Re'^{K_7} \quad (3.46)$$

Siendo:

$$Pe' = v_0 D_p / D_z \quad ; \quad R_H = H(1 - \varepsilon) / D_p \quad ; \quad Ar = D_p^3 g \rho (\rho_s - \rho) / \mu^2 \quad y$$

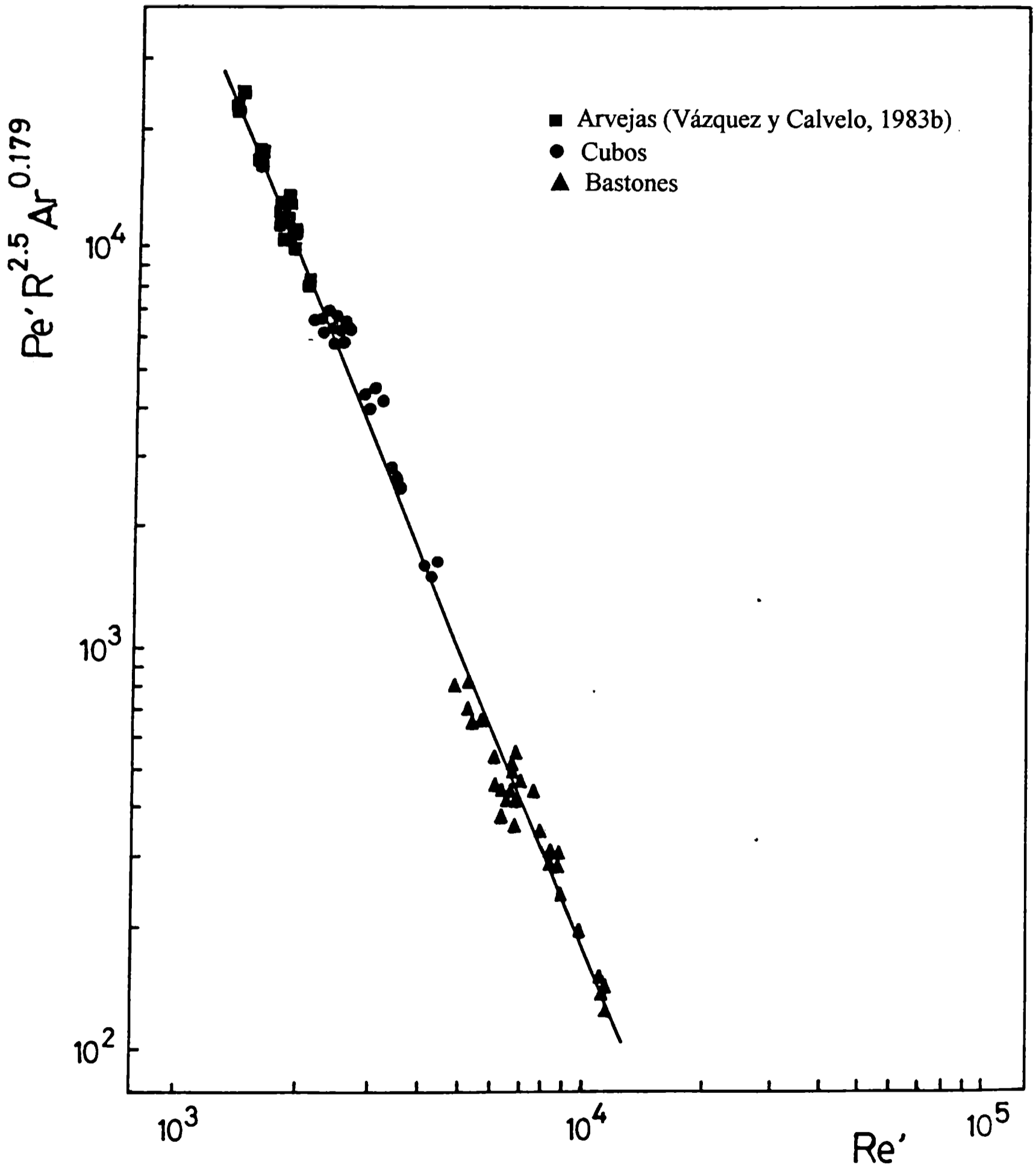
$$Re' = \rho v_0 D_p / \mu (1 - \varepsilon) \quad (3.47)$$

Regresionando los valores experimentales de  $D_z$  para arvejas (Vázquez y Calvelo, 1983b), cubos y bastones con la ec. (3.46) por el método de Marquardt, se obtuvieron los valores de  $K_6 = 2,54 \times 10^{11}$  y  $K_7 = 2,26$ , con un coeficiente de correlación de 0,943. La ec. (3.46) entonces se puede escribir:

$$Pe' R_H^{2,5} Ar^{0,179} = 25 \times 10^{11} Re'^{2,26} \quad (3.48)$$

En la Fig. 3.20 se presentan los resultados experimentales de los coeficientes de dispersión longitudinal para las tres partículas y en línea llena se ha representado la predicción de la ec. (3.48).

Fig. 3.20: Correlación generalizada para la obtención de coeficientes de dispersión longitudinal, resultados experimentales obtenidos para arvejas (Vázquez y Calvelo, 1983b), cubos y bastones.



$\frac{F}{W L}$  es el flujo másico de sólidos por unidad de área de lecho (la producción del equipo)

$\rho_s$  es la densidad del alimento

$H$  y  $\varepsilon$  son la altura y porosidad del lecho que se obtiene de la ec. (3.34)

$D_z$  es el coeficiente de dispersión longitudinal que se calcula con la correlación de la ec. (3.48)

$t_f$  es el tiempo de congelación de las partículas individuales que se estima con la ec. (2.57) del capítulo 2 de este trabajo, con el coeficiente de transferencia de calor efectivo calculado con la ec. (3.23) y la correlación de las ecs. (3.14) y (3.15).

#### **3.6.4.5.- Verificación de la correlación generalizada de $D_z$ para otras partículas**

Como consecuencia de no disponer información para coeficientes de dispersión longitudinal para otras partículas y en otras condiciones, es posible verificar la correlación generalizada de la ec. (3.48) mediante el uso de la ec. (3.50).

En la bibliografía existen datos experimentales de la producción obtenida con equipos de lecho fluidizado comercializados por firmas europeas. Con la ec. (3.50) se puede calcular la producción de los equipos en cuestión y compararla con los datos experimentales. Asimismo, mediante la ec. (3.50) se puede evaluar la influencia de  $D_z$  sobre la producción de éstos equipos.

En la Tabla 3.10 se presenta la relación entre la producción predicha por la ec. (3.50) ( $F_p$ ) y la producción experimental informada por los fabricantes ( $F_c$ ), con y sin

**Distribución de tiempos de residencia de alimentos en lecho fluidizado**

el efecto del coeficiente de dispersión longitudinal. Cuando se calcula sin el efecto de  $D_z$  el término que contiene la raíz cuadrada en la ec. (3.50) es nulo.

**Tabla 3.10: Relación  $F_p / F_c$  ( $F_c$  se obtuvo de Frigoscandia, 1977), con y sin el efecto del mezclado longitudinal, para distintos alimentos.**

Alimento	$F_p / F_c$	
	Con el efecto de $D_z$	Sin el efecto de $D_z$
Bastones de papa (0,5 x 0,5 x 5 cm)	1,05	1,27
Cubos de papa (1 cm)	1,01	1,21
Bastones de colirábano (*) (1 x 1 x 5 cm)	1,02	1,23
Chauchas (*) (0,7 x 3 cm)	0,97	1,17
Zanahorias enteras (baby) (*) (2 x 5 cm)	1,13	1,32
Arvejas (0,7 cm)	1,04	1,19
Albóndigas de carne picada (+) (2,5 cm)	1,06	1,22
Frutillas (+) (2,5 cm)	0,96	1,15
(*) $\varepsilon$ se obtuvo con la ecuación correspondiente a bastones de papa.		
(+) $\varepsilon$ se obtuvo con la ecuación correspondiente a arvejas.		

## **Distribución de tiempos de residencia de alimentos en lecho fluidizado**

---

Como se observa en la Tabla 3.10, la predicción del modelo de la ec. (3.50) difiere de la producción experimental entre 1 y 13 % con un error promedio de 2,6 %.

El apartamiento máximo se registra para las zanahorias enteras (baby), lo cual es razonable si se tiene en cuenta que es la forma menos regular de todas las comparadas por lo que la predicción de la ec. (2.57) (tiempo de congelación) puede generar errores considerables, y la porosidad de lecho expandido se calculó con la ecuación para bastones. El apartamiento para las formas regulares va del 1 al 5 % con un promedio de 0,8 %.

Asimismo, en la tabla 3.10 se puede apreciar el efecto que posee el coeficiente de  $D_z$  sobre la producción. Si no se considerara el mezclado longitudinal de sólidos se sobre estima la producción en valores que van desde el 15 hasta el 32 %.

De acuerdo a éstos resultados es posible considerar que la correlación generalizada de la ec. (3.48) predice satisfactoriamente los coeficientes de dispersión longitudinal para alimentos en lecho fluidizado, por consiguiente se confirma que es posible extrapolar valores para otras densidades de partícula, e interpolarlos para otras formas.

### **3.7.- Comparación de los tiempos de congelación y producciones de éste modelo con datos experimentales de equipos comerciales**

En un trabajo de muy reciente aparición, Gruda, 1999, se obtuvieron datos experimentales de tiempos de congelación y producciones de equipos congeladores comerciales. Los mismos se compararon con la predicción de las ecuaciones (2.67), para el cálculo de tiempos de congelación, y (3.50) para la producción de

## Distribución de tiempos de residencia de alimentos en lecho fluidizado

---

congeladores continuos de lecho fluidizado. Los resultados se presentan en la Tabla 3.11.

**Tabla 3.11: Comparación de tiempos de congelación y producciones predichos con las ecuaciones desarrolladas en éste trabajo con datos experimentales obtenidos en equipos comerciales**

Equipo, producto Variable	Flo-Freeze 8MA frutillas			TZF-4U arvejas		
	Este trabajo	Gruda, 1999	%	Este trabajo	Gruda, 1999	%
$h$ (w/m °c)	186,2	-----	-----	157,3	----	----
$he$ (w/m °c)	116,8	151	- 22,6	69	84	- 17,8
$t_f$ (s)	821,4	844	- 2,7	261,4	240	+ 8,9
$F$ (kg/h)	2699,4	2700	- 0,02	4638,4	4800	- 3,4

Como se puede observar en la Tabla 3.11, las ecuaciones desarrolladas predicen con muy buena aproximación los datos experimentales obtenidos en congeladores continuos comerciales de lecho fluidizado

### 3.8.- Conclusiones

Se ha efectuado una revisión de la bibliografía existente para transferencia de calor y materia en lechos fluidizados, con especial atención a la fluidización de alimentos.

De toda la información encontrada se ha adoptado un modelo de cálculo de coeficientes de transferencia de calor, y un modelo para estudiar la distribución de tiempos de residencia de partículas en congeladores continuos de lecho fluidizado.



## **Distribución de tiempos de residencia de alimentos en lecho fluidizado**

---

Se han realizado, en un equipo discontinuo, experiencias para la determinación de los parámetros fluidodinámicos de partículas no esféricas como: la pérdida de carga a través del lecho, la porosidad de lecho fijo y expandido y la fracción de burbujas en el lecho.

De las experiencias descritas se pudo verificar el normal funcionamiento de la grilla distribuidora de aire seleccionada para el equipo experimental y la utilidad de las técnicas utilizadas.

De los resultados obtenidos en las experiencias fluidodinámicas se propusieron correlaciones para calcular la velocidad y porosidad de mínima fluidización y la porosidad del lecho expandido.

Asimismo, se comprobó que la fracción de burbujas en el lecho para partículas no esféricas también es elevada por ende resulta válido utilizar la correlación publicada para obtener los coeficientes de transferencia de calor para dichas partículas. Además, se ha propuesto una correlación muy simple para estimar la fracción de burbujas en lechos fluidizados de alimentos.

Se compararon resultados con datos publicados por otros autores para partículas esféricas, encontrándose una buena concordancia.

Luego de obtenidos los parámetros fluidodinámicos y comprobado el normal funcionamiento del equipo experimental, se construyeron dos lechos fluidizados continuos utilizando la misma grilla que en el equipo anterior.

Con ellos se efectuaron experiencias para estudiar la distribución de tiempos de residencia en lecho fluidizado continuo, para partículas no esféricas.

## **Distribución de tiempos de residencia de alimentos en lecho fluidizado**

---

En la primera parte se verificó la aplicabilidad del modelo seleccionado que permitía evaluar la fracción de partículas previamente marcadas y alimentadas al lecho cuando éste estaba funcionando en estado estacionario con las mismas partículas sin marcar.

De los resultados obtenidos en ésta etapa se pudo concluir que el modelo representaba adecuadamente el movimiento de cubos y bastones en su recorrido longitudinal a través de lechos fluidizados continuos.

Luego de comparado el modelo de mezclado, haciendo uso de él y efectuando experiencias en ambos equipos experimentales continuos se determinaron los coeficientes de dispersión longitudinal (una medida del grado de mezclado de los sólidos en su recorrido en el sentido de avance del flujo principal de las partículas en el lecho), en función de las variables de operación: velocidad del aire, altura de lecho, longitud y ancho de lecho. Todas las experiencias se llevaron a cabo con aire a temperatura ambiente.

Con los valores obtenidos se propusieron regresiones para obtener el coeficiente de dispersión longitudinal para cada partícula en términos de la velocidad superficial del aire y la altura de lecho expandido.

Las correlaciones propuestas se compararon con valores publicados de coeficientes de dispersión para partículas esféricas, y se verificó que el coeficiente sólo depende de la velocidad del aire y la altura de lecho expandido.

Con el objeto de interpolar y extrapolar valores del coeficiente para otras partículas con distintas propiedades y a diversas temperaturas se propuso, utilizando la información lograda en éste trabajo y la publicada para esferas, una correlación

generalizada, en términos de números adimensionales tradicionales y otros grupos adimensionales propuestos en este trabajo, a través de los cuales se incorporaba, además de la velocidad del aire y la altura de lecho, el diámetro efectivo de partícula y la influencia de la temperatura considerada en las propiedades termofísicas del sistema.

Con el modelo de mezclado comprobado experimentalmente y el propuesto para el cálculo de tiempos de congelación de las partículas de alimento, se obtuvo la ecuación para calcular la producción de congeladores continuos de lecho fluidizado.

Con la ecuación de producción, combinada con el modelo para el cálculo de tiempos de congelación, con los coeficientes de transferencia de calor encontrados en la bibliografía, y obteniendo los coeficientes de dispersión longitudinal de la correlación generalizada, se pudo evaluar la importante influencia del mezclado longitudinal de sólidos sobre la producción de congeladores continuos de lecho fluidizado

También, se efectuaron comparaciones con datos de producción informados por fabricantes de equipos. La buena coincidencia obtenida permitió indicar que la correlación generalizada que se ha propuesto para evaluar los coeficientes de mezclado longitudinal para otras partículas de alimentos y en otras condiciones operativas, provee resultados adecuados.

Por último, con valores obtenidos de la bibliografía, se compararon datos experimentales de tiempos de congelación y producciones obtenidos con congeladores continuos de lecho fluidizado, comerciales, obteniéndose una muy buena concordancia.

## **Capítulo 4**

# **OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN CONGELADORES CONTINUOS DE LECHO FLUIDIZADO**

## **4.- Optimización de la producción en congeladores continuos de lecho fluidizado**

### **4.1.- Introducción**

Los resultados presentados en el capítulo 3 de este trabajo permiten indicar que el modelo de la ec. (3.50) predice adecuadamente la producción de congeladores continuos de lecho fluidizado.

Mediante el uso de la ec. (3.50) se puede analizar la influencia de las variables de operación sobre el flujo másico de producto en estos equipos.

Las variables de operación que condicionan la producción en estos congeladores son:

- ✓ La forma y el tamaño de los sólidos
- ✓ La temperatura del aire fluidizante
- ✓ El ancho del lecho
- ✓ La longitud del lecho
- ✓ La velocidad superficial del aire
- ✓ La altura del lecho de partículas

Del análisis de las variables descriptas surgirá la posibilidad de encontrar las condiciones de operación que permitan obtener la máxima producción de los congeladores, en función de los parámetros de operación controlables del sistema.

Esto es importante ya que si existen posibilidades de optimizar el funcionamiento de éstos equipos, también existe la posibilidad de trabajar sobre los costos de producción, que en todo el proceso de la congelación los gastos de energía por unidad producida son los más relevantes.

### 4.2.- Análisis de la influencia de las variables de operación sobre la producción de congeladores continuos de lecho fluidizado

Las ecuaciones que vinculan las variables de operación, ya presentadas en los capítulos 2 y 3 de éste trabajo y que se vuelven a enumerar, son:

El flujo másico de producto por unidad de área de lecho, de la ec. (3.50):

$$\frac{F}{W L} = \frac{\rho_s H_0 (1 - \varepsilon_0)}{t_f} \left[ 1 - \sqrt{\frac{5,41 t_f D_z}{L^2}} \right] \quad (4.1)$$

En la que se ha reemplazado  $H(1 - \varepsilon)$  mediante la ec. (4.6)

El tiempo de congelación,  $t_f$ , se obtiene de la ec. (2.57):

$$t_f = V * \left[ \frac{L^2}{\alpha_0} (aTc + b) \left( \frac{1}{Bi_e} + C A^* \right) (1 + Ti)^n (-1 - T_1)^{-m} \right] \quad (4.2)$$

## Optimización de la producción en congeladores continuos de lecho fluidizado

---

En la que se ha reemplazado  $T_a$  por  $T_1$  y  $Bi_0$  por  $Bi_e = h_e D / k_0$ ;  $T_1$  es la temperatura del aire a la entrada del lecho y  $h_e$  el coeficiente de transferencia de calor efectivo, que se obtiene de la ec. (3.23):

$$h_e = G C_p \left[ 1 - e^{-(h_a H / G C_p)} \right] / a H \quad (4.3)$$

y el  $h$  de la ec. (4.3) se obtiene de la correlación de la ec. (3.14):

$$J_H = 0,204 Re^{-0,563} Ar^{0,179} \quad (4.4)$$

El coeficiente de dispersión longitudinal se obtiene de la correlación generalizada (3.48) o de la ec. (3.45) que es particular para cada sólido:

$$Dz = K_3 H^{K_4} v_0^{K_5} \quad (4.5)$$

La altura de lecho expandido se puede calcular con la ec. (3.4):

$$(1 - \varepsilon_0) H_0 = (1 - \varepsilon) H \quad (4.6)$$

$H_0$  y  $\varepsilon_0$  son la altura y porosidad de lecho fijo respectivamente.

Y la porosidad de lecho expandido se obtiene de la ec. (3.37):

$$\varepsilon = \varepsilon_{mf} \left( \frac{v_0}{v_{mf}} \right)^d \quad (4.7)$$

Las ecs. (4.1) a (4.7) constituyen las ecuaciones de diseño de éstos congeladores, y en ellas se puede visualizar en principio:

Si se modifica el ancho del lecho,  $W$ , la producción de éstos equipos se modificará proporcionalmente a ella. Es decir que la influencia de  $W$  sobre la producción es fácilmente predecible y no requiere más análisis.

Si cambia el diámetro de partícula,  $D$ , cambia el tiempo de congelación  $t_f$  (ec. (4.2)) por ende también cambia la producción del equipo (ec. (4.1)).

Si  $D$  aumenta, aumenta  $t_f$  y disminuye la producción, y si  $D$  disminuye se produce el efecto contrario.

No es posible visualizar, en forma directa, la influencia del diámetro de partícula sobre la existencia de máximos de producción.

Seguramente posee influencia sobre los posibles máximos si se estiman los mismos para otras partículas a través del coeficiente de dispersión longitudinal (ec. (3.48)), y mediante la influencia relativa que posee  $t_f$  en el término de mezclado de la ec. (4.1). Por ello la influencia del diámetro de partícula siempre aparecerá implícita en los cálculos.

La temperatura del aire que ingresa al lecho,  $T_l$ , modifica el tiempo de congelación. Si la misma aumenta, aumenta  $t_f$  y disminuye  $F/WL$ . Si  $T_l$  disminuye ocurre a la inversa.

Esta temperatura puede producir otros efectos ya que de ella dependen, también, las propiedades de los sólidos y del aire. Por ello es posible que tenga influencia sobre la probable existencia de máximos de producción.



Si  $T_f$  y el diámetro de partícula son constantes, para un determinado producto, se puede visualizar que las variables  $v_0$ ,  $H_0$  y  $L$  afectan la producción en distintos sentidos según su peso relativo en las ecuaciones de diseño.

**Así, si se incrementa la altura de lecho, para  $v_0$  y  $L$  constantes:**

- ✓ Aumenta el valor de  $H_0(1 - \varepsilon_0)$  de la ec. (4.1), en consecuencia tiende a aumentar  $F/WL$
- ✓ Crece el valor de  $D_z$  de la ec. (4.5), entonces tiende a disminuir  $F/WL$
- ✓ Disminuye el coeficiente  $h_e$  de la ec. (4.3), por ende aumenta  $t_f$  de la ec. (4.2) y tiende a disminuir  $F/WL$

Es decir, no se puede a priori predecir la influencia de la altura de lecho sobre la producción.

Una situación similar se presenta cuando se analiza la influencia de la velocidad superficial del aire,  $v_0$ .

- ✓ Si  $v_0$  aumenta, aumenta  $h$  de la ec. (3.14) por lo tanto aumenta  $h_e$  de la ec. (4.3) y disminuye  $t_f$  de la ec. (4.2), tendiendo a aumentar  $F/WL$  de la ec. (4.1).
- ✓ Simultáneamente si se incrementa  $v_0$  se incrementa  $D_z$  (ec. (4.5)) por incidencia directa de ello y por incremento adicional de la altura de lecho expandido,  $H$ , por la ecs. (4.6) y (4.7), lo que hace que  $F/WL$  tienda a disminuir.

Por ende tampoco se puede predecir con facilidad el efecto de  $v_0$  sobre la producción.

