

ANÁLISIS DE LA TRANSFERENCIA TÉRMICA DURANTE LA FUSIÓN DE UN MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

María Vilte, Angélica Bouciguez y Sonia Esteban

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

Recibido 12/08/13, Aceptado 29/09/13

RESUMEN: En el presente trabajo se estudia experimentalmente, el proceso de fusión de un material de cambio de fase, contenido en un recipiente rectangular que recibe calor desde una de sus paredes laterales verticales, con un flujo constante. Se analiza la evolución temporal de la distribución de temperaturas en el interior de la sustancia y el avance del frente de fusión, conjuntamente con su inclinación y fracción de líquido durante el mencionado proceso. Los resultados muestran la importancia de considerar no solo la transferencia conductiva sino también la convección natural durante la fusión en un material de cambio fase.

Palabras claves: grasa orgánica, frente de fusión, temperatura, conducción y convección natural, acumulador de calor.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el proceso de fusión de un material de cambio de fase es uno de los temas más estudiados en el área de transferencia de calor; debido a las numerosas aplicaciones que en diversos campos de la ciencia y la tecnología dicho estudio ha generado (Sharma et al., 2009). En particular, en el área de las energías renovables, estos materiales pueden contribuir a mejorar los sistemas de acumulación de energía (Nallusamy et al., 2007) y el acondicionamiento térmico de locales destinados a diversos usos (Farid et al., 2004).

El uso de un sistema de acumulación térmica empleando materiales tradicionales (piedra, agua, concreto, etc.) requiere disponer de espacios relativamente grandes, mientras que el empleo de materiales de cambio de fase (PCM) permite reducir, en gran medida, los volúmenes de acumulación, manteniendo o incluso incrementando la capacidad de almacenamiento. Ellos resultan particularmente atractivos ya que posibilitan la acumulación de energía en forma de calor latente, resultando una alta densidad de reserva de energía, almacenada a temperatura constante o en un rango limitado de variación de ella, que corresponde al punto de fusión de la sustancia empleada (Zalba, 2003).

En trabajos anteriores, se presentaron estudios sobre grasa vacuna como material de cambio de fase, en particular la caracterización de propiedades termofísicas (Vilte y Boucíguez, 2008; Vilte y Boucíguez, 2010), resultando los valores, consignados en la Tabla 1, para dicha grasa, la que utiliza también en este trabajo.

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: c	Sólido: 4.1 10 ³ J/kg °C	Líquido: 5.7 10 ³ J/kg °C
Conductividad térmica: k	Sólido: 0.57 W/m °C	Líquido: 0.95 W/m °C

Tabla 1: propiedades termofísicas de la grasa vacuna.

El PCM, al ser sometido a calentamiento a partir de estado sólido, da lugar, a la aparición de una fase líquida, además de la sólida ya existente y una interfase que separa ambas, la que se encuentra a la temperatura de fusión. La transferencia de calor tiene lugar, en el interior del PCM, por efectos conductivos y convectivos (Hamdan y Al-Hinti, 2004), los que dependen fuertemente de las dimensiones y forma del recinto que contiene el material; siendo éstos últimos particularmente interesantes y constituyen el objetivo principal de este trabajo.

En este artículo, se presenta el estudio del comportamiento de tales sustancias, frente a diferentes tamaños de recintos, observándose los procesos de conducción y convección, así como la relevancia de este último, en relación al espesor del recinto.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Para estudiar el proceso de fusión de un PCM en un recinto cerrado que recibe un flujo de calor constante en una de sus paredes laterales, se construyeron recintos de vidrio float de 3mm de espesor, de bases rectangulares tipo caja de diferente ancho (6, 7, 8 y 10 cm) en la dirección del flujo de calor, pero con las mismas dimensiones en la pared calentada (12x18 cm²). Los recintos son de vidrio transparente a fin de obtener registros fotográficos del proceso que ocurre en el interior del material. Los ensayos experimentales se dividen en dos etapas, primero se trabaja con los recintos de 6 y 7 cm de espesor, designados como modelos 6 y 7; se registran medidas térmicas durante el proceso de fusión y se obtienen registros fotográficos; luego, se ensayan los recipientes de 8 y 10 cm de espesor (modelos 8 y 10).

Las medidas de temperaturas se realizaron con sensores térmicos: termocuplas tipo T, las que se ubicaron en el centro de la superficie exterior e interior de la pared calentada; 3 sensores a 2 cm de la pared calentada: el primero a 0.5 cm del techo, el segundo en el centro del recinto y el tercero a 0.5 cm del piso; 3 sensores a 4 cm de la pared calentada, a la misma altura que los anteriores (Figura 1). Para los 2 recintos se emplearon 16 termocuplas que conectadas a través de módulos ADAM, a una PC permiten registrar y almacenar los datos para su posterior procesamiento. El flujo de calor que reciben los recintos se genera con una placa calefactora que se conectada a una fuente de voltaje regulada provee una potencia de calentamiento constante (Figura 2).

