

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA CONVECCIÓN NATURAL EN UN PROCESO DE FUSION DE GRASAS ORGANICAS

M. Vilte, A. Bouciguez

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: A partir del estado sólido se somete una grasa orgánica, a un flujo de calor controlado en la dirección normal al espesor, con el propósito de examinar el avance del frente de fusión y el efecto de la convección natural que podría aparecer en el líquido emergente. Para ello se han construido recintos de distintos espesores, que contienen la sustancia, inicialmente sólida a temperatura menor a la de fusión; por el ingreso de calor ésta aumenta su temperatura, dando lugar a una fase líquida; la que de acuerdo al espesor del recinto que la almacena, puede presentar o no efectos convectivos. Se analizan y comparan los perfiles de temperaturas obtenidos, a fin de determinar el espesor límite en el cual dichos efectos se hacen apreciables.

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

INTRODUCCIÓN

El acondicionamiento térmico de locales destinados a distintos usos, puede llevarse a cabo con diversos elementos constructivos tales como ladrillos, adobe, placas térmicas, o bien utilizarse materiales que presenten cambio de fase sólido - líquido en temperaturas cercanas a las que se desea acondicionar. Estos materiales presentan la ventaja adicional de acumular calor no solo en forma sensible sino también mientras tiene lugar el cambio de fase, como calor latente. Las sustancias orgánicas son en general, más estables que las inorgánicas y soportan sin alteraciones apreciables en sus propiedades, reiterados ciclos de fusión - solidificación (Hasan y Sayigh, 1996; Boucíguez et al, 2006; Farid et al, 2004). Las ceras, las grasas y sus ésteres son buenos acumuladores de energía en virtud de sus parámetros térmicos. (Swern, 1964).

En trabajos anteriores se presentaron algunos estudios sobre las propiedades físicas de la grasa vacuna, material de cambio de fase que por su disponibilidad y costo resulta interesante (Vilte y Boucíguez, 2008). Su punto de fusión, se encuentra en 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 30 V, por lo que los tiempos necesarios para observar los procesos de fusión y solidificación son razonables. La remoción de estas sustancias de los recipientes es relativamente sencilla y rápida. Las propiedades termo físicas de la grasa vacuna utilizada en este trabajo, ya determinadas, se presentan en la Tabla 1, donde la conductividad térmica del líquido se ha medido en experiencias realizadas donde no aparece el proceso de convección, así como cuando éste fenómeno tiene lugar, registrándose en este último caso, el valor correspondiente a la suma de los efectos conductivo y convectivo.

PROPIEDAD	VALOR
Densidad: ρ	914.2 Kg/m ³
Punto de fusión: T	35 – 40 °C
Calor latente de fusión: L	100 kJ/kg
Capacidad calorífica del sólido: c	6 10 ³ J/kg °C
Capacidad calorífica del líquido: c	980 J/kg °C
Conductividad térmica del sólido: k	0.57 W/m °C
Conductividad térmica del líquido: k (sin convección)	0.42 W/m °C
Conductividad térmica del líquido: k (con convección)	0.95 W/m °C

Tabla 1. Propiedades de la grasa vacuna.

En este trabajo se presenta el estudio experimental de tal sustancia cuando a partir del estado sólido se la somete a un flujo de calor controlado en la dirección normal al espesor, analizándose el comportamiento térmico para diferentes espesores de material de cambio de fase.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Para determinar la presencia o no de convección en la fase líquida cuando la sustancia se funde, se han construido recintos en vidrio float, de 3mm de espesor, del mismo ancho y alto (12x18 cm²), siendo ésta la superficie expuesta al flujo de calor y diferentes espesores: 2, 3, 4 y 5 cm. 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 termoelectricos de cobre- constantan que permiten el registro de las temperaturas en el interior de los recipientes.

Tales recintos, fueron llenados con la sustancia en el estado líquido, seguidamente se adhiere la tapa que incorpora los sensores de temperatura en su interior. Cuando el material se ha solidificado completamente, se procede a realizar las experiencias de calentamiento y enfriamiento.

El proceso de calentamiento se realiza empleando una resistencia calefactora de 26Ω 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 dos recintos que contienen la 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 transferido. El sistema formado por los recintos y el calefactor se encuentra aislado del ambiente con poliestireno expandido de 2 cm de espesor. La potencia de calentamiento es suministrada por una fuente doble regulable de 30V y 3 A que fija una salida estable de potencia. En la Figura 1 se muestra el dispositivo experimental utilizado para el calentamiento y para la medición de las temperaturas.



Figura 1: Dispositivo experimental utilizados: fuente, sensores de temperatura, registro de datos, recinto y aislación.