Por último si se modifica  $L$ , la longitud del lecho, la producción se modifica en el mismo sentido, pero seguramente el cambio de  $F / W L$  no es directamente proporcional al cambio de  $L$  ya que ésta interviene, además, en el término de mezclado de la ec. (4.1).

A continuación se analizará, utilizando las ecuaciones de diseño, la influencia de cada una de las variables en particular para luego intentar evaluar el efecto conjunto de todas ellas sobre la producción.

Toda la evaluación se efectuará para arvejas frescas de 0,7 cm de diámetro. Las propiedades térmicas utilizadas fueron tomadas de Reynoso y Calvelo, 1985.

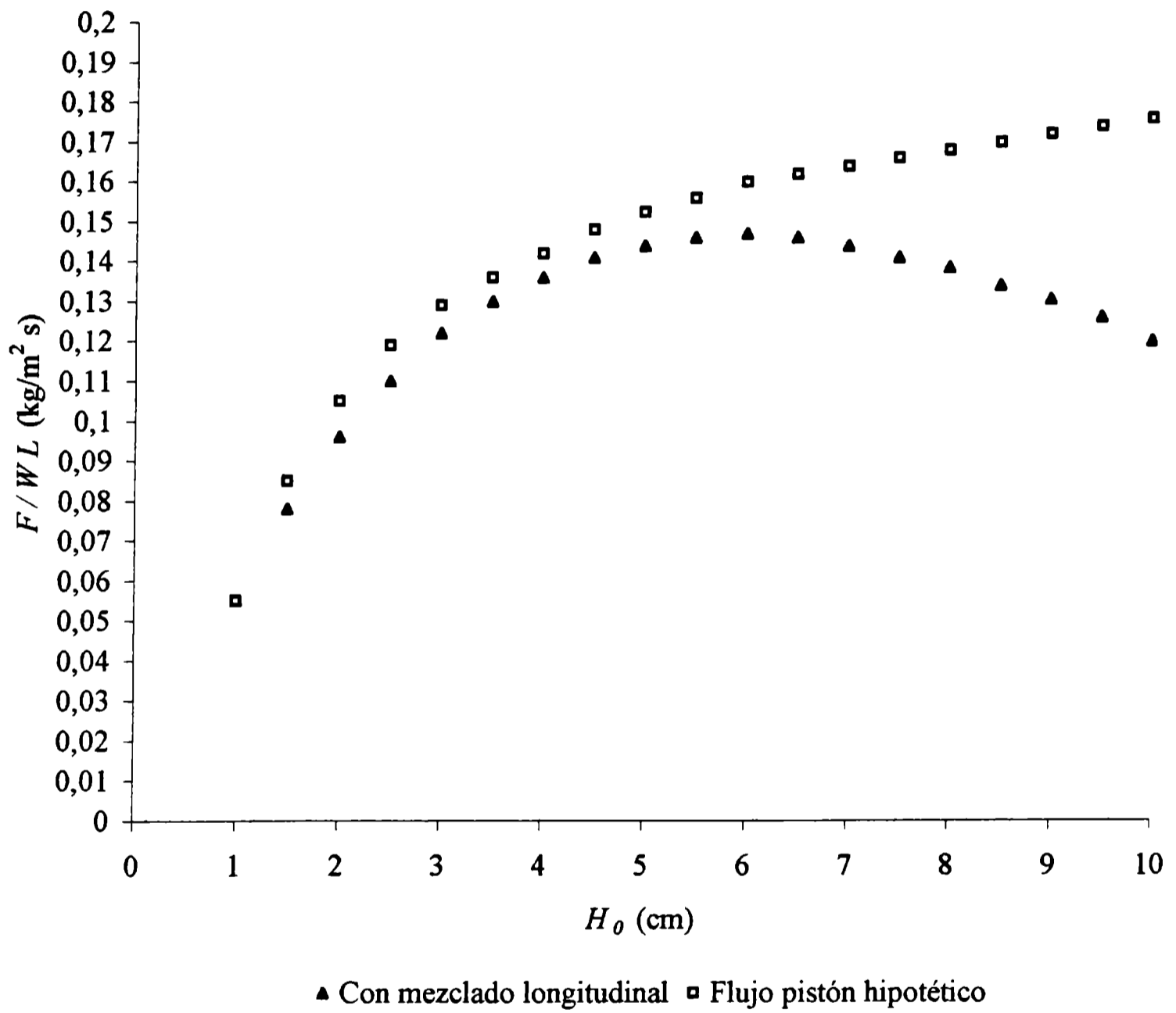
Las propiedades del aire fueron tomadas de Perry y Chilton, 1982.

### 4.2.1.- Efecto de la altura de lecho expandido sobre la producción

En la Fig. 4.1 se ha representado  $F / W L$  en función de la altura de lecho fijo,  $H_0$ , manteniendo constantes el resto de las variables.

En la misma figura se incluyó, la misma funcionalidad considerando la existencia de un flujo pistón hipotético ( $D_z = 0$ ) en el equipo congelador.

Fig. 4.1: Efecto de la altura de lecho sobre la producción de congeladores continuos de lecho fluidizado.  $L = 4$  m,  $T_1 = -35$  °C,  $v_0 = 1,6$  m/s



Como se puede ver en la Fig. 4.1, si existiera flujo pistón la producción siempre crece si aumenta  $H_0$ , mientras que cuando hay mezclado longitudinal la producción crece más lentamente hasta un máximo y luego comienza a decrecer.

Se determina una importante reducción en los valores de  $F / W L$  respecto del flujo pistón. Este último efecto ya se había observado en el capítulo 3 de éste trabajo.

Además, se puede ver que fuera del máximo para cada valor de  $F / W L$  hay dos valores de  $H_0$  que permiten alcanzar la misma producción.

Para la  $v_0$  elegida la  $F / W L$  presenta un máximo para  $H_0 = 6$  cm.

### 4.2.2.- Efecto de la velocidad superficial del aire sobre la producción

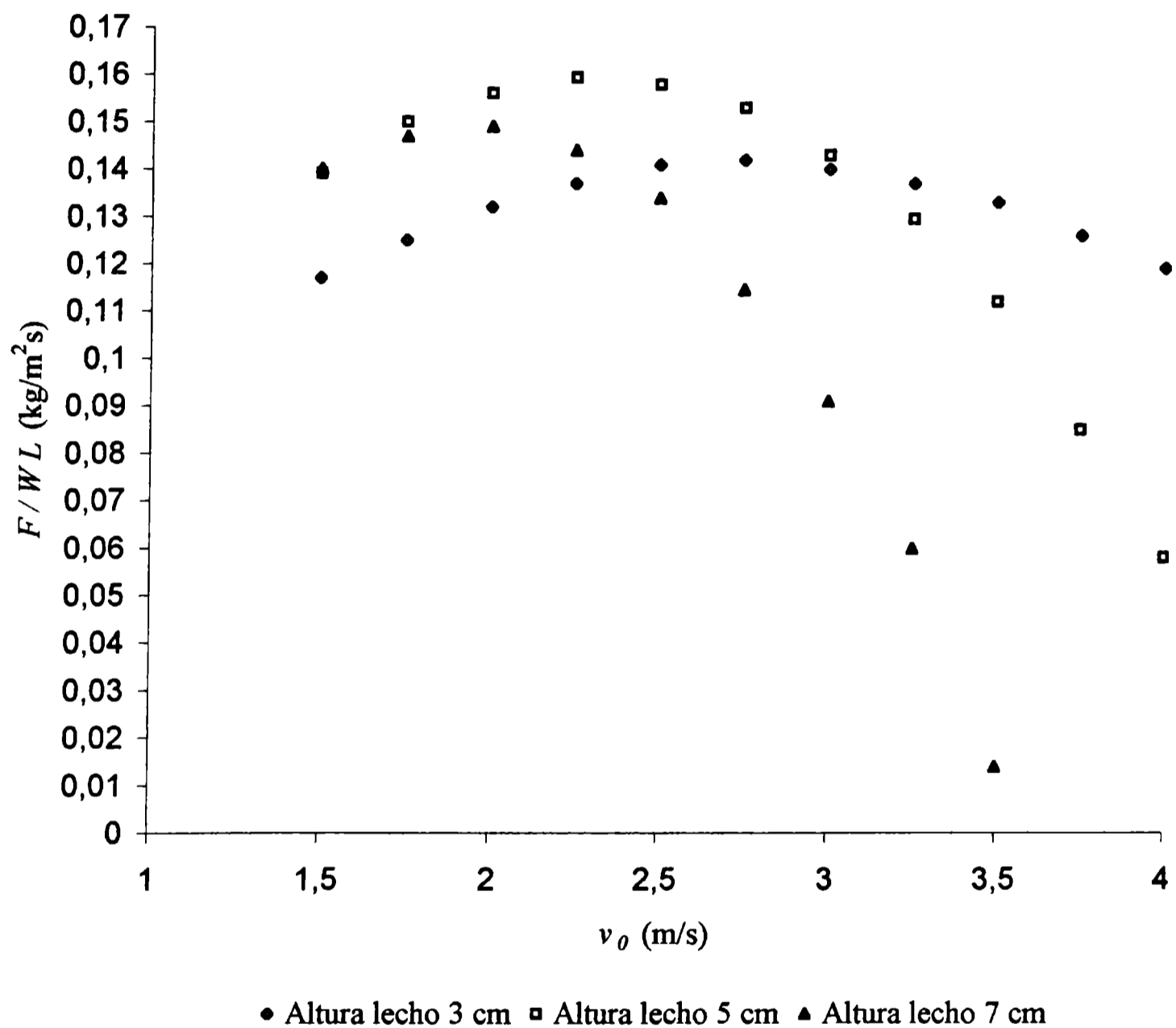
Si se incrementa la velocidad del aire, las diferencias respecto del flujo pistón se incrementan aún más como consecuencia del incremento de  $D_z$ , ya analizado.

El efecto del incremento de  $h_e$  tiene menos incidencia ya que el tiempo de congelación varía poco con él como consecuencia de que en estos equipos los coeficientes de transferencia siempre son muy altos.

En la Fig. 4.2 se muestra la influencia de  $v_0$  sobre la producción para las demás variables constantes.

**Fig. 4.2: Efecto de la velocidad superficial del aire sobre la producción de congeladores continuos de lecho fluidizado en función de la altura de lecho fijo.**

$L = 4 \text{ m}$ ,  $T_l = -35 \text{ }^\circ\text{C}$



En la Fig. 4.2 se observa que el flujo de producto presenta máximos y los mismos cambian su valor y posición con la variación de altura.

## Optimización de la producción en congeladores continuos de lecho fluidizado

---

Así, para la altura de 3 cm el máximo se encuentra para una velocidad de 2,75 m/s, para 5 cm la velocidad correspondiente es de 2,25 m/s, y para 7 cm es de 2 m/s. También, se puede observar que los mayores valores de  $F / W L$  se presentan a velocidades cercanas a 2,0 m/s y tienden a ser menores para velocidades más altas. Este último efecto se muestra con más detalle en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1: Efecto de la velocidad del aire sobre los máximos de producción en congeladores continuos de lecho fluidizado.  $L = 4$  m,  $T_1 = - 35$  °C**

$v_0$ (m/s)	$H_0$ (cm)	$F / W L$ (kg / m <sup>2</sup> s)
1,4	6,2	0,145
1,6	6,0	0,148
1,8	5,8	0,151
2,0	5,5	0,158
3,0	4,0	0,152
4,0	3,9	0,149

Este efecto se puede atribuir al fuerte incremento del coeficiente de mezclado longitudinal para velocidades de aire muy alejadas de la de mínima fluidización.

Asimismo, se puede ver que a medida que se incrementa la altura de lecho fijo la curva se estrecha con lo que pequeños cambios en la velocidad pueden significar variaciones importantes en la producción.

Asimismo, por debajo del valor máximo de  $F / W L$ , aparecen varios pares de valores de  $v_0$  que dan la misma producción, para todas las alturas de lecho fijo.

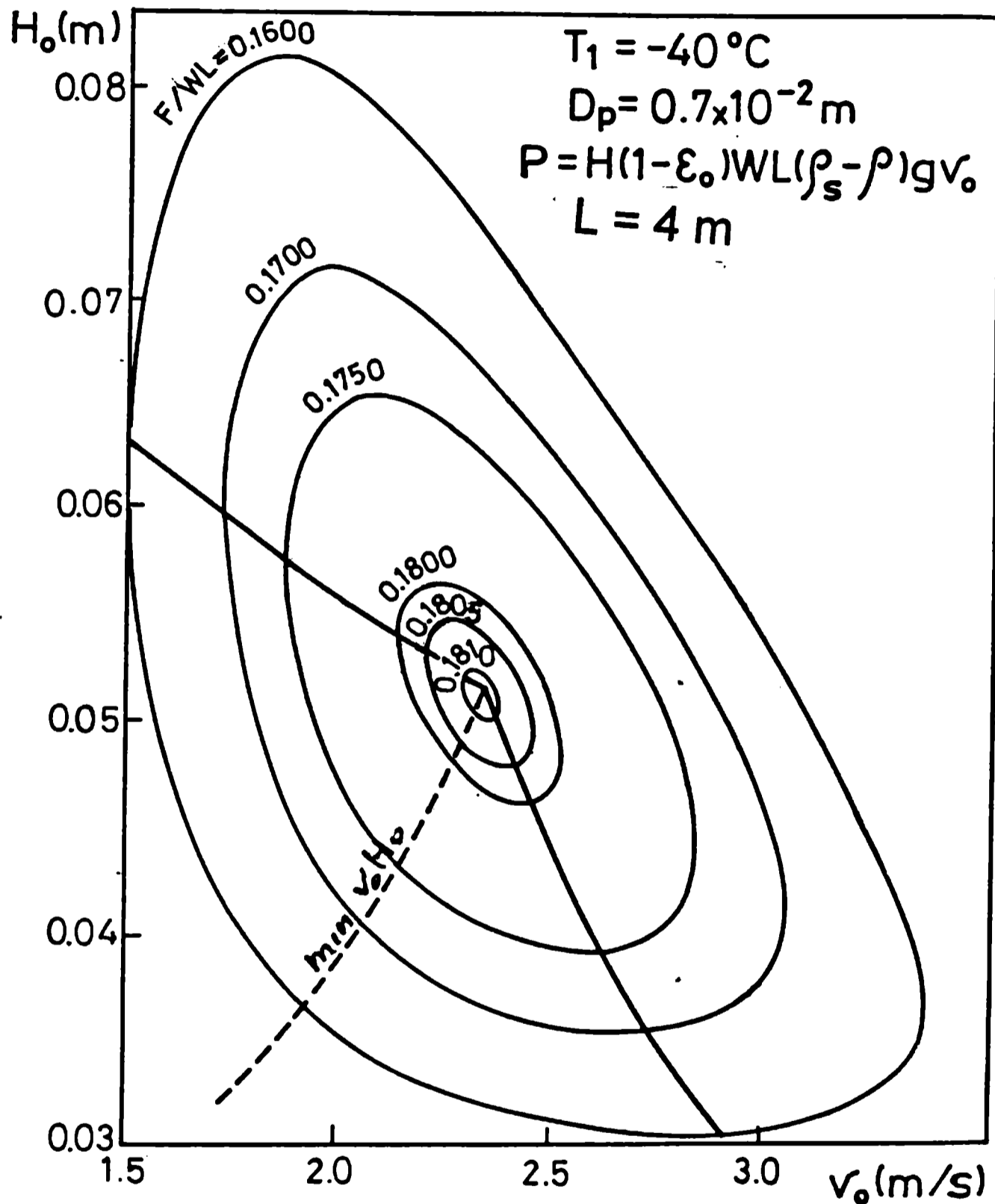
De las Figs. 4.1 y 4.2 es posible visualizar que para obtener la producción máxima fijando una de las variables,  $v_0$  o  $H_0$ , la otra queda automáticamente determinada si el resto de las variables permanecen constantes, y que la producción máxima crece hasta determinado valor de la velocidad del aire para luego disminuir como se ve en la Tabla 4.1.

Esto conduce a pensar en la existencia de un par de valores de la altura y velocidad del aire que proveen la máxima producción posible a  $T_1$  y  $L$  constantes, es decir un valor óptimo para  $F / W L$  en términos de  $v_0$  y  $H_0$ .

### **4.2.3.- Efecto conjunto de la velocidad superficial del aire y la altura de lecho sobre la producción**

Si se analiza conjuntamente el efecto de  $v_0$  y  $H_0$ , para  $T_1$  y  $L$  constantes, y se calcula  $F / W L$  para todos los pares posibles de velocidad del aire y altura de lecho, se obtienen gráficos como el que se muestra en la Fig. 4.3.

Fig. 4.3: Efecto conjunto de la altura de lecho y la velocidad superficial del aire sobre la velocidad de producción de congeladores continuos de lecho fluidizado, para  $T_1 = -40\text{ }^\circ\text{C}$  y  $L = 4\text{ m}$ .



En la Fig. 4.3 se ha representado en ordenadas  $H_0$  y en abscisas  $v_0$ . La velocidad de producción por unidad de área de lecho aparece como curva paramétrica de igual producción en el mismo gráfico.



Como se puede observar en la Fig. 4.3, cuando se calcula el efecto combinado de  $H_0$  y  $v_0$  sobre  $F / W L$  aparecen curvas en las que existen múltiples pares de valores de  $H_0$  y  $v_0$  que permiten obtener la misma producción, tantos más pares cuanto más se alejan las condiciones del máximo de producción.

También se observa que existe un solo par de valores de  $H_0$  y  $v_0$  para la producción máxima, expresado en la Fig. 4.3 por  $H_0 = 5,1$  cm y  $v_0 = 2,35$  m/s, es decir se confirma la existencia de un óptimo de producción en términos de  $H_0$  y  $v_0$ .

Asimismo, en la Fig. 4.3 se puede ver que existen zonas del gráfico para las cuales cualquier aumento de  $H_0$  y/o  $v_0$  se incrementa el valor de  $F / W L$ , y otras en las que no siempre que se incrementen  $H_0$  y/o  $v_0$  habrá un crecimiento de  $F / W L$ . Este efecto ya se había observado en la Fig. 4.2 y en los valores mostrados en la Tabla 4.1.

En la Fig. 4.3 se han delimitado ambas zonas mediante las líneas llenas que cortan a las curvas de iso producción. Por debajo de dichas líneas se observa el primer efecto y por encima de ellas el segundo.

Si se trabajará fuera del óptimo, si bien existen múltiples pares de  $H_0$  y  $v_0$  que satisfacen la misma velocidad de producción, desde el punto de vista de la optimización no es conveniente el uso de cualquier par.

Por ejemplo, la potencia consumida por los sopladores que impulsan el aire en éstos equipos ésta dada por (Kunii y Levenspiel, 1969):

$$\frac{P_{ot}}{W L} = v_0 \Delta P \quad (4.8)$$

$P_{ot} / W L$  es la potencia aplicada por unidad de área de lecho,  $v_0$  es la velocidad superficial del aire y  $\Delta P$  es la pérdida de carga a través del lecho. Si en la ec. (4.8) se reemplaza la pérdida de carga mediante la ec. (3.5), se obtiene:

$$\frac{P_{ot}}{W L} = v_0 H_0 (1 - \varepsilon_0) (\rho_s - \rho) g \quad (4.9)$$

De la ec. (4.9) surge que la mínima potencia aplicada por unidad de área de lecho es la que corresponde al mínimo valor del producto  $v_0 H_0$ . Estos mínimos se han representado en la Fig. 4.3 mediante una línea de trazo discontinuo.

Obviamente siempre conviene trabajar en el óptimo ya que en él también se cumple la condición de mínima potencia de soplado. Pero si por razones operativas no se puede trabajar en el óptimo es deseable moverse sobre la línea de mínima potencia.

Sin embargo, existen situaciones en las que el producto es difícilmente fluidizable (generalmente en aquellos con formas muy irregulares y de tamaños diversos, como por ejemplo trozos de coliflor) en los que una solución práctica puede ser trabajar con velocidades de aire relativamente altas y alturas de lecho relativamente bajas. Entonces, de la Fig. 4.3 se puede elegir, fijando  $v_0$ , la altura de lecho fijo que permitirá la máxima producción en dicho caso.

#### **4.2.4.- Influencia de la longitud de lecho sobre la producción óptima en congeladores continuos de lecho fluidizado.**

Como se indicó, la Fig. 4.3 se construyó para  $L = 4$  m. Para otros valores de  $L$  se pueden construir gráficos similares, como los que se presentan en las Figuras 4.4 y 4.5.

Fig. 4.4: Efecto conjunto de la altura de lecho y la velocidad superficial del aire sobre la velocidad de producción de congeladores continuos de lecho fluidizado, para  $T_1 = -40^\circ\text{C}$  y  $L = 2\text{ m}$ .