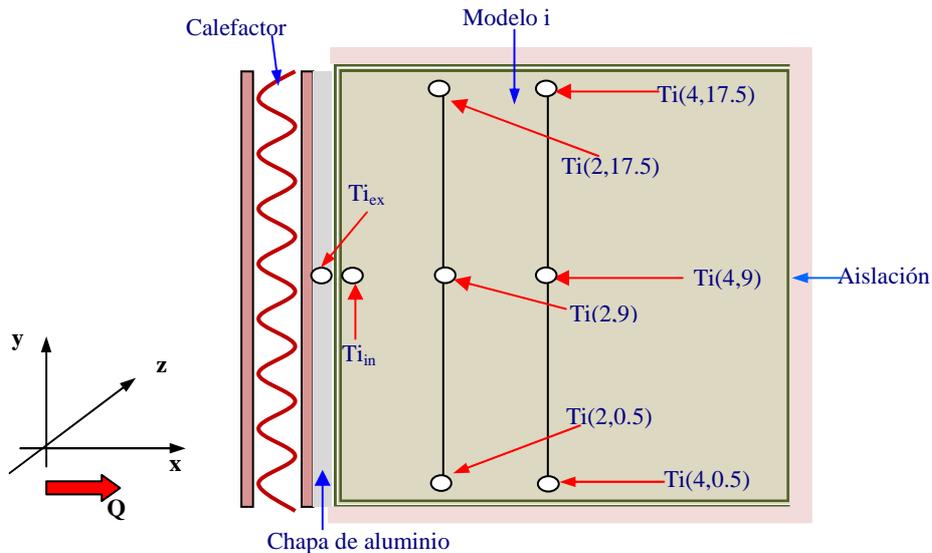


Figura 1: Esquema de la disposición de los sensores térmicos y la dirección del flujo de calor.

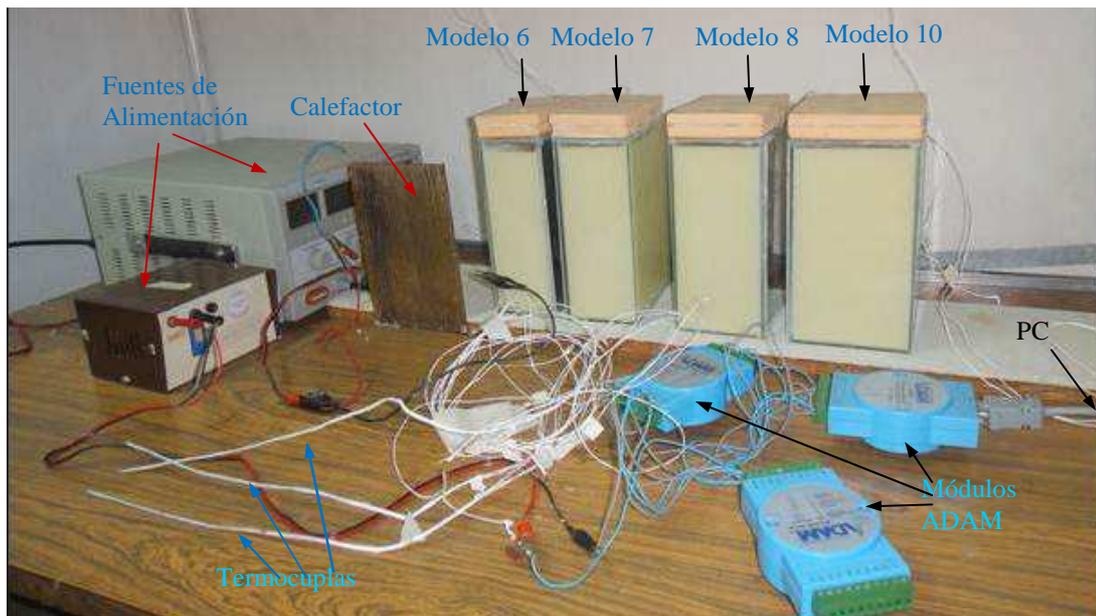


Figura 2. Fotografía del dispositivo experimental, mostrando todos los elementos utilizados.

DESCRIPCIÓN DE LAS EXPERIENCIAS Y EL MODELO FÍSICO DEL PROBLEMA

Los recintos rectangulares de altura (h), ancho (a) y profundidad (e) se encuentran aislados, excepto en la pared vertical a lo largo de la cual se suministra un flujo de calor constante. Cada uno de ellos contiene un material de cambio de fase, en este caso una grasa orgánica de origen vacuno (PCM). Al comenzar el calentamiento el PCM está a la temperatura ambiente del laboratorio. Como resultado del calentamiento, el PCM adyacente a la pared calentada alcanza la temperatura de fusión y el proceso de licuación empieza a desarrollarse y la interfase sólido-líquido comienza a moverse alejándose con el tiempo de la pared caliente. Dada la geometría del modelo y su evolución en el tiempo, este proceso puede dividirse en tres etapas:

- Régimen puramente convectivo.
- Transición del régimen conductivo al de la convección natural
- Régimen de convección natural

Estas etapas se analizarán en presente trabajo en base a las medidas térmicas en el interior y exterior del recinto que contiene el material y con la ayuda de los registros fotográficos del desarrollo del proceso de fusión. En dicho análisis se realizaron los siguientes supuestos:

- El material sólido se encuentra inicialmente a la temperatura ambiente del laboratorio.
- Las pérdidas de calor en las paredes del recinto son despreciables.
- El material es homogéneo e isótropo.
- La aproximación de Boussinesq es válida, y se desprecia el cambio de volumen del material durante el cambio de fase.
- El flujo convectivo que se establece es bidimensional, no depende de la dirección z .

MEDIDAS TÉRMICAS

Las experiencias realizadas con los modelos 6 y 7, se desarrollan durante aproximadamente 24 horas; la etapa de calentamiento se extiende entre 8 y 12 horas y la de enfriamiento, igual tiempo. Dependiendo de la temperatura ambiente para la potencia de calentamiento de 10 W, entre las 8 y las 12 horas se ha fusionado en su totalidad el material del modelo 6. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 3. Si bien durante el calentamiento los modelos y el calefactor permanecen aislados, durante la etapa de enfriamiento se retira la aislación para evitar la formación de pequeños núcleos, donde la sustancia podría permanecer en estado líquido, en el interior de la masa sólida.

