

ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS EN UNA SUSTANCIA QUE EXPERIMENTA UN PROCESO DE FUSIÓN

María Vilte, 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 17/08/14, aceptado 29/09/14

RESUMEN: En este trabajo se presenta un estudio detallado de la distribución de temperaturas en el interior de un recinto que contiene una sustancia que experimenta el proceso de fusión. Se evalúan los gradientes verticales que se establecen cerca de la pared caliente, entre el techo y el piso del recinto; como así también los horizontales, entre la pared caliente y la pared opuesta más fría. El interés en evaluar dichos gradientes radica en que estos son los responsables del establecimiento y desarrollo de la transferencia de calor convectiva y conductiva dentro de la cavidad, que determinan la forma y rapidez del avance de la frontera en el proceso de fusión. También se determina la evolución temporal de la fracción de líquido a partir de los registros fotográficos del proceso.

Palabras claves: frontera sólido-líquido, conducción, convección natural, gradiente de temperaturas, fracción de líquido.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad dada la cantidad y variedad de aplicaciones, la temática de cambio de fase es una de las más estudiadas en el área de transferencia de calor. Se espera además que el desarrollo de este tema contribuya a aportar soluciones al problema energético mundial que involucra los costos de los combustibles y la limitación de dichos recursos no renovables (Farid M. et al, 2004). Por otro lado, la conciencia de un ambiente más limpio requiere la búsqueda de soluciones creativas y de alternativas a las ya existentes en lo que hace a la demanda de energía. En este marco, el estudio de los materiales de cambio de fase alcanza una gran relevancia, como así también el proceso de cambio de fase propiamente dicho, esto motiva el estudio de transferencia de calor en el mismo, en vistas a cuantificar la energía que estos materiales pueden almacenar y la disponibilidad de la misma.

El proceso de fusión en un recinto rectangular con calentamiento lateral fue estudiado desde el punto de vista experimental, y numérico (Benard et al, 1985), (Zhang y Bejan, 1989), para diferentes sustancias de cambio de fase como metales o sustancias orgánicas como el octadecano. (Hamdam y Al-Inti, 2004) proponen una solución analítica para el avance de la frontera y la fracción de líquido presente, que será discutida en este trabajo para el caso de la sustancia aquí estudiada.

Anteriormente ya se presentaron estudios sobre grasa vacuna, sustancia orgánica propuesta como material de cambio de fase, abordándose en particular la caracterización de propiedades termofísicas de dicho material (Vilte y Boucíguez, 2008; Vilte y Boucíguez, 2010), las que se resumen en la Tabla 1, y que se emplearán 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.

En un trabajo más reciente (Vilte et al, 2013), se estudió el proceso de fusión de una sustancia orgánica calentada desde una pared lateral con un flujo de calor constante. En dicho trabajo se consideró dos recintos de diferentes tamaños, analizándose los procesos de conducción y convección, así como la relevancia de este último, en relación al espesor del recinto.

En vistas a estudiar con mayor detalle el perfil térmico durante el proceso de fusión y analizar la influencia de la altura del recinto en el desarrollo del flujo convectivo, así como la forma y rapidez del frente de fusión; en este trabajo se estudia por separado dos recintos de diferentes dimensiones. Además, se determina la evolución temporal de la fracción de líquido a partir de los registros fotográficos del proceso.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Se construyeron dos recintos de vidrio de 3 mm de espesor uno de 25x12x6 cm³ de volumen (recinto 1) y otro de 30x12x6 cm³ (recinto 2). Los recintos son prismas rectangulares con tapa de acrílico por donde se introducen los sensores de

temperatura, al que se adosa goma de 4 cm de espesor que actúa como aislante a la vez que asegura que las termocupas queden fijas en su posición dentro de la cavidad. En la superficie lateral a ser calentada por el calefactor, se coloca una chapa de aluminio de 1.5 mm de espesor para uniformizar la temperatura. Las resistencias usadas fueron construidas específicamente para dichos recintos con las medidas especificadas de $25 \times 12 \text{ cm}^2$ y $30 \times 12 \text{ cm}^2$, los valores de las mismas son de 138 y 173 Ohmios, respectivamente. Las potencia de calentamiento ensayadas en las experiencias estuvieron en el intervalo entre 17 y 21 W. Para realizar las medidas térmicas se emplearon en cada ensayo 16 termocupas de cobre-constantan anexadas a módulos ADAM que conectados a una PC permiten registrar y guardar los datos para el posterior procesamiento. En la figura 1 se muestra un esquema del equipo experimental utilizado, la notación usada en el análisis de las medidas térmicas y las posiciones de las termocupas.

Para la visualización del proceso se empleó una cámara fotográfica de alta resolución y se realizaron registros fotográficos cada 15 minutos; totalizando alrededor de 40 registros en cada experiencia. Luego se procesaron las fotos con el software Picasa. Posteriormente con ImageJ, programa de procesamiento digital de imágenes, se estimó la fracción de líquido presente en función del tiempo.