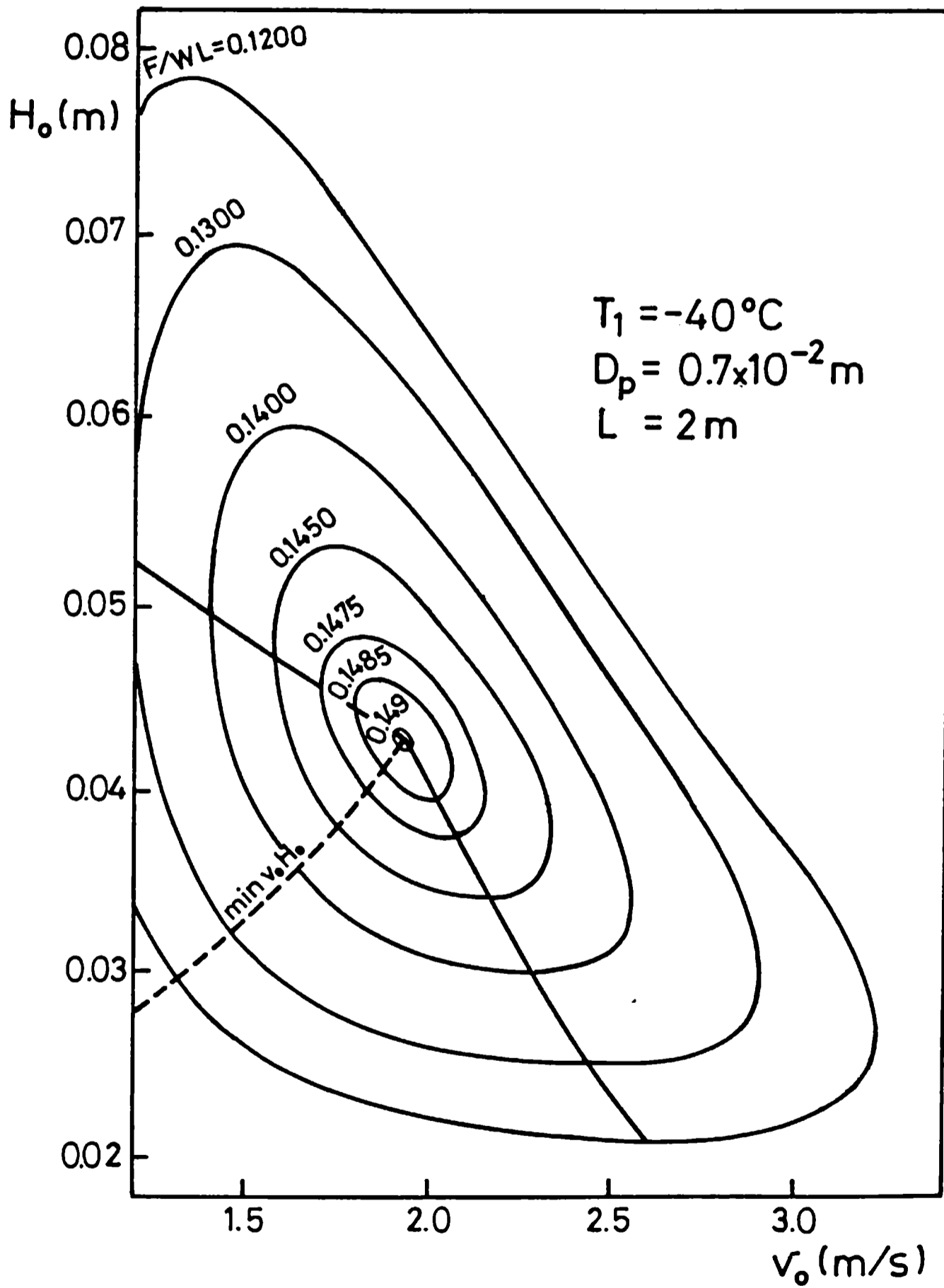
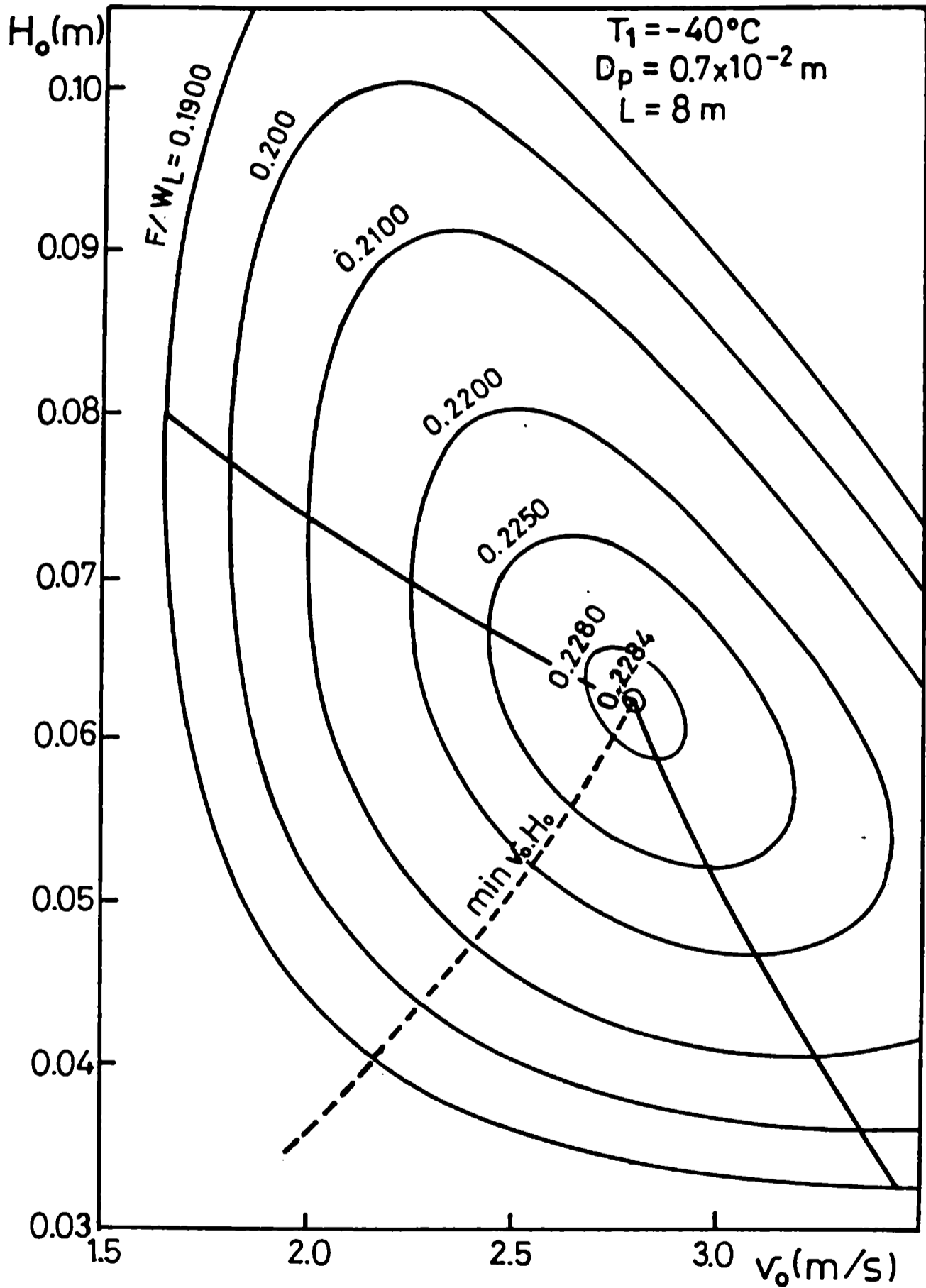


Fig. 4.5: Efecto conjunto de la altura de lecho y la velocidad superficial del aire sobre la velocidad de producción de congeladores continuos de lecho fluidizado, para  $T_1 = -40^\circ\text{C}$  y  $L = 8\text{ m}$ .



## Optimización de la producción en congeladores continuos de lecho fluidizado

---

Como se puede ver las curvas son muy similares, y se puede efectuar un análisis igual al realizado para la Fig. 4.3 y con idénticas conclusiones.

Si de las Figs. (4.3) a (4.5) se extraen los valores de  $F/WL$  óptimos para cada longitud y se calcula la producción óptima por unidad de ancho de lecho,  $F/W$ , se obtienen los valores indicados en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2: Producción óptima por unidad de área y por unidad de ancho de lecho en función de  $L$ , con las correspondientes condiciones operativas para  $T_1 = -40$  °C.**

$L$ (m)	$v_0$ (m/s)	$H_0$ (cm)	$D_z \cdot 10^3$ (m <sup>2</sup> /s)	$F/WL$ ópti- mo (kg/m <sup>2</sup> s)	$F/W$ óptimo (kg/m s)	Cociente $F/W$ óptimo y $F/W$ óptimo $L=2$ m
2	1,96	4,30	0,288	0,1490	0,2980	1
4	2,35	5,10	0,854	0,1810	0,7240	2,4
8	2,82	6,15	2,650	0,2284	1,8372	6,2

Si se comparan las producciones máximas por unidad de ancho de lecho para 4 y 8 m respecto de la correspondiente a la longitud de lecho de 2 m, se observa que la relación de producciones máximas es mayor que la correspondiente a la relación de las respectivas longitudes. Si hubiera flujo pistón, sin mezclado longitudinal de sólidos, ambas relaciones deberían ser idénticas.

En la Tabla 4.2 se han incluido las alturas de lecho y velocidades del aire que corresponden a cada máximo. Con ellas se pueden calcular los coeficientes de dispersión longitudinal para cada longitud de lecho que también se incluyen en la Tabla 4.2.

La relación de los coeficientes  $D_z$  para 4 y 8 m respecto del correspondiente a 2 m es aproximadamente 3 veces mayor para 4 m y 9 veces mayor para 8 m, mientras que en el término de mezclado de la ec. (4.1) la relación de longitudes son 4 y 16 ( $L^2$ ) respectivamente.

De ello se puede concluir que el peso relativo de  $D_z$  en la ec. (4.1) es cada vez menor a medida que aumenta  $L$ , por ello las relaciones de  $F/W$  máximas crecen con una potencia de  $L$  mayor que 1. En consecuencia, si es posible, conviene utilizar congeladores lo más largos posible.

### **4.2.5.- Influencia de la temperatura del aire de entrada al lecho sobre la producción óptima en congeladores continuos de lecho fluidizado.**

Como se verá en las Figs. 4.6, 4.7 y 4.8, la temperatura posee incidencia sobre los valores de altura de lecho y velocidad de aire que generan los óptimos de producción.

Si la  $T_1$  disminuye aumenta la producción y los máximos se desplazan hacia mayores valores de  $v_0$  y  $H_0$ , a igualdad de los otros parámetros.

### **4.2.6.- Influencia del diámetro de partícula sobre la producción óptima en congeladores continuos de lecho fluidizado.**

Como ya se indicó, el diámetro de partícula seguramente produce cambios en los óptimos de producción a través del coeficiente de dispersión longitudinal (ec. (3.48)), y mediante la influencia relativa que posee  $t_f$  en el término de mezclado de la ec. (4.1).

Por ello la influencia del diámetro de partícula sobre  $F / W L$  óptimos está implícita en los análisis ya realizados.

El diámetro de partícula presenta una funcionalidad con la producción óptima que se presentará en la ec. (4.14) y, como se verá, obteniendo la producción óptima para un dado diámetro mediante simples constantes se puede obtener la producción óptima correspondiente al nuevo diámetro.

Por la información presentada, y como se manifestó, la optimización de la producción en éstos equipos requiere el análisis conjunto de todas las variables.

### **4.3.- Optimización de la producción en congeladores continuos de lecho fluidizado.**

En la Fig. 4.6 se presenta la influencia de todas las variables sobre la  $F / W L$  para  $T_l = - 35$  °C, y en la Fig. 4.7 se muestra información similar para  $T_l = - 40$  °C.

Fig. 4.6: Influencia de todas las variables sobre la producción de congeladores de lecho fluidizado continuos.  $T_1 = -35^\circ\text{C}$ .

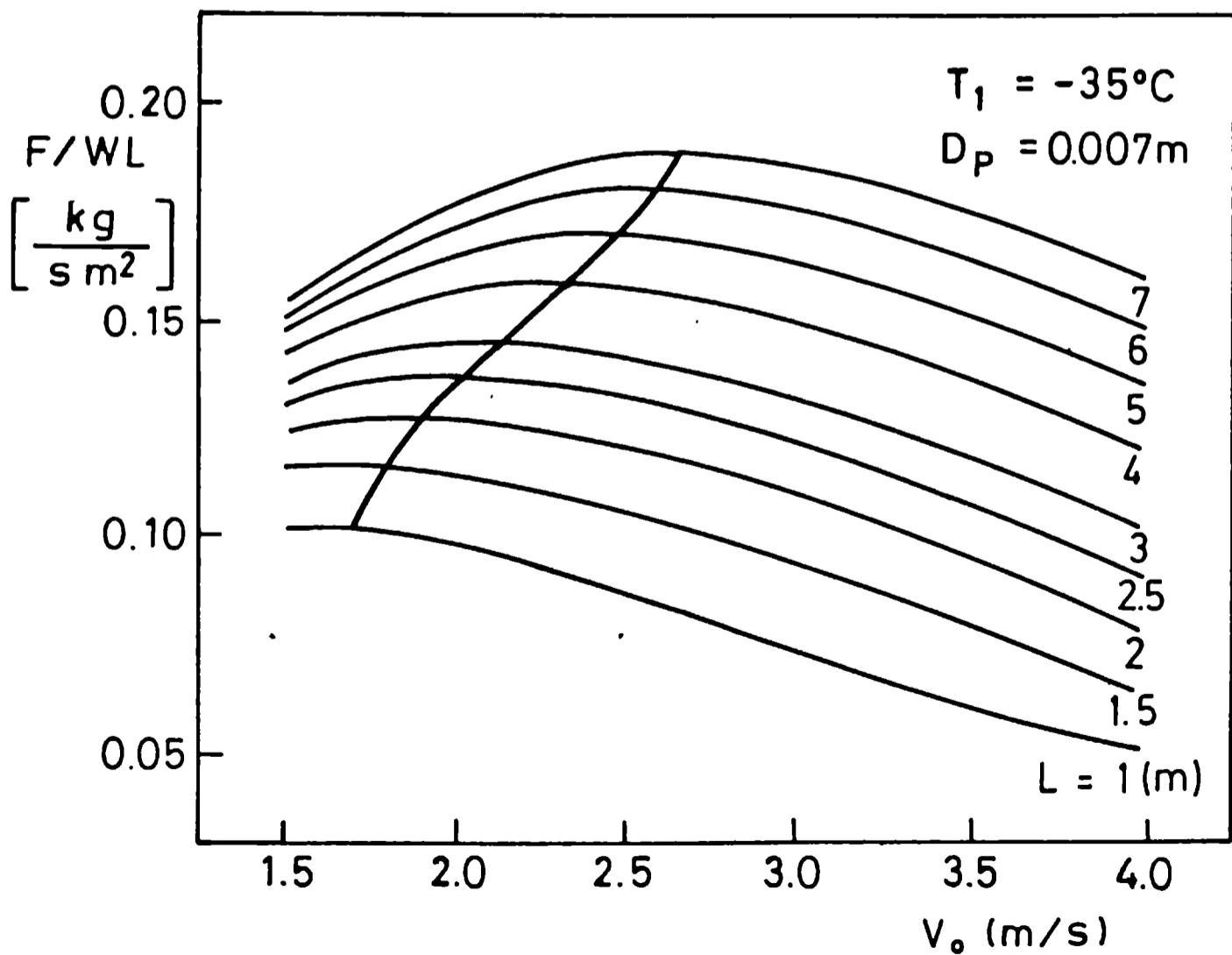
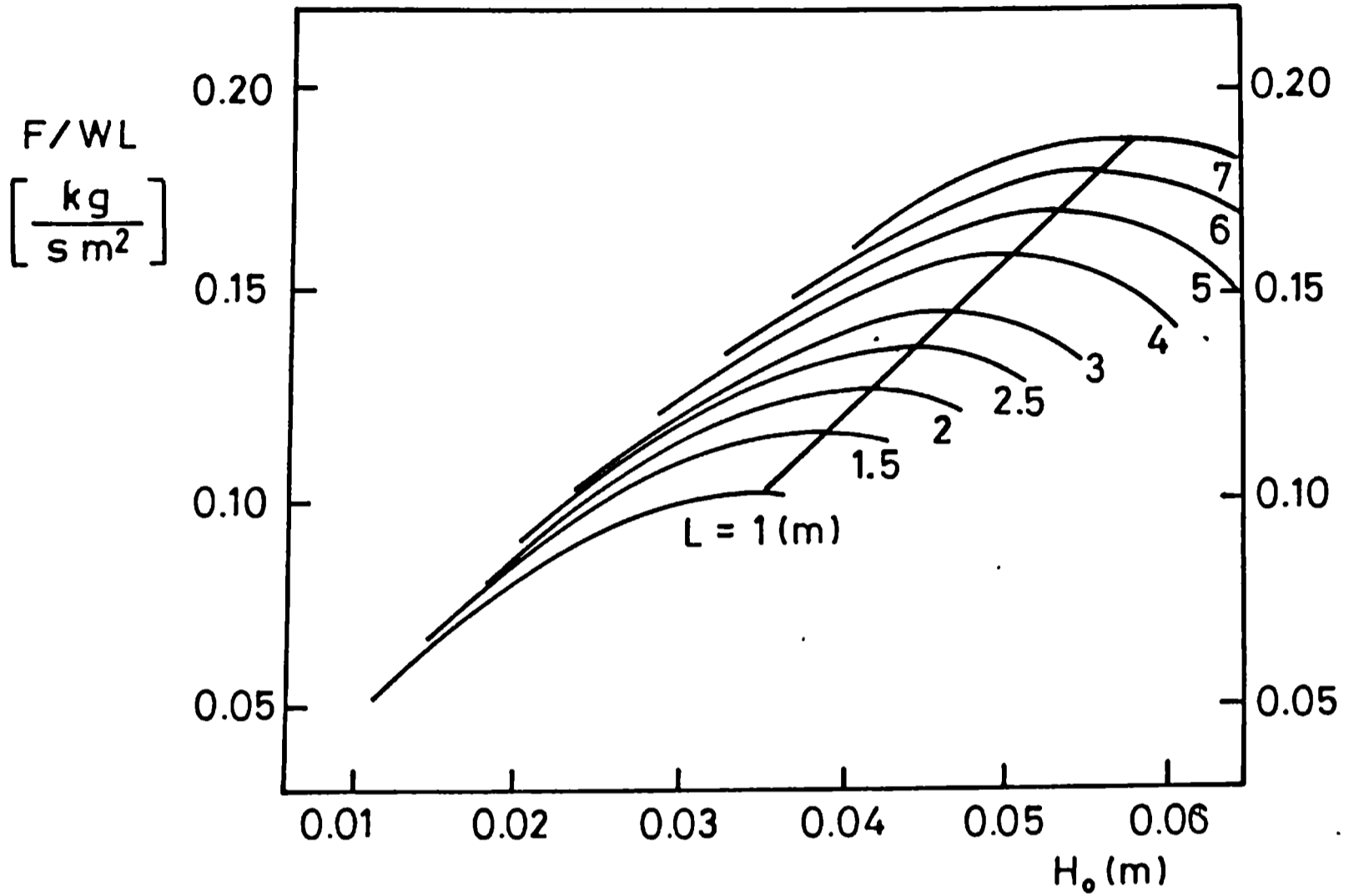
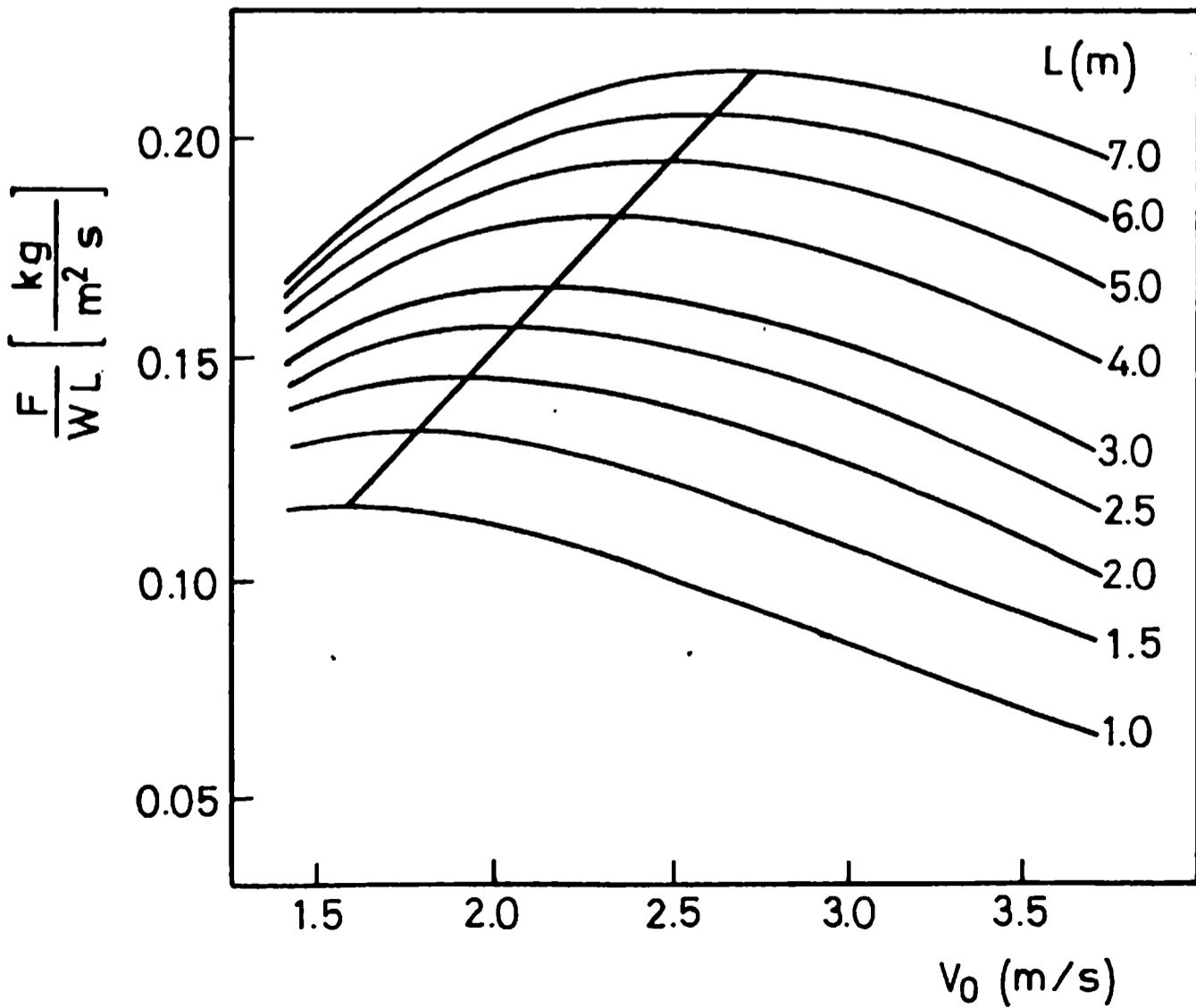
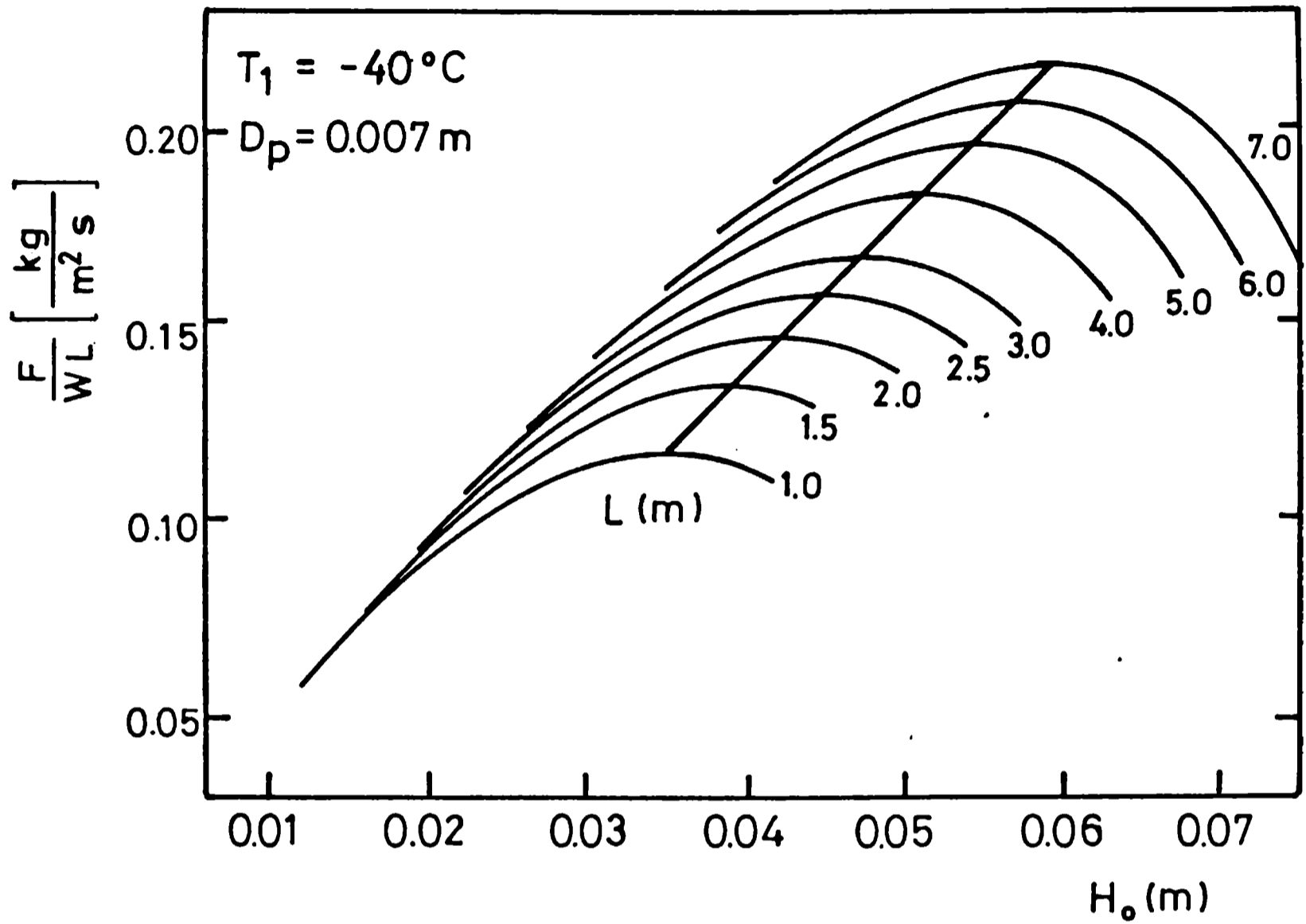