El registro de las medidas térmicas se realiza con pares termoelectricos tipo T, de cobre – constantan, ensambladas en módulos ADAM, alimentados por una fuente de 12 V, que conectados a una PC permite almacenar los registros obtenidos para su procesamiento posterior. En la Figura 2 se muestra un diagrama donde se esquematiza la ubicación de los sensores de temperatura para cada recinto: En ella la letra “i”, a continuación de la letra T de temperatura, identifica el espesor de la muestra, es decir $i=2$, corresponde a un recinto de 2 cm de espesor, $i=3$ a 3 cm, etc., mientras que los números entre paréntesis dan la posición (x,y) medidas desde pared del recipiente en contacto con chapa de aluminio y la base respectivamente; de modo que, por ejemplo, T2(1,0.5) representa a la temperatura del recinto de 2 cm de espesor a 1 cm de la pared que recibe calor y 0.5 cm de la base. Cabe señalar que el recinto de 2 cm de espesor solo tiene tres sensores a $x=1$ cm. Con igual criterio $T_{i_{in}}$ y $T_{i_{ex}}$ son, respectivamente, las temperaturas del vidrio en el interior y el exterior del recipiente “i”; respectivamente; ambos sensores se encuentran en la mitad de la superficie es decir a $y=9$ cm. Esta nomenclatura es la que se cita en todo el trabajo, de acuerdo al siguiente detalle:

- $T_{i_{in}}$: temperatura del vidrio en el interior del modelo “i”.
- $T_{i_{ex}}$: temperatura del vidrio en el exterior del modelo “i”.
- $T_i(1, 0.5)$: temperatura en $x=1$ cm, $y=0.5$ cm en el local “i”.
- $T_i(1, 9)$: temperatura en $x=1$ cm, $y=9$ cm en el local “i”.
- $T_i(1, 17.5)$: temperatura en $x=1$ cm, $y=17.5$ en el local “i”.
- $T_i(2, 0.5)$: temperatura en $x=2$ cm, $y=0.5$ cm en el local “i”.
- $T_i(2, 9)$: temperatura en $x=2$ cm, $y=9$ cm en el local “i”.
- $T_i(2, 17.5)$: temperatura en $x=2$ cm, $y=17.5$ en el local “i”.
- Tamb: temperatura del ambiente del laboratorio

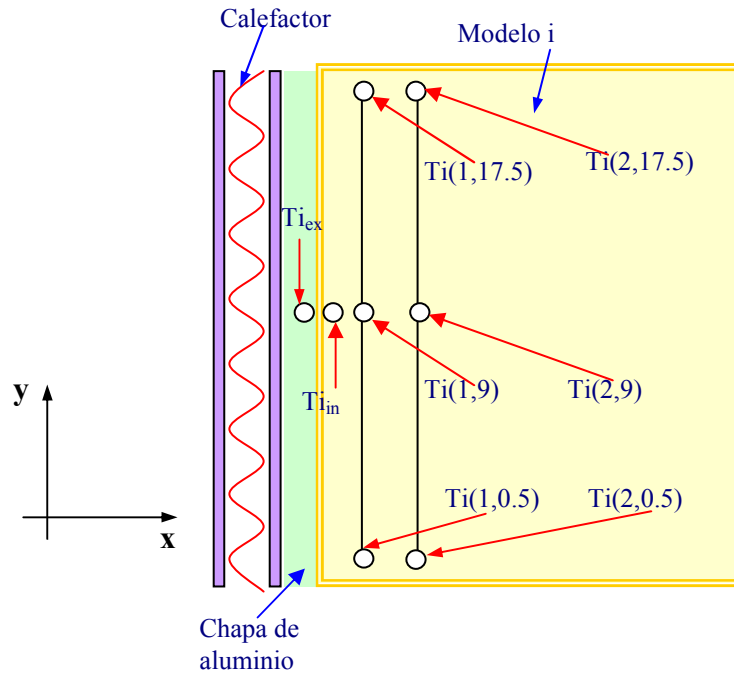


Figura 2: Esquema de la disposición de los sensores térmicos.

VISUALIZACIÓN DE LA INTERFASE EN LOS PROCESOS DE FUSIÓN Y SOLIDIFICACIÓN

Con el propósito de observar el proceso de fusión y solidificación en materiales de cambio de fase, en la grasa vacuna se ensayaron diferentes espesores en geometría rectangular. En el caso en que el calentamiento se realiza desde la base, no se advierten efectos convectivos apreciables, tal como se visualiza en la Figura 3, en ella se aprecia también que el líquido es transparente, mientras que el sólido es opaco.