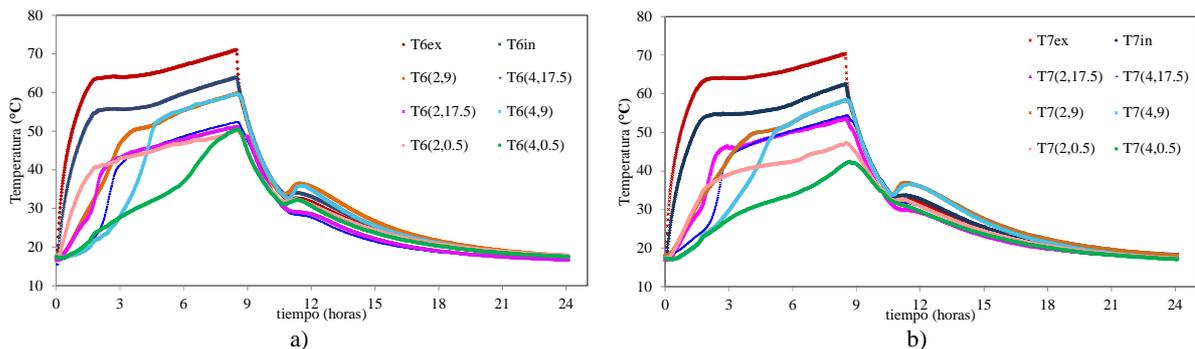


Figura 3. Evolución de los valores de temperatura en los modelos 6 y 7 durante las etapas de calentamiento y enfriamiento.

En ambos modelos, una vez iniciado el calentamiento, las temperaturas exterior e interior en la pared calentada crecen en forma logarítmica (curvatura cóncava), de modo que la diferencia de temperaturas entre las superficies interior y exterior es siempre creciente. Aproximadamente, a las 2 horas de iniciado el proceso, esta diferencia se estabiliza entre 7 y 10 °C, y aunque la temperatura en ambas superficies continúa creciendo, la diferencia se mantiene prácticamente constante, hasta el final de la etapa de calentamiento. En el modelo 7, los perfiles de temperatura son más suaves y en general, las máximas alcanzadas son menores en 1° C que las registradas en el modelo 6, lo que puede deberse a la mayor inercia que ofrece éste, al tener mayor cantidad de PCM. Los perfiles de temperatura registrados en el interior del material muestran incrementos de temperatura que dependen de la distancia a la pared calentada.

En la Figura 4, se muestra las temperaturas próximas al techo ($y=17.5$ cm), a 2 y 4 cm de la pared que recibe el calor, $T6(2,17.5)$, $T(6,17.5)$, $T7(2,17.5)$ y $T7(4,17.5)$) durante la etapa de calentamiento, para los modelos 6 y 7; conjuntamente con las exterior e interior en la pared del recipiente en su punto medio. En ella se observa que, en la primera hora de iniciado el proceso, éstas crecen lentamente, en forma casi lineal y luego exponencialmente hasta que, aproximadamente luego de 2 horas adoptan un perfil similar al de la pared calentada pero 15 °C por debajo de ésta. En el modelo 6, la diferencia de temperatura entre $x=2$ y $x=4$ para $y=17.5$ cm, crece rápidamente desde el inicio del calentamiento, alcanzando un valor máximo de unos 14°C aproximadamente las 2 horas, luego desciende rápidamente a 0°C cerca de las 3,5 horas. En algunos casos esta diferencia se vuelve negativa, lo que puede atribuirse a que líquido muy caliente desciende desde techo por la región central. En el modelo 7, la diferencia de temperatura entre $x=2$ y $x=4$ para $y=17.5$ cm, es también creciente desde el inicio del calentamiento y alcanza un valor máximo de alrededor de 12.3°C aproximadamente las 2 horas, luego se observa que rápidamente tiende a 0°C a las 3,5 horas de iniciado el proceso.

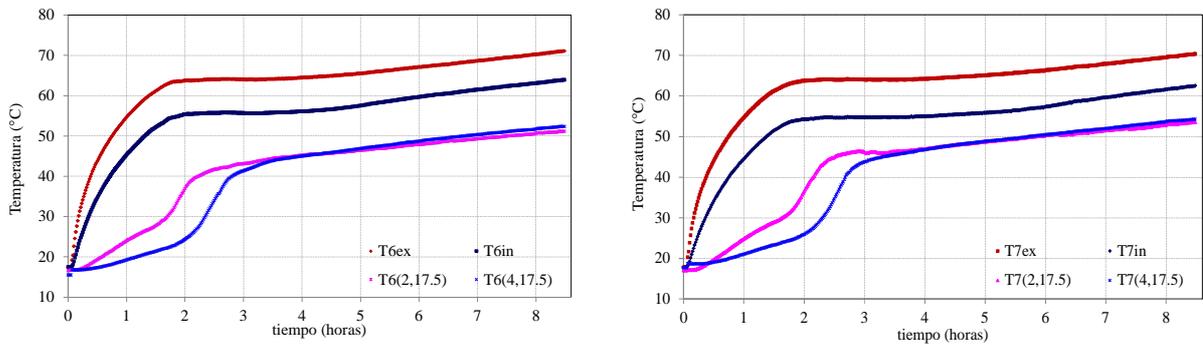


Figura 4: Evolución de los valores de temperatura a 2 y 4 cm de la pared calentada en la región del techo ($y=17.5$ cm) para los modelos 6 y 7.

En ambos modelos, las temperaturas registradas a 2 cm de la pared calentada ($T6(2,9)$ y $T7(2,9)$), a igual distancia del techo y el piso ($y=9$ cm), presentan un crecimiento casi lineal en el tiempo hasta que, aproximadamente a partir de las 3.5 y 4.2 horas respectivamente de iniciado el calentamiento los perfiles adquieren una pendiente igual al de las temperaturas registradas en la pared calentada, como se muestra en la Figura 5. A la misma altura ($y=9$ cm), las temperaturas registradas a 4 cm de la pared calentada ($T6(4,9)$ y $T7(4,9)$) muestran un crecimiento exponencial (curva convexa) hasta unas 4.5 y 5.2 horas respectivamente y luego toman una pendiente igual al de temperaturas de la pared calentada y se superponen con las correspondientes $T6(2,9)$ y $T7(2,9)$; lo que muestra que se requiere un determinado tiempo para que se funda el material y uniformice su temperatura en la región. La diferencia de crecimiento de las temperaturas a los 2 y 4 cm de la pared que recibe el calor, está relacionado con el proceso conductivo (estacionario) hasta los 2cm y la existencia de convección a los 4 cm.

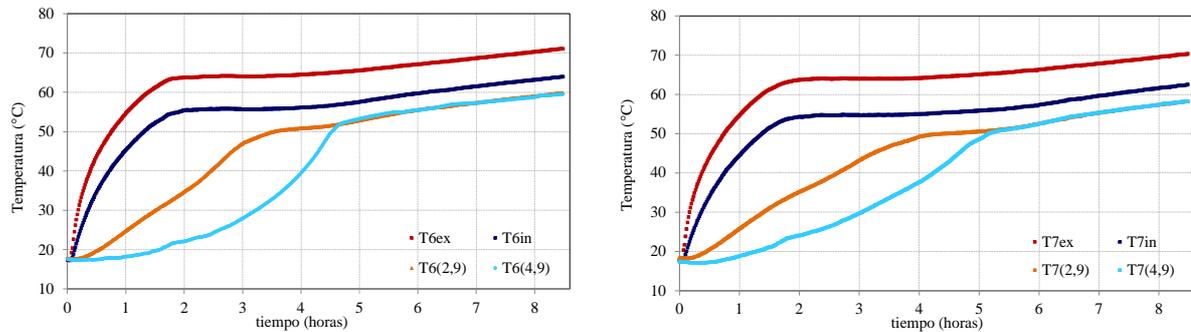


Figura 5. Evolución de los valores de temperatura a 2 y 4 cm de la pared calentada en la región central ($y=9$ cm) en los modelos 6 y 7.

De acuerdo a la Figura 6, en ambos modelos, las temperaturas registradas a 2 cm de la pared calentada, próximas al piso, $y=0.5$ cm ($T6(2,0.5)$ y $T7(2,0.5)$) se observa un crecimiento logarítmico (curva cóncava), con un perfil de temperaturas similar al de la pared calentada pero con valores mucho menores. En la misma región, las temperaturas a 4 cm de la pared calentada ($T6(4,0.5)$ y $T7(4,0.5)$), presentan un crecimiento exponencial lento (curva convexa) hasta que adquieren una pendiente igual al perfil de temperaturas de la pared calentada y se superponen con las $T6(2,0.5)$ y $T7(2,0.5)$ respectivamente, al cabo de unas 7 horas de iniciado el calentamiento; lo que muestra que aunque en un tiempo suficientemente largo se uniformizará la temperatura del material en el estado líquido en esta región.

En el modelo 6, la diferencia de temperatura entre $x=2$ y $x=4$ para $y=0.5$ cm, es creciente desde el inicio del calentamiento y alcanza un valor máximo de alrededor de 13.3°C aproximadamente las 1.7 horas, luego desciende lentamente hasta alcanzar los 7°C a las 5,6 horas aproximadamente y de allí desciende más rápidamente a 0°C cerca de las 7 horas. En el modelo 7 la diferencia de temperatura entre $x=2$ y $x=4$ para $y=0.5$ cm, es creciente desde el inicio del calentamiento y alcanza un valor máximo de alrededor de 12.6°C aproximadamente las 1.9 horas, luego desciende lentamente hasta alcanzar los 8.5°C a las 7 horas, luego más lentamente observándose que tiende a 0°C . Para la potencia de calentamiento con la que se trabajó en estas experiencias no se alcanza el tiempo suficiente para fundir el material en esta región.

En el caso de los modelos 8 y 10 las experiencias se extienden entre las 26 y 30 horas, la etapa de calentamiento se prolongó entre las 10 y 13 horas (Figura 7), ya que al contener los recintos mayor cantidad de sustancia, para la misma potencia ensayada en los modelos 6 y 7 (10 W) se requiere mayor tiempo para visualizar el proceso de fusión de todo el material. Para la potencia de calentamiento mencionada la diferencia de temperatura entre la superficie interior y exterior de la pared calentada en las primeras 2 horas crece y luego se estabiliza entre los 10 y 14°C hasta que finaliza el calentamiento.

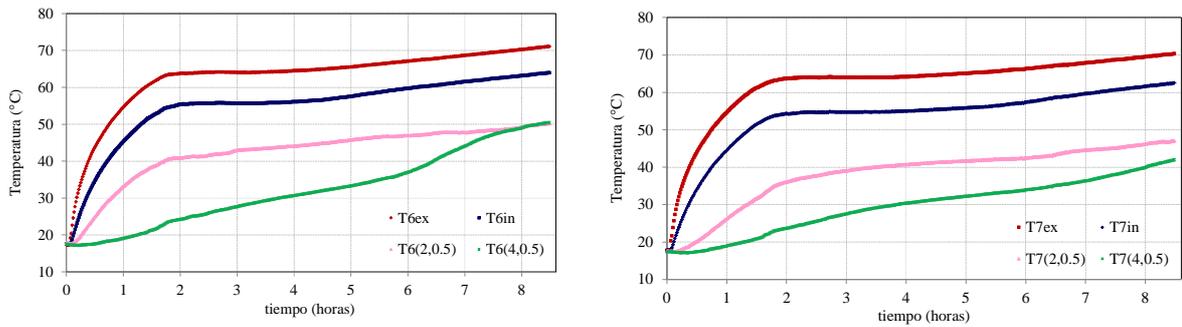


Figura 6. Evolución de los valores de temperatura a 2 y 4 cm de la pared calentada en la región del piso ($y=0.5$ cm) en los modelos 6 y 7.