Fig. 4.7: Influencia de todas las variables sobre la producción de congeladores de lecho fluidizado continuos.  $T_1 = -40\text{ }^\circ\text{C}$ .



En el cuadro superior de las Figs. 4.6 y 4.7 se presenta  $F / W L$  en función de  $v_0$  para distintas longitudes de lecho, y en el cuadro inferior se muestra la misma dependencia pero en función de  $H_0$ .

Es necesario destacar que los valores de  $F / W L$  corresponden a la producción máxima que se obtiene en cada condición.

La producción máxima también presenta un valor máximo que corresponde al óptimo para cada temperatura y cada longitud de lecho.

Con una línea que corta las curvas correspondientes a los distintos  $L$  se han señalado los valores óptimos para la producción en ambos sectores de los gráficos.

Como se puede ver en las Figs. 4.6 y 4.7, la temperatura del aire modifica no solo el valor de  $F / W L$ , como era de esperar, sino que también modifica la posición de los valores óptimos de producción.

Los cuadros superior e inferior de las Figs. 4.6 y 4.7 no son independientes, sino que por el contrario están conectados entre sí de modo que accediendo a cualquiera de ellos quedan determinadas las variables en el otro.

Por ejemplo, si se desea ingresar al gráfico con una  $L$  predeterminada, ya sea en el óptimo de producción o fuera de él, trazando una horizontal sobre el valor de  $F / W L$  seleccionado se obtiene del cuadro superior la correspondiente velocidad del aire y del cuadro inferior la altura de lecho fijo. Se procede del mismo modo cualquiera sea la variable seleccionada para acceder al gráfico.

En las Figs. 4.6 y 4.7 se puede observar que los valores de  $F / W L$  correspondientes a los óptimos para cada longitud de lecho y cada temperatura tienen una tendencia a variar linealmente con  $v_0$  y  $H_0$ .

Es posible entonces proponer que los valores óptimos para cada temperatura se pueden representar mediante rectas del tipo:

$$\left[ \frac{F}{W L} \right]_{Opt.} = K_8 + K_9 v_0 \quad (4.10)$$

$$\left[ \frac{F}{W L} \right]_{Opt.} = K_{10} + K_{11} H_0 \quad (4.11)$$

Asimismo, en las Figs. 4.6 y 4.7 se puede ver que la producción óptima presenta una dependencia exponencial con la longitud de lecho, del tipo:

$$\left[ \frac{F}{W L} \right]_{opt.} = K_{12} L^{K_{13}} \quad (4.12)$$

Donde las constantes  $K_8$  a  $K_{13}$  son funciones de la temperatura  $T_l$  y de los otros parámetros, que en los óptimos son constantes para cada condición.

Realizando la simulación, con las ecuaciones de diseño, para un amplio rango de condiciones ( $T_l$  desde  $-20$  hasta  $-45$  °C;  $L$  desde 1 hasta 7 m;  $H_0$  desde 1 hasta 8 cm y  $v_0$  desde la  $v_{mf}$  hasta 4 m/s) se obtuvieron los valores óptimos para cada una de ellas.

## Optimización de la producción en congeladores continuos de lecho fluidizado

---

Regresionando dichos valores por cuadrados mínimos variando un solo parámetro ( $v_0$ ,  $H_0$  ó  $L$ ) por vez se obtuvieron los valores de las constantes, que para cada temperatura se presentan en la Tabla 4.3:

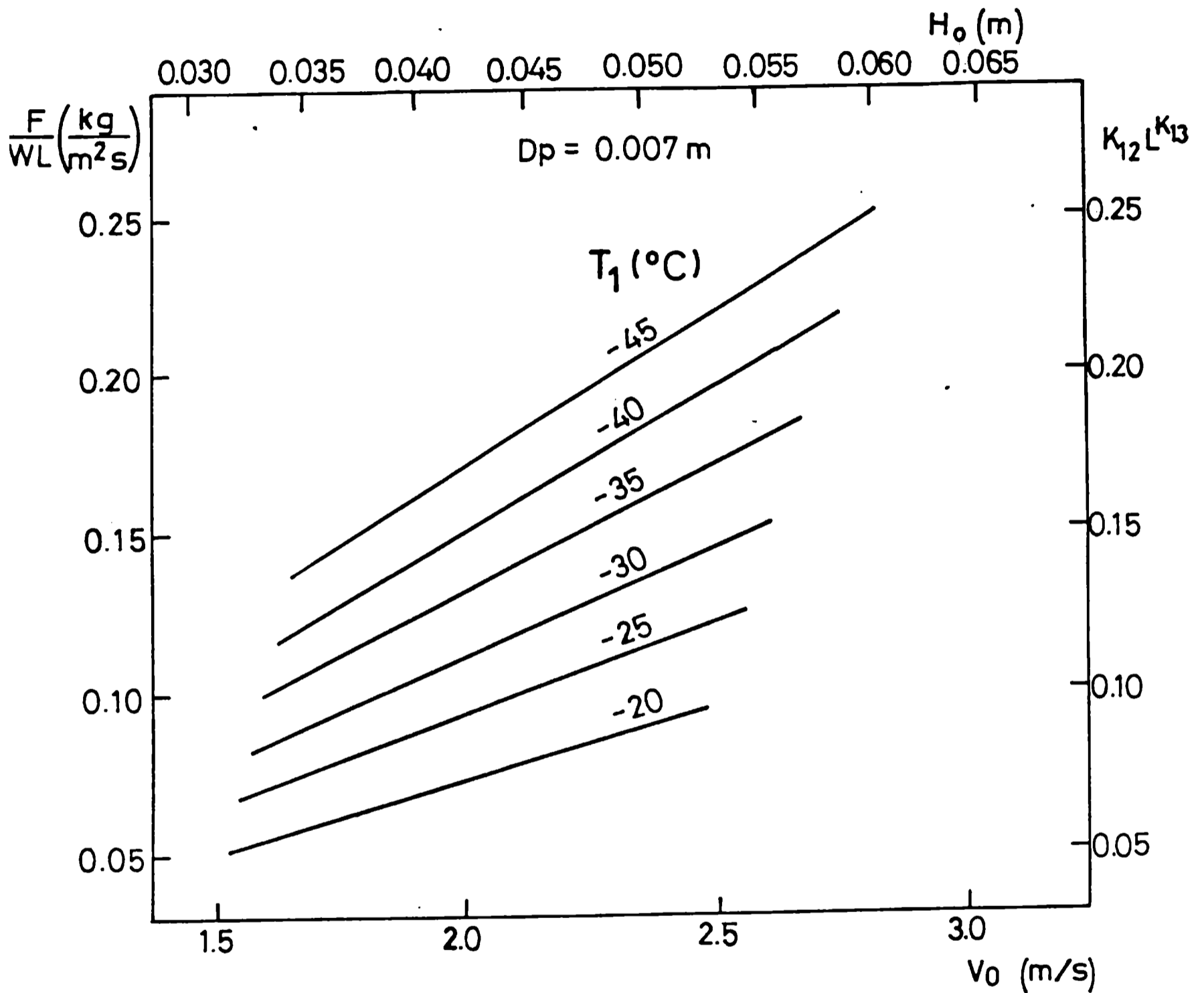
**Tabla 4.3: Constantes regresionadas para las ecs. (4.10), (4.11) y (4.12).**

$T_1$ (°C)	$K_8$	$K_9$	$K_{10}$	$K_{11}$	$K_{12}$	$K_{13}$
- 45	- 0,030	0,100	- 0,031	4,71	0,137	0,314
- 40	- 0,029	0,090	- 0,023	4,11	0,119	0,315
- 35	- 0,022	0,077	- 0,019	3,57	0,100	0,315
- 30	- 0,020	0,064	- 0,015	3,00	0,083	0,315
- 25	- 0,016	0,055	- 0,014	2,50	0,068	0,319
- 20	- 0,015	0,044	- 0,008	1,93	0,051	0,322

Los coeficientes de correlación superaron 0,99 en todos los casos.

Con las expresiones de las ecs. (4.10) a (4.12) se puede, para facilitar el uso de la información, construir un nomograma que incluya todas las variables de operación que modifican la producción óptima de éstos equipos. El mismo se presenta en la Fig. 4.8.

Fig. 4.8: Nomograma para obtener la producción óptima de congeladores continuos de lecho fluidizado en función de las condiciones de operación.



De la Fig. 4.8, si se fija la temperatura de operación eligiendo cualquier otra variable quedan determinadas todas las demás para obtener la producción óptima.

Por ejemplo, si se toma  $T_l = -30$  °C y se desea producir  $0,15 \text{ kg} / \text{m}^2 \text{ s}$  se obtiene:  $H_0 = 5,6 \text{ cm}$ ,  $v_0 = 2,6 \text{ m/s}$  y de la ec. (4.12)  $L = 6,5 \text{ m}$ .

Si por el contrario se cuenta con un congelador, se fija  $L$  y  $T_l$ . Se calcula  $F/W$  con la ec. (4.12) y entrando con ella se obtienen  $H_0$  y  $v_0$ .

Cuando por algún motivo se impone más de una condición, puede que no se esté trabajando en el óptimo entonces no se puede utilizar el nomograma de la fig. 4.8.

Sí se puede acceder a la información a través de las Figs. 4.6 y 4.7 para obtener producciones máximas, o con las Figs. 4.3 a 4.5 para trabajar fuera de los óptimos y de los máximos, o directamente con las ecuaciones de diseño (4.1) a (4.7). En éste caso es recomendable, como criterio adicional, tratar de minimizar el requerimiento de potencia de soplado.

El nomograma de la Fig. 4.8 fue desarrollado para arvejas de  $D_p = 0,7 \text{ cm}$ . Para partículas esféricas de otro diámetro se han utilizado las ecuaciones de diseño para obtener la dependencia de la producción óptima con  $D_p$  (ecs. (4.1) a (4.4), ec. (3.48) para  $D_z$  y ecs. (4.6) y (4.7)).

De los resultados de la aplicación del modelo se propuso una correlación para obtener la producción óptima para  $D_p$  distinto de  $0,7 \text{ cm}$ , que se presenta en la ec. (4.13) y válida para  $D_p$  entre  $0,5$  y  $1,0 \text{ cm}$ .

$$\left(\frac{F}{W L}\right)_{D_p} = \left(\frac{F}{W L}\right)_{0,7} [1 - (1,1 D_p - 0,77)] \quad (4.13)$$

Donde el primer miembro de la ec. (4.13) es la producción óptima para diámetro distinto de 0,7 cm y el primer factor del segundo miembro es la producción óptima para 0,7 cm de diámetro, siendo  $D_p$  el nuevo diámetro de partícula. Los errores que se obtuvieron cuando se comparaba la correlación de la ec. (4.13) con el modelo completo fueron menores que el 2 %.

#### 4.4.- Comparación de las ecuaciones de diseño con datos experimentales

Es realmente muy escasa la información difundida sobre valores experimentales que evalúen el funcionamiento de congeladores continuos de lecho fluidizado.

Estos equipos son provistos por muy pocas firmas. Ellas efectuaron el desarrollo y lo implementaron comercialmente sin publicar información. En cuanto a la investigación sobre éstos temas, muy pocos son los autores que han trabajado en el diseño de congeladores de lecho fluidizado para alimentos, y los pocos que lo hicieron estuvieron asociados a las empresas que actualmente proveen los equipos. Por ello la muy poca información difundida es muy parcial.

Los únicos datos disponibles también parciales fueron publicados, en sus catálogos comerciales, en sus manuales de operación y/o en sus especificaciones de medidas, pesos, etc., por la firma proveedora líder en el mercado mundial de éstos congeladores, Frigoscandia Co.

Los valores, que seguramente fueron desarrollados por Persson, se han publicado en forma muy parcial (Persson, 1967).

## Optimización de la producción en congeladores continuos de lecho fluidizado

---

Los datos fueron tomados por otros autores. Lermuzeaux ha desarrollado una correlación entre la velocidad superficial del aire recomendada para trabajar en congeladores de lecho fluidizado y la velocidad de mínima fluidización para partículas esféricas (Lermuzeaux, 1968), y por Gruda y Postolski, que trabajaron mucho en el desarrollo de congeladores continuos de doble cinta arrastrada en Polonia (Gruda y Postolski, 1986). Estos últimos autores tampoco, por el desarrollo emprendido, han generado mucha información sobre congeladores continuos de lecho fluidizado.

Sus trabajos se basan principalmente en la medición experimental de coeficientes de transferencia de calor y su variación a lo largo del equipo y pérdida de peso durante la congelación continua de alimentos en equipos industriales. Los valores promedio para los coeficientes de transferencia de calor no difieren de aquellos desarrollados por Vázquez y Calvelo, 1980, 1983a, pero permiten visualizar como varían los mismos en el recorrido longitudinal de los sólidos. Los datos sobre la producción de congeladores de lecho fluidizado continuo, que se pudieron obtener se presentan en la Tabla 4.4

**Tabla 4.4: Producción de congeladores continuos de lecho fluidizado, informada por Frigoscandia, 1977, en función de la longitud de lecho para arvejas.**

$L$ (m)	$F_c$ (kg/h)	$F_c / F_{c(2,21\text{ m})}$
2,21	850	1,00
3,83	2.100	2,47
5,45	3.150	3,70
7,07	4.200	4,94
8,69	5.250	6,18
10,31	7.000	8,23

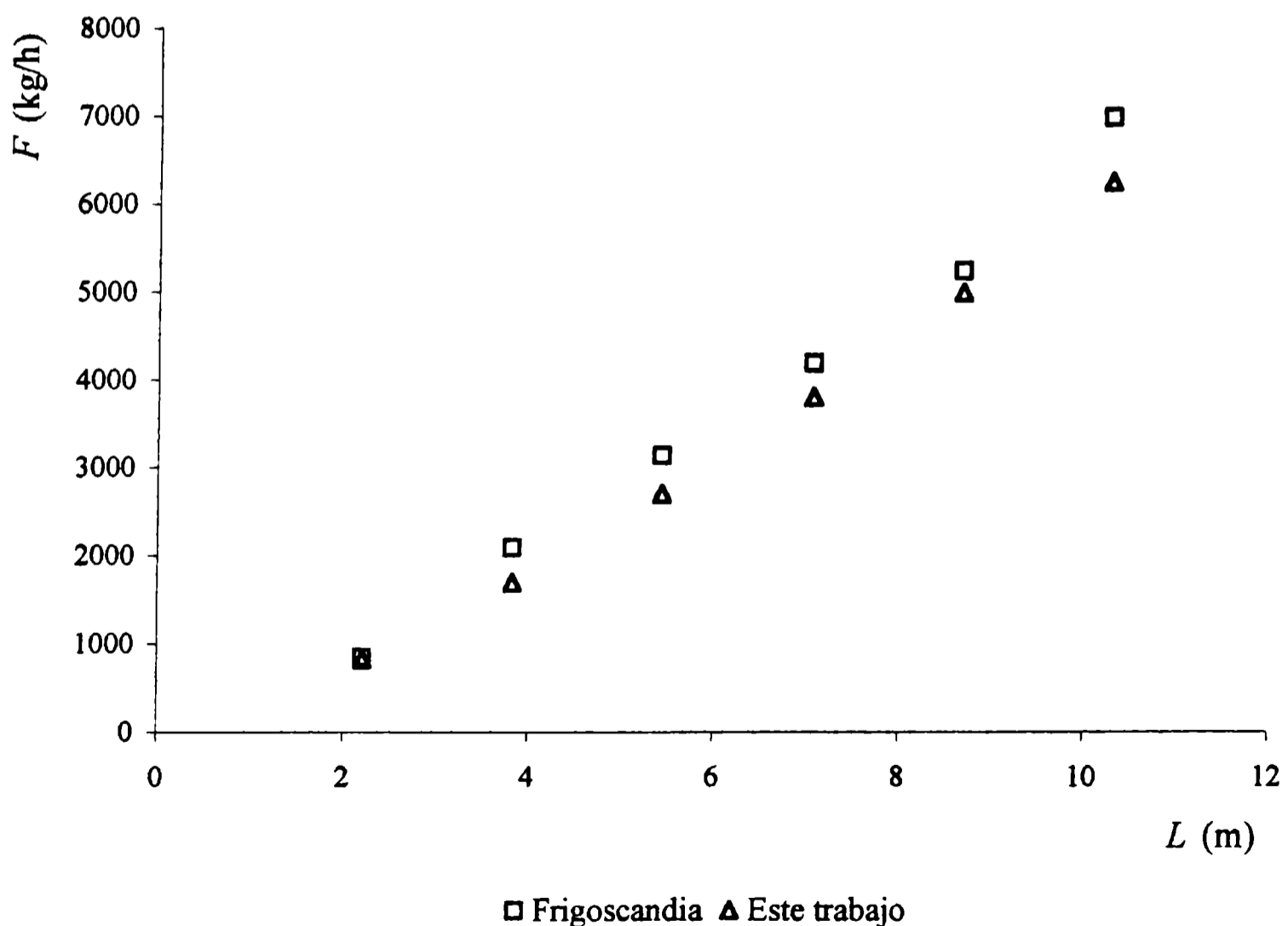


En la misma Tabla 4.4 se ha volcado la relación entre las producciones para cada longitud de lecho respecto de la producción del lecho de menor longitud. Como se puede ver la relación  $F_c / F_{c(2,21\text{ m})}$  es muy próxima a la informada en la Tabla 4.2 con resultados de éste trabajo.

Si se regresionan los valores de producción de la Tabla 4.4, se obtiene una funcionalidad de  $F_c$  con  $L$  igual a la indicada en la ec. (4.12) y con constantes de regresión muy parecidas (0,321 y 0,119) con un coeficiente de regresión de 0,986.

Comparando los valores de producción informados en la tabla 4.4 con los estimados mediante el nomograma de la Fig. 4.8 de éste trabajo, se obtuvieron los resultados indicados en la Fig. 4.9.

**Fig. 4.9: Comparación de la producción informada por Frigoscandia, 1977. Con la predicha por el modelo propuesto en éste trabajo.**



Los errores obtenidos, de la comparación presentada en la Fig. 4.9, están comprendidos entre 2,8 y 19 %, con un promedio de 11 %.

La concordancia puede considerarse satisfactoria si se tiene en cuenta la muy poca certeza que se tuvo sobre los valores no informados en los catálogos comerciales. Ellos fueron:

- ✓ El ancho de lecho,  $W$ , que se asumió igual a 0,65 m comparando escalas de una fotografía de un equipo en funcionamiento.
- ✓ Las propiedades del producto que se utilizaron (ver apartado 4.2.- de éste trabajo).
- ✓ La temperatura inicial del producto que se tomó como 15 °C, pudiendo ser menor como consecuencia del enfriamiento posterior al escaldado en la línea de producción.
- ✓ La temperatura de ingreso del aire al lecho, que fue establecida por comparación con un equipo de la firma instalado en la Argentina y la obtenida en un trabajo de Gruda, 1999.
- ✓ El diámetro de partícula que fue asumido de 0,7 cm, promedio de arvejas congeladas de tres marcas que se comercializan en el mercado minorista argentino, dos importadas y una nacional. Se puede decir que los diámetros relevados de los mencionados productos fueron diversos desde 0,5 a 0,8 cm. El promedio se obtuvo de los paquetes que a la vista presentaban arvejas grandes.