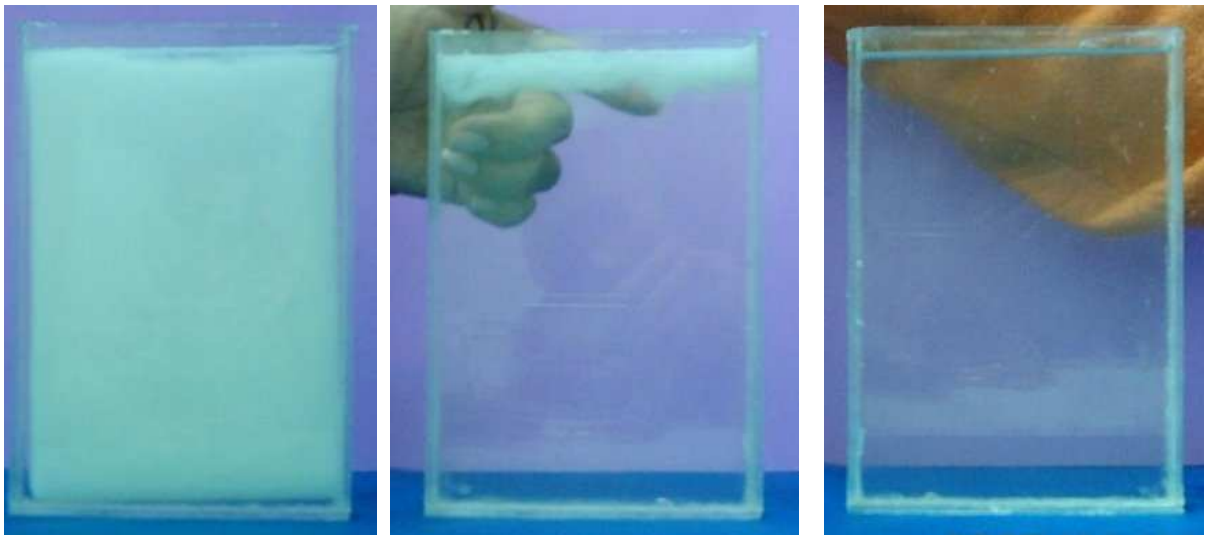


Figura 3: Proceso de calentamiento desde la base.

En cambio, cuando se realiza el calentamiento desde la pared lateral, pueden apreciarse efectos convectivos de acuerdo al espesor de la muestra. Aprovechando que el devanado del calefactor está por ambos lados del mismo, se ubica entre dos recintos; así las experiencias se han realizado conjuntamente en los de espesor 2 y 4 cm y en los de 3 y 5 cm en forma simultánea, respectivamente.

En la Figura 4 (a), se muestra la sustancia al cabo de 4.5 horas de iniciado el proceso de calentamiento, para espesores de 4cm (izquierda) y 2cm (derecha); en la (b) se muestra la sustancia al cabo de 5.5 horas de iniciado el proceso de calentamiento, para espesores de 3cm (izquierda) y 5cm (derecha).



(a) espesores: 4cm (izquierda) y 2cm (derecha)

(b) espesores de 5cm (izquierda) y 3cm (derecha)

Figura 4: Proceso de calentamiento desde la pared lateral, para los espesores estudiados.

En estas experiencias se observa que al ser calentadas lateralmente, al producirse la fusión, aparecen efectos convectivos, los que se hacen más notorios a medida que aumenta el espesor.

RESULTADOS OBTENIDOS

Con el dispositivo experimental que se muestra y esquematiza en las Figuras 1 y 2, se realizaron experiencias de calentamiento y enfriamiento en los cuatro recintos de diferente espesor. En forma simultánea, se ensayaron los recintos de 3 y 5 cm de espesor y luego los de 2 y 4 cm de espesor. Estos fueron aislados térmicamente del ambiente adosando a las paredes externas poliestireno expandido de 2 cm de espesor. Se trabajó con una potencia de calentamiento (P_c) de 20 W, la temperatura ambiente del laboratorio (T_{amb}) varió entre 15 y 18°C. La etapa de calentamiento del sistema se prolongó por un período de tiempo entre 6 y 8 horas, luego el sistema se enfrió en contacto con el ambiente hasta que la sustancia se solidificó completamente.

Para comparar los perfiles de temperaturas entre los distintos recintos se los analizó separadamente; los resultados se presentan en las Figuras 5 y 6.

En la Figura 5, parte izquierda se muestra la evolución de las temperaturas del recinto (2) durante el calentamiento y en la parte derecha los valores de obtenidos en el recinto (4) para el mismo proceso. De igual manera en la Figura 6, izquierda se muestra la evolución de las temperaturas del recinto (3) durante el calentamiento y a la derecha los valores de obtenidos en el recinto (5) para el mismo proceso.

Analizando en forma general la evolución de las temperaturas en el interior de los recintos, a las 4 horas de iniciado el calentamiento, se observa que en el interior de los modelos 2 y 3 superan los 40 °C, por lo que la sustancia está completamente licuada; mientras que en los recintos 4 y 5 las temperaturas en el piso no alcanzan aún los 40 °C, por lo que todavía existe sustancia en el estado sólido, lo que coincide con los registros fotográficos mostrados en la Figura 4, en la que en los recipientes de menor espesor la grasa se encuentra completamente licuada. También puede observarse que, para todos los recintos y para diferentes tiempos de iniciado el calentamiento los valores de temperatura a 1 y 2 cm de la pared que recibe calor, cercanos al centro y al techo de la cavidad ($T_i(1,9)$, $T_i(2,9)$, $T_i(1,17.5)$ y $T_i(2, 17.5)$) aumentan ubicándose por encima de los valores de temperatura próximas al piso ($T_i(1,0.5)$ y $T_i(2,0.5)$); estos cambios repentinos son generados cuando el fenómeno de convección comienza a cobrar importancia. Durante la etapa de enfriamiento, en todos los modelos, se puede apreciar entre las 9 y 12 horas de iniciado el calentamiento un “fenómeno de histéresis” típico de la grasa vacuna.

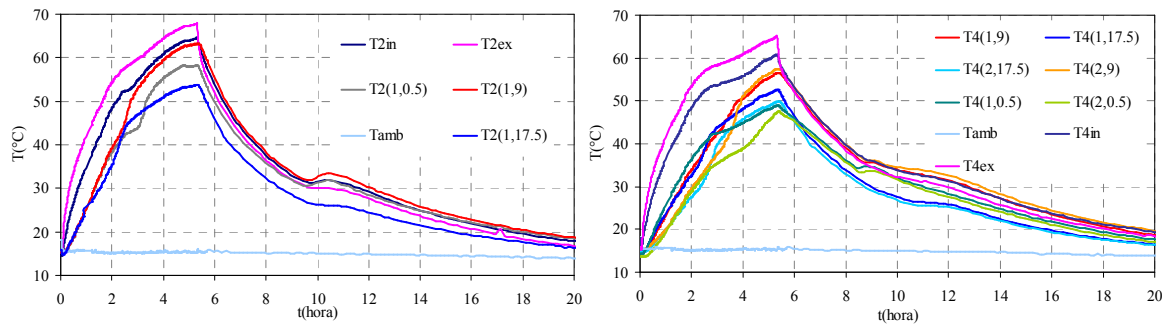


Figura 5: Evolución temporal de temperaturas medidas en los recintos (2) y (4) durante el proceso de calentamiento y posterior enfriamiento, izquierda y derecha respectivamente.

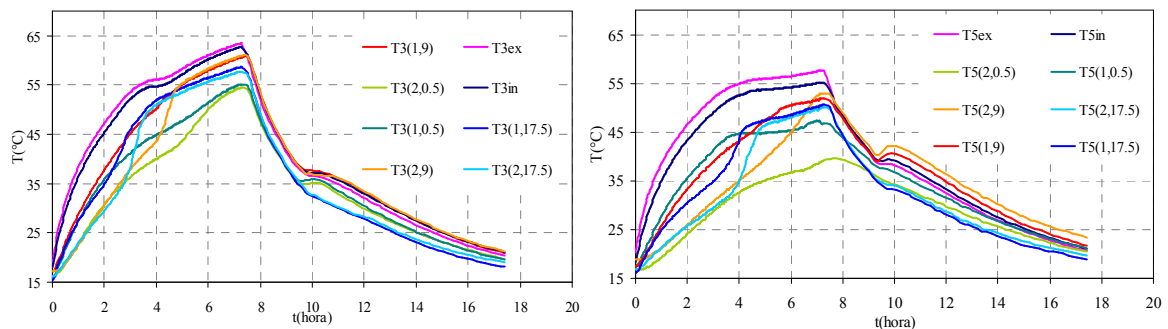


Figura 6: Evolución temporal de temperaturas medidas en los recintos (3) y (5) durante el proceso de calentamiento y posterior enfriamiento, izquierda y derecha respectivamente.