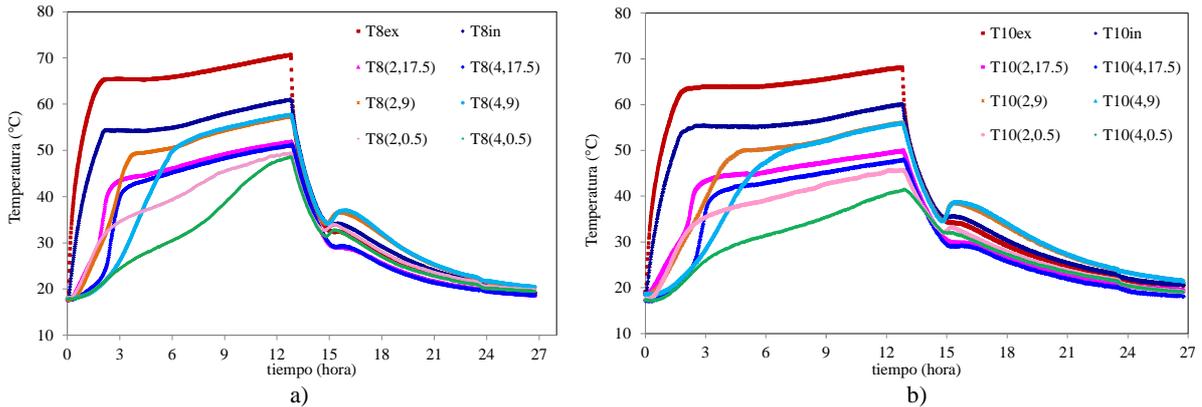


Figura 7. Evolución de los valores de temperatura en los modelos 8 y 10 durante las etapas de calentamiento y enfriamiento.

En ambos modelos los valores de temperatura a 2 cm y 4 cm de la pared calentada en la región cercana al techo ($y=17.5$ cm) ($T8(2,17.5)$, $T8(4,17.5)$, $T10(2,17.5)$ y $T10(4,17.5)$) crecen rápidamente, sobre todo las que corresponden a $x=2$ cm. El crecimiento en las primeras horas es en forma exponencial (curva convexa) hasta que alcanzan la forma y pendiente del perfil en la pared calentada después de las 3 horas de iniciado el proceso (Figura 8). En el modelo 8 los valores de temperatura de los sensores que se encuentran cercanos al techo ($y=17.5$ cm) a 2 cm y 4 cm de la pared calentada registran una diferencia máxima de 14.7 °C a las 2,3 horas y en el modelo 10 esta diferencia máxima es de $14,2$ °C a las 2,4 horas. Esta diferencia disminuye rápidamente ya que entre las 3 y 4 horas ya es inferior a 3 °C. El caso del modelo 8, si bien $T8(2,17.5)$ y $T8(4,17.5)$ no se intersectan ambos perfiles continúan evolucionado con una diferencia de valores de temperatura que no supera 1 °C, en el caso del modelo 10 con los perfiles de temperatura $T10(2,17.5)$ y $T10(4,17.5)$ avanzan paralelos con un diferencia de 2 ° C.

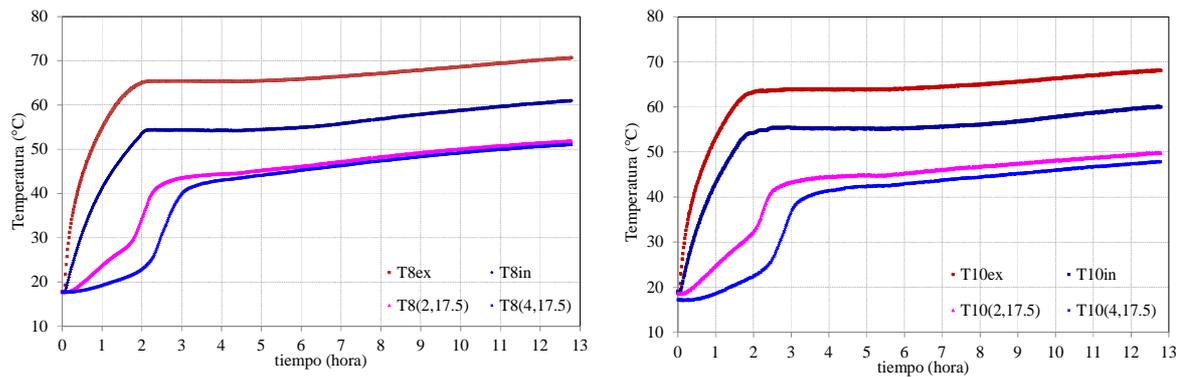


Figura 8. Evolución de los valores de temperatura a 2 y 4 cm de la pared calentada en la región del techo ($y=17.5$ cm) en los modelos 8 y 10.

En ambos modelos los valores de temperatura a 2 cm de la pared calentada en la región central ($y=9$ cm) ($T8(2,9)$ y $T10(2,9)$) crecen en las primeras 3 horas de iniciado el calentamiento en forma exponencial (curva convexa) hasta alcanzar la forma y pendiente del perfil en la pared calentada luego se intersectan con los perfiles de temperatura ($T8(4,9)$ y $T10(4,9)$) que se ubican a 4 cm de la pared calentada, observándose que después de la 3 horas se uniformiza la temperatura en esta zona (Figura 9). Los perfiles $T8(4,9)$ y $T10(4,9)$ tienen un crecimiento más lento pero la forma del perfil es similar a los que se ubican a 2 cm de la pared calentada. En el modelo 8 los valores de temperatura de los sensores que se encuentran a 2 cm y los que ubican a 4 cm de la pared calentada registran una diferencia máxima de $17,4$ °C a las 3, 4 horas y el modelo 10 esta diferencia máxima es de 12 °C a las 3,6 horas. Esta diferencia se anula en el modelo 8 a las 6 horas de iniciado el calentamiento y en el modelo 10 a las 7,2 horas.

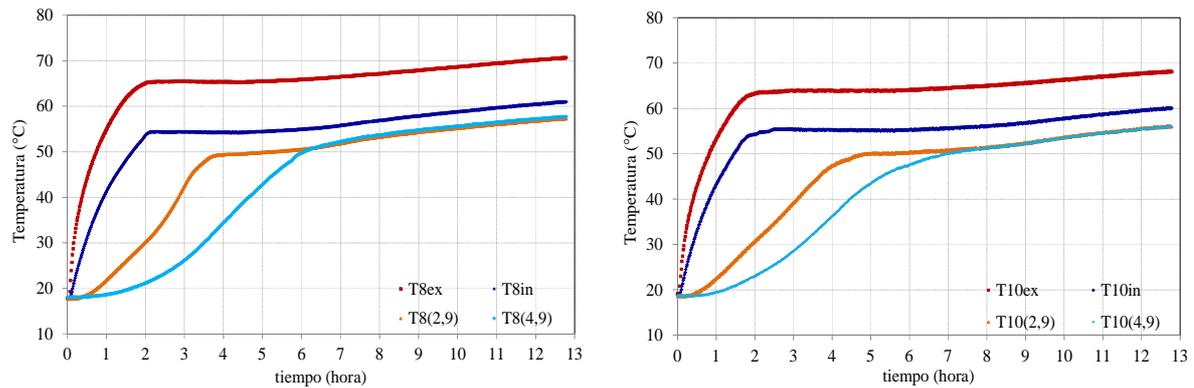


Figura 9. Evolución de los valores de temperatura a 2 y 4 cm de la pared calentada en la región central ($y=9$ cm) en los modelos 8 y 10.

De acuerdo a la figura 10, en ambos modelos los valores de temperatura a 2 cm de la pared calentada en la región cercana al piso ($y=0.5$ cm) ($T8(2,0.5)$ y $T10(2,0.5)$) crecen en las primeras horas de iniciado el calentamiento en forma exponencial (curva convexa) muy lentamente y se podría decir que alcanzan la forma y pendiente del perfil en la pared calentada después de las 8 horas de comenzado el proceso. El caso del modelo 8, $T8(2,0.5)$ se intersecta con el perfil de temperatura ($T8(4,0.5)$) ubicado a 4 cm de la pared calentada, observándose que recién después de la 12 horas de iniciado el calentamiento en esta zona se uniformiza la temperatura. Los perfiles $T8(4,9)$ y $T10(4,9)$ tienen un crecimiento mucho más lento pero la forma del perfil es similar a los que se ubican a 2 cm de la pared calentada. En el modelo 8 los valores de temperatura de los sensores que se encuentran a 2cm y los que ubican a 4 cm de la pared calentada registran una diferencia máxima de $11,5^{\circ}\text{C}$ a las 2,3 horas y el modelo 10 esta diferencia máxima es de 11°C a las 2,2 horas. Esta diferencia disminuye lentamente hasta los $8,5^{\circ}\text{C}$ a las 7 horas y luego disminuye rápidamente anulándose en el modelo 8 a las 12,5 horas de iniciado el calentamiento. En el modelo 10 dada la potencia de calentamiento no llega a uniformizarse la temperatura en esta región ya que todavía queda material en el estado sólido, pero se observa que el comportamiento es similar al del modelo 8 por lo que la diferencia entre los valores de temperatura $T10(2,0.5)$ y $T10(4,0.5)$ se anulará en un tiempo posterior.

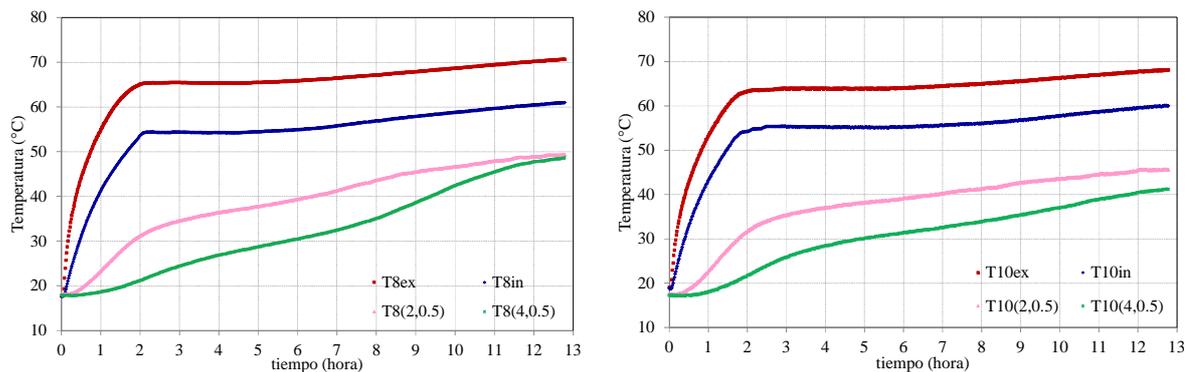


Figura 10. Evolución de los valores de temperatura a 2 y 4 cm de la pared calentada en la región del piso ($y=0.5$ cm) en los modelos 8 y 10.

En el modelo 8 en el estado líquido al final de la etapa de calentamiento la zona central alcanza una temperatura de 57°C , la zona cerca al piso $48,2^{\circ}\text{C}$ y el techo 51°C . En general la zona central es la más caliente luego le sigue el techo y por último la zona cercana al piso.

VISUALIZACIÓN DEL PROCESO DE FUSIÓN

Los registros fotográficos se obtuvieron con una cámara digital montada sobre un trípode que se mantuvo en la misma posición durante toda la etapa del calentamiento. Se tomaron fotos cada 15 ó 30 minutos dependiendo de las condiciones de la experiencia. En el caso de las experiencias realizadas con los modelos 6 y 7 los registros se realizaron cada 30 minutos, durante un lapso de tiempo de 8 horas 45 minutos. Para los modelos 8 y 10 también se obtuvieron registros fotográficos del proceso de fusión en estos recintos y se repitieron las experiencias a fin de determinar el intervalo de tiempo en el que se desarrolla el régimen puramente conductivo y el tiempo una vez iniciado el calentamiento en el que la interfase sólido – líquido próxima al techo alcanza la pared opuesta y finaliza la etapa de transición para ambos modelos. Como ya se dijo el proceso de fusión de un PCM en un recinto rectangular calentado desde una pared lateral tiene 3 etapas: el régimen de conducción, la transición del régimen conductivo al de convección natural y el régimen de convección. De la observación del fenómeno y los registros fotográficos se observa que al inicio del calentamiento el material cercano a la pared caliente cambia de color formando una franja paralela a ella. En la Figura 11, se muestra estos registros para los modelos 6 y 7. El primer indicio de sustancia fundida aparece aproximadamente a los 50 minutos (foto b) y esta franja oscura continua creciendo, hasta aproximadamente la 1,5 horas de iniciado el calentamiento; siendo la transferencia de calor puramente conductiva (foto c). En esta primera etapa, en la pequeña capa de material fundido adyacente y paralela a la pared calentada,

el calor se transfiere por conducción, debido al gradiente de temperatura que se genera entre la temperatura de la pared calentada (T_{in}) y la temperatura de la interfase sólido - líquido. Transcurrido este tiempo, comienzan a visualizarse los efectos convectivos, que prevalecen sobre todo en la región superior del recinto, modificando la forma del avance de la frontera. Esta segunda etapa comienza cuando, las partículas de líquido más caliente se mueven hacia arriba y las más frías hacia abajo, debido a la diferencia de densidad. Esto da origen a una estratificación vertical en el seno del líquido, estableciéndose un gradiente vertical con isotermas horizontales. Al mismo tiempo se generan dos capas límites: una capa límite caliente adyacente a la pared calentada y una más fría adosada a la interface sólido - líquido. Esta etapa de transición finaliza cuando la frontera alcanza la esquina superior derecha del recinto: (fotos f y g)- Se observa que esto ocurre entre las 3 y 4 horas para los modelos 6 y 7 respectivamente. En la etapa final, el calor se transfiere principalmente por convección y la distribución de temperaturas en el seno del líquido y a lo largo de la pared calentada alcanza el estado estacionario (Figuras 8 y 9); ya que el efecto convectivo es importante en la región superior. Las fotos g, h, i) y j) corresponden a esta etapa final.

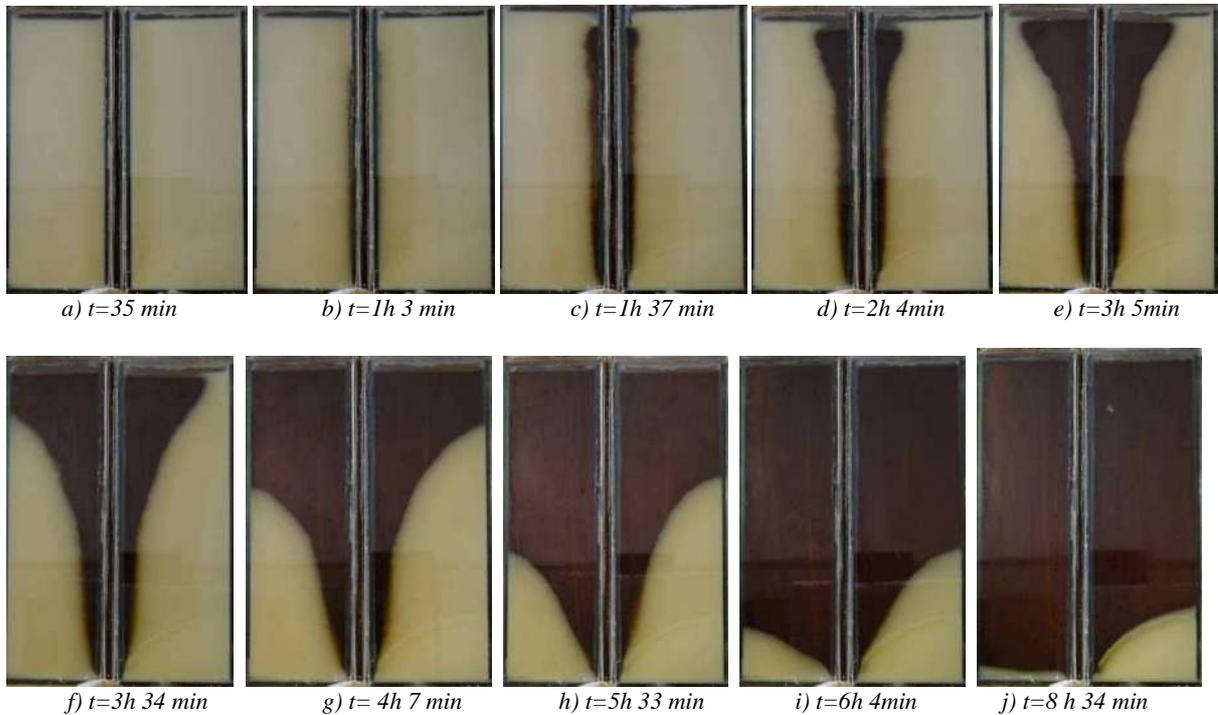


Figura 11. Registros fotográficos de la evolución temporal del proceso de fusión de una sustancia de cambio de fase para los Modelos 6 y 7.

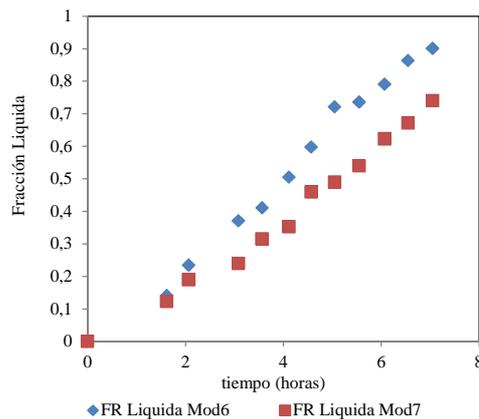


Figura 12. Evolución temporal de la fracción de líquido para los modelos 6 y 7 durante la etapa de calentamiento.

De los registros fotográficos se puede determinar la fracción de líquido presente en función del tiempo, lo que se muestra en la Figura 12. La fracción de líquido creciente con el tiempo, es siempre superior en el modelo 6, ya que este ofrece menor inercia al contener menor cantidad de sustancia de cambio de fase. Después de las 5 horas de iniciado el calentamiento, la diferencia de fracción líquida entre ambos modelos se estabiliza y oscila entre un 16 y 19%.

CONCLUSIONES

En nuestros días, ante el creciente consumo de energía, el incremento del precio de los combustibles fósiles y el consecuente agotamiento de las reservas hace que el uso de estos materiales resulta una elección interesante, ya que aporta soluciones no

solo al reemplazo de los combustibles tradicionales, sino y fundamentalmente a la preservación del ambiente. Por este motivo el estudio de transferencia de calor en los mismos, es importante, en vistas a cuantificar la energía que pueden almacenar y la disponibilidad de la misma.

De las experiencias realizadas y sus resultados, de acuerdo a lo expuesto anteriormente, se puede afirmar que los efectos convectivos evolucionan más rápidamente en la zona del techo y la región central lo que provoca que las diferencias de temperaturas se amortigüen por el movimiento de material de cambio de fase, en estado líquido, que asciende muy caliente sobre la pared calentada, circula por el techo y desciende por la pared fría pero también por la región central, mezclando el fluido. Esto hace que el material se funda más rápidamente en la región superior del recinto. Así en la zona cercana al techo la temperatura del material ya fundido se uniformiza entre las 3 y las 3,5 horas, en la zona central entre las 4 y las 5 horas. En la zona cercana al piso los valores de temperatura evolucionan más lentamente, el material fundido uniformiza su temperatura después de las 7 horas de iniciado el calentamiento.

Con respecto al espesor los valores de temperatura obtenidos en el techo para ambos modelos son muy cercanos, las diferencias se hacen apreciables en la zona central y en el piso. En la zona central si bien los valores son cercanos en ambos modelos ((T6(2,9) y T7(2,9)) y (T6(4,) y T7(4,9))), en el modelo 6 se intersecan T6(2,9) con T6(4,9) a las 4,5 horas mientras que en el modelo 7 esto se produce una hora después y con valor de temperatura algo menor. En la zona cercana al piso, en el modelo 6 las temperaturas (T6(2,17.5) y T6(4,17.5)) se uniformizan a las 7 horas, pero en el caso del modelo 3 esto no ocurre, ya que dadas las condiciones de las experiencias realizadas en este modelo todavía hay material en el estado sólido.

En cuanto a la visualización del proceso de fusión, se observa claramente el efecto convectivo, el que comienza a apreciarse a 1 hora y media de iniciado el calentamiento, siendo evidentes al cabo de 2 horas, como muestra la Figura 11. Cuando el espesor es menor, el tiempo en que comienza a evidenciarse la convección, es también menor y consecuentemente aumenta con el espesor de la muestra.

Los registros fotográficos confirman que el flujo convectivo es bidimensional, ya que la frontera no presenta variación apreciable en la dirección z, además dicha interfase es definida y en principio se puede aproximar en forma lineal, solo de a tramos, ya que la pendiente cambia con la altura. En la zona del piso la capa fundida de material es muy pequeña y se mantiene prácticamente constante durante todo el proceso.

REFERENCIAS

- Nallusamy N., Sampath S., Velraj R.. (2007). Experimental investigation on a combined sensible and latent heat storage system integrated with constant/varying (solar) heat sources. *Renewable Energy* 32, 1206-1227.
- Farid, M; Khudhair, A; Razack, S y Al-Hallaj, S.. (2004). A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications. *Energy Conversion and Management* 45, 1597 – 1615.
- Hamdan, M y Al-Hinti, I.. (2004). Analysis of Heat Transfer during the Melting of a Phase Change Material. *Applied Thermal Engineering* 24, 1935-1944.
- Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi D.. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, pp. 318–345.
- 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 Energía Solar. Vol. 12, Sección 3, Pag. 47-54. ISSN 0329-5184.
- Vilte, M y Boucíguez, A. (2010). Estudio experimental del efecto de convección en un recinto con material de cambio de fase. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Revista de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 14, pág. 03.199 -03.206. ISSN 0329-5184.
- Zalba B., Marín J., Cabeza L., Mehling H. (2003). Review on thermal storage with phase change: materials, heat transfer, analysis and applications. *Applied thermal engineering*. Volume 23, Issue 3, pp 251-283.

HEAT TRANSFER ANALYSIS FOR THE MELTING OF A PHASE CHANGE MATERIAL

ABSTRACT: The experimental study of a fusion process in a phase change materials is studied here. The material is contained in a rectangular recipient; it receives heat from one of its vertical wall. The temperature distribution in the substance and the advance of the melting front, as a function of time are analyzed. The liquid fraction during that process is too evaluated. The results show the importance of considering natural convection during melting in the change phase material, joined to the conductive transfer into it.

Keywords: organic fat, melt front temperature, conduction and convection, heat accumulator.