Los valores de alturas de lecho predichos por el modelo presentado, en los óptimos de producción para las longitudes de lecho usuales en estos equipos, fueron

de entre 4,4 y 6,4 cm. Estos valores coincidieron con los valores informados por Ciobanu y col., 1976, para congeladores comerciales.

Las velocidades de aire en condiciones de producción óptima para las longitudes de lecho consideradas (2,21 a 10,31 m), predichas por el modelo estaban comprendidas entre 1,77 y 2,78 m/s. Estos valores coinciden con los informados por Lermuzeaux, 1968, y con la correlación de Persson, 1967, para lechos fluidizados que relaciona el número de Froude con el número de Reynolds.

Por lo expresado es posible considerar que las ecuaciones de diseño de congeladores continuos de lecho fluidizado representan adecuadamente el proceso, y predicen satisfactoriamente tanto la producción como la incidencia de las variables de operación sobre la misma.

### **4.5.- Aplicación de las ecuaciones de diseño para otros productos y otras formas de alimentos**

El modelo presentado, como se mostró en la Tabla 3.10 del capítulo 3 de éste trabajo, predice con buena aproximación el funcionamiento de congeladores continuos de lecho fluidizado para formas como las estudiadas aquí y para diversos tamaños, e incluso evalúa satisfactoriamente el comportamiento de otras formas como las zanahorias enteras y chauchas cortadas para las cuales se calculó la porosidad de lecho expandido con la ecuación correspondiente a los bastones de papa de 1 x 1 x 5 cm.

Sin embargo, es de práctica habitual en los catálogos comerciales, expresar la producción de estos congeladores en función de un coeficiente de rendimiento en relación a la capacidad de congelación de arvejas. Un ejemplo de ello se presenta en la Tabla 4.5, en la que se incluyen las predicciones del modelo para los mismos

## Optimización de la producción en congeladores continuos de lecho fluidizado

---

productos, formas y tamaños, y el error % comparado con los valores informados en la bibliografía.

**Tabla 4.5: Coeficientes de rendimiento (rendimiento % para otros productos referido a la capacidad de producción de arvejas) en congeladores continuos de lecho fluidizado.**

<b>Producto Tamaño</b>	<b>Coeficiente de rendimiento (Frigoscandia, 1977; Gruda y Postolski, 1986)</b>	<b>Coeficiente de rendimiento (Este trabajo)</b>	<b>Error %</b>
Arvejas 0,7 cm	100	100	-----
Repollos de Bruselas			
2,5 cm	65	61	- 6,1
4,0 cm	45	47	4,4
Frutillas			
2,5 cm	55	52	- 5,5
3,5 cm	40	38	- 5,0
Albóndigas de carne			
2,5 cm	40	43	7,5
Espárragos cortados			
2,5 cm	50	54	8,0
Puerro			
1,3 cm	40	35	- 12,5
Chauchas			
0,7 x 3,0 cm	75	70	- 6,7

<b>Tabla 4.5: Continuación</b>			
Zanahorias enteras (baby) 2 x 5 cm	45	49	8,9
Cubos de nabo 1 cm	80	78	- 2,5
Cubos de zanahoria 1 cm	80	81	1,3
Cubos de manzana 1,3 cm	60	63	5,0
Bastones de papa 0,5 x 0,5 x 5,0 cm	95	96	1,1
Bastones de colirrabano 1 x 1 x 5 cm	65	64	- 1,5

Como se puede observar en la Tabla 4.5 la predicción de los coeficientes de rendimiento del modelo es muy buena. Los errores porcentuales respecto de los valores informados por Frigoscandia y Gruda y Postolski, estuvieron comprendidos entre - 12,5 y 8,9 con un promedio de - 0,25 %.

Asimismo, se puede ver que los máximos apartamientos los presentan los productos cilíndricos (espárrago, chaucha, zanahoria entera y puerro), geometría para la cual se estimó la porosidad del lecho expandido con la ecuación correspondiente a los bastones de papa.

Para las formas estudiadas en éste trabajo los errores varían entre - 6,1 y 7,5 %, y para las formas y tamaños considerados en éste estudio entre - 2,5 y 1,1 %.

La porosidad de lecho expandido para los diferentes tamaños de las formas consideradas en éste trabajo se obtuvo utilizando las ecuaciones correspondientes a las arvejas para las esféricas, a los cubos de papa para las cúbicas y a los bastones de papa para los paralelepípedos rectangulares.

### 4.6.- Comparación de la producción de lecho fluidizado y lecho fijo

En el desarrollo de la ec. (3.50), del capítulo 3 de éste trabajo, se asumió mezclado total en el sentido de la circulación del aire, por ello dicha ecuación no puede utilizarse para predecir producciones de congeladores en lecho fijo aun considerando el coeficiente de mezclado longitudinal  $D_z = 0$ .

En los congeladores de lecho fijo las condiciones son distintas ya que al no existir mezclado en ninguna dirección, y por ende tampoco en la dirección del flujo del aire, a medida que se asciende en la altura de lecho las partículas son sometidas a distintas condiciones de temperatura del aire. Es decir, que la condición térmica de la partícula no solo cambia en el sentido de avance global de los sólidos, como en el lecho fluidizado, sino que también cambia con la altura de lecho.

Por ende la transferencia de calor ocurre de un modo distinto que en lecho fluidizado. La bibliografía existente sobre este tema es muy escasa (Gruda, 1979, 1983; Gruda y Postolski, 1986; Reynoso y Calvelo, 1985). En los trabajos de Gruda y de Gruda y Postolski el problema se enfoca desde la experiencia obtenida en equipos congeladores de cinta arrastrada desarrollados en Polonia.

La única publicación encontrada que abordó este problema desde los fundamentos fue la de Reynoso y Calvelo, 1985, quienes estudiaron la congelación de

arvejas en lecho fijo y efectuaron algunas comparaciones entre lecho fijo y lecho fluidizado.

Los mencionados autores sobre la base de que la temperatura del gas en el lecho fijo varía en la dirección de avance de los sólidos (coordenada  $z$ ) y con la altura de lecho (coordenada  $x$ ) propusieron que los mencionados cambios en la temperatura del aire provocaban diferentes velocidades del frente de congelación en las partículas:  $\xi = \xi(x, z) = D / D_0$ ,  $D$  es el diámetro correspondiente a la posición actual del frente de congelación y  $D_0$  el diámetro de la partícula. En base a ello plantearon un balance de energía térmica pseudo estacionario en el aire que circula en un diferencial de volumen de lecho fijo  $W dz dx$ , donde  $W$  es el ancho del lecho:

$$C_p G \frac{\partial T}{\partial x} = q_0 a_v \quad (4.14)$$

Donde  $T$  es la temperatura del aire,  $C_p$  y  $G$  son el calor específico y el flujo másico de aire y  $a_v$  es el área de partícula por unidad de volumen de lecho.

$q_0$  es el flujo de calor en la superficie de la arveja, que definieron:

$$q_0 = \frac{h(T_i - T)}{Bi_0 \left( \left( \frac{1}{\xi} \right) - 1 \right) + 1} \quad (4.15)$$

Reemplazando la ec. (4.15) en la ec. (4.14) obtuvieron:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{h(T_i - T)a}{\left[ Bi \left( \frac{1}{\xi} - 1 \right) + 1 \right] C_p G} \quad (4.16)$$

Para resolver la ec. (4.16) es necesario conocer la función  $\xi = \xi(x, z) = D / D_0$ , para ello plantearon que el flujo de calor en el frente de congelación es, con  $\rho_s = \text{constante}$ :

$$q = -\lambda_f Y_0 \rho_s \frac{dD}{dt} \quad (4.17)$$

Asumiendo estado pseudo estacionario en la conducción de calor en la fase congelada se puede escribir:  $q_0 D_0^2 = q D^2$ , introduciendo en esta ultima las ecs. (4.17) y (4.15), y considerando que la velocidad de avance del volumen de lecho fijo considerado, a lo largo del congelador, es:  $V_b = z / t$ , encontraron:

$$\frac{\partial \xi}{\partial z} = - \frac{h(T_i - T)}{V_b \lambda_f Y_0 D_0 \xi^2 \left[ Bi \left( \frac{1}{\xi} - 1 \right) + 1 \right]} \quad (4.18)$$

Con las siguientes condiciones de contorno:

$$\xi = 1 \quad \text{en} \quad z = 0 \quad \text{para} \quad x \geq 0 \quad (4.19)$$

$$T = T_1 \quad \text{en} \quad x = 0 \quad \text{para} \quad z \geq 0$$

Definieron:

$$\eta^* = \frac{T_i - T}{T_i - T_1}, \quad x^* = \frac{x a k}{C_p G D_0} \quad \text{y} \quad z^* = \frac{z k (T_i - T_1)}{V_b \lambda_f Y_0 \rho_s D_0^2}, \quad \text{con lo que las}$$

ecuaciones (4.16), (4.18) y (4.19) se reescribieron:



$$\frac{\partial \eta^*}{\partial x^*} = -\frac{Bi \eta^*}{Bi \left( \frac{1}{\xi} - 1 \right) + 1} \quad (4.20)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial z^*} = \frac{Bi \eta^*}{\xi^2 \left[ Bi \left( \frac{1}{\xi} - 1 \right) + 1 \right]} \quad (4.21)$$

$$\xi = 1 \quad \text{en} \quad z^* = 0 \quad \text{para} \quad x^* \geq 0 \quad (4.22)$$

$$\eta^* = 1 \quad \text{en} \quad x^* = 0 \quad \text{para} \quad z^* \geq 0$$

Las ecs. (4.20) a (4.22) las resolvieron numéricamente mediante un esquema en diferencias finitas, encontrando los perfiles de temperatura del aire en la altura de lecho para distintas posiciones en la longitud del mismo, que se presentan para un caso particular en la Fig. 4.10; y la posición del frente de congelación en las partículas en función de las coordenadas de la posición del lecho que se presenta en la Fig. 4.11.

Fig. 4.10: Distribución de la temperatura adimensional del aire ( $\eta'$ ) en función de la altura de lecho ( $x'$ ) para distintas posiciones en la longitud del lecho ( $z'$ ) (Adaptado de Reynoso y Calvelo, 1985)

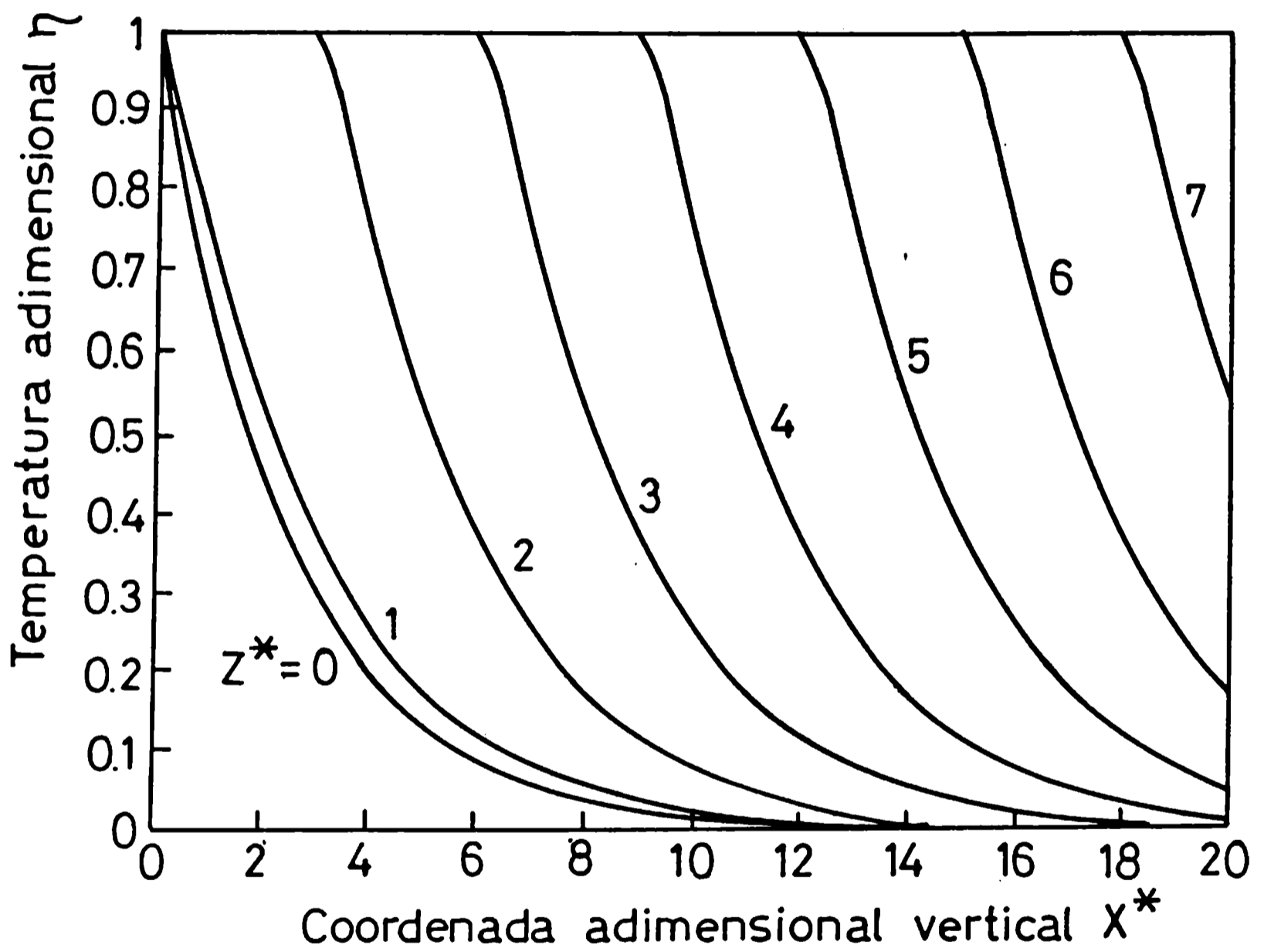
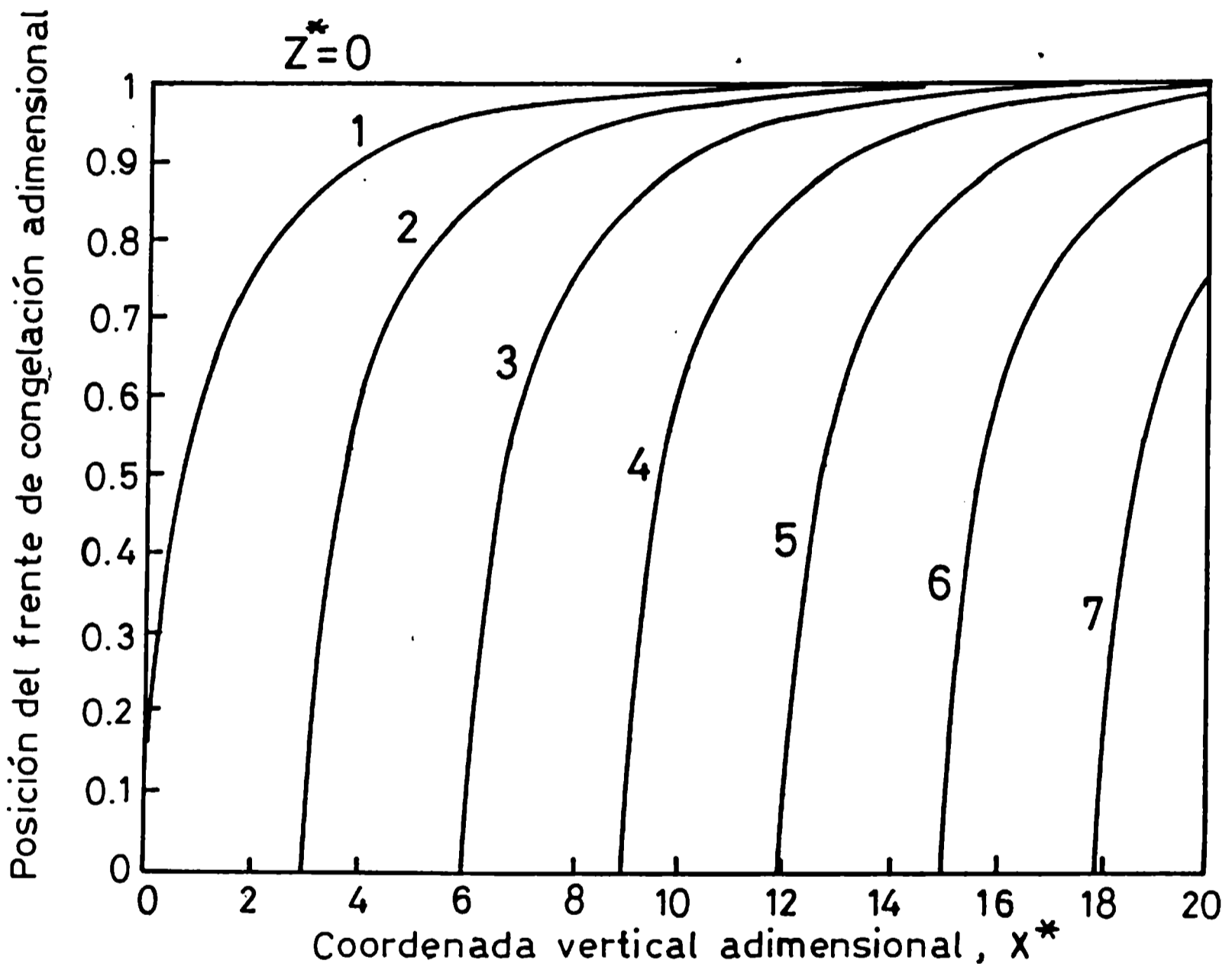


Fig. 4.11: Posición del frente de congelación en las partículas ( $\xi$ ) en función de la altura de lecho ( $x^*$ ) para distintas posiciones en la longitud del lecho ( $z^*$ ) (Adaptado de Reynoso y Calvelo, 1985)



Los resultados presentados en las figuras 4.10 y 4.11 permitieron a los autores verificar que el funcionamiento de los lechos fijos es distinto que el de lechos fluidizados, ya que en este último sólo existirá la variación de la temperatura del aire

con las coordenadas de altura y longitud de lecho y sólo se encontrará la distribución de posiciones del frente en las partículas de congelación en función de la longitud de lecho.

Reynoso y Calvelo, 1985, analizando el sistema de ecuaciones hiperbólico (4.20) a (4.22), encontraron una relación analítica entre la longitud  $z^*$  necesaria para que las partículas se congelen totalmente en función de la posición en la altura de lecho  $x^*$ , según:

$$z^* = \left(1 + \frac{2}{Bi} + 2x^*\right) / 6 \quad (4.23)$$

De la cual se puede despejar la velocidad de avance de los sólidos en el lecho (ver definición de  $z^*$  y de  $x^*$ ) de acuerdo a:

$$V_b = \frac{6 L k (T_i - T_1)}{\lambda_f Y_0 \rho_s R_0^2 \left[ \left(1 + 2 / Bi\right) + \left(2 a H_0 k / C_p G R_0\right) \right]} \quad (4.24)$$

Donde  $R_0$  es el radio de la partícula,  $V_b$  corresponde a la velocidad de avance de la cinta en el congelador.

Como en estos congeladores existe flujo pistón de los sólidos, la producción de los mismos se puede obtener:

$$F = W H_0 (1 - \varepsilon_0) \rho_s V_b \quad (4.25)$$

Reemplazando la ec. (4.24) en la (4.25):

$$F = W H_0 (1 - \varepsilon_0) \rho_s \frac{6 L k (T_i - T_1)}{\lambda_f Y_0 \rho_s R_0^2 \left[ (1 + 2 / Bi) + (2 a H_0 k / C_p G R_0) \right]} \quad (4.26)$$

Despejando la producción por unidad de área de lecho:

$$\frac{F}{W L} = \frac{6 H_0 (1 - \varepsilon_0) \rho_s k (T_i - T_1)}{\lambda_f Y_0 \rho_s R_0^2 \left[ (1 + 2 / Bi) + (2 a H_0 k / C_p G R_0) \right]} \quad (4.27)$$

La ec. (4.27) se puede reescribir:

$$\frac{F}{W L} = \frac{H_0 (1 - \varepsilon_0) \rho_s}{\frac{\lambda_f Y_0 \rho_s R_0^2}{3 k (T_i - T_1)} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{Bi} \right) + \frac{\lambda_f Y_0 \rho_s H_0 (1 - \varepsilon_0)}{C_p G (T_i - T_1)}} \quad (4.28)$$

El primer término del denominador del segundo miembro de la ec. (4.28) es el tiempo de congelación de las partículas definido por Plank, 1963.

A los efectos de realizar comparaciones entre las producciones de lecho fijo y lecho fluidizado, se reemplazó el tiempo de congelación en la ec. (4.28) por el correspondiente a la ec. (2.57) del capítulo 2 de éste trabajo y se modificó la ec. (4.28) de modo de calcular la producción para que salga, al igual que en lecho fluidizado, el 95 % de las partículas totalmente congeladas (para tener en cuenta la última consideración en la ecuación de definición de  $x^*$  se multiplica por 0,95, Reynoso y Calvelo, 1985).

