

## **ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL EFECTO DE CONVECCIÓN EN UN RECINTO CON MATERIAL DE CAMBIO DE FASE**

**M. Vilte y A. Boucíguez**

Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de Salta. Av. Bolivia 5150 - 4400 Salta-  
Tel. 0387 – 4255424, e-mail: viltem@unsa.edu.ar; bouciga@unsa.edu.ar

**RESUMEN:** En este trabajo se presenta el estudio experimental a escala de laboratorio de una grasa orgánica, a fin de evaluar la importancia del efecto de la convección natural en la forma y el movimiento del frente de fusión en dos cavidades rectangulares de diferentes espesores que contienen el material de cambio de fase. Ambos recintos están en contacto en forma simultánea con un flujo calor constante en la dirección normal al espesor. Se analiza y compara el perfil de temperaturas obtenido en ambos recintos, cuando los mismos están en contacto con el ambiente y cuando se aísla el sistema completo. Se determinan para ambos modelos los coeficientes convectivos en la pared involucrada en la transferencia térmica.

**Palabras Claves:** convección natural, grasas orgánicas, perfil térmico, materiales de cambio de fase, temperatura de fusión.

### **INTRODUCCIÓN**

El proceso de acumulación de energía basado en el aprovechamiento del calor latente que captan o ceden los materiales de cambio de fase es muy eficaz. Este calor latente generalmente es alto (del orden de  $10^3$  kJ/kg) dependiendo la sustancia utilizada. La elección del material para una aplicación determinada puede utilizar esta propiedad, tanto para ingresar calor como para extraerlo, produciendo su licuación o solidificación, respectivamente. Ambos procesos se llevan a cabo a una temperatura constante, la que también es característica del material. Por lo tanto, dependiendo del problema planteado, la selección del material de cambio de fase adecuado es muy importante y por ende resulta interesante el estudio de estos materiales.

El hecho de que muchas sustancias orgánicas presenten cambio de fase a temperaturas próximas a la ambiente, las hace muy atractivas para distintos fines, como por ejemplo ofrecer condiciones de confort en una vivienda, mantener productos agrícolas o alimenticios, (Hasan y Sayigh, 1996; Boucíguez et al, 2006; Farid et al, 2004). Respecto de las ceras, las grasas y sus ésteres se ha establecido que son muy buenos acumuladores de energía en virtud de sus propiedades térmicas. (Swern, 1964).

En trabajos anteriores se presentaron algunos estudios sobre las propiedades termo físicas de un material de cambio de fase que por su disponibilidad y costo resulta interesante de ser analizado: la grasa vacuna (Vilte y Boucíguez, 2008). Esta sustancia es fácil de manipular en el laboratorio ya que su punto de fusión es del orden de los  $36$  °C, por lo que los flujos de calor requeridos para su calentamiento pueden satisfacerse con fuentes de voltajes convencionales de laboratorio, que operan en un rango de 30V. Empleando muestras de estas sustancias los periodos de tiempo necesarios para observar los procesos de fusión y solidificación no son largos. La remoción de estas sustancias de los recipientes es relativamente sencilla y rápida. Las propiedades termo físicas de la grasa vacuna usada en este trabajo, ya determinadas, se presentan en la Tabla 1. Cabe señalar que la conductividad térmica del líquido se ha medido sin tener en cuenta la convección, es decir como la suma de ambos efectos: conductivo y convectivo, situación que puede considerarse adecuada cuando los espesores son pequeños, del orden de 3 cm.

PROPIEDAD	VALOR	
Densidad: $\rho$	914.2 Kg/m <sup>3</sup>	
Punto de fusión: T	35 – 40 °C	
Calor latente de fusión: L	100 kJ/kg	
Capacidad calorífica: c	Sólido: $6 \cdot 10^3$ J/kg °C	Líquido: $10^3$ J/kg °C
Conductividad térmica: k	Sólido: 0.57 W/m °C	Líquido: 0.95 W/m °C

*Tabla 1. Propiedades de la grasa vacuna.*

En este trabajo se presenta el estudio experimental del comportamiento de tal sustancia cuando es calentada desde una superficie horizontal y desde una vertical, observándose la presencia de distintos efectos de acuerdo a sus dimensiones y a la forma en que ella recibe el calor.

## DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

A fin de evaluar la importancia de considerar o no efectos convectivos en las sustancias de cambio de fase cuando se realiza una transferencia térmica a través de dicha sustancia en posición vertical, se construyeron dos modelos en vidrio float de 3mm de espesor que contienen la grasa orgánica y que simulan una pared vertical de material de cambio de fase que es calentada. El modelo (1) tiene las siguientes dimensiones:  $1 \times 12 \times 18 \text{ cm}^3$  y el modelo (2):  $10 \times 12 \times 18 \text{ cm}^3$ , la diferencia entre ambos modelos es el espesor, en la relación es 1:10. La construcción en vidrio de los dos recintos que contienen el material de cambio de fase, fue realizada para visualizar el comportamiento del mismo durante los procesos de fusión y solidificación. El techo de los modelos es de acrílico de 3mm de espesor los que previamente se han perforado para introducir en el interior de cada cavidad pares termoeléctricos de cobre- constantan que permiten el registro de las temperaturas en el interior de los recipientes.

Una vez contruidos los recintos, se llenan con la sustancia en el estado líquido y se adhiere la tapa que incorpora los sensores de temperatura en su interior. Cuando el material se ha solidificado se procede a realizar las experiencias de calentamiento y enfriamiento. La sustancia orgánica ensayada es grasa vacuna, cuyo punto de fusión está en el rango de  $35$  a  $39 \text{ }^\circ\text{C}$ ; con las propiedades termo físicas ya mencionadas. (Vilte y Boucíguez, 2008)

El proceso de calentamiento se realiza empleando una resistencia calefactora de  $26 \text{ } \Omega$  construida sobre una base de fibra de vidrio de  $12 \times 18 \text{ cm}^2$  de superficie donde se devana un hilo de constantan entre ambas caras, por lo que el calefactor transfiere un flujo de calor prácticamente igual por cada una de ellas. Dicho calefactor se ubica entre los dos recintos con grasa, colocándose entre el calefactor y cada recinto una chapa de aluminio de igual superficie para optimizar el contacto y uniformizar el flujo de calor trasferido. La potencia de calentamiento es suministrada por una fuente doble regulable de  $30\text{V}$  y  $3 \text{ A}$  que fija una salida estable de potencia.

En la Figura 1 (parte izquierda) se muestra el dispositivo experimental armado para la realización de las experiencias: los recintos con grasa, los sensores de temperatura, las fuentes de alimentación y la resistencia calefactora. En la parte derecha puede apreciarse la relación entre los espesores de los dos recintos que contienen el material de cambio de fase.



Figura 1: Izquierda: Dispositivo experimental que se empleó en los ensayos. Derecha: Recintos, calefactor y aislación.

El registro de las medidas térmicas se realiza con 14 termocuplas ensambladas en 2 módulos ADAM que conectados a una PC permite guardar y realizar el procesamiento posterior de las medidas térmicas obtenidas durante el proceso de calentamiento y enfriamiento en cada una de las experiencias. Los módulos ADAM son alimentados por una fuente de  $12\text{V}$ . En la Figura 2 se muestra un diagrama donde se esquematiza la ubicación de los sensores de temperatura en el sistema ensayado. La nomenclatura empleada en ella es la que se cita en todo el trabajo, según se detalla a continuación:

- $T1_{vin}$ : temperatura del vidrio en el interior del modelo 1.
- $T1_{vex}$ : temperatura del vidrio en el exterior del modelo 1
- $T2_{vin}$ : temperatura del vidrio en el interior del modelo 2.
- $T2_{vex}$ : temperatura del vidrio en el exterior del modelo 2
- $T1(0.5, 0.5)$ : temperatura en  $x=0.5 \text{ cm}$ ,  $z=0.5$  en el local 1
- $T1(0.5, 9)$ : temperatura en  $x=0.5 \text{ cm}$ ,  $z=9$  en el local 1
- $T1(0.5, 17.5)$ : temperatura en  $x=0.5 \text{ cm}$ ,  $z=17.5$  en el local 1
- $T2(0.5, 0.5)$ : temperatura en  $x=0.5 \text{ cm}$ ,  $z=0.5$  en el local 2
- $T2(0.5, 9)$ : temperatura en  $x=0.5 \text{ cm}$ ,  $z=9$  en el local 2
- $T2(0.5, 17.5)$ : temperatura en  $x=0.5 \text{ cm}$ ,  $z=17.5$  en el local 2

T2(1.5, 0.5): temperatura en  $x=1.5$  cm,  $z=0.5$  en el local 2  
 T2(1.5, 9): temperatura en  $x=1.5$  cm,  $z=9$  en el local 2  
 T2(1.5, 17.5): temperatura en  $x=1.5$  cm,  $z=17.5$  en el local 2  
 Tamb: temperatura del ambiente del laboratorio