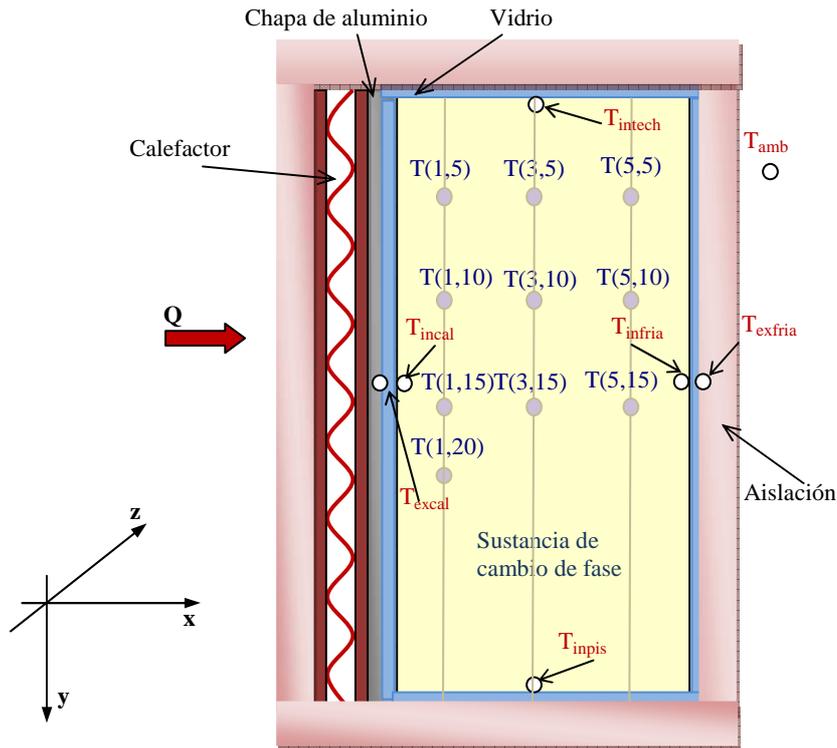


Figura 1: Esquema de la disposición de los sensores térmicos y la dirección del flujo de calor.

DESCRIPCIÓN DE LAS EXPERIENCIAS Y MODELO FÍSICO DEL PROBLEMA

El estudio del proceso de fusión de una sustancia de cambio de fase se realiza empleando recintos rectangulares de altura (h), ancho (a) y profundidad (e) que se encuentran aislados térmicamente, excepto en la pared vertical en la que se suministra un flujo de calor constante. La sustancia de cambio de fase (PCM) empleada en las experiencias es una grasa orgánica de origen vacuno.

Al comenzar el calentamiento, el PCM está a la temperatura ambiente del laboratorio (entre 16 y 20 °C). Como resultado del calentamiento, el PCM adyacente a la pared calentada alcanza la temperatura de fusión, dando inicio al proceso de licuación; la interfase sólido-líquido comienza a moverse alejándose de la pared caliente. Dada la geometría del modelo y la evolución del flujo en el tiempo, este proceso puede dividirse en tres etapas: un régimen puramente conductivo donde la frontera avanza paralela a la pared calentada formando una capa de espesor constante. Una segunda etapa de transición del régimen conductivo al de convección natural, en la zona cercana al techo, donde la frontera se desplaza más rápidamente hacia la pared opuesta dejando de ser la capa líquida, una capa de espesor constante. Por último, la etapa de régimen de convección natural que comienza cuando el frente de fusión cercano al techo alcanza la pared opuesta más fría. Estas etapas se analizan en el presente trabajo, en base a las medidas térmicas, que nos permiten calcular los gradientes de temperaturas que se establecen en el interior del recinto, y que son responsables de la transferencia de energía.

Los registros fotográficos del proceso de fusión hacen posible evaluar la fracción de líquido presente en función del tiempo, seguir el proceso de fusión visualizando la evolución de la transferencia conductiva al régimen de convección natural. En este abordaje experimental del proceso se realizaron algunos 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 y por último el flujo convectivo que se establece es bidimensional, no depende de la dirección z, lo que se confirma en los ensayos.

MEDIDAS TÉRMICAS

Para estudiar térmicamente y obtener imágenes del proceso de fusión de la sustancia de cambio de fase se llevan a cabo numerosas experiencias de calentamiento y enfriamiento de la sustancia en un laboratorio donde la temperatura oscila entre 16 y 20 °C. El sistema formado por el material de cambio de fase, recinto y calefactor están aislados térmicamente del ambiente y las oscilaciones mencionadas no influyen en las experiencias.

En la figura 2 se presentan las medidas de temperatura en el interior del recinto 1 (sustancia de cambio de fase); en tanto que en la figura 3, la evolución temporal de las temperaturas en las paredes del recinto. En ambas figuras se puede observar que la etapa de calentamiento dura aproximadamente 6 horas. Las temperaturas en el interior de la sustancia [T(3,15)], figura 2 y de la superficie calentada [Tincal], figura 3, superaron los 50 °C, valores por encima de la temperatura de fusión de la sustancia (tabla 1). La temperatura de la superficie interior del piso alcanza los 37°C, por lo que en este ensayo, casi toda la sustancia a las 6 horas de calentamiento está prácticamente líquida. Al comienzo de la experiencia, los perfiles de temperaturas cercanos a la pared caliente [T(1,y)] figura 2, son cóncavos siguiendo la forma del perfil de temperatura de la superficie interior o exterior de la pared caliente [Texcal, Tincal], figura 3. Las temperaturas de la región central y cercanas a la pared fría [T(3,y) y T(5,y)] figura 2, son convexas similares al perfil de la pared fría, [Tinfria] figura 3. Una vez que la sustancia se funde todos los perfiles tienden a ser cóncavos nuevamente, aproximándose a un estado estacionario donde el aumento de temperatura es casi lineal con el tiempo y con igual pendiente (entre las 4 y 6 horas) hasta finalizar la etapa de calentamiento.

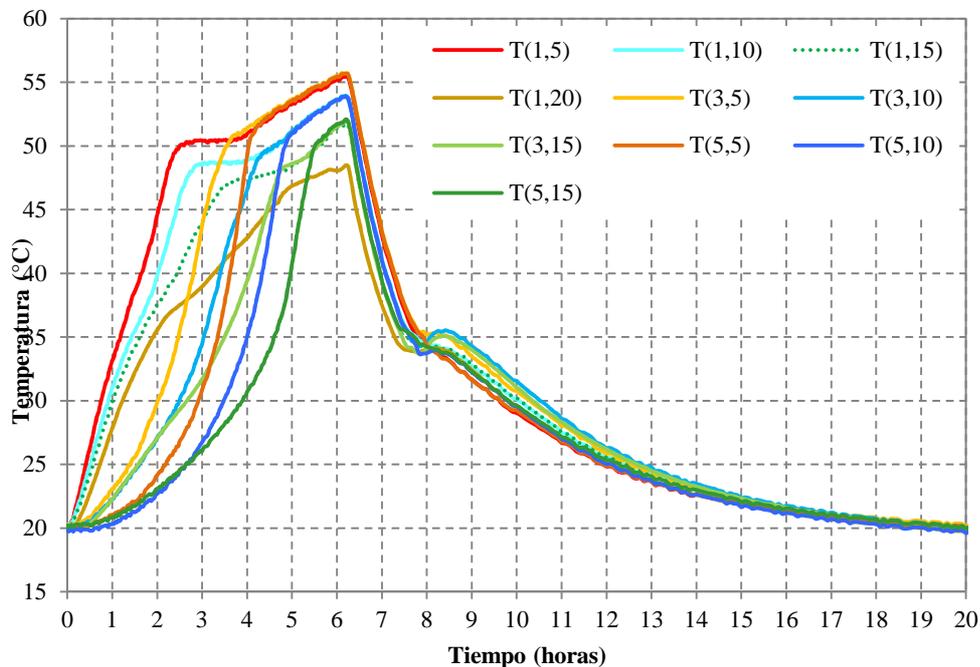


Figura 2: Evolución temporal de temperaturas en el interior en una sustancia, durante el proceso de fusión

En la etapa de enfriamiento se observa, para todos los perfiles de la figura 2, el fenómeno de subenfriamiento; para analizarlo se muestra la figura 4 solamente el perfil T(3,15) que corresponde a la temperatura de la sustancia en el centro del recinto. En la zona de enfriamiento, podemos distinguir dos etapas: la primera donde la sustancia se enfría en el estado líquido y la segunda etapa, después de la solidificación. El fenómeno de subenfriamiento está representado por una inflexión que forma un valle después de la primera etapa, en esta depresión la sustancia alcanza temperaturas por debajo del punto de solidificación, sin que realmente esté sólida. Posteriormente ocurre un aumento de la temperatura hasta alcanzar la temperatura de solidificación y luego el material, ya sólido, continúa enfriándose en forma normal. Este fenómeno permite determinar el punto de solidificación de la sustancia (T_c), que en este caso, es de aproximadamente 35,06 °C (figura 4). Si la sustancia fuera pura coincidiría con el punto de fusión, en este caso los resultados muestran que no es así, ya que la sustancia estudiada no es pura; sin embargo es de esperar que T_c que se encuentre dentro de un intervalo alrededor de la temperatura de fusión de la sustancia.

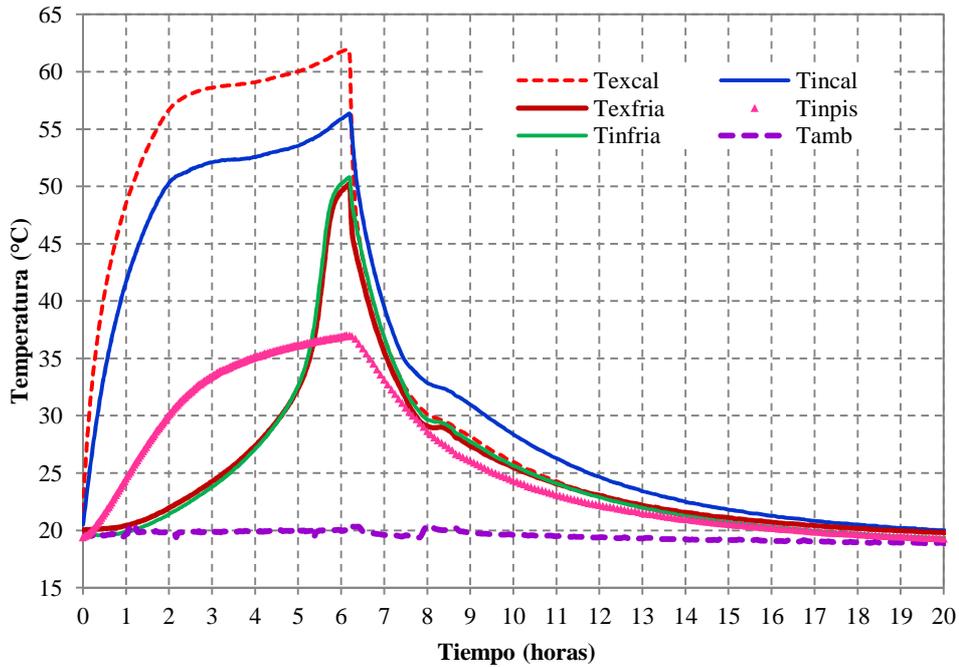


Figura 3: Evolución temporal de temperaturas en las paredes del recinto, durante el proceso de fusión.

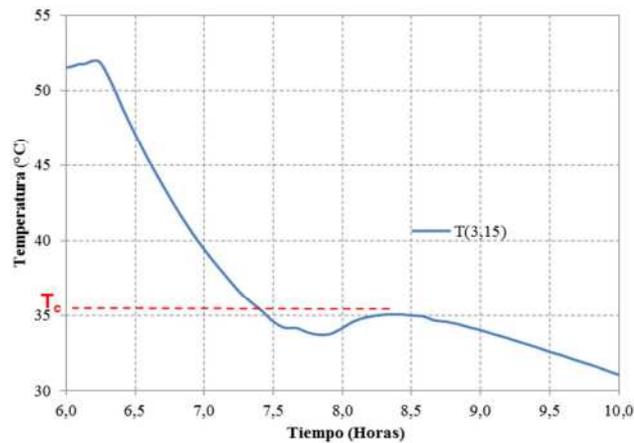


Figura 4: Fenómeno de subenfriamiento en la sustancia de cambio de fase.

GRADIENTES DE TEMPERATURAS

Se determinan los gradientes horizontales de temperaturas G_x para las posiciones $x=1$ ($x_i=1, x_{i+1}=3$) y $x=3$ cm ($x_i=3, x_{i+1}=5$); a distintas alturas del recinto $y=5, 10, 15$ cm, a través de la siguiente expresión:

$$G_x = \frac{T(x_{i+1}, y) - T(x_i, y)}{x_{i+1} - x_i}$$

Se calculan los valores de los gradientes de temperaturas verticales G_y en $y=5$ ($y_i=5, y_{i+1}=10$), $y=10$ ($y_i=10, y_{i+1}=15$) y en $y=15$ cm ($y_i=15, y_{i+1}=20$) a 1 cm de la pared caliente, equidistante de la pared caliente y la pared opuesta más fría ($x=3$ cm) y cercano a pared fría ($x=5$ cm) usando la expresión:

$$G_y = \frac{T(y_{i+1}, x) - T(y_i, x)}{y_{i+1} - y_i}$$

Donde $T(y_i, x)$ y $T(y_{i+1}, x)$ son las temperaturas registradas experimentalmente cada 2 minutos, por lo que puede obtenerse una evolución en el tiempo de los gradientes de temperaturas que se establecen en el interior de los recintos.

I. Gradientes horizontales

El gradiente de temperatura horizontal en la posición $x=1$ cercano a la pared caliente y a 5 cm del techo [$G_x(1, 5)$], crece desde el inicio del calentamiento y alcanza un valor máximo, a las 2 horas de iniciado el mismo; luego comienza a disminuir rápidamente, en tanto que el gradiente en $x=3$ y $y=5$ cm [$G_x(3, 5)$], tiene igual comportamiento pero con una diferencia de

tiempo de una hora. De la figura 5, se puede notar que mientras $G_x(1,5)$ alcanza el máximo $G_x(3,5)$ llega a un poco más de la mitad de su máximo valor y cuando $G_x(1,5)$ ha disminuido a la mitad de su valor máximo, $G_x(3,5)$ alcanza el valor máximo. A las 4 horas de iniciado el calentamiento ambos gradientes de temperatura analizados son despreciables y podemos decir que en la zona central y la cercana a la pared caliente a 5 cm del techo se ha uniformizado la temperatura. Esto está de acuerdo con los registros fotográficos (figura 11) que muestran que a las 3 horas de iniciado el calentamiento el frente de fusión alcanza la esquina superior derecha, dando lugar a un flujo convectivo totalmente desarrollado en la región superior de la cavidad, donde crece más rápidamente la fracción de líquido presente en la zona.

De la figura 6 podemos ver que, a medida que la altura disminuye esta rapidez disminuye, decir que los gradientes de temperatura crecen pero más lentamente, así para $x=1$ cm a $y=10$ cm del techo [$G_x(1,10)$] alcanza un valor máximo las 2,5 horas de iniciado el calentamiento y luego comienza a disminuir, en tanto que el gradiente en $x=3$ cm [$G_x(3,10)$] tiene igual comportamiento pero con una diferencia de tiempo de una hora. A las 4,5 horas de iniciado el calentamiento ambos gradientes de temperatura son despreciables y podemos decir que en la zona central y la cercana a la pared caliente a 10 cm del techo se ha uniformizado la temperatura, esto está de acuerdo con los registros fotográficos (figura 11) que muestran que a esta hora en esta zona todo está líquido.

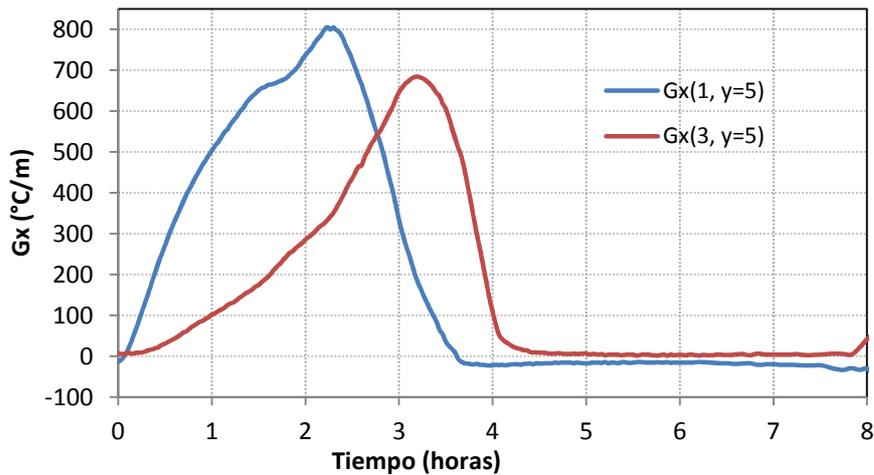


Figura 5. Gradientes de temperaturas horizontales a $y=5$ cm.

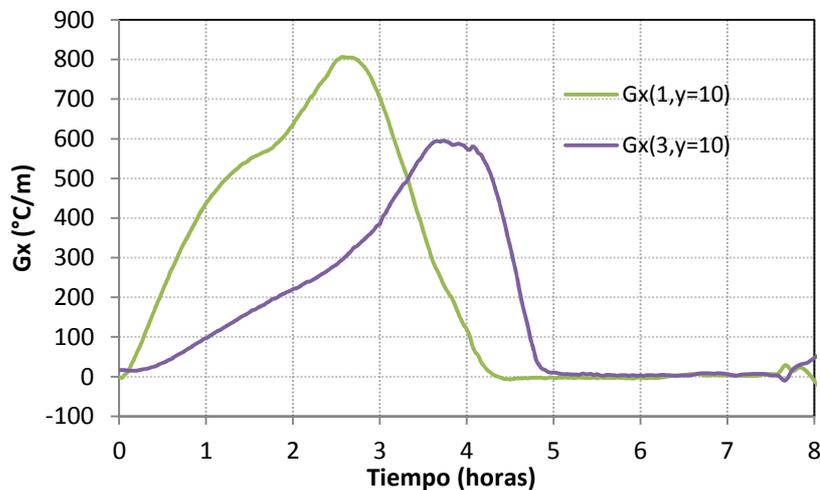


Figura 6. Gradientes de temperaturas horizontales a $y=10$ cm.

Por último, de la figura 7, el gradiente de temperatura horizontal en la posición $x=1$ y equidistante del techo y el piso ($y=15$ cm) [$G_x(1,15)$] crece desde el inicio del calentamiento y alcanza un valor máximo las 3 horas de iniciado el calentamiento y luego comienza a disminuir, en tanto que el gradiente en $x=3$ cm [$G_x(3,10)$], tiene igual comportamiento pero con una diferencia de tiempo de una hora y media. Después de 5 horas de iniciado el calentamiento, ambos gradientes de temperatura son despreciables, al igual que los dos casos anteriores; por lo que más de la mitad de la cantidad de sustancia ya se ha fundido (figura 11). Los valores máximos alcanzados de ambos gradientes horizontales $G_x(1, y)$ y $G_x(3, y)$ a diferentes alturas $y=5, 10$ y 15 cm del recinto, en todas las experiencias realizadas, se encuentran entre 600 y 900 °C/m, tabla 2.

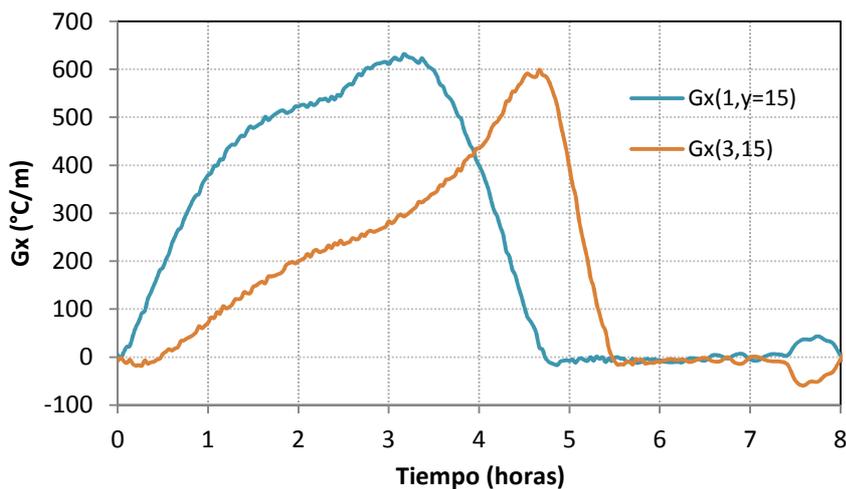


Figura 7: Gradientes de temperaturas horizontales a $y=15$ cm.

y	$G_{x_{max}}$ (°C/m) en $x=1$	$G_{x_{max}}$ (°C/m) en $x=3$
5	804	679
10	807	588
15	620	599

Tabla 2: Valores máximos de gradientes horizontales.

II. Gradientes verticales

En la figura 8 se muestran los gradientes verticales cercanos a la pared caliente [$G_y(1, 15)$, $G_y(1, 10)$ y $G_y(1, 5)$]. Se observa que si bien los gradientes crecen desde el inicio del calentamiento luego se mantienen constante en un intervalo de 1 o 2 horas del comienzo del mismo ($20 < G_y < 40$), esto se corresponde con los periodos de flujo predominantemente conductivo y con el de la transición a flujo convectivo. Se observa cómo se dispara primero, el cercano al techo ($y=5$ cm) [$G_y(1, 5)$] y luego los otros dos. El gradiente vertical cerca del techo crece alcanzando un valor máximo y luego disminuye, este comportamiento tiene una duración de aproximadamente 1,5 horas. El gradiente en $y=10$ [$G_y(1, 10)$] se desarrolla de igual forma pero con un retardo de 30 minutos, entre las 2 y 4 horas de iniciado el calentamiento. En el caso del gradiente en $y=15$ [$G_y(1, 15)$] se desarrolla de igual forma con un retardo de 50 minutos entre las 2 y 5 horas de iniciado el calentamiento. Estos gradientes verticales no se anulan una vez que cesa la etapa de calentamiento a las 6 horas, sino que siguen evolucionando incluso alcanzando nuevos picos de valores más pequeños. Estos se anulan solamente cuando la sustancia comienza a solidificarse, después de 2 horas de iniciado el enfriamiento; por lo que una vez que cesa el calentamiento los procesos convectivos continúan desarrollándose en el interior del recinto. En la siguiente tabla 3 se muestran los valores máximos alcanzados por los gradientes verticales.

y	$G_{y_{max}}$ (°C/m) ($x=1$)	$G_{y_{max}}$ (°C/m) ($x=3$)	$G_{y_{max}}$ (°C/m) ($x=5$)
5	110	190	289
10	116	148	250
15	121		

Tabla 3: Valores máximos de gradientes verticales.

En la figura 9 se muestran los gradientes verticales situados en una posición equidistante entre la pared caliente y la fría ($x=3$ cm). En este caso el gradiente cercano al techo [$G_y(3, 5)$] crece desde el inicio del calentamiento, pero en la zona cercana al centro de la cavidad ($y=10$ cm) [$G_y(3, 10)$], el gradiente recién comienza a desarrollarse a partir de las 2 horas de iniciado el calentamiento; esto se debe a que en la zona central entre los 10 y 15 cm del techo antes de las 2 horas de iniciado el calentamiento la sustancia es sólida. Una vez que se establecen dichos gradientes comienzan a crecer y alcanzan un máximo, en el caso del gradiente cercano al techo [$G_y(3, 5)$] entre las 2 y 4 horas y el ubicado en $y=10$ [$G_y(3, 10)$] entre las 3 y 5 horas, luego decrecen; y finalmente, después de la 4,5 horas oscilan alrededor de 50 °C/m, anulándose cuando la sustancia se solidifica.

Por último, cercano a la pared fría ($x=5$ cm) se calculan dos gradientes verticales, uno en $x=5$ [$G_y(5, 5)$] y otro en $x=10$ cm [$G_y(5, 10)$], los que se muestran en la figura 10. Como en el caso anterior el gradiente que se desarrolla cerca del techo crece desde el comienzo, pero el cercano a la zona central recién arranca a las 2,5 horas; debido al retraso de la onda térmica y al hecho de que la sustancia está sólida.

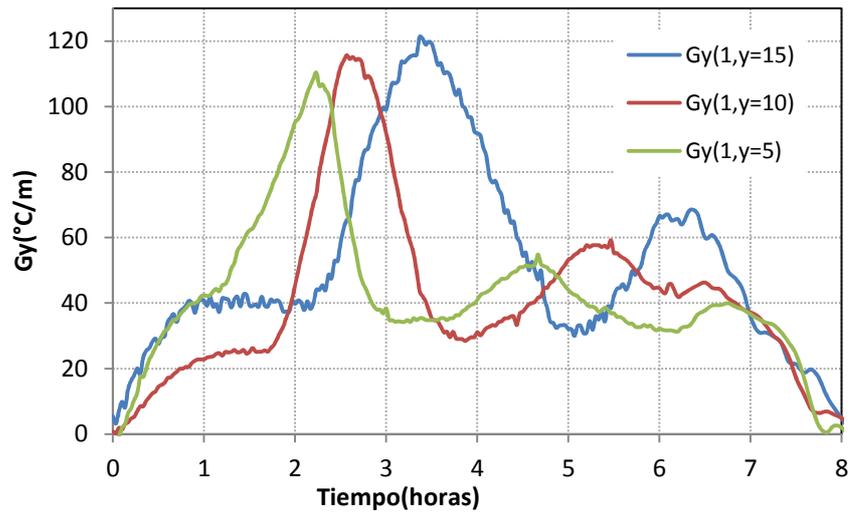


Figura 8. Gradientes de temperaturas verticales a $x=1$ cm.

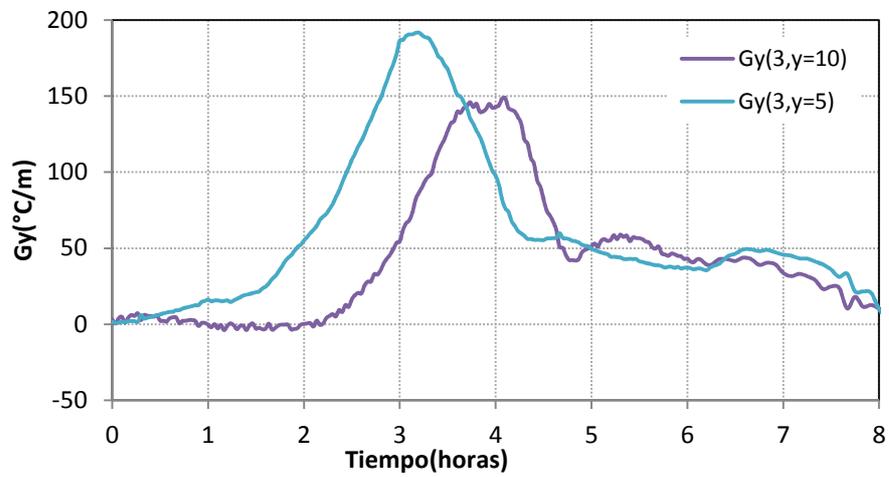


Figura 9. Gradientes de temperaturas verticales a $x=3$ cm.

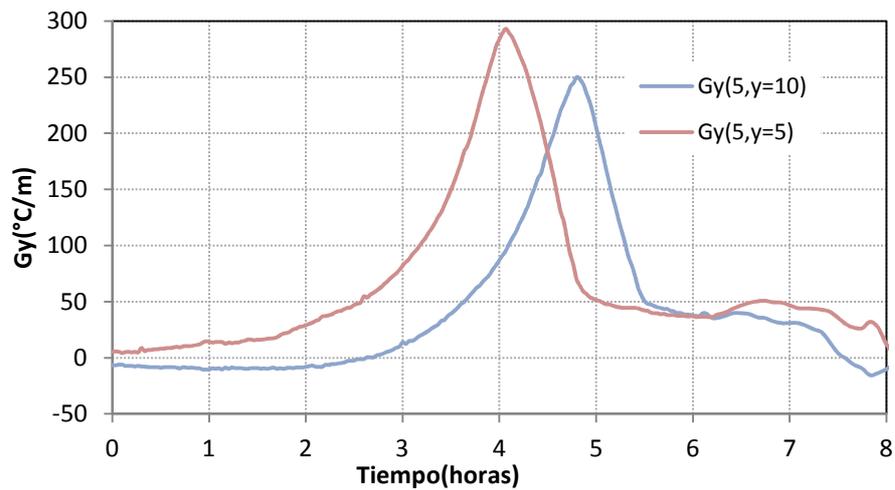


Figura 10. Gradientes de temperaturas verticales a $x=5$ cm.

VISUALIZACIÓN DEL PROCESO. CARACTERÍSTICAS DEL AVANCE DE LA FRONTERA

La figura 11 es una secuencia fotográfica del proceso de fusión que muestra la evolución temporal de la frontera sólido líquido en la sustancia estudiada.

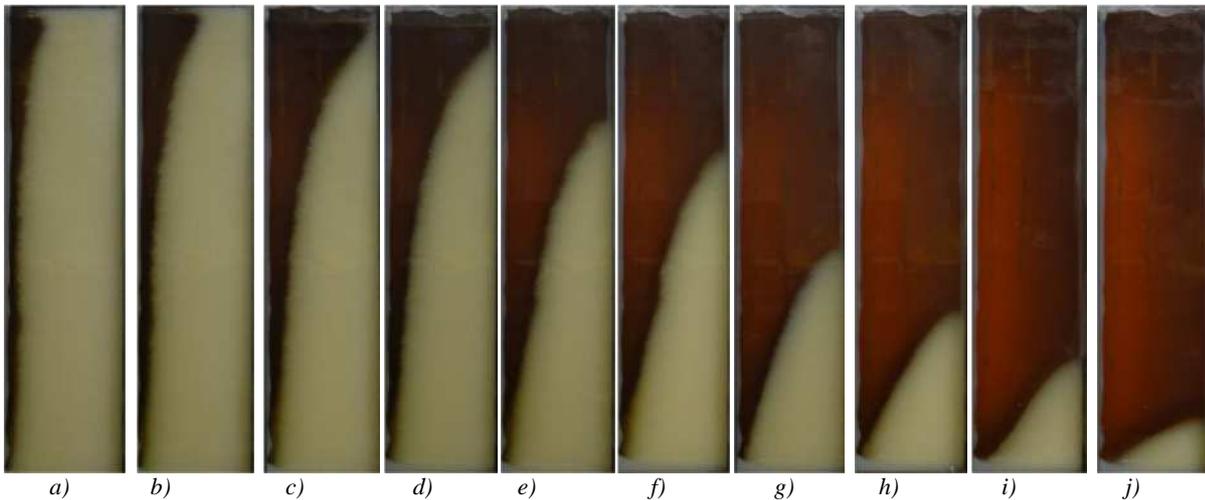


Figura 11 Evolución temporal del proceso de fusión en una grasa orgánica. a) t=2 horas, b) t=2,5 horas, c) t=3 horas, d) t=3,5 horas, e) t=4 horas, f) t=4,5 horas, g) t= 5,5 horas, h) t=5,75 horas, i) t= 6h j) t= 6,5h.

En el trabajo (Hamdan, M y Al-Hinti, I., 2004) los autores trabajan con el octadecano como sustancia de cambio de fase y plantean una aproximación analítica para la posición de la frontera teniendo en cuenta el fenómeno convectivo. En dicho trabajo se plantea que el espesor local de la capa fundida, $S(y,t)$ tiene la siguiente forma:

$$S(y,t) = S_0(t) + y \tan \varphi$$

Donde $S_0(t)$ es el espesor de la capa fundida en la parte inferior de la cavidad a nivel de la base del recipiente ($y=0$), φ es el ángulo de inclinación de la interfaz y puede ser evaluado en función del flujo de calor entregado al sistema, el tiempo, la altura del recinto etc.. Para este caso se supone que φ es independiente de la altura y .

Para la sustancia orgánica estudiada en este trabajo $S_0(t)$ es prácticamente 0 o despreciable y se mantiene así durante todo el proceso; lo que puede significar que la transferencia conductiva es pequeña a nivel de la base del recipiente (Figura 11) en comparación con la convectiva. La aproximación lineal de $S(y,t)$ en nuestro caso no puede aplicarse ya que la interfaz observada en los registros fotográficos muestran que la misma no es lineal (Figura 13) y el ángulo de inclinación depende de la posición. Lo que se puede plantear en nuestro caso es una aproximación lineal por tramos. Esta forma curva del avance de la frontera no depende de la relación de aspecto (h/a), que en la figura 13-a) es de 0.24, en la 11- b) corresponde a una relación de aspecto de 0.5 y la 13-c) a 0.2. La concavidad de la curva cambia en la región superior una vez que el frente alcanza la esquina superior derecha, es decir cuando el flujo convectivo está totalmente desarrollado.

La producción de registros fotográficos del proceso, en particular las fotos mostradas en la figura 12, validan el modelo bidimensional utilizado, por lo que el movimiento en xyz puede ser aproximado como bidimensional en el plano xy.



Figura 12. Visualización del frente de fusión en una sustancia orgánica con calentamiento lateral.

Para determinar la fracción de líquido presente se procesan las fotos con el software Picasa; mejorándolas en brillo y contraste, transformándolas por medio de un filtrado a una escala de grises, luego se puede pasar por un esbozo a lápiz de modo que se pueden obtener las imágenes de la figura 13.

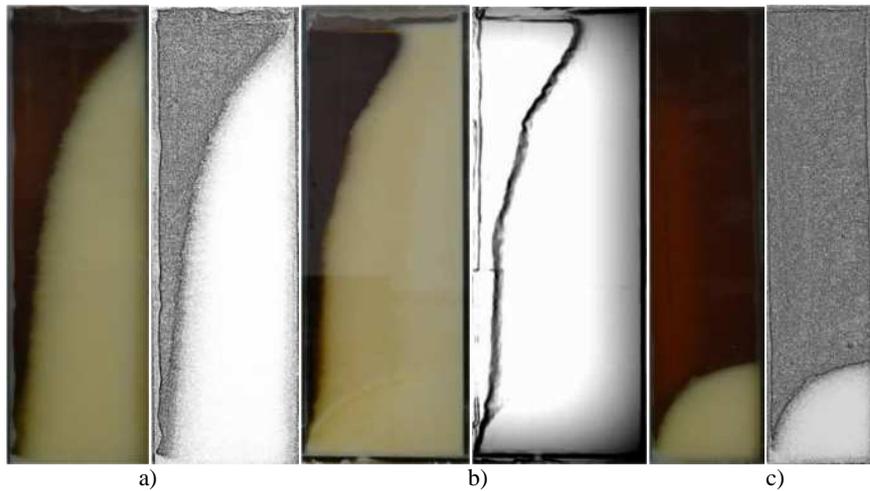


Figura 13. Diferentes tipos de procesamiento digital de las fotografías del proceso de fusión de una sustancia orgánica para diferentes relaciones de aspecto y/x . a) $y/x= 0.24$, b) $y/x= 0.5$ y c) $y/x=0.2$

Luego, con el programa ImageJ, se determina la fracción de líquido presente haciendo un cociente de áreas, ya que en este procesador digital de imágenes se puede calcular áreas, ángulos, distancias, etc. Esto se realiza para cada foto y de ese modo podemos obtener la evolución temporal de la fracción de líquido desde el inicio del calentamiento. En la figura 14, se muestra la evolución temporal y una aproximación polinómica para la misma.

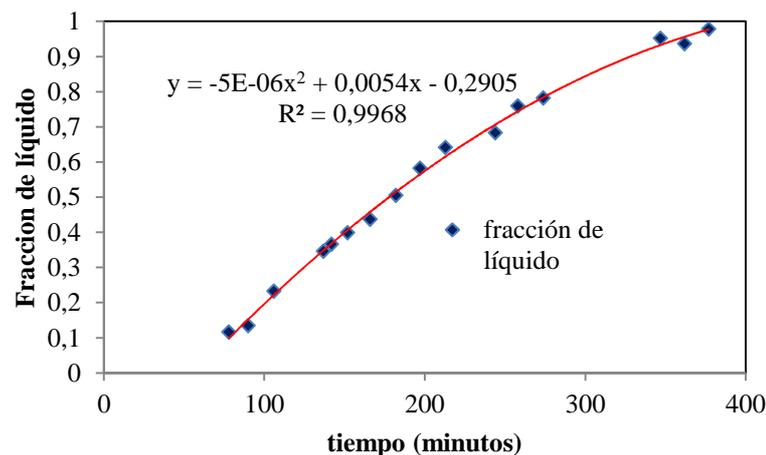


Figura 14 Evolución temporal de la fracción de líquido.

CONCLUSIONES

Los gradientes verticales calculados a partir de las medidas térmicas realizadas muestran que es posible seguir la evolución del flujo convectivo en todas sus etapas. El comportamiento con valores pequeños del gradiente vertical cercano a la pared caliente responsable del establecimiento del flujo convectivo en las primeras horas del calentamiento refleja la etapa predominantemente conductiva. Dichos valores no nulos también revelan que desde el principio está presente y no puede ser despreciado. El crecimiento pronunciado de los mencionados gradientes a diferentes alturas muestra el inicio de la transición al régimen de convección natural. El decrecimiento de estos valores muestra la evolución del flujo convectivo que (con valores más pequeños) solo cesa cuando la sustancia se solidifica.

Los valores alcanzados por los gradientes horizontales reflejan la propagación del fenómeno convectivo en esta dirección, se puede afirmar que en la zona cercana al techo la rapidez de propagación y en definitiva el avance de la frontera es mayor, y decrece con la altura lo que está de acuerdo con los registros fotográficos mencionados. La anulación de los gradientes en esta dirección determina que la sustancia en dicha zona está completamente líquida y la temperatura tiende a uniformizarse.

Los registros fotográficos tomados cada 15 minutos para las potencias ensayadas revelan todas las etapas del desarrollo del flujo presentes en el proceso de fusión de la sustancia. La forma del avance de la frontera en el interior de la sustancia, no cambia con la relación de aspecto de la cavidad, ni con la potencia ensayada, es siempre curva y no puede ser aproximada en forma lineal con la posición vertical, ya que la pendiente depende de ella. El espesor de la capa fundida en la parte inferior de la cavidad a nivel de la base del recipiente ($y=0$) es prácticamente 0 o despreciable y se mantiene así durante todo el proceso; lo que puede significar que la transferencia conductiva es pequeña a nivel de la base del recipiente en comparación con la

convectiva. Las fotografías también confirman que el flujo puede ser aproximado en forma bidimensional en el plano x,y durante todo el proceso de fusión.

El procesamiento realizado de cada uno de los registros fotográficos permitió determinar en forma precisa la fracción de líquido presente en función del tiempo y realizar una aproximación polinómica de la misma.

REFERENCIAS

- Benard C.;Gobin D.; Martinez F. (1985). Melting in rectangular enclosures: experiments and numerical simulations. *Journal Heat Transfer* 107 (November).
- 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.
- 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 Bouciguez A.. (2010). Determinación experimental de propiedades térmicas de materiales de cambio de fase orgánicos. Trabajo Mural en AFA.
- Vilte M., Bouciguez A. y Esteban S. (2013). Análisis de la transferencia térmica durante la fusión de un material de cambio de fase. *Revista AVERMA (Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente)*.Revista de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente. ISSN 0329-5184.
- Zhang Z.; Bejan A. (1989). Melting in an enclosure heated at constant rate. *Int. Journal Heat Mass Transfer* (32) (6).

HEAT TRANSFER ANALYSIS FOR THE MERGER OF A PHASE CHANGE MATERIAL

ABSTRACT: In this paper a detailed temperature distribution inside an enclosure containing a substance that undergoes study melting process occurs. Vertical gradients are established, between the top and the bottom of the enclosure are evaluated; as well as the horizontal, between the hot and opposite wall. The interest in evaluating these gradients is that they are responsible for the establishment and development of convective and conductive transfer of heat within the cavity, which determines the shape and speed of advance of the phase change front. The temporal evolution of the liquid fraction was also determined from photographic records of the process.