Entonces la ec. (4.28) queda expresada:

$$\frac{F}{WL} = \frac{H_0(1-\varepsilon_0)\rho_s}{t_f + \frac{\lambda_f Y_0 \rho_s H_0(1-\varepsilon_0)}{C_p G(T_i - T_1)}} 0,95 \quad (4.29)$$

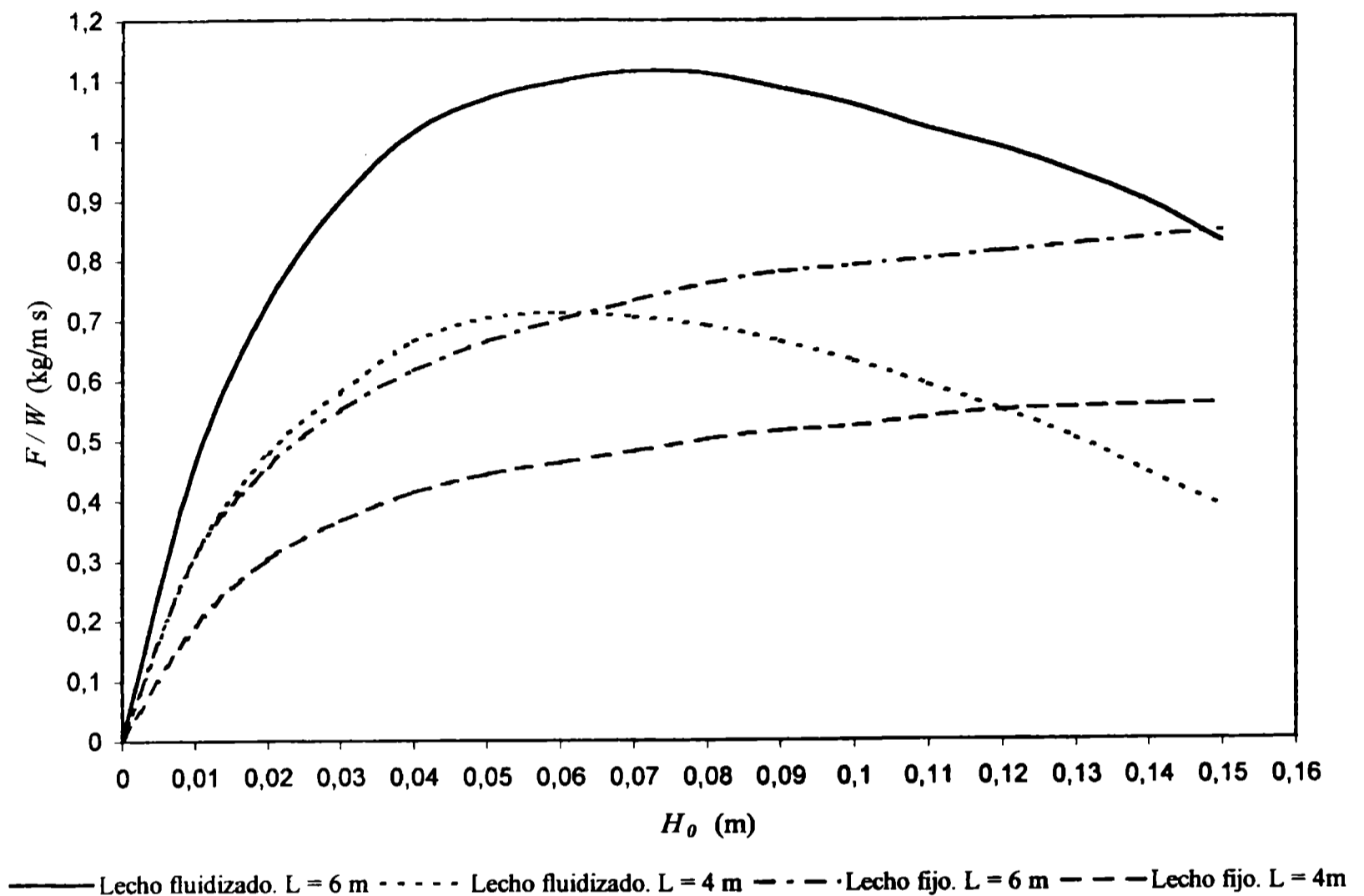
Respecto de las velocidades de trabajo se asumió para lecho fijo una velocidad de aire de 0,8 veces de la de mínima fluidización, y para lecho fluidizado se consideró 1,2 veces la velocidad de mínima fluidización (Gruda, 1979, 1983; Gruda y Postolski, 1986; Reynoso y Calvelo, 1985).

Los coeficientes de transferencia para lecho fluidizado se tomaron de igual modo que en el capítulo 3 de este trabajo, y para lecho fijo el recomendado por Reynoso y Calvelo, 1985, que corresponde a la correlación de Bradshaw y Myers, 1963. Para una temperatura de aire de - 30 °C los coeficientes calculados fueron de 150,8 W/m<sup>2</sup>·C para lecho fijo y 162,2 W/m<sup>2</sup>·C para lecho fluidizado. Como se ve la diferencia en los valores del coeficiente de transferencia de calor es mínima, por ende las probables diferencias en los valores de producción prácticamente no dependen del valor del coeficiente de transferencia de calor.

Para las comparaciones se consideró arvejas de  $D_p = 0,7$  cm y con las mismas propiedades que las utilizadas en el capítulo 3 de este trabajo. Las propiedades del aire a - 30 °C se tomaron de Perry y Chilton, 1982.

En la Fig. 4.12 se presenta la velocidad de producción por unidad de ancho de lecho para ambos tipos de equipos en función de la altura de lecho.

**Fig. 4.12: Velocidad de producción por unidad de ancho de lecho en función de la altura de lecho fijo, para dos valores de longitud de lecho.**



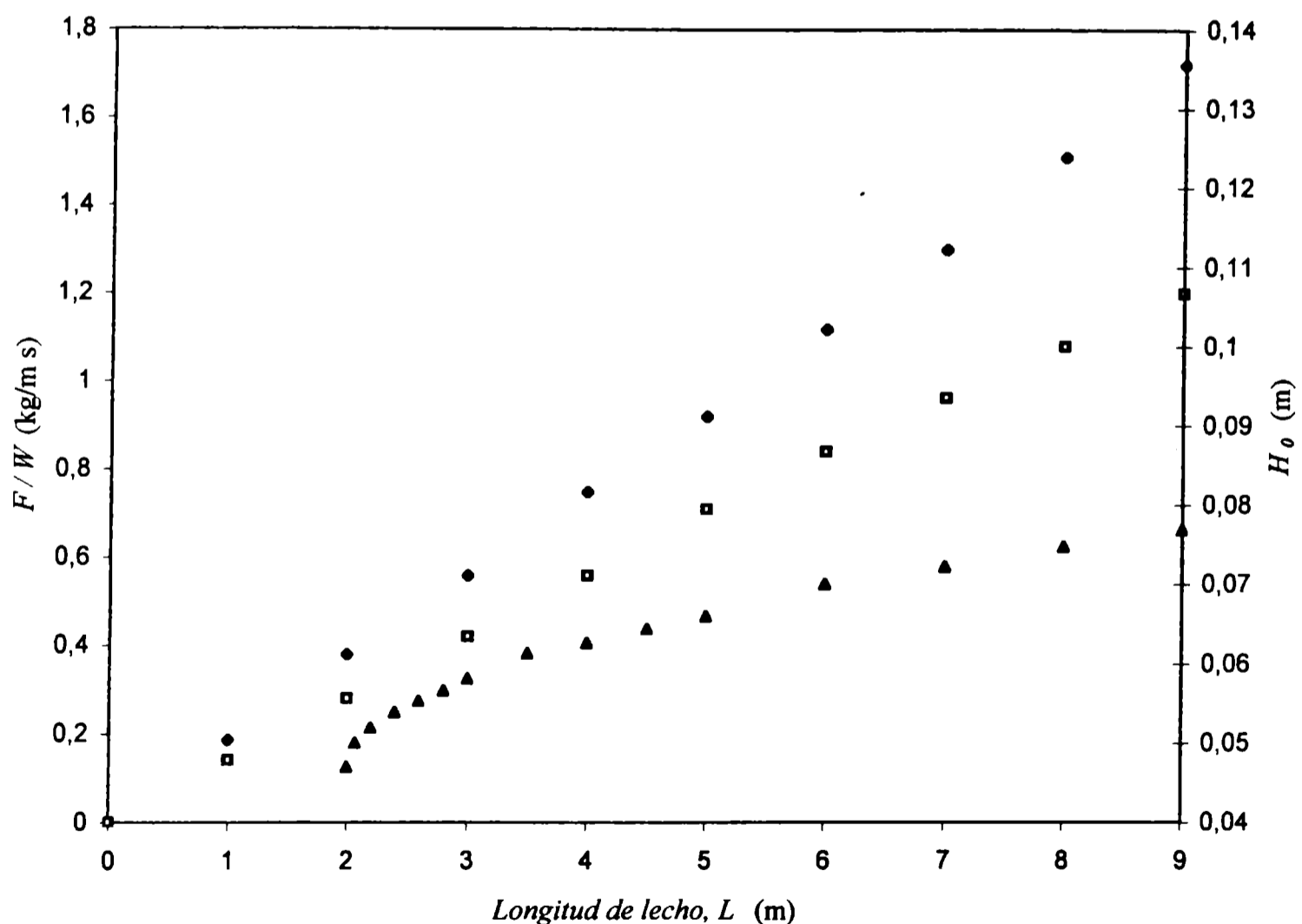
En la Fig. 4.12 se puede observar, que dependiendo de la longitud del equipo la producción del lecho fluidizado, comparando en la posición de máximos, es de 20 hasta 50 % mayor que en el lecho fijo. También se puede ver, como ya se había indicado en el capítulo 4, la fuerte influencia de la altura sobre la producción del lecho fluidizado.

En la Fig. 4.13 se ha representado la producción en función de la longitud de lecho, con  $H_0 = 22$  cm para lecho fijo, y la producción máxima para distintas alturas de lecho fluidizado. Si se observa la función de la ec. (4.29), se nota que la misma no

presenta máximos, sino que crece asintóticamente a medida que aumenta la altura del lecho fijo.

Para lecho fijo, se ha seleccionado la  $H_0 = 22$  cm ya que hasta dicha altura se observan aumentos de producción de los mismos. Por encima de 22 cm los cambios en los valores de producción del lecho fijo son imperceptibles. Es necesario indicar que estos valores de altura prácticamente no se utilizan, sólo se han considerado a los efectos de efectuar las comparaciones en condiciones de máxima producción teórica posible en lecho fijo.

Fig. 4.13: Velocidad de producción en función de la longitud de lecho para lecho fijo,  $H_0 = 22$  cm y para lecho fluidizado operando en el máximo.



● Lecho fluidizado ■ Lecho fijo ▲ Altura de lecho vs.  $L$  Lecho fluidizado



Como se ve en la Fig. 4.13 la longitud necesaria para obtener la misma producción en lecho fijo es de 20 a 30 % mayor que en lecho fluidizado, como era de esperar de acuerdo a los resultados de la Fig. 4.12.

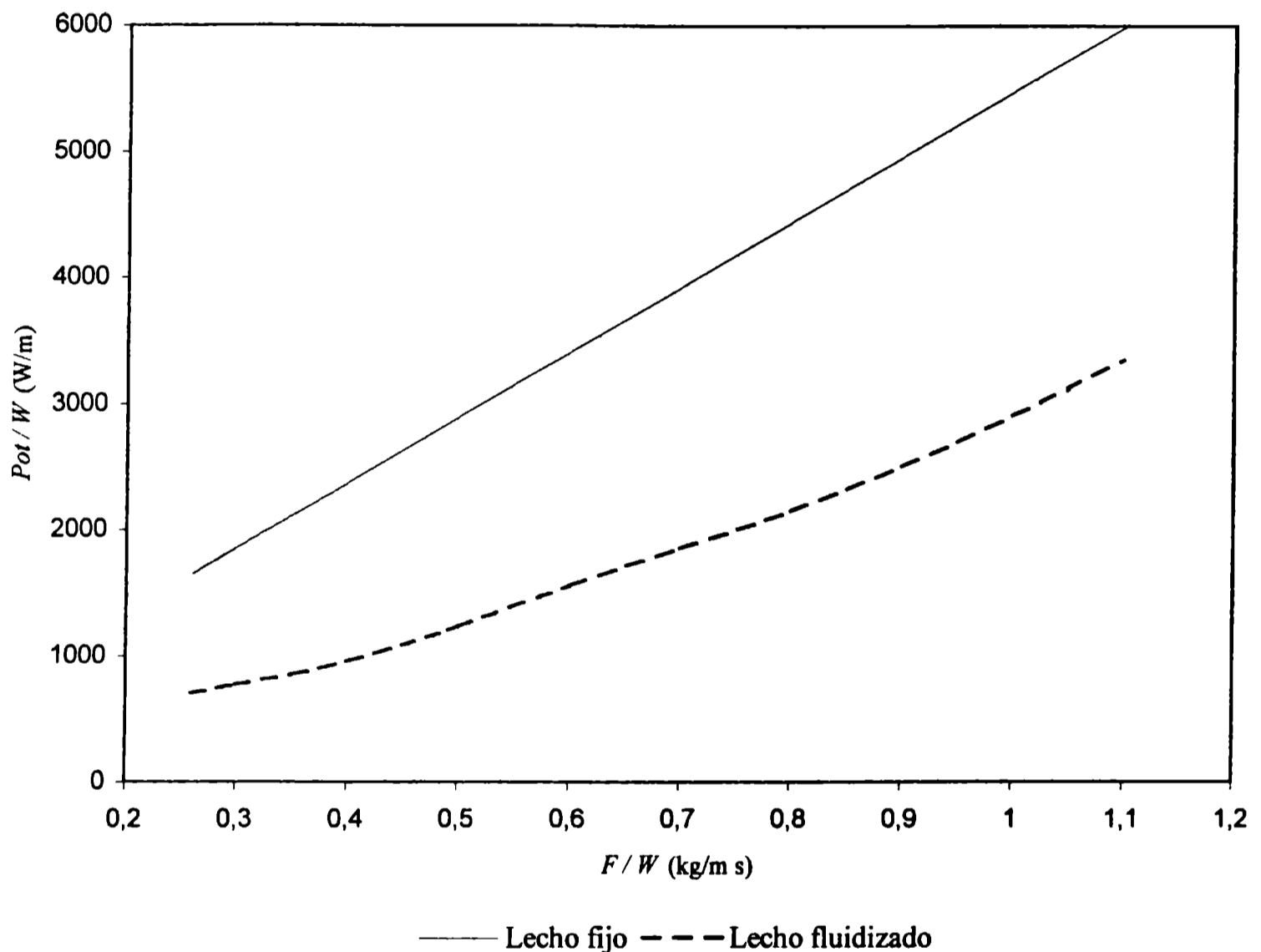
También, es posible comparar la potencia de soplado por unidad de ancho de lecho ( $P_{ot}/W = \Delta P v_0 L$  (4.20) ) en función de la producción, obteniendo la pérdida de carga  $\Delta P$  mediante la utilización de la ecuación de Ergun para lecho fijo y de la ec. (4.9) para lecho fluidizado.

Si se compara la potencia de soplado para el mismo tamaño de equipo, obviamente por la ec. (4.20), la potencia aplicada es mayor en lecho fluidizado que en lecho fijo ya que la velocidad del aire es mayor en el primero.

Sin embargo la comparación de potencia consumida debe efectuarse para la misma cantidad producida, ya que el tamaño de los equipos, como se vio en la Fig. 4.13, es distinto.

En la Fig. 4.14 se presenta la potencia de soplado por unidad de ancho de lecho en función de la velocidad de producción por unidad de ancho de lecho para lecho fijo, y para lecho fluidizado operando en condiciones de máxima producción.

**Fig. 4.14:** Potencia de soplado por unidad de ancho de lecho ( $P_{ot}/W$ ) en función de la velocidad de producción por unidad de ancho de lecho ( $F/W$ ) para el lecho fijo funcionando con  $H_0 = 22$  cm y  $v_0 = 0,8 v_{mf}$ , y el lecho fluidizado funcionando en el máximo de producción con  $v_0 = 1,2 v_{mf}$ .



Como se observa en la Fig. 4.14 la potencia de soplado para lecho fijo es una función lineal de la velocidad de producción y no depende de  $L$  y  $W$ , como es posible predecir si se combinan las ecs. (4.27) y (4.28) con la ecuación de Ergun, contrariamente a lo que ocurre en el lecho fluidizado que la potencia es función de  $L$

a través del par de valores  $H_0$  y  $v_0$  que hacen máxima la producción y que, como se mostró en éste capítulo, cambian con  $L$ . Es decir, la dependencia de la potencia con la velocidad de producción no es lineal en lecho fluidizado, como se ve en la Fig. 4.14.

Asimismo, en la Fig. 4.14 es posible visualizar que la potencia de soplado para obtener la misma producción es aproximadamente 2 veces más alta en lecho fijo que en lecho fluidizado como consecuencia de la mayor altura de lecho y del mayor tamaño de equipo.

### **4.7.- Comparación de tiempos de congelación y producción experimentales de lecho fijo con los modelos presentados en éste trabajo**

En un trabajo presentado en el último 20<sup>th</sup> International Congress of Refrigeration, realizado en Sydney, Australia se presentó un trabajo (Gruda, 1999) que provee datos experimentales de coeficientes de transferencia de calor gas-partícula, tiempos de congelación y producción de equipos congeladores de lecho fluidizado y lecho fijo.

Los mencionados datos fueron comparados con las predicciones de los modelos presentados en este trabajo. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.6.

**Tabla 4.6: Comparación de datos experimentales (Gruda, 1999) de tiempos de congelación y producciones de equipos congeladores industriales de lecho fijo, con las predicciones de los modelos presentados en este trabajo.**

Equipo, producto	TZF-4U, frutillas			Ren-5, frutillas		
	Este trabajo	Gruda, 1999	Diferencia %	Este trabajo	Gruda, 1999	Diferencia %
$h$ (w/m °c)	----	----	----	----	----	----
$he$ (w/m °c)	----	107	----	----	125	----
$t_f$ (s)	797,3	750	+ 6,3	968,8	990	- 2,2
$F$ (kg/h)	4195,3	4000	+ 4,8	3905,6	4000	- 2,4

Como se observa en la Tabla 4.6, existe una muy buena correlación entre los datos experimentales obtenidos en congeladores industriales y los predichos con los modelos presentados en este trabajo.

#### **4.8.- Conclusiones**

Con las ecuaciones y correlaciones presentadas en el capítulo 3 para los parámetros fluidodinámicos, los coeficientes de dispersión longitudinal, la ecuación de producción; el modelo para el cálculo de tiempos de congelación desarrollado en el capítulo 2 y la correlación obtenida de la bibliografía para los coeficientes de transferencia de calor efectivos se establecieron las ecuaciones de diseño para congeladores continuos de lecho fluidizado.

Mediante el uso de las ecuaciones de diseño se analizó la influencia de cada variable de operación sobre los valores de producción: velocidad del aire; altura de lecho; diámetro de partícula, ancho y longitud de lecho y temperatura del aire de fluidizante.

Si se mantenían constantes el diámetro de partícula, la longitud y el ancho del lecho y la temperatura del aire, se observaban varios pares de valores de la velocidad del aire y altura del lecho que daban la misma producción, y un único par que hacía máxima la producción en las condiciones estudiadas.

Cuando se variaba, además, la longitud del lecho y la temperatura del aire se notaba el mismo comportamiento, es decir la existencia de múltiples pares de valores de velocidad del aire y altura de lecho que daban idéntica producción y un solo par que proveía la producción máxima. También se veía que los pares de valores de velocidad y altura cambiaban cuando se modificaba alguna de las otras variables.

Esto llevó a pensar en la existencia de óptimos de producción para cada longitud de lecho y cada temperatura. Mediante el análisis conjunto de todas las variables operativas se obtuvieron gráficos de producción máxima en cada condición y se observó que efectivamente para cada longitud de lecho y cada temperatura existía un óptimo para el valor de la producción.

Analizando los valores óptimos se propusieron correlaciones muy simples para obtenerlos en función de la temperatura del aire, la longitud de lecho y el diámetro de partícula.

Asimismo, se presentó un nomograma, de muy fácil utilización, mediante el cual fijando un par de variables operativas o la producción deseada y otra variable cualquiera quedan fijadas las demás para el correspondiente óptimo de producción.

También y mediante la utilización del criterio adicional de mínimo consumo de energía para el soplado del aire se efectuaron recomendaciones para seleccionar

## **Optimización de la producción en congeladores continuos de lecho fluidizado**

---

variables de operación cuando se deba trabajar fuera de los óptimos y/o de los máximos, por ejemplo en la fluidización de alimentos problemáticos.

Con la información provista por el nomograma de óptimos de producción, se efectuaron comparaciones con datos experimentales obtenidos de la bibliografía para partículas de distintos alimentos, de diversas formas y tamaños y distintas propiedades, obteniéndose una predicción aceptable si se tiene en cuenta la poca certidumbre en algunos de los datos experimentales informados por la firma proveedora de equipos más importante del mercado mundial.

Asimismo, se efectuaron comparaciones entre congeladores de lecho fijo y de lecho fluidizado. La información necesaria para evaluar la producción de lecho fijo fue obtenida de la bibliografía.

Los antecedentes publicados para lecho fijo fueron adaptados, en éste trabajo, a las condiciones de las ecuaciones de diseño del lecho fluidizado para trabajar sobre las mismas bases.

De las comparaciones efectuadas surgió que los congeladores de lecho fluidizado producen, para el mismo tamaño de equipo, entre un 20 y un 50 % más que los de lecho fijo; y la potencia de soplado del aire es 2 veces mayor en lecho fijo que en lecho fluidizado cuando se compara sobre la base de la misma producción.

Por último, se efectuaron comparaciones con datos experimentales de tiempos de congelación y producciones de equipos comerciales de lecho fijo obtenidos de un trabajo de muy reciente aparición y se obtuvo una concordancia satisfactoria.

## **Capítulo 5**

### **CONCLUSIONES**

## 5.- Conclusiones generales

En el capítulo 2, se ha presentado una revisión de todos los métodos existentes para el cálculo de tiempos de congelación. Dentro de ellos se ha puesto el énfasis en aquellos que se pueden utilizar para estimar tiempos de proceso para paquetes de alimentos con transferencia de calor en más de una dirección, y en uno que permite calcular tiempos para transferencia de calor en una sola dirección con una única ecuación muy simple.

Sobre la base de éste último y tomando los factores de forma más sencillos que se han publicado, se ha propuesto un método de cálculo de tiempos de congelación para formas regulares con transferencia de calor multidireccional.

El método desarrollado se ha comparado con datos experimentales de tiempos de congelación publicados por diversos autores, y se han efectuado experiencias para ampliar su validez a productos no encontrados en la bibliografía y para congelación de alimentos en grandes recipientes, en un rango de condiciones de operación que cubren prácticamente todas las posibilidades de congelación industrial.

Las comparaciones se efectuaron para diversos productos, de composición, estructura y propiedades diferentes como: carne vacuna entera y picada, puré de papa, zanahorias enteras, surimi, pulpa de frutilla y un sistema modelo de tilosa.

Los productos fueron congelados simulando o utilizando distintos equipos: túneles con aire forzado, inmersión en líquidos preenfriados y lechos fluidizados.

Los resultados obtenidos de las comparaciones permiten indicar que el método es adecuado para la predicción de tiempos de congelación de formas regulares



sometidas a transferencia de calor en una o más direcciones, y para alimentos de relativamente alto contenido de agua.

Además, es adecuado para ser utilizado en plantas de producción contando solamente con valores de fácil obtención de propiedades de alimentos frescos.

**En el capítulo 3**, se ha efectuado una revisión de la bibliografía existente para transferencia de calor y materia en lechos fluidizados, con especial atención a la fluidización de alimentos.

De toda la información encontrada se ha adoptado un modelo de cálculo de coeficientes de transferencia de calor, y un modelo para estudiar la distribución de tiempos de residencia de partículas en congeladores continuos de lecho fluidizado.

Para la utilización de los mencionados modelos fue necesario obtener parámetros característicos de la fluidización, para ello se han realizado, en un equipo discontinuo, experiencias para la determinación de los parámetros fluidodinámicos de partículas no esféricas como: la pérdida de carga a través del lecho, la porosidad de lecho fijo y expandido y la fracción de burbujas en el lecho.

De las experiencias descritas se pudo verificar el normal funcionamiento de la grilla distribuidora de aire seleccionada para el equipo experimental y la utilidad de las técnicas empleadas; y de los resultados obtenidos se propusieron correlaciones para calcular la velocidad y porosidad de mínima fluidización y la porosidad del lecho expandido, para cubos y paralelepípedos.

Asimismo, se comprobó que la fracción de burbujas en el lecho para partículas no esféricas también es elevada y por ende resulta válido utilizar la correlación

publicada para obtener los coeficientes de transferencia de calor para dichas partículas. Además se ha propuesto una correlación muy sencilla para estimar la fracción de burbujas en lechos fluidizados de alimentos.

Se compararon resultados con datos publicados por otros autores para partículas esféricas, encontrándose una buena concordancia.

Luego de obtenidos los parámetros fluidodinámicos y comprobado el normal funcionamiento del equipo experimental discontinuo, se construyeron dos lechos fluidizados continuos utilizando la misma grilla que en el equipo anterior.

Con ellos se efectuaron experiencias para estudiar la distribución de tiempos de residencia en lecho fluidizado continuo, para partículas no esféricas.

En la primera parte se verificó la aplicabilidad del modelo seleccionado que permitía evaluar la fracción de partículas previamente marcadas y alimentadas al lecho cuando éste estaba funcionando en estado estacionario alimentado con las mismas partículas sin marcar.

De los resultados obtenidos en ésta etapa se pudo concluir que el modelo representaba adecuadamente el movimiento de cubos y bastones en su recorrido longitudinal a través de lechos fluidizados continuos.

Luego de verificado el modelo de mezclado, haciendo uso de él y midiendo en ambos equipos experimentales de fluidización continua se determinaron los coeficientes de dispersión longitudinal (una medida del grado de mezclado de los sólidos en su recorrido en el sentido de avance del flujo principal de las partículas en el lecho), en función de las variables de operación que son: velocidad del aire, altura

de lecho, longitud y ancho de lecho. Todas las experiencias se llevaron a cabo con aire a temperatura ambiente.

Con los valores obtenidos se propusieron regresiones para obtener el coeficiente de dispersión longitudinal para cada partícula en términos de la velocidad superficial del aire y la altura de lecho expandido.

Las correlaciones propuestas se compararon con valores publicados de coeficientes de dispersión para partículas esféricas, y se verificó que el coeficiente sólo depende de la velocidad del aire y la altura de lecho expandido.

Con el objeto de interpolar y extrapolar valores del coeficiente de dispersión longitudinal para otras partículas con distintas propiedades y a diversas temperaturas se propuso, utilizando la información lograda en éste trabajo y la publicada para esferas, una correlación generalizada, en términos de números adimensionales tradicionales y otros grupos adimensionales propuestos en éste trabajo, a través de los cuales se incorporaba, además de la velocidad del aire y la altura de lecho, el diámetro efectivo de partícula y la influencia de la temperatura considerada en las propiedades termofísicas del sistema.

Con el modelo de mezclado comprobado experimentalmente y el propuesto para el cálculo de tiempos de congelación de las partículas de alimento, se obtuvo la ecuación para calcular la producción de congeladores continuos de lecho fluidizado.

Con la ecuación de producción, combinada con el modelo para el cálculo de tiempos de congelación con los coeficientes de transferencia de calor encontrados en la bibliografía y obteniendo los coeficientes de dispersión longitudinal de la correlación generalizada, se pudo evaluar la importante influencia

del mezclado longitudinal de sólidos sobre la producción de congeladores continuos de lecho fluidizado

También, se efectuaron comparaciones con datos de producción informados por fabricantes de equipos. La buena coincidencia obtenida permitió indicar que la correlación generalizada que se ha propuesto para evaluar los coeficientes de dispersión longitudinal para otras partículas de alimentos y en otras condiciones operativas, provee resultados adecuados.

Con las ecuaciones y correlaciones presentadas en el capítulo 3 para los parámetros fluidodinámicos, los coeficientes de dispersión longitudinal, la ecuación de producción; el modelo para el cálculo de tiempos de congelación desarrollado en el capítulo 2 y la correlación obtenida de la bibliografía para los coeficientes de transferencia de calor efectivos se establecieron las ecuaciones de diseño para congeladores continuos de lecho fluidizado.

**En el capítulo 4**, mediante el uso de las ecuaciones de diseño se analizó la influencia de cada variable de operación sobre los valores de producción: velocidad del aire; altura de lecho; diámetro de partícula, ancho y longitud de lecho y temperatura del aire de fluidizante.

Si se mantenían constantes el diámetro de partícula, la longitud y el ancho del lecho y la temperatura del aire, se observaban varios pares de valores de la velocidad del aire y altura del lecho que daban la misma producción, y un único par que hacia máxima la producción en las condiciones estudiadas.

Cuando se variaba, además, la longitud del lecho y la temperatura del aire se notaba el mismo comportamiento, es decir la existencia de múltiples pares de valores

de velocidad del aire y altura de lecho que daban idéntica producción y un solo par que proveía la producción máxima. También se veía que los pares de valores de velocidad y altura cambiaban cuando cambiaba alguna de las otras variables.

Esto llevó a pensar en la existencia de óptimos de producción para cada longitud de lecho y cada temperatura. Mediante el análisis conjunto de todas las variables operativas se obtuvieron gráficos de producción máxima en cada condición y se observó que efectivamente para cada longitud de lecho y cada temperatura existía un óptimo para el valor de la producción.

Analizando los valores óptimos se propusieron correlaciones muy simples para obtenerlos en función de la temperatura del aire, la longitud de lecho y el diámetro de partícula.

Asimismo, se presentó un nomograma, de muy fácil utilización. En el cual fijando un par de variables operativas o, la producción deseada y otra variable cualquiera, quedan fijadas las demás para el correspondiente óptimo de producción.

También y mediante la utilización del criterio adicional de mínimo consumo de energía para el soplado del aire se efectuaron recomendaciones para seleccionar variables de operación cuando se deba trabajar fuera de los óptimos y/o de los máximos, por ejemplo en la fluidización de alimentos problemáticos.

Con la información provista por el nomograma de óptimos de producción, se efectuaron comparaciones con datos experimentales obtenidos de la bibliografía para partículas de distintos alimentos, de diversas formas, regulares, y tamaños y distintas propiedades, obteniéndose una precisión muy aceptable si se tiene en cuenta la poca

certidumbre en algunos de los datos experimentales informados por la firma proveedora de equipos más importante del mercado mundial.

También, en el capítulo 4, se efectuaron comparaciones entre congeladores de lecho fijo y de lecho fluidizado. La información necesaria para evaluar la producción de lecho fijo fué obtenida de la bibliografía.

Los antecedentes publicados para lecho fijo fueron adaptados, en este trabajo, a las condiciones de las ecuaciones de diseño del lecho fluidizado para trabajar sobre las mismas bases.

De las comparaciones efectuadas surgió que los congeladores de lecho fluidizado producen, para el mismo tamaño de equipo, entre un 20 y un 50 % más que los de lecho fijo; y la potencia de soplado del aire es 2 veces mayor en lecho fijo que en lecho fluidizado cuando se compara sobre la base de la misma producción.

Por último, sé efectuarón comparaciones con datos experimentales de tiempos de congelación y producciones de equipos de lecho fluidizado y lecho fijo obtenidos de un trabajo de muy reciente aparición y sé obtuvo una muy buena concordancia.

## NOMENCLATURA

### Tiempos de congelación

$a$ : Constante de la ecuación (2.12)

$a_i$ : Area de la cara  $i$  de un alimento sometido a transferencia de calor en más de una dirección

$b$ : Constante de la ecuación (2.12)

$c_l$ : Constante ecuación (2.21)

$e$ : Excentricidad. Definida en la Tabla 2.7

$f_1$ : Parámetro de la ecuación (2.40)

$f_2$ : Parámetro de la ecuación (2.41)

$h$ : Coeficiente de transferencia de calor convectivo

$h_a$ : Coeficiente de transferencia de calor medio refrigerante – superficie del producto

$h_{exp}$ : Coeficiente de transferencia de calor experimental. Tabla 2.9

$h_m$ : Coeficiente de transferencia de calor debido a la envoltura del alimento

$k$ : Conductividad térmica

$k_a$ : Conductividad térmica del aire

$k_c$ : Conductividad térmica de los carbohidratos ec. (2.75)

$k_i$ : Conductividad térmica del hielo

$k_j$ : Conductividad térmica

$k_m$ : Conductividad térmica a la temperatura  $T_m$

$k_{mi}$ : Conductividad térmica de la cara  $i$  del bloque de alimento a la temperatura  $T_m$

$k_w$ : Conductividad térmica del agua

$k_0$ : Conductividad térmica del producto fresco

$m$ : Constante de la ecuación (2.11)

$m_l$ : Parámetro de la ecuación (2.17)

$n$ : Constante de la ecuación (2.11)

- $n_l$ : Parámetro de la ecuación (2.18)
- $q$ : Flujo de calor en el alimento
- $r$ : Coordenada radial
- $r_n$ : Parámetro definido en la ec. (2.39)
- $r_p$ : Parámetro definido en la ec. (2.39)
- $s(t)$ : Posición del frente móvil durante la congelación de una placa plana
- $t$ : Tiempo
- $t_a$ : Tiempo de atemperado
- $t_f$ : Tiempo de congelación
- $t_{f,exp}$ : Tiempo de congelación experimental
- $t_{f,num}$ : Tiempo de congelación calculado con método numérico. Tabla 2.13
- $t_{fp}$ : Tiempo de congelación de Plank, ec. (2.9) y ec. (2.30)
- $t_{f,pre}$ : Tiempo de congelación calculado con la ecuación (2.57)
- $t_{fe}$ : Tiempo de congelación de una forma cualesquiera
- $t_{fl}$ : Tiempo de congelación definido por la ecuación (2.38)
- $t_{fpl}$ : Tiempo de congelación de una placa plana
- $t_p$ : Tiempo de preenfriamiento
- $w$ : Contenido de hielo promedio del producto parcialmente congelado
- $w_{ce}$ : Contenido de hielo del producto a  $T_{ce}$
- $w_a$ : Contenido de hielo del producto a  $T_a$
- $x$ : Coordenada espacial
- $y$ : Coordenada espacial
- $z$ : Coordenada espacial
- $A$ : Area superficial del alimento
- $A_l$ : Parámetro ecuación (2.21)
- $A^*$ : Factor geométrico para transferencia de calor en más de una dirección. Definido en la Tabla 2.7



$B_i$ : Número de Biot

$B_{i0}$ : Número de Biot del producto fresco

$B_{i_{cil}}$ : Número de Biot definido por la ecuación (2.51)

$B_{i_l}$ : Número de Biot definido por la ecuación (2.38)

$C$ : Constante ecuación (2.11)

$C_1$ : Constante ecuación (2.55)

$C_2$ : Constante ecuación (2.55)

$C_p$ : Calor específico

$C_{p0}$ : Calor específico del producto fresco

$C_{p_{ap}}$ : Calor específico aparente

$C_{p_c}$ : Calor específico de los carbohidratos ec. (2.71)

$C_{p_i}$ : Calor específico del hielo

$C_{p_s}$ : Calor específico de la matriz sólida de un alimento

$C_{p_w}$ : Calor específico del agua

$D$ : Dimensión característica  $D = 2L$

$D_l$ : Lado más largo de un prisma rectangular

$D_e$ : Lado más corto de un prisma rectangular de sección cuadrada ec. (2.51)

$D_m$ : Longitud característica definida por la ecuación (2.50)

$D_1, D_2, D_3$ : Dimensiones de los recipientes utilizados en la congelación de pulpa de frutilla en grandes recipientes. Tabla 2.10

$E$ : Número de dimensiones equivalentes a la transferencia de calor generalizado, definido por la ecuación (2.33)

$E_1$ : Parámetro definido por la ecuación (2.34)

$E_2$ : Parámetro definido por la ecuación (2.35)

$E_3$ : Función definida por la ecuación (2.35)

$EHTD$ : Número de dimensiones equivalentes a la transferencia de calor definido por la ecuación (2.27)

$F_0$ : Número de Fourier

- $G$ : Factor geométrico definido por la ec. (2.16)
- $G_1$ : Parámetro definido por la ecuación (2.33)
- $G_2$ : Parámetro definido por la ecuación (2.33)
- $G_3$ : Parámetro definido por la ecuación (2.33)
- $H_{cil}$ : Altura de cilindro
- $H_t$ : Entalpía total
- $H$ : Entalpía por unidad de masa
- $L$ : Longitud característica para la transferencia de calor. Semiespesor de una placa plana, radio de cilindro o esfera
- $L_1, L_2, L_3$ : Longitudes características para transferencia de calor en tres direcciones definidos en la Tabla 2.7
- $N$ : número de tiempos de vida media. Definido por la ecuación (2.24)
- $Nu$ : Número de Nusselt
- $P$ : Factor de forma de Plank
- $Pk$ : Número de Plank
- $Pr$ : Número de Prandtl
- $P_1$ : Factor de Plank modificado. Definido por la ecuación (2.19)
- $P_2$ : Factor de Plank modificado. Tabla (2.2)
- $Q$ : Calor total que se transfiere de un alimento al medio refrigerante
- $R$ : factor de forma de Plank
- $R_1$ : Factor de Plank modificado. Definido por la ecuación (2.20)
- $R_2$ : Factor de Plank modificado. Tabla 2.2
- $Re$ : Número de Reynolds
- $Ste$ : Número de Stefan
- $T$ : Temperatura
- $T_a$ : Temperatura del medio refrigerante
- $T_c$ : Temperatura del centro térmico
- $T_{ce}$ : Temperatura de inicio de la congelación

$\bar{T}_f$ : Temperatura media de congelación definida por la ecuación (2.47)

$T_i$ : Temperatura inicial del producto

$T_m$ : Temperatura media  $(T_{ce} + T_a)/2$

$T_s$ : Temperatura de la superficie del alimento

$T^*$ : temperatura adimensional

$X$ : Parámetro definido por la ecuación (2.36)

$X^*$ : Variable adimensional definida por la ecuación (2.11)

$V$ : Volumen del paquete de alimento

$V^*$ : Factor geométrico para transferencia de calor en más de una dirección. Definido en la Tabla 2.7

$Y$ : Contenido de agua del producto

$Y_0$ : Contenido de agua del producto fresco

$\alpha$ : Difusividad térmica

$\alpha_0$ : Difusividad térmica del producto fresco

$\alpha_m$ : Difusividad térmica evaluada a  $T_m$

$\beta_1$ : Relación entre la dimensión característica respecto del lado más corto

$\beta_2$ : Relación entre la dimensión característica respecto del lado más corto

$\eta$ : Temperatura adimensional definida por la ecuación (2.22)

$\eta_i$ : Temperatura adimensional correspondiente a la cara  $i$  de un paquete de alimento

$\eta_c$ : temperatura adimensional del centro térmico

$\eta_{ce}$ : temperatura adimensional estimada del centro térmico

$\lambda_f$ : Calor latente de congelación del agua

$\lambda_{f,efect}$ : Calor latente de congelación efectivo. Tabla 2.14

$\rho$ : Densidad

$\rho_0$ : Densidad del producto fresco

$\rho_c$ : Densidad del producto congelado

$\rho_i$ : Densidad del hielo

$\rho_s$ : Densidad de la matriz sólida de un alimento

$\rho_w$ : Densidad del agua

$\tau$ : Tiempo adimensional

$\tau_{1/2}$ : Tiempo adimensional de vida media definido por la ecuación (2.24)

$\tau_{1/2}^s, \tau_{1/2}^c, \tau_{1/2}^p$ : Tiempo adimensional de vida media para formas simples. Fig. 2.8

$\Delta t$ : intervalo de tiempo

$\Delta x, y, z, r$ : intervalo espacial

$\Delta H$ : Diferencia de entalpía

$\Delta H_1$ : Diferencia de entalpía definida por la ecuación (2.45)

$\Delta H_2$ : Diferencia de entalpía definida por la ecuación (2.46)

$\Delta H_T$ : Cambio entálpico total por unidad de volumen durante la congelación de un alimento

$\Delta T_1$ : Diferencia de temperatura definida por la ecuación (2.47)

$\Delta T_2$ : Diferencia de temperatura definida por la ecuación (2.48)

**Distribución de tiempos de residencia de alimentos en lecho fluidizado y Optimización de la producción en congeladores de lecho fluidizado**

- a*: Área de partícula por unidad de volumen de lecho
- d*: Parámetro definido por la ecuación (3.7)
- g*: Aceleración gravitatoria
- h*: Coeficiente de transferencia de calor convectivo gas – partícula en lecho fluidizado
- h<sub>e</sub>*: Coeficiente de transferencia de calor efectivo gas – partícula en lecho fluidizado
- j*: Coordenada móvil adimensional definida por la ecuación (3.26)
- k*: Conductividad térmica del alimento
- m<sub>s</sub>*: Masa de sólidos en el lecho fluidizado discontinuo
- q*: Calor transferido de la partícula al aire fluidizante
- q<sub>0</sub>*: Flujo de calor en la superficie de la partícula de alimento
- t*: Tiempo
- t<sub>min</sub>*: Tiempo mínimo de residencia de las partículas en el lecho fluidizado continuo
- v<sub>mf</sub>*: Velocidad de mínima fluidización
- v<sub>mf</sub>*: Velocidad del aire entre las partículas en condiciones de mínima fluidización
- v<sub>0</sub>*: Velocidad superficial del aire de fluidización y congelación
- v<sub>0</sub>*: Velocidad del aire entre las partículas (velocidad intersticial)
- v<sub>z</sub>*: Velocidad global de los sólidos en el lecho fluidizado continuo. Ec. (3.30)
- w*: Fracción másica de partículas marcadas en el lecho fluidizado continuo
- w<sub>L</sub>*: Fracción másica de partículas marcadas a la salida del lecho fluidizado continuo
- x*: Coordenada espacial
- x\**: Coordenada adimensional definida en la ec. (4.19)
- y*: Coordenada espacial
- z*: Coordenada espacial
- z\**: Coordenada adimensional definida en la ec. (4.19)

$Ar$ : Número de Arquímedes

$Bi_e$ : Número de Biot calculado con el coeficiente de transferencia de calor  $h_e$

$C_p$ : Calor específico de las partículas de alimento

$D$ : diámetro correspondiente a la posición del frente de congelación de las partículas en lecho fijo

$D_e$ : Diámetro equivalente de las partículas

$D_p$ : Diámetro efectivo de las partículas

$D_z$ : Coeficiente de dispersión longitudinal de sólidos en el lecho fluidizado continuo

$D_0$ : Diámetro inicial de la partícula en lecho fijo

$F$ : Flujo másico de sólidos en el lecho fluidizado

$F_c$ : Flujo másico de sólidos en el lecho fluidizado. Información de catálogos comerciales

$F_p$ : Flujo másico de sólidos en el lecho fluidizado calculado con la ecuación (3.50)

$G$ : Flujo másico de aire

$G_0$ : Flujo másico superficial de aire en el lecho fluidizado

$H$ : Altura de lecho expandido

$H_0$ : Altura de lecho fijo

$H_{mf}$ : Altura de lecho en condiciones de mínima fluidización

$\mathcal{H}$ : Humedad absoluta del aire

$\mathcal{H}_1$ : Humedad absoluta del aire a  $T_1$

$\mathcal{H}_2$ : Humedad absoluta del aire a  $T_2$

$\mathcal{H}^*$ : Humedad absoluta del aire a  $T_s$

$J_H$ : Factor de Colburn

$K_1$ : Constante definida por la ecuación (3.35)

$K_2$ : Constante definida por la ecuación (3.35)

$K_3$ : Constante definida por la ecuación (3.45)

$K_4$ : Constante definida por la ecuación (3.45)

$K_5$ : Constante definida por la ecuación (3.45)