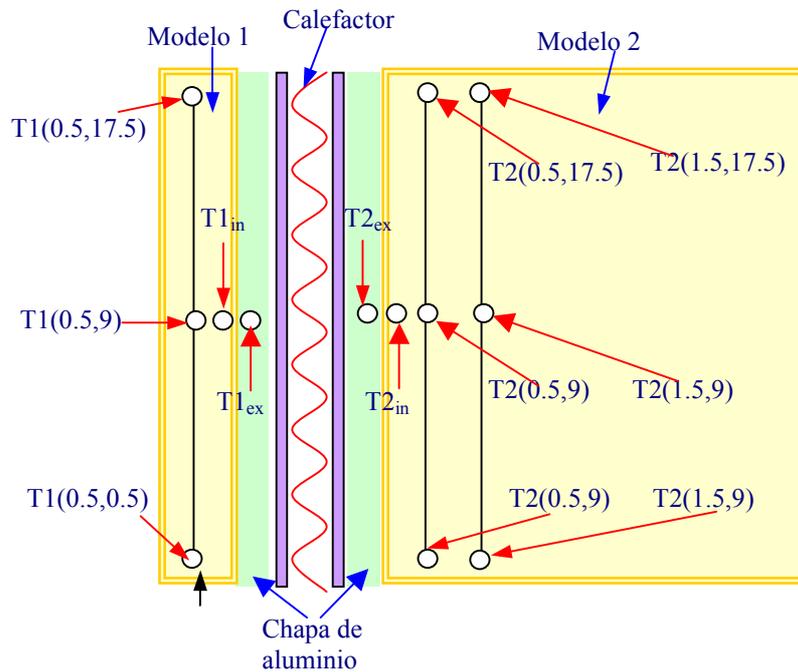


Figura 2: Esquema de la disposición de los sensores térmicos, en el interior de los locales y en la grasa y calefactor.

### VISUALIZACIÓN DE LA INTERFASE EN LOS PROCESOS DE FUSIÓN Y SOLIDIFICACIÓN

A fin de estudiar los procesos de fusión y solidificación en materiales de cambio de fase, en el caso particular de la grasa vacuna se ensayaron diferentes geometrías, realizando el calentamiento desde diferentes superficies laterales. En los ensayos de calentamiento desde la base, se utilizaron cajas de Petri, por la calidad del vidrio que permite visualizar claramente ambas fases (líquida y sólida) y la superficie de separación entre ambas. En ellas no se aprecian efectos convectivos. Los resultados se muestran en la Figura 3, donde puede apreciarse el avance del frente de fusión desde la base hacia la superficie externa. Esta observación que se repite si la geometría es de base rectangular como se muestra en la Figura 4, permite ajustar el comportamiento de la sustancia de cambio de fase con un modelo conductivo.

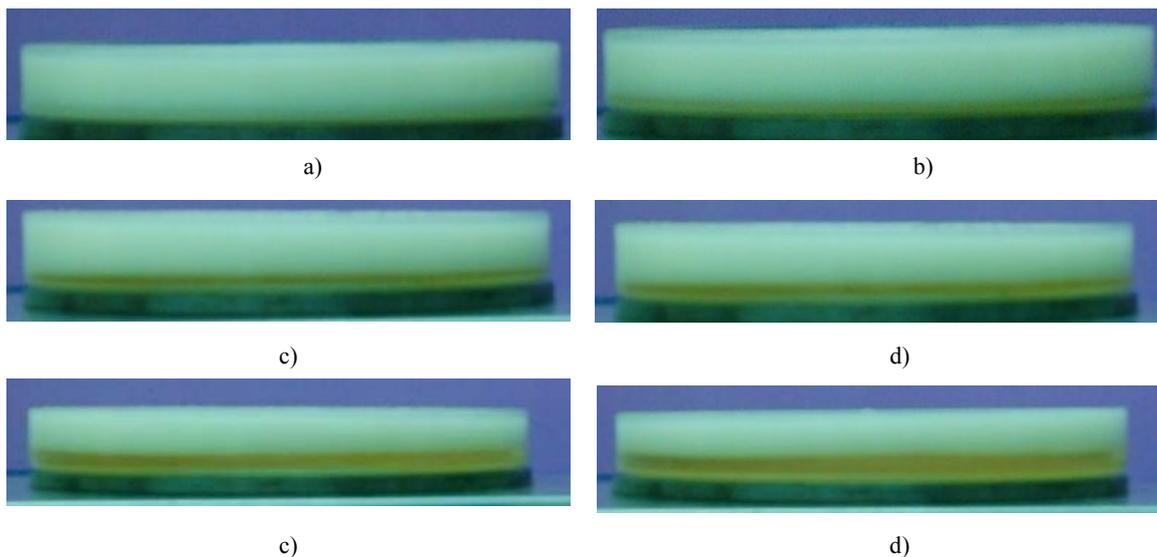


Figura 3: Proceso de calentamiento desde la base, geometría cilíndrica.