En la Figura 6 (izquierda) se advierte que a las 5.5 horas de iniciado el calentamiento en el modelo 3 la región central se encuentra a mayor temperatura: $T3(1,9)=T3(2,9)\cong 57\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una diferencia constante con la de la pared ($T3in$) de $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, valores que siguen aumentando por el ingreso constante de flujo de calor; luego sigue la de la zona cercana al techo $T3(1,17.5)=56\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T3(2,17.5)=55\text{ }^{\circ}\text{C}$ y luego la región mas fría cercana al piso con temperaturas entre $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. En el modelo 4 (Figura 5 derecha) para este mismo tiempo se registra un comportamiento similar con temperaturas ligeramente inferiores. En el modelo 5 (Figura 6 derecha) para este tiempo, de acuerdo a los registros obtenidos: $T5(1,9)=50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T5(2,9)=42\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T5(1,17.5)=T5(2,17.5)\cong 47\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T5(1,0.5)=45.5$ y $T5(2,0.5)=35.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, solo existe sustancia en el estado sólido en la región cercana al piso a 2 cm de la pared que recibe calor. Para el mismo tiempo en el modelo 2 se observan temperaturas más altas: la temperatura máxima alcanzada por la sustancia de cambio de fase es $T2(1,9)=63\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el centro de la cavidad, manteniendo con $T2in$ una diferencia constante de $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo que la zona central al igual que la de los otros modelos, es más caliente, las temperaturas registradas en la zona cercana al techo las mismas están por debajo de las registradas en la zona cercana al piso, lo que podría deberse a una pérdida de sustancia por alguna de las juntas del envase de vidrio que contienen la misma. La sustancia se encuentra completamente líquida en este último caso.

A fin de analizar lo que sucede a diferentes distancias de la pared calentada, se muestra en la Figura 7 la evolución de las temperaturas para el modelo 3 en $x=1$ y 2 cm . Se observa que en principio, el aumento de temperatura es más o menos uniforme a las diferentes alturas ($y=0,5\text{ cm}$ en la zona cercana al piso; $y=9\text{ cm}$ en el centro de la cavidad, $y=17.5$ en la zona cercana al techo); pero entre las 2 y 3 horas de iniciado el calentamiento se producen incrementos de temperatura repentinos en la región cercana al techo ($T3(1,17.5)$) y luego en el centro $T3(1,9)$, según se puede apreciar en la Figura 7 a) para $x=1\text{ cm}$. Para un tiempo ligeramente mayor en $x=2\text{ cm}$ (Fig. 7 b)) ocurre algo similar, solo que los cambios son más notables.

Este comportamiento obedece al flujo convectivo que se establece en la cavidad, ya que la grasa líquida más caliente por diferencia de densidad es arrastrada a lo largo de la pared caliente hacia el techo, luego se desplaza sobre el mismo hacia la pared más fría y dependiendo de la evolución del flujo antes de llegar a la pared opuesta desciende acercándose hacia la zona central hasta llegar al piso y completar el ciclo. En el modelo 4 se observa idéntico comportamiento, tal como se puede apreciar en la Figura 8. El tiempo en el que ocurren estos cambios repentinos después de iniciado el calentamiento marcan el establecimiento de la convección natural dentro del recinto que contiene el material de cambio de fase. En el caso del modelo 5 (Figura 9), los cambios se producen entre las 3 y las 4 horas de iniciado el calentamiento; esto puede deberse a la mayor cantidad de sustancia contenida en este recinto lo que contribuye a una mayor inercia térmica. Con respecto a la temperatura de la zona cercana al piso crece en forma uniforme con el tiempo, incluso durante el tiempo en que el flujo convectivo se mantiene o disminuye ligeramente, lo que se debe a que el fluido más frío llega a esta zona siguiendo el ciclo convectivo. Esto último está de acuerdo con las fotos registradas (Figura 4) donde la sustancia de cambio de fase de la zona cercana al piso cercana y a la pared opuesta a la calentada es la que permanece sin licuarse a las 5 horas de iniciado el calentamiento.

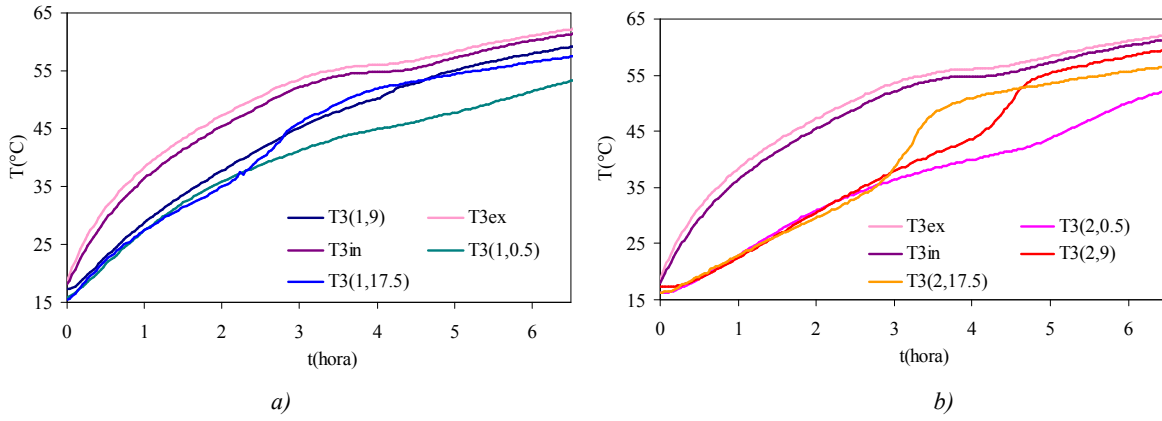


Figura 7: Evolución temporal de las temperaturas en el modelo 3: a) En $x=1$ cm. b) En $x=2$ cm.

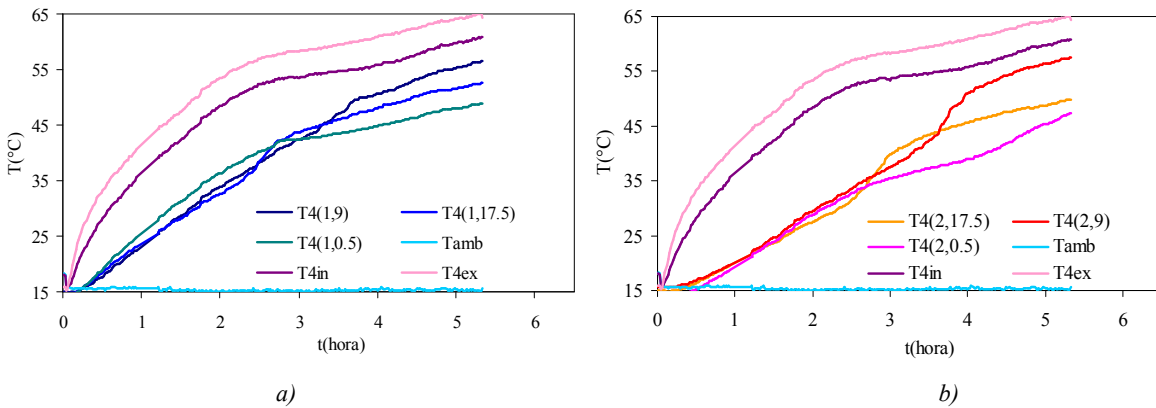


Figura 8: Evolución temporal de las temperaturas en el modelo 4: a) En $x=1$ cm. b) En $x=2$ cm.

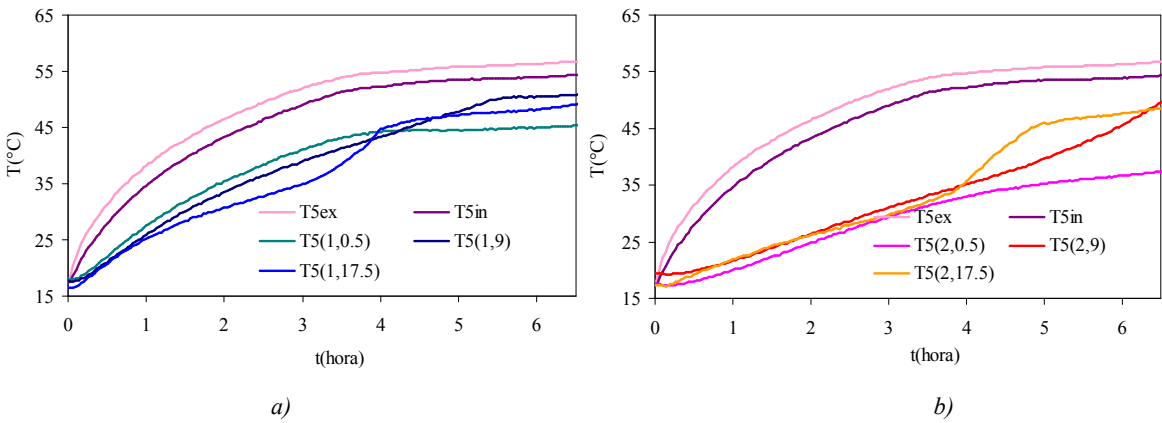


Figura 9: Evolución temporal de las temperaturas en el modelo 5: a) En $x=1$ cm. b) En $x=2$ cm.

De los registros térmicos también se puede determinar el tiempo para el cual el frente de fusión alcanza los 2 cm medidos a partir de pared que recibe calor y a diferentes alturas, lo que se presenta en las Figuras 10 (techo), 11 (centro) y 12 (piso). En la Figura 10 a) se muestra que en el modelo 3 las temperaturas en el techo se uniformizan para $x=1$ y 2 cm a las 3.5 horas, por lo que puede decirse que para este tiempo la sustancia está completamente licuada a 2 cm de la pared caliente; en la Figura 10 b) para el modelo 5 este tiempo es mayor: 5 horas. Según se aprecia en la Figura 11 en el centro las temperaturas para $x=1$ y 2 cm se uniformizan a las 4.4 horas para el modelo 3 y en el modelo 5 esto ocurre más allá de las 6 horas. Las temperaturas en el piso para $y=0,5$ cm según se observa en la Figura 12 a) en el modelo 3 se uniformizan a las 6 horas cuando ambas se acercan a los 50 °C. De este análisis puede afirmarse que por el efecto convectivo la región que se licua más rápidamente, más allá de la cercana a la pared caliente, es la cercana al techo, luego el centro y por último la región próxima al piso, lo que coincide con los registros fotográficos (Figura 4) que muestran la forma que tiene el frente de fusión. Además puede decirse que para la potencia ensayada en el modelo 3 toda la sustancia de cambio de fase está en el estado líquido a las 6 horas mientras que en el modelo 5 aún hay material sólido presente.

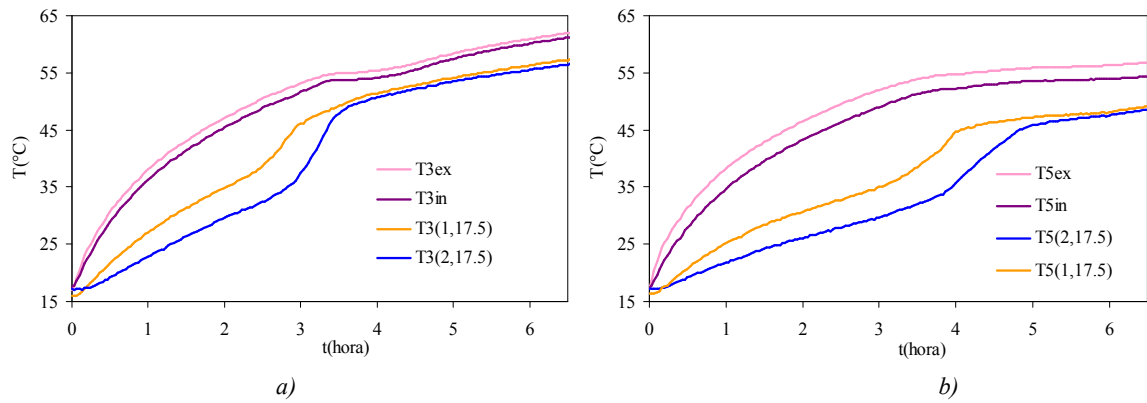


Figura 10: Evolución temporal de las temperaturas en el techo ($y=17.5$ cm) para $x=1$ cm y en $x=2$ cm: a). en el modelo 3; b) en el modelo 5.

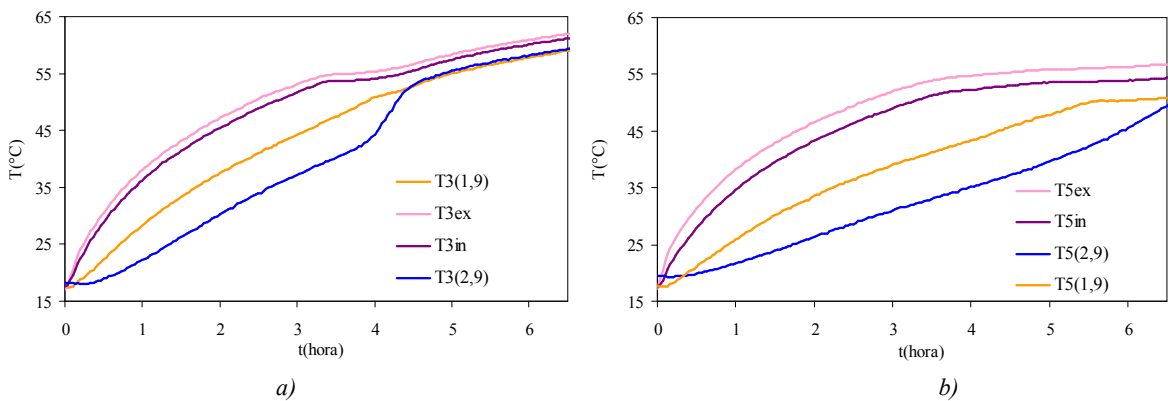


Figura 11: Evolución temporal de las temperaturas en el centro ($y=9$ cm) para $x=1$ cm y en $x=2$ cm: a). en el modelo 3; b) en el modelo 5.