- $K_6$ : Constante definida por la ecuación (3.46)  
 $K_7$ : Constante definida por la ecuación (3.46)  
 $K_8$ : Constante definida por la ecuación (4.10)  
 $K_9$ : Constante definida por la ecuación (4.10)  
 $K_{10}$ : Constante definida por la ecuación (4.11)  
 $K_{11}$ : Constante definida por la ecuación (4.11)  
 $K_{12}$ : Constante definida por la ecuación (4.12)  
 $K_{13}$ : Constante definida por la ecuación (4.12)  
 $L$ : Longitud del lecho fluidizado continuo  
 $M_s$ : Masa de sólidos retenida en el lecho fluidizado continuo  
 $Nu$ : Número de Nusselt  
 $Pe$ : Número de Peclet  
 $Pe'$ : Número de Peclet modificado  
 $P_{oi}$ : Potencia de soplado del aire en el lecho fluidizado continuo  
 $Pr$ : Número de Prandtl  
 $Q$ : Calor transferido de las partículas al aire en el lecho fluidizado  
 $R_0$ : Radio inicial de la partícula en lecho fijo  
 $Re$ : Número de Reynolds  
 $Re'$ : Número de Reynolds modificado  
 $R_H$ : Factor definido por la ecuación (3.47)  
 $S$ : Sección del lecho fluidizado discontinuo  
 $T$ : Temperatura  
 $T_i$ : Temperatura inicial del alimento  
 $T_s$ : Temperatura superficial de las partículas en el lecho  
 $T_1$ : Temperatura del aire al ingreso al lecho  
 $T_2$ : Temperatura del aire al egreso del lecho  
 $V_b$ : velocidad de avance de las partículas en lecho fijo  
 $W$ : Ancho del lecho fluidizado continuo

$\delta$ : Fracción de burbujas en el lecho

$\varepsilon$ : Porosidad de lecho expandido

$\varepsilon_{mf}$ : Porosidad de mínima fluidización

$\varepsilon_0$ : Porosidad de lecho fijo

$\eta^*$ : Temperatura adimensional definida en la ec. (4.19)

$\lambda_f$ : Calor latente de solidificación del agua

$\mu$ : Viscosidad del aire

$\xi$ : Posición adimensional del frente de congelación de las partículas en lecho fijo

$\rho$ : Densidad del aire

$\rho_s$ : Densidad de sólidos

$\tau$ : Tiempo adimensional

$\tau_{min}$ : Tiempo adimensional mínimo de residencia de las partículas en el lecho fluidizado continuo

$\Delta P$ : Pérdida de carga del lecho de partículas

$\Psi$ : Esfericidad de las partículas



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Agnelli, M.E. y Mascheroni, R. H.** (1998) Congelación mixta criogénica – mecánica. Estudio de transferencia de calor y de la calidad de los productos procesados. *Actas del 7º Cong. Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia*. Vol II:286
- Arroyo, J.G. y Mascheroni, R. H.** (1990) A generalized method for the prediction of freezing times of regular or irregular foods. *Progress Sci. and Tech. Refrig. in Food Eng.* Int. Inst. Refrig. 643
- Barker, J.J.** (1965) Heat transfer in fluidized bed. *Ind. Eng. Chem.* 57:33
- Bhattachariyya, D. y Pei, D.C.T.** (1974) Fluid to particle heat transfer in fluidized bed. *Ind. Eng. Chem. Fund.* 13:199
- Bazán, H.C. y Mascheroni, R. H.** (1984) Heat transfer with simultaneous change of phase in freezing boned mutton. *Lat. Am. J. Heat Mass Trans.* 8:55
- Bird, B.R.; Stewart, W.E. y Lightfoot, E.N.** (1964) Transport phenomena. Ed. *John Wiley & Sons, Inc.*, New York
- Bonacina, C. y Comini, G.** (1971) On a numerical method for the solution of the unsteady state heat conduction equation with temperature dependent parameters. *Proc. 13<sup>th</sup> Cong Refrig.* 2:329
- Bonacina, C. y Comini, G.** (1973) On the solution of the nonlinear heat conduction equations by numerical methods. *Int. J. Heat Mass Transfer.* 16:581
- Bradshaw, R.D. y Myers, J.E.** (1963) Heat transfer and mass transfer in fixed and fluidized bed of large particles. *AIChE. J.* 9:590
- CAIRAA** (1998) (Cámara Argentina de Industriales de la Refrigeración y el Aire Acondicionado) Estadística de fabricación nacional e importación de refrigeradores y freezers. Comunicación Personal
- Calvelo, A.** (1981) Recent studies on meat freezing, in *Developments in Meat Science – 2* (Ed. R. Lawrie). *Applied Science Publishers Ltd*, London. 125

- Campañone, L.A., Salvadori, V.O. y Mascheroni, R.H.** (1998) A finite – difference method to solve coupled heat and mass balances with simultaneous surface dehydration during freezing. *Lat. Am. Appl. Res.* 28:83
- Carslaw, S.H y Jaeger, J.C.** (1959) Conduction of heat in solids. *Oxford University Press*, 2<sup>nd</sup> Edition, Oxford
- Castaigne, F. y Lacroix, C.** (1985) Méthode simple permettant d'estimer les temps de congélation d'aliments avant des formes simples. *Rev. Gen. Froid.* 74:251
- Chang, T.M. y Wen, C.Y.** (1966) Fluid to particle heat transfer in air fluidized beds. *Chem. Eng. Prog. Symp. Series.* 62:111
- Chapman, A.J.** (1967) Heat transfer. *The MacMillan Co.* New York
- Cheftel, J.C. y Cheftel, H.** (1976) Introducción a la bioquímica y tecnología de los alimentos. Vol. I. *Ed. Acribia.* España
- Choi, Y. y Okos, M.R.** (1986) Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. *Food Eng. And Process Application.* 1:93
- Ciobanu, A., Lascu, G., Bercescu, V. y Nicolescu, L.** (1976) Cooling technology in the food industry. *Abacus Press.* Tunbridge Wells, Kent
- Cleland, A. C.** (1986) A review of methods for predicting the duration of freezing processes. *Food Eng. And Process Applications.* 2:41
- Cleland, A.C.** (1990) Food Refrigeration Processes. Analysis, design and simulation. *Elsevier Applied Science Publishers Ltd,* London
- Cleland, D.J. y Cleland, A.C.** (1991) An alternating direction, implicit finite difference scheme for heat conduction with phase change in finite cylinders. *Proc. 18<sup>th</sup> Int Cong. Refrig.* Montreal, 4:1855
- Cleland, D.J., Cleland, A.C. y Earle, R.L.** (1987a) Prediction of freezing and thawing times for multi-dimensional shapes by a simple formulae: I – Regular shapes. *Int. J. Ref.* 10:156

- Cleland, D.J., Cleland, A.C. y Earle, R.L. (1987b)** Prediction of freezing and thawing times for multi-dimensional shapes by a simple formulae: II – Irregular shapes. *Int. J. Ref.* 10:234
- Cleland, D.J., Cleland, A.C., Earle, R.L. y Byrne, S.J. (1987)** Experimental data for freezing and thawing of multidimensional objects. *Int. J. Ref.* 10:22
- Cleland, A.C. y Earle, R.L. (1977)** A comparison of analytical and numerical methods for predicting freezing times of foods. *J. Food Sci.* 42:1390
- Cleland, A.C. y Earle, R.L. (1979a)** A comparison of methods for predicting the freezing times of cylindrical and spherical foodstuffs. *J. Food Sci.* 44:958
- Cleland, A.C. y Earle, R.L. (1979b)** Prediction of freezing times for foods in rectangular packages. *J. Food Sci.* 44:964
- Cleland, A.C. y Earle, R.L. (1984a)** Assessment of freezing times predictions methods. *J. Food Sci.* 49:1034
- Cleland, A.C. y Earle, R.L. (1984b)** Freezing time predictions for different final product temperatures. *J. Food Sci.* 49:1230
- Cleland, A.C., Earle, R.L. y Cleland, D.J. (1982)** The effect of freezing rate on the accuracy of numerical freezing time predictions. *Int. J. Refrig.* 5:294
- Cleland, A.C. y Olzilgen, S. (1998)** Thermal design calculations for food freezing equipment – past, present and future. *Int. J. Refrig.* 21:359
- Creed, P.G. y James, S.J. (1985)** The freezing times of liver in a vertical plate freezer. *J. Food Sci.* 50:285.
- CSIRO (1968)** Freezing times of boneless meat. *AIRAH Trans.*, March, 41.
- Davidson, J.F. y Harrison, D. (1963)** Fluidized particles. *University Press.* Cambridge
- Davidson, J.F. y Harrison, D. (1971)** Fluidization. *University Press.* Cambridge

- Delgado, A.E., Rubiolo, A.C. y Gribaudo, L.M.** (1990) Effective heat capacity for strawberry freezing and thawing calculations. *J. Food Eng.* 12:165
- Delgado, A.E., Rubiolo, A.C. y Gribaudo, L.M.** (1992) Appropriate variables for predicting freezing temperatures of strawberry package using a simplified method. *Proceed. Proposals for the generation and use of refrigeration in the 21<sup>st</sup>. Century. I.I.R. Comm. B2, C2, E2.* p. 235. Buenos Aires, 7 al 9 de septiembre.
- De Michelis, A. y Calvelo, A.** (1982) Mathematical model for nonsymmetric freezing of beef. *J. Food Sci.* 47:1211
- De Michelis, A. y Calvelo, A.** (1983) Freezing time predictions for bricks and cylindrical shaped foods. *J. Food Sci.* 48:909
- De Michelis, A., Mascheroni, R.H. y Calvelo, A.** (1985) estimación de tiempos de congelación de productos cárneos. *La Alimentación Latinoamericana* 19:52
- Ede, A.J.** (1949) The calculation of the rate of freezing and thawing of foodstuffs. *Modern Refrig.* 52:52
- Escardino, A., Ruiz, F. y Barbero, P.** (1970) Circulación de aire a través de lechos formados por granos de cereales. *Rev. Agroquím. y Tecnol. Aliment.* 10:528
- Flores, E.S. y Mascheroni, R.H.** (1984) Tiempos de congelación de bloques de carne picada. *CIDCA*, Publicación interna N° 39
- Frederick, D. y Grief, R.** (1985) A method for the solution of heat transfer problems with a change of phase. *J. Heat Transf.* 107:520
- Frigoscandia** (1977). Contracting manual
- Gruda, Z.** (1979) Increasing of freezers efficiency through the improvement of the heat transfer conditions between air and product- New invention in fluidized bed freezers regarding soft products freezing. *Proceed. XVth. Int. Cong. Refrig.* 3:1199
- Gruda, Z.** (1983) Investigations of the fluidized bed freezing process of the large food particles. *Proceed. XVIth. Int. Cong. Refrig.* Paper B1:236

**Gruda, Z.** (1999) Effective particle-to-air heat transfer coefficient in fluidized bed freezers of different design. *20th. Int. Cong. Refrig.*, Sydney, Australia, Comunicación personal

**Gruda, Z. y Postolski, J.** (1986) Tecnología de la congelación de alimentos. *Ed. Acribia*. Zaragoza, España

**Gutfinger, C. y Abuaf, N.** (1974) Advances in heat transfer. 10:167. *Academic Press*. New York

**Hayakawa, K., Nonino, C. y Succar, J.** (1983) Two dimensional heat conduction in food undergoing freezing: Prediction freezing times of rectangular or finitely cylindrical food. *J. Food Sci.* 48:1841

**Hayakawa, K., Scott, K.R. y Succar, J.** (1986) Theoretical and semitheoretical methods for estimating freezing or thawing time. *ASHRAE Trans.* Part. 2B 91:371

**Heertjes, P.M. y Mckibbins, S.W.** (1956) The partial coefficient of heat transfer in a drying fluidized bed. *Chem. Eng. Sci.* 5:161

**Hense, H. y Kieckbusch, T.G.** (1991) Congelamento de cacao: 1-Resultados experimentais. *Actas IV Cong Latinoamericano de Transf. Calor y Materia.*

**Herbert, L.S. y Lovett, D.A.** (1979) New measurements of cooling times in blast freezers. *AIRAH Trans.* September, 8

**Hossain, Md.M., Cleland, D.T. y Cleland, A.C.** (1992a) Prediction of freezing and thawing times for foods of regular multidimensional shape by using an analytically derived geometric factor. *Int. J. Refrig.* 15:277

**Hossain, Md.M., Cleland, D.T. y Cleland, A.C.** (1992b) Prediction of freezing and thawing times for foods two - dimensional irregular shape by using a semi-analytical geometric factor. *Int. J. Refrig.* 15:235

- Hossain, Md.M., Cleland, D.T. y Cleland, A.C.** (1992c) Prediction of freezing and thawing times for foods of three - dimensional irregular shape by using a semi-analytical geometric factor. *Int. J. Refrig.* 15:241
- Hui, Y.H.** (1992) Encyclopedia of food science and technology. *John Wiley Ed.* New York
- Hung, Y.C. y Thompson, D.R.** (1983) Freezing time prediction for slab shape foodstuffs by an improved analytical method. *J. Food Sci.* 48:555
- Ilicali, C.** (1989) A simplified analytical model for freezing time calculation in brick-shaped foods. *J. Food Process Eng.* 11:177
- Ilicali, C. y Saglam, N.** (1987) A simplified analytical model for freezing time calculation in foods. *J. Food Proc. Eng.* 9:299
- Joshi, C. y Tao, L.** (1974) A numerical method of simulating the axisymmetrical freezing of food systems. *J. Food Sci.* 39:623
- Jowitt, R., Escher, F.E., Hallstrom, H.F., Meffert, Th., Spies, W.E.L. y Voss, G.** (eds.) (1983) Physical properties of foods. *Elsevier Appl. Sci.*
- Kettering, K.N, Manderfield, E.L. y Smith, J.M** (1950) Heat and mass transfer in fluidized systems. *Chem. Eng. Progress.* 46:139
- Kunii, D. y Levenspiel, O.** (1969) Fluidization Engineering. *John Wiley and Sons, Inc.* New York
- Lacroix, C. y Castaigne, F.** (1987) Simple method for freezing time calculation for infinite flat slabs, infinite cylinders and spheres. *Can. Ins. Fd. Sci. Technol. J.* 20:252
- Lees, M.** (1966) A linear three level difference scheme for quasi linear parabolic equations. *Maths. Comput.* 20:516
- Lermuzeaux, M.** (1968) Un nouveau matériel francais de surgelation en lit fluidizé. *Revue Gral. du Froid.* 8:354

**Levy, F.L.** (1958) Calculating freezing time of fish in airblast freezers. *J. Refrig.* 1:55

**Levy, F.L.** (1983) Calculating the thawing time of meat. *Zeits Lebens. Technol.* 34:691

**Lindauer, G.** (1967) Heat transfer in packed and fluidized beds by the method of cyclic temperature variations. *AIChE. J.* 13:1181

**Mann, R.S. y Feng, L.C.L.** (1968) Gas-solid heat transfer in fluidized beds. *Ind. Eng. Chem. and Development.* 7:327

**Mannapperuma, J.D. y Singh, R.P.** (1988) Prediction of freezing and thawing times of foods using a numerical method based on enthalpy transformation. *J. Food Sci.* 53:626

**Marquardt, D.W.** (1963) An algorithm for least-square estimation of nonlinear parameters. *J. Soc. Ind. Appl. Math.* 11:431

**Mascheroni, R.H.** (1977) Transferencia de calor con simultáneo cambio de fase en productos cárneos. *Tesis doctoral.* Universidad Nacional de La Plata

**Mascheroni, R. H.** (1995) Apuntes Curso Postgrado: Transferencia de calor en refrigeración, congelación y descongelación de alimentos. *Módulos: Métodos Aproximados y Métodos Numéricos.* Comunicación Personal

**Mascheroni, R. H.** (1999) Food freezing. Current trends in technology and equipment. *Barbosa – Cánovas y J. Lozano (Eds.).*

**Mascheroni, R. H. y Calvelo, A** (1978) Modelo de descenso crioscópico en tejidos cárneos. *La Alimentación Latinoamericana.* 12:34

**Mascheroni, R. H. y Calvelo, A** (1980) Relationship between heat transfer parameters and the characteristic damage variables for the freezing of beef. *Meat Sci.* 4:267

**Mascheroni, R. H. y Calvelo, A.** (1982) A simplified model for freezing time calculations in foods. *J. Food Sci.* 47:1211

- Mascheroni, R. H., Ottino, J. y Calvelo, A.** (1977) A model for the thermal conductivity of frozen meat. *Meat Sci.* 1:235
- Matsuda, Y.** (1971) Determination of times required for freezing and vacuum freeze-drying of 'surimi' as a food model. *Proceed. 13th Int. Cong. Refrig.* II:357
- Mellor, J.D.** (1978) Thermal properties of foodstuffs. 2. Theoretical aspects. *Bull. I.I.R.* LVIII:569
- Miles, C.A., Van Beck, G. y Veerkamp, C.H.** (1990) Calculation of thermophysical properties of foods. *Physical Properties of foods.* Applied Sci., London. Chap. 16:269
- Mooleeratanond, W., Ashby, B.H., Kramer, A. y Bailey, W.A.** (1982) Criteria of energy-efficient packaging and freezing of boxed beef. *Trans. ASAE.* 25:502
- Nagaoka, J., Takaji, S. y Hohtani, S.** (1955) Experiments on the freezing of fish, by air blast freezer. *J. Tokio Univ. Fish.* 42:65
- Perry, R.H. y Chilton, C.H.** (1982) Manual del Ingeniero Químico. 5° Ed. *McGraw – Hill Latinoamericana, S.A.*
- Persson, P.O.** (1967) Fluidizing technique in food freezing. *ASHRAE J.* 9:42
- Pflug, I.J., Blaisdell, J.L. y Kopelman, J.** (1965) Developing temperature – time curves for objects that can be approximated by a sphere, infinite plate or infinite cylinder. *Trans. ASHRAE.* 71:238
- Pham, Q.T.** (1984) An extension to Plank's equation for predicting freezing times for foodstuffs of simple shapes. *Int. J. Refrig.* 7:377
- Pham, Q.T.** (1985) A fast, unconditionally stable finite-difference method for heat conduction with phase change. *Int. J. Heat Mass Transf.* 28:2979
- Pham, Q.T.** (1986) Simplified equation for predicting the freezing time of foodstuffs. *J. Food Technol.* 21:209



**Pham, Q.T. y Willix, J.** (1990) Effect of Biot number and freezing rate on accuracy of some food freezing time prediction methods. *J. Food Sci.* 55:1429

**Plank, R.** (1913) Die gefrierdauer von eisbloken. *Zeitsch. Kalte-Industrie.* 20:109

**Plank, R.** (1963) El empleo del frío en la industria de la refrigeración. *Ed. Reverté.* Barcelona

**Ramaswamy, H.S. y Tung, M.A.** (1984) A review on predicting freezing time of foods. *J. Food Proc. Eng.* 7:169

**Reynoso, R. O. y Calvelo, A.** (1985) Comparison between fixed and fluidized bed continuous pea freezers. *Int. J. Refrig.* 8:109

**Reynoso, R. O. y De Michelis, A.** (1993) Parameters affecting freezing, storage and transport of individually frozen Schoeneman raspberries. *Int. J. Refrig.* 17:209

**Riley, D.S. y Duck, P.W.** (1977a) Application of the heat balance integral to freezing of cuboid. *Int. J. Heat Mass Transfer.* 20:294

**Riley, D.S. y Duck, P.W.** (1977b) An extension of existing solidification results obtained from the heat balance integral method. *Int. J. Heat Mass Transfer.* 20:297

**Rubiolo de Reinick, A. y Schwartzberg, H.** (1986) Predicting temperature vs. time behaviour during the freezing and thawing of rectangular foods. *Biotech. Progress.* 2:164

**Salvadori, V.O., Reynoso, R.O., De Michelis, A. y Mascheroni, R.H.** (1987a) Freezing time predictions for regular shaped foods: a simplified graphical method. *Int. J. Refrig.* 9:357

**Salvadori, V.O., Reynoso, R.O., De Michelis, A. y Mascheroni, R.H.** (1987b) Obtención de tiempos de congelación a través de un método gráfico. *La Técnica del Frío y del Calor.* XXXV:384

**Salvadori, V.O. y Mascheroni, R.H.** (1991) Prediction of freezing and thawing times of foods by means of a simplified analytical method. *J. Food Eng.* 13:67

**Salvadori, V. O.** (1994) Transferencia de calor durante la congelación, el almacenamiento y la descongelación de alimentos. *Tesis doctoral*. Univ. Nac. La Plata

**Sanz, P.D., Dominguez, M. y Mascheroni, R.H.** (1989) Equations for the prediction of thermophysical properties of meat products. *Lat. Am. Appl. Res.* 19:155

**Sastry, S.K.** (1984) Freezing time prediction: an enthalpy based approach. *J. Food Sci.* 49:1121

**Sheen, S. y Witney, L.F.** (1990) Modelling heat transfer in fluidized beds of large particles and its application in the freezing of large food items. *J. Food Eng.* 12:249

**Siri, G.J. y Mascheroni, R. H.** (1995) A design equation for freezing time calculations in regularly-shaped foods. *Lat. Amer. Appl. Res.* 25:199

**Succar, J. y Hayakawa, K.** (1983) Empirical formulae for predicting thermal physical properties of food at freezing or defrosting temperatures. *Food Sci. Technol.* 16:326

**Succar, J. y Hayakawa, K.** (1984) Parametric analysis for predicting freezing time of infinitely slab shaped food. *J. Food Sci.* 49:468

**Tocci, A.M. y Mascheroni, R. H.** (1994) Freezing times of meat balls in belt freezers. Experimental determination and prediction by different methods. *Int. J. Refrig.* 17:445

**Vázquez, A y Calvelo, A.** (1980) Gas particle heat transfer coefficient in fluidized pea beds. *J. Food Process. Eng.* 4:53

**Vázquez, A. y Calvelo, A.** (1983a) Gas particle heat transfer coefficient for the fluidization of different shaped foods. *J. Food Sci.* 48:114

**Vázquez, A. y Calvelo, A. (1983b)** Modelling of residence times in continuous fluidized bed freezers. *J. Food Sci.* 48:1081

**Wang, D.Q. y Kolbe, E. (1987)** Measurement and prediction of freezing times of vacuum canned Pacific shrimp. *Int. J. Refrig.* 10:18

**Wansley, W. y Johanson, L.N. (1954)** Fluidized bed heat transfer. *Chem. Eng. Progress.* 50:347

**Welty, J.R. (1974)** Engineering Heat transfer. *John Willey Ed.* New York

**Wilson, H.A. y Singh, R.P. (1987)** Numerical simulation of individual quick freezing of spherical particles. *Int. J. Refrig.* 10:149