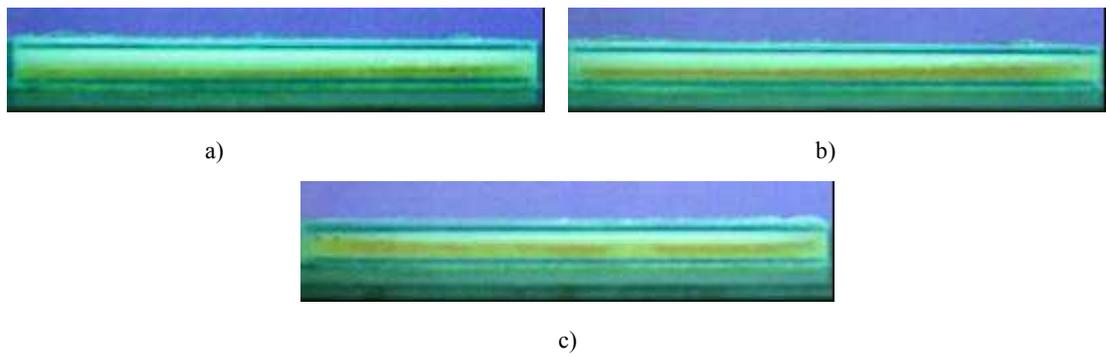


Figura 4: Proceso de calentamiento desde la base, geometría rectangular.

Cuando los recintos son más altos que anchos y son enfriados o calentados desde abajo se observa el mismo efecto, tal como se aprecia en la Figura 5. Las partes (a) y (b) de la figura corresponden a las etapas inicial y final del proceso de enfriamiento desde su base; a partir del estado (b), se realiza un proceso de calentamiento desde su base, observándose que el líquido avanza desde abajo hacia arriba, tal como se observa en (c) y (d), en donde la sustancia se encuentra completamente líquida.

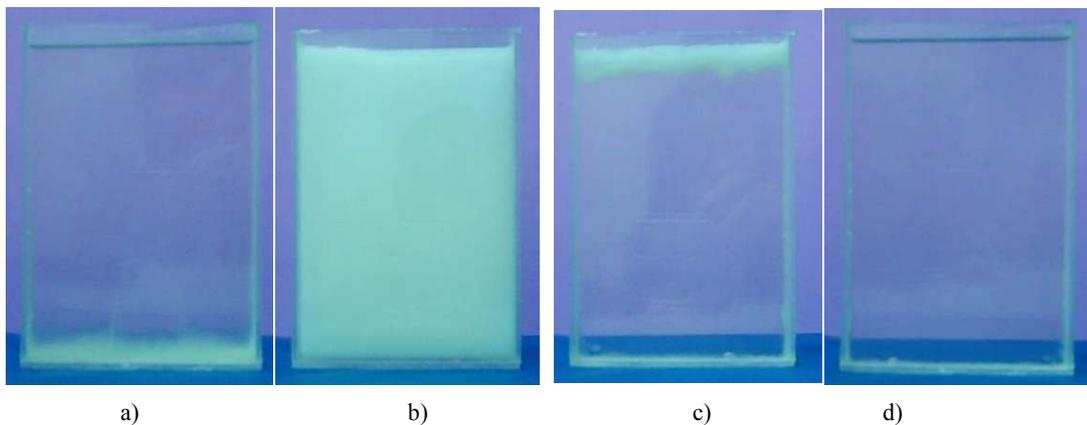


Figura 5. Posición del sólido al ser enfriado o calentado desde la base.

Se realizaron ensayos para esta misma geometría con calentamiento desde una pared lateral, como se muestra en la Figura 6, en ella se observa que en la zona próxima a la pared calentada la grasa se funde formando una delgada capa de espesor casi homogéneo en la dirección vertical, la interfase avanza paralela a la superficie calentada, en estas observaciones preliminares no observa efectos convectivos importantes que se reflejen en la forma del avance del frente de fusión.

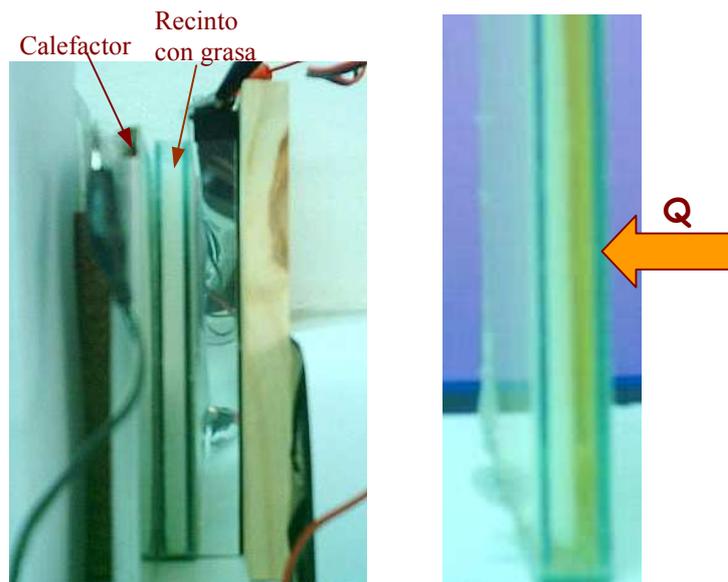
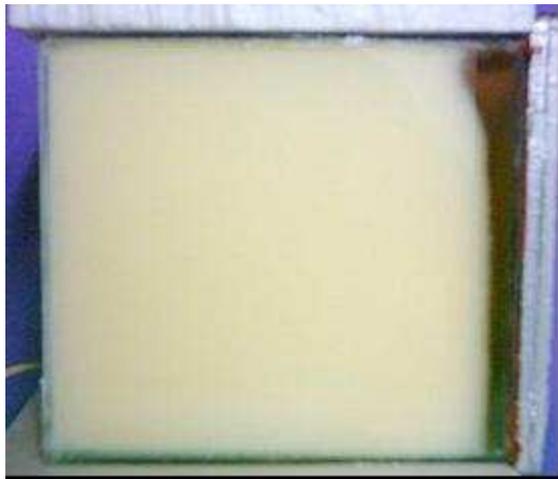


Figura 6: Geometría rectangular con calentamiento desde una pared lateral donde se observa el perfil del frente fusión.

Continuando el estudio de calentamiento desde uno de los laterales en recipientes de geometría rectangular se incrementó el espesor de la cavidad manteniendo las otras dos dimensiones constantes. En la Figura 7 se muestra el avance del frente de

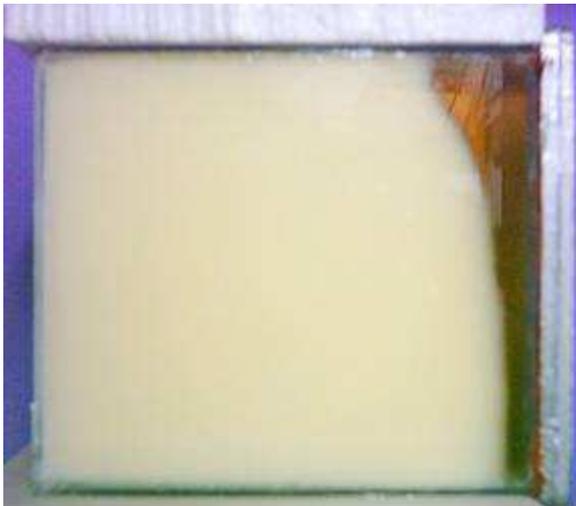
fusión cuando el recinto con grasa es calentado desde la pared lateral derecha, la cavidad reposa sobre una madera, mientras que sobre el techo se ha colocado poliestireno expandido a fin evitar cualquier influencia en la temperatura desde el ambiente exterior. En este caso es notable el efecto de la convección en la forma del avance del frente de fusión. De estos ensayos se puede afirmar que cuando el espesor de la cavidad aumenta los fenómenos convectivos parecen más importantes.



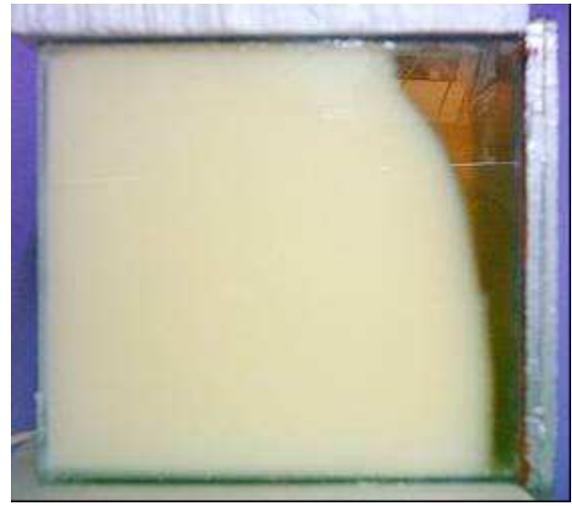
a)



b)



c)



d)

*Figura 7. Perfil del avance del frente de fusión en una geometría rectangular con calentamiento desde una pared lateral.*

En estas experiencias se observa el proceso de fusión y solidificación en cavidades rectangulares de diferentes espesores cuando son calentadas en una de sus superficies laterales, evidenciándose los efectos convectivos cuando aumenta el espesor. En ambos casos esta sustancia presenta un comportamiento adecuado para el acondicionamiento térmico de recintos.

#### **REGISTROS OBTENIDOS Y CÁLCULO DE COEFICIENTES.**

Con el dispositivo experimental que se muestra y esquematiza en las Figuras 1 y 2, se realizaron experiencias de enfriamiento y calentamiento de ambos recintos: (1) y (2). En un primer ensayo, ambos recintos se encontraban en contacto con el ambiente del laboratorio y posteriormente las paredes externas fueron aisladas con 3 cm de poliestireno expandido. Se trabajó con una potencia de calentamiento ( $P_c$ ) entre 15 y 30 W, la temperatura ambiente del laboratorio ( $T_{amb}$ ) varió entre 15 y 20°C. La etapa de calentamiento de sistema se prolongó por un período de tiempo entre 4 y 6 horas, luego el sistema se enfrió en contacto con el ambiente hasta que la sustancia se solidificó completamente. La evolución temporal de temperaturas en el interior de los recintos (1) y (2) durante los procesos de calentamiento enfriamiento del sistema aislado se muestran en la Figura 8, la que corresponde a un  $P_c=24$  W. La temperatura máxima es la alcanzada en el exterior de los recintos ( $T_{1vex}$  y  $T_{2vex}$ ) aproximadamente 66 °C, la mínima registrada en el recinto (2) a 1.5 cm de la pared caliente cerca del piso  $T_2(1.5, 0.5)$  de 40 °C, por lo que para este caso se tiene una capa material de cambio de fase en el estado líquido de espesor mayor o igual a 1.5 cm. Durante la etapa de enfriamiento se puede apreciar entre las 6 y 9 horas de iniciado el calentamiento un “fenómeno de histéresis” más pronunciado, típico de la grasa vacuna (en  $T_2(1.5, 9)$  y  $T_1(0.5, 0.5)$ ). Aproximadamente a las 3 horas de iniciado el calentamiento el proceso de transferencia de calor conductiva a través del vidrio alcanza el estado

estacionario ( $T1_{vex}$ ,  $T1_{vin}$ ,  $T2_{vex}$ ,  $T2_{vin}$ ). Dentro de los recintos ocurren repentinos cambios en los valores de temperatura entre el piso, el centro y el techo de las cavidades, que pueden atribuirse al movimiento del fluido.

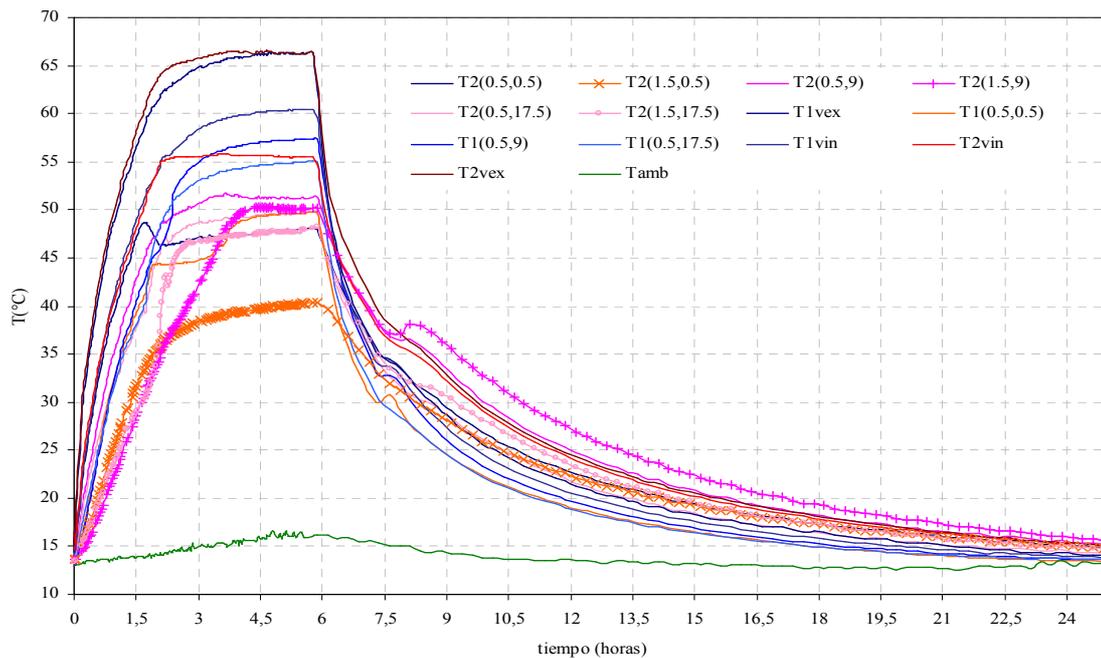


Figura 8. Evolución temporal de temperaturas medidas en los recintos (1) y (2) durante el proceso de calentamiento y posterior enfriamiento.

Para comparar los perfiles de temperaturas entre ambos recintos se los analizó por separado; en la Figura 9 (izquierda) se muestra la evolución de las temperaturas del recinto (1) durante el calentamiento y en la misma a la derecha los valores de obtenidos en el recinto (2) para el mismo proceso. En ella se observa que, para en el recinto (1) próximo a las 2 horas de calentamiento los valores de temperatura a 0.5 cm de la pared caliente cercanos al centro y al techo de la cavidad ( $T1(0.5,9)$  y  $T1(0.5, 17.5)$ ) aumentan ubicándose por encima de los valores de temperatura cercana al piso ( $T1(0.5,0.5)$ ), este cambio está generado por el fenómeno de convección que comienza a tener importancia en esta etapa del calentamiento.

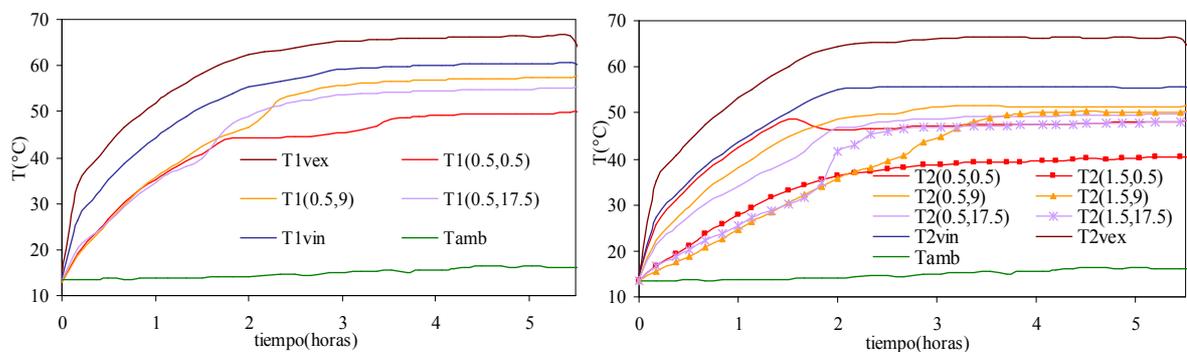


Figura 9: Perfil de temperaturas - Izquierda: modelo (1). - Derecha: modelo (2).

En cuando al recinto (2) se observa que a partir de las 2 horas de iniciado el calentamiento las temperaturas correspondientes al zona superior y centro de la cavidad se incrementan, ubicándose a partir de ese momento por encima de la temperatura próxima al piso, esto ocurre tanto para una distancia de 0.5 cm de la pared caliente como también a 1.5 cm de la misma. A la distancia de 0.5 cm de la pared la diferencia de temperaturas entre el centro  $T2(0.5,9)$  y el piso  $T2(0.5,0.5)$  es de 2 °C, a 1.5 cm de la pared caliente esta diferencia aumenta siendo de aproximadamente 10°C. A medida que nos aproximamos al techo para ambas distancias de la pared caliente, la temperatura cercana al techo es menor que la del centro aunque sigue siendo mayor que la de la zona vecina al piso, esto puede deberse a que en la zona superior hay, debido a movimientos del líquido, ingreso de grasa líquida más fría que luego se desplaza hacia abajo.

El fenómeno de convección ocurre cuando una superficie está en contacto con un fluido que tiene temperatura diferente a la de la superficie, tal como el estudiado en que la pared tiene adosado el calefactor y se encuentra en contacto con la grasa a una temperatura menor. Una vez que se inicia el calentamiento de la pared, la grasa próxima a la superficie que recibe calor, aumenta su temperatura hasta que se funde y forma una capa delgada de líquido. Con el transcurso del tiempo, el fluido (la grasa fundida) en contacto inmediato con la pared sigue calentándose por conducción, provocando que se torne menos denso.

Debido a la diferencia de densidad, se obtiene una fuerza de flotación resultante, provocando que el fluido más ligero se eleve y lo reemplace otra cantidad de fluido más frío, repitiéndose continuamente este proceso.

Este efecto influye en la forma en que avanza el frente de fusión, en el caso más simple la grasa caliente asciende próxima a la pared en contacto con el calefactor, luego se desplaza por el techo hacia la parte más fría arrastrando grasa líquida a menor temperatura hacia abajo y cerrando el ciclo como se representa dibujado sobre la fotografía que muestra el frente de fusión, hecho que se aprecia claramente en el recipiente de mayor tamaño, tal como se muestra en la Figura 10.



Figura 10: .Esquemización del ciclo de convección más sencillo en el proceso de fusión de una grasa vacuna.

Suponiendo que el calor transferido por conducción a través de la superficie del vidrio es el que está involucrado en la transferencia convectiva entre la pared caliente y grasa líquida a menor temperatura, se utilizó la siguiente expresión para calcular el coeficiente convectivo en la pared:

$$h = \frac{\dot{Q}}{A(T_{gr} - T_{in})}$$

Donde  $A$  es la superficie transversal de  $0.0216 \text{ m}^2$ ,  $T_{in}$ : la temperatura en la superficie interna de la pared de la cavidad y  $T_{gr}$ : la temperatura en la grasa a  $0.5 \text{ cm}$  de la superficie interna de la pared de la cavidad.

El valor de  $\dot{Q}$  se determina como:

$$\dot{Q} = 0.8 \frac{V^2}{2R}$$

Donde  $V$  es la tensión aplicada por la fuente de voltaje y  $R$  la resistencia del calefactor medido por un ohmetro; este valor está afectado por el factor de  $0.8$  para tener en cuentas las pérdidas y por  $0.5$  ya que la potencia total se reparte por igual entre ambas caras.

Los valores de los coeficientes convectivos así obtenidos son los que se muestran en la Tabla 2, los que evidencian que el efecto convectivo es más importante en el modelo (2) de mayor espesor. Los valores obtenidos de los coeficientes convectivos  $h$  son del orden de los calculados mediante el programa Heat Transfer version 1.1 a de B. Young y A. F. Mills para el caso de convección de aceite en una pared vertical. Este programa sencillo y simple arroja para el modelo 1 un valor de  $h$  de  $34 \text{ W/m}^2\text{°C}$  y para el modelo 2 un valor de  $38 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

	$H(\text{W/M}^2\text{°C})$	$\Delta H$
Modelo 1	39	4
Modelo 2	76	2

Tabla 2. Valores de los coeficientes convectivos en ambos modelos.

## CONCLUSIONES

Se analizaron los procesos de fusión y solidificación, en un recinto rectangular calentado desde una pared lateral vertical. En particular se observó el avance del frente de fusión y la presencia de efectos convectivos que pudieran ocurrir que modifiquen el desarrollo del mismo. Para espesores pequeños del orden de  $1.5$  a  $2 \text{ cm}$ , dichos efectos son despreciables, en el caso de mayores espesores, tal como el comprendido entre  $10$  y  $12 \text{ cm}$ , los efectos convectivos son importantes por lo que el frente de fusión deja de ser una capa de espesor homogéneo y constante próxima a la pared caliente y se torna de un mayor espesor en la zona superior cercana a la parte superior del recinto.

Se estimaron los coeficientes  $h$  de la transferencia convectiva que tiene lugar en la zona próxima a la pared caliente para la grasa vacuna, resultando que éstos se hacen importantes a medida que aumentan los espesores involucrados. En este aspecto sería interesante desarrollar un modelo numérico que permita dar cuenta de este efecto a fin de contrastar los resultados experimentales y contar con una herramienta que pueda utilizarse en la evaluación de otros materiales de cambio de fase y diferentes espesores de pared.

## REFERENCIAS

- Boucíguez, A; Lozano, R; Sánchez, A y Lara, M.(2006). *Conservación de Productos Agrícolas Utilizando Sustancias de Cambio de Fase*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Revista de la Asociación Argentina de Energía Solar. Vol.10, pág. 2.23 – 2.30. ISSN 0329-5184
- Farid, M, Khudhair, A, Razack, S y Al-Hallaj, S., (2004) *A Review on Phase Change Energy Storage: Materials y Applications* Energy Conversion y Management N° 45, pp. 1597-1615.
- Hasan, A and Sayigh, A. (1996) *Some Fatty Acids as Phase Change Thermal Energy Storage Materials*. Renewable Energy, Vol. 4, N° 1, pp. 69 – 76.
- Swern, D. (1964) *Physical Properties of Fats and Fatty Acids*. Cap. 3 Bailey's Industrial Oil and Fat Products.
- Vilte, M y Boucíguez, A. (2008). *Determinación Experimental y Numérica de Propiedades Térmicas de Grasas Orgánicas* Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Revista de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol.12, pág. 3.45 – 3.52. ISSN 0329-5184.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Salta, por el financiamiento para la realización del presente trabajo.

## EXPERIMENTAL STUDY OF CONVECTIVE EFFECTS IN ROOMS WITH PHASE CHANGE MATERIALS

**ABSTRACT:** Looking for to observe convective effects, an organic wax was submitted to an experimental study at laboratory scale. Two rectangular cavities, of different thicknesses, containing the phase change materials were tested. A contact heat flow, in normal direction to the thickness of such devices, was simultaneously applied. In order to determinate the convective coefficients involved in the heat transfer, the obtained temperature profile inside the two cavities were analyzed to study the natural convection process.

**Keywords:** natural convection, organic waxes, thermal profile, phase change materials, melting point.