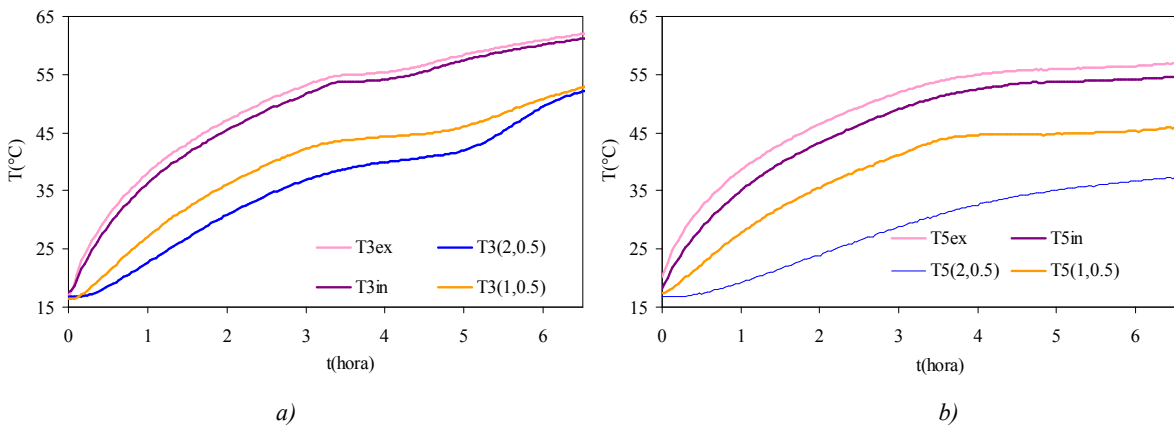


Figura 12: Evolución temporal de las temperaturas en el piso ($y=0.5$ cm) para $x=1$ cm y en $x=2$ cm: a). en el modelo 3; b) en el modelo 5.

Para el cálculo del coeficiente convectivo en la grasa, se asume que el calor transferido por conducción a través de la superficie del vidrio es el involucrado en el proceso convectivo entre la pared caliente y grasa líquida, utilizándose la siguiente expresión para calcularlo:

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

Donde A es la superficie transversal (pared de (12×18) cm²) de 0.0216 m², 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 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 dividido por 2 ya que la potencia total se reparte por igual entre ambas caras del calefactor.

Así el coeficiente convectivo resulta 70 ± 7 (W/m²°C). Asimismo, se aprecia que en el recipiente de 2 cm de espesor, los efectos convectivos pueden desestimarse, mientras que en los restantes, éste fenómeno se encuentra presente.

CONCLUSIONES

Se analizaron los procesos de fusión y solidificación, en un recinto rectangular calentado (o enfriado) desde una superficie. Se observa que no aparecen efectos convectivos cuando tal proceso tiene lugar desde la base, permaneciendo el sólido por encima del líquido, cuando es calentado y el líquido por encima del sólido cuando es enfriado.

Para el caso en que el calentamiento tiene lugar desde una superficie lateral, se observa el avance del frente de fusión y la presencia de efectos convectivos que lo modifican. Para espesores pequeños, menores a 2 cm, dichos efectos son despreciables, por lo que el frente de fusión avanza prácticamente sin deformación; mientras que para espesores mayores, los efectos convectivos comienzan a cobrar importancia, a medida que aumenta el espesor del material, existiendo una mayor cantidad de líquido en la parte superior del recinto, respecto de la parte inferior.

La estimación del coeficiente de convección h contribuye al mejor entendimiento del fenómeno y proporciona un parámetro importante para la posterior modelización del comportamiento de ésta y de otras grasas orgánicas de similares características.

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 Num érica 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 recibido.

ABSTRACT

An organic wax, initially solid, is exposed to a control heat flux in normal direction, to analyze the advance of fusion front and the convective effects in the resulting liquid phase. Rectangular cavities, of different thicknesses containing the phase change materials, in solid state, were heated; then the liquid phase appears. The thermal profile of temperature is analyzed with the purpose to obtain the limited thicknesses where the convective effects are important.

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