

ANÁLISIS DE LA FUSIÓN DE CARGA FRÍA AL INTERIOR DE UN CONVERTIDOR TENIENTE: SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN MODELO FÍSICO

Ronald Paredes^{*}, Marcela Cruchaga[†], Patricio Ruz^{††}, Ramón Fuentes^{††}, Carlos Conca^{*}

^{*} Centro de Modelamiento Matemático
Universidad de Chile
Blanco Encalada 2120, piso 7, Santiago, Chile
e-mail: rparedes@dim.uchile.cl, sitio web: <http://www.cmm.uchile.cl/>

[†] Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Santiago de Chile
Avenida Bernardo O'Higgins 3363, Santiago, Chile
e-mail: mcruchag@lauca.usach.cl, sitio web: <http://www.usach.cl/>

^{††} Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia S.A. (IM2)
Avenida del Parque 4980, piso 1, Ciudad Empresarial, Huechuraba, Santiago
Sitio web: <http://www.im2.cl/>

Key words: Procesos de Fusión, Transferencia de Calor, Cambio de Fase

Resumen: *En el proceso de fusión-conversión de cobre, en un convertidor Teniente, una de las variables operacionales importantes es la temperatura del baño^{1,2}. La temperatura dentro de convertidor aumenta debido a las reacciones químicas exotérmicas presentes en el proceso de fusión. Cuando la temperatura del baño sobrepasa el límite superior del rango de operación, se agrega carga fría al interior del convertidor, con la finalidad de bajar la temperatura del baño y agregar elementos necesarios en el proceso de fusión conversión. La carga fría que se agrega, consiste en una mezcla de escoria de hierro, sílice y carbón, y los tamaños de ésta no superan las dos pulgadas de diámetro. Para el estudio hidrodinámico del convertidor se realizan modelos físicos a escala utilizando agua como fluido. En una primera etapa al estudio de la fusión de carga fría, se ha propuesto simular la fusión de bloques de hielo en una cavidad cilíndrica con agua, obteniéndose la evolución temporal del campo de temperatura y de la fracción de líquido, con la finalidad de verificar los modelos propuestos con observaciones ha realizar en el modelo físico. Para desarrollar el estudio, se calculó un campo de velocidad similar al desarrollado en el interior del convertidor Teniente, el cual fue posteriormente impuesto como condición inicial en el proceso de fusión.*

1 INTRODUCCION

Dentro del proceso de fusión en el convertidor Teniente (CT) una de las variables operacionales importantes es la temperatura del baño o de la fase líquida. Si esta temperatura es muy alta aparecen cantidades de elementos que hacen que el proceso de fusión no sea óptimo, además se produce un daño a las capas de aislante refractario del convertidor. Por otro lado, si la temperatura de la fase líquida es demasiado baja, la productividad del convertidor disminuye y queda cobre atrapado en la escoria, lo cual afecta a la eficiencia del proceso. Debido a esto, se ha fijado un rango de temperatura para la operación del convertidor, el cual es desde 1.150C hasta 1.250C. La temperatura dentro de convertidor aumenta debido a las reacciones químicas exotérmicas presentes en el proceso de fusión. Cuando la temperatura del baño sobrepasa el límite superior del rango de operación, se agrega carga fría al interior del convertidor, con la finalidad de bajar la temperatura del baño y mantenerla así dentro del rango de operación. La carga fría que se agrega es una mezcla de escoria de hierro, sílice y carbón, la cual es ingresada por el “gar-gun”. El tamaño de la carga fría no supera las dos pulgadas de diámetro. Determinar la evolución temporal de la temperatura del baño o fase líquida al agregar carga fría es relevante para la descripción adecuada del proceso. Por otro lado, la hidrodinámica del proceso puede estudiarse en modelos físicos a escala utilizando agua como fluido en estudio. Con la finalidad de validar los modelos de análisis propuestos para el proceso de fusión, en el presente trabajo se analiza la simulación numérica de la fusión de un bloque de hielo en agua, en una cavidad cilíndrica, de geometría a escala del Convertidor Teniente, considerando este dominio como una tajada del convertidor en la zona de inyección por toberas. Se ha obtenido la evolución temporal de los campos de temperatura, fracción de líquido y el tiempo de fusión.

1.1 Antecedentes Generales

El Convertidor Teniente es un equipo cilíndrico cuyas dimensiones varían de acuerdo a su capacidad de tratamiento de concentrado. Un esquema del CT y sus principales componentes se muestra en la figura 1. En la actualidad existen diseños que miden 5m de diámetro por 22m de largo, dentro de los cuales se puede fundir hasta 2.000 toneladas por día de concentrado seco. En grandes rasgos, el Convertidor Teniente está constituido por una carcasa de acero, revestida en su interior con ladrillos refractarios, que cumplen la función de aislar térmicamente el interior del convertidor. A este conjunto carcasa-ladrillos, ingresan, en la zona inferior, las toberas de concentrado y de soplado, mediante las cuales se ingresa el concentrado de cobre y el aire enriquecido con oxígeno. En la figura 2 puede observarse un corte en la zona de las toberas de soplado. La nomenclatura utilizada en dicha figura corresponde a la que se detalla en la tabla 1, mientras que las dimensiones y características principales se muestran en la tabla 2.

La realización de modelos físicos en maquetas de acrílico en los que se simula diversas operaciones del convertidor utilizando agua es de utilidad para la comprensión de la hidrodinámica de los procesos. En este trabajo se realiza la modelación numérica del proceso de fusión de hielo en la geometría de uno de estos modelos físicos para validar en trabajos

futuros con mediciones de laboratorio las predicciones numéricas del modelo propuesto para el estudio de fusión en el convertidor.

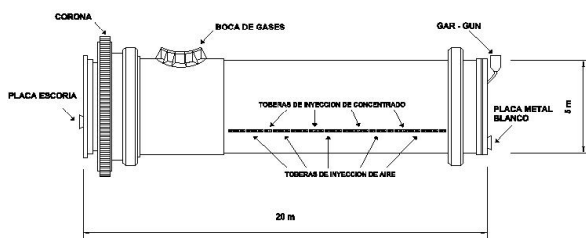


Figura 1: Esquema convertidor Teniente

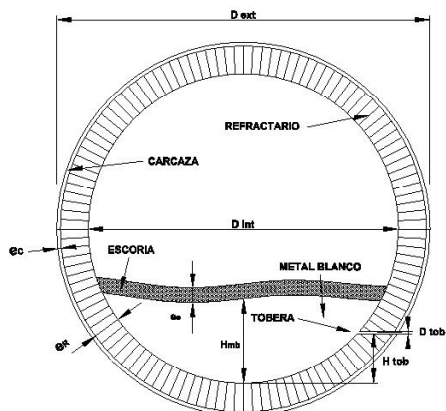


Figura 2: Vista en corte en zona de toberas de soplado

Tabla 1

D_{ext}	Diámetro exterior
D_{int}	Diámetro interior
D_{tob}	Diámetro interior de la tobera
e_c	Espesor de la carcaza
e_R	Espesor del refractario
e_c	Espesor de la capa de escoria
H_{mb}	Nivel de metal blanco medido desde el piso del CT
H_{tob}	Altura de la tobera medida desde el piso

Tabla 2

Largo	14 - 22 m
Diámetro exterior	4 - 5 m
Nº de toberas de soplado	36 - 45 de 2 - 2 1/2 pulgadas de diámetro
Nº de toberas de inyección	2 - 4 de 3 1/2 pulgadas de diámetro

2 ECUACIONES FUNDAMENTALES

Para analizar numéricamente la fusión de carga fría en el convertidor, se necesita modelar matemáticamente el proceso de cambio de fase, la transferencia de calor y el movimiento de la fase líquida. Las simulaciones numéricas fueron realizadas con el software comercial FLUENT, el cual trae incorporados un modelo de cambio de fase, modelos para flujo laminar y para la transferencia de calor. Para simular el flujo se resolvieron las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento, utilizando el método de entalpía porosidad para el cambio de fase. El software utilizado resuelve el modelo matemático utilizando el método de los volúmenes de control, implementado con el algoritmo SIMPLEC. El detalle del modelo matemático puede ser encontrado en [3]. Si se asume que el flujo es incompresible y que la densidad del sólido y la del líquido son iguales, la ecuación de continuidad de la mezcla es:

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \quad (1)$$

donde la \vec{U} representa la velocidad de fase líquida. La velocidad en la fase sólida se ha considerado nula. La ecuación de cantidad de movimiento de la mezcla es:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{U}) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_l \nabla \vec{U}) - \frac{\mu_l}{K} \vec{U} \quad (2)$$

donde ρ es la densidad, p la presión y μ_l es la viscosidad del líquido. El término final de la ecuación (3) representa la resistencia del flujo de líquido en la región pastosa. La permeabilidad K es relacionada a la fracción volumétrica de líquido, mediante la ecuación de Koseny-Carman:

$$K = K_0 \frac{f_l^3}{(1-f_l)^2} \quad (3)$$

donde K_0 es la constante de permeabilidad y f_l es la fracción de líquido. La entalpía del flujo es calculada como la suma de la entalpía sensible, h , y el calor latente ΔH :

$$H = h + \Delta H \quad (4)$$

definiendo la entalpía sensible como:

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (5)$$

donde h_{ref} es la entalpía de referencia, T_{ref} es la entalpía de referencia y c_p es el calor específico a presión constante. El calor latente se calcula como el producto entre la fracción de líquido f_l por el calor de cambio de fase L :

$$\Delta H = f_l L \quad (6)$$

la fracción de líquido f_l es deducida mediante la temperatura, la cual se asume que varía linealmente entre las temperaturas de sólido T_s y líquido T_l :

$$f_l = \frac{T - T_s}{T_l - T_s} \quad (7)$$

El valor de la fracción de líquido es cero si $T < T_s$ y 1 si $T > T_l$. Finalmente, la ecuación de energía para el problema de fusión es [3]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \vec{U} \cdot \nabla(\rho H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_r \quad (8)$$

donde H es la entalpía (calculada con la ecuación 4), k es la conductividad térmica y S_r corresponde al término fuente para incluir el calor generado en las reacciones químicas exotérmicas (para el problema analizado en este trabajo, $S_r=0$). Este modelo matemático es resuelto numéricamente mediante volúmenes finitos utilizando el algoritmo de solución conocido como SIMPLEC a través del programa FLUENT [4], obteniéndose los campos de presión, velocidad y temperatura, para cada instante de tiempo. Los parámetros numéricos utilizados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3

Parámetros numéricos utilizados

Modelos utilizados	
Espacio	3D
Tiempo	Transiente, Primer orden, implícito
Régimen de flujo	Laminar
Ecuaciones resueltas	
Ecuaciones de flujo (momentum y continuidad)	
Energía	
Parámetros transientes	
Paso de tiempo [s]	0,0001
Máximo de iteraciones por paso de tiempo	20
Relajadores	
Presión	0,3
Densidad	1,0
Energía	1,0
Esquemas de discretización	
Presión	Body Force Weighted
Acoplamiento presión-velocidad	SIMPLEC
Momentum	Ley de potencia
Energía	Ley de potencia
Propiedades físicas del agua	
Densidad [kg/m ³]	998,2 (constante)
Calor específico c _p [J/kg°C]	4.182 para el agua y 2.106 para el hielo
Conductividad térmica [W/m°C]	0,6 para el agua y 2,4 para el hielo.
Viscosidad [kg/ms]	0,001003(constante)
Permeabilidad K ₀ [kg/m-s]	1,003x10 ⁸
Calor de fusión [J/kg]	334.400(constante)
Temperatura de Solidus [°C]	0
Temperatura de Liquidus [°C]	0,2

3 RESULTADOS OBTENIDOS

Se simula la fusión de un bloque de hielo en agua, en una cavidad de geometría cilíndrica. El esquema de la geometría se muestra en la figura 3, mientras que las dimensiones geométricas son las mostradas en la tabla 4. En la tobera, el flujo es inyectado con una velocidad de 20m/s y a una temperatura de 15 °C y normal a la superficie de la tobera. El

manto y la cara superior de la cavidad cilíndrica se han considerado paredes adiabáticas. La velocidad es nula sobre la pared del manto, en tanto que la cara superior se ha considerado deslizante. Las caras laterales se han considerado salidas de flujo. En la simulación se utilizó una malla con elementos tetraédricos con 71.969 elementos, apegada al cuerpo y refinada en la zona del bloque de hielo. Inicialmente, el agua al interior de la cavidad se encuentra a una temperatura de 15 °C y el bloque de hielo se encuentra a -4 °C. En la simulación se impuso como condición inicial para las velocidades un campo de velocidad que fue calculado previamente sin considerar la transferencia de calor al interior de la cavidad ni el bloque de hielo.

En la figura 4 se muestra, para el instante inicial, un mapa de contornos de magnitud de velocidad en la pared superior (superficie libre) y en el plano medio de la tajada. En la cara superior, se observa que el campo de velocidad es asimétrico y de gran intensidad en la zona donde emerge el flujo figura 4-(a). En la zona del bloque de hielo la velocidad es nula, mientras que la velocidad de aproximación del flujo al bloque es de 2m/s, debido a la cercanía del bloque a la pared superior figura 4-(b).

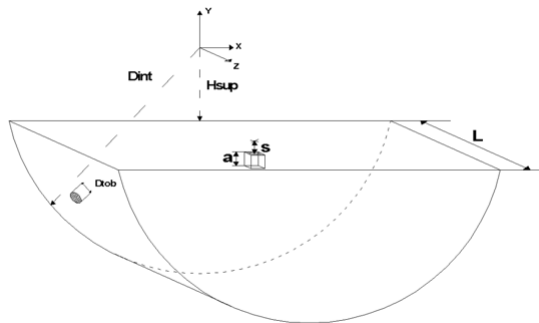


Figura 3: Esquema de la geometría del problema

Tabla 4

Dimensiones geométricas

D_{int} : Diámetro interno	0,712 m
L : Longitud interna	0,193 m
H_{sup} : Posición vertical cara superior	-0,153 m
D_{tob} : Diámetro de la tobera	0,012 m
A : Lado del cubo	0,01 m
S : Sumergencia del cubo	0,01 m

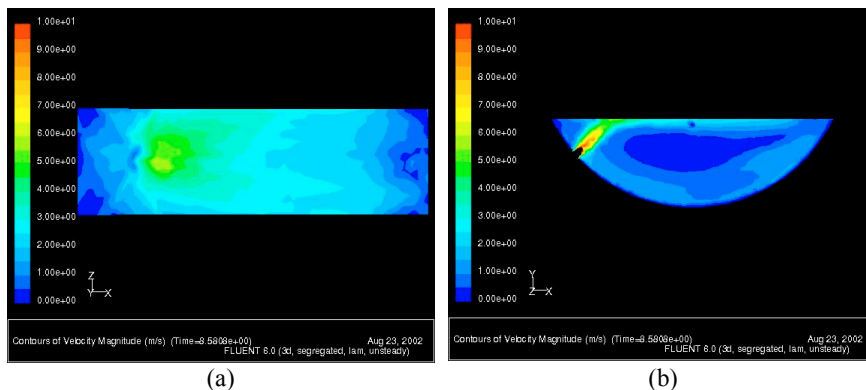


Figura 4 : Contornos de velocidad: (a) pared superior, (b) plano medio de la tajada.

En las figuras 5 y 6 se muestran los contornos de fracción de líquido en diferentes instantes de tiempo durante la fusión del bloque de hielo, en los planos de simetría, Z_m y X_m . En plano Z_m (figura 5) se puede observar el tamaño relativo del bloque respecto al dominio utilizado. La forma del frente de cambio de fase se observa irregular a lo largo del tiempo, mostrando mayor desgaste en la zona cercana a la pared superior. En el plano X_m (figura 6) se observa cierta asimetría en la forma del frente de cambio de fase, producidas por la asimetría del campo de velocidad. El tiempo de fusión completa del bloque de hielo es de 0,11 segundos. En las figuras 7, 8 y 9 se muestra el campo de temperaturas en diferentes instantes de tiempo durante la fusión del bloque de hielo. La temperatura en las zonas adyacente y aguas abajo del bloque que se funde baja a un valor cercano a los 13 °C (de los 15 °C iniciales). A medida que el tiempo transcurre, se observa que la zona posterior al bloque también baja su temperatura. Globalmente, no se aprecia una baja en la temperatura media del dominio. La baja de la temperatura sólo se produce en la vecindad del bloque de hielo. En la figura 7 se muestra la evolución de la temperatura en el plano medio Z_m de la tajada. Se observa claramente una zona fría, correspondiente al bloque durante la fusión. Al final de la fusión, se observa una estela fría, correspondiente al líquido liberado durante el cambio de fase, el cual posteriormente aumenta su temperatura debido a la difusión de calor. La estela fría no llega a tener contacto con el manto del dominio cilíndrico, lo cual indica que el flujo que está más próximo a la cara superior deslizante, y por lo tanto el de mayor velocidad, es el que llega al manto del dominio. En la figura 8 se muestra el campo de temperatura en el plano medio X_m de la tajada. Se observa claramente la zona fría en el bloque de hielo, junto con isoterms asimétricas, debido a la asimetría del campo de velocidad. En el plano X_1 (figura 9), ubicado aguas abajo del bloque, se observa un enfriamiento que comienza en un instante posterior al del inicio de la fusión. El enfriamiento comienza primero en la zona superior del plano (en la cara superior del cilindro), para después extenderse hacia abajo y finalmente desaparecer, lo cual evidencia el paso de la estela de líquido frío proveniente de la fusión del bloque aguas

arriba. Se observa una clara asimetría en las isoterma.

4 CONCLUSIONES

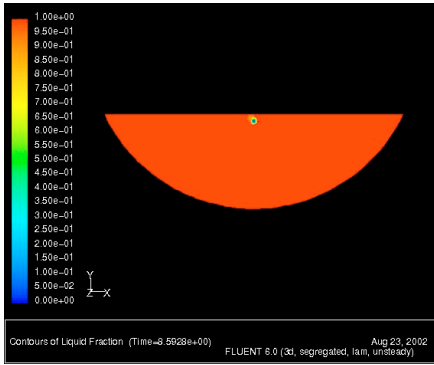
Se ha simulado la fusión de hielo en agua en una cavidad cilíndrica de paredes adiabáticas, en el marco del estudio de la fusión de carga fría en el convertidor Teniente. Se calculó previamente un campo de velocidad similar al desarrollado al interior del convertidor. Este campo de velocidad ha sido impuesto como condición inicial en el proceso de fusión de un bloque de hielo cúbico de 1 cm de lado. El bloque fue situado en el plano medio de la cavidad cilíndrica, 1 cm bajo la pared superior. Se encontró que el campo de velocidad es asimétrico. Esta asimetría afecta directamente la transferencia de calor al interior de la cavidad, provocando isoterma asimétricas a lo largo del proceso de fusión. La fusión del bloque produce una disminución local en la temperatura, en la cercanía del bloque y aguas debajo de éste. Globalmente la temperatura de la cavidad no sufrió variaciones significativas. El tiempo de fusión calculado es de 0,11 segundos. Este pequeño valor puede ser explicado debido al alto valor de la velocidad de aproximación del flujo, 2m/s, y a que el volumen del bloque de hielo es pequeño (1 cm³). Como trabajos futuros, se realizarán simulaciones numéricas aumentando el tamaño del bloque de hielo, para cuantificar el efecto del volumen de hielo fundido sobre la caída de temperatura en el dominio y los tiempos de fusión de los bloques. Además, se espera realizar una experiencia física para obtener datos experimentales que permitan ajustar y validar el modelo numérico. Se realizará un estudio de sensibilidad de algunos parámetros del modelo numérico, con la finalidad de ajustar los cálculos que realiza el modelo con algunos datos experimentales.

5 AGRADECIMIENTOS

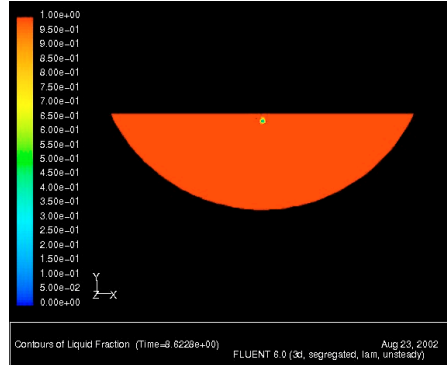
Los autores agradecen a CONICYT por el soporte brindado a este trabajo, dentro del marco del proyecto FONDEF DOOI 1068.

6 REFERENCIAS

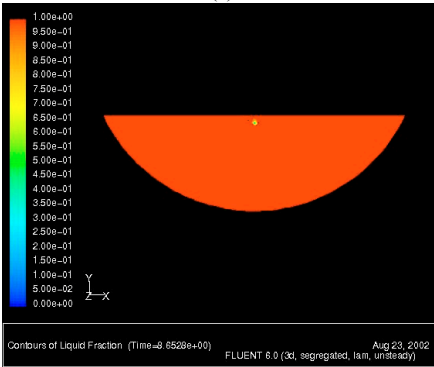
- [1]. P. J. Mackey, R. Campos (2001), "Modern Continuous Smelting and Converting by Bath Smelting Technology", Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 40, N° 3, pp 355-376.
- [2]. Imris, S, Rebolledo, M. Sanchs, G. Castro, G. Achurra, F. Hernandez (2000), "The Cooper Losses in the Slags from the El Teniente process", Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 39, No 3, pp 281-290.
- [3]. V. R. Voller and C. Prakash (1987), "A fixed grid numerical modeling methodology for convection diffusion mushy region phase-change problems", I. J. Of Heat and mass Transfer, Vol. 30, No 8, pp 1709-1719.
- [4]. FLUENT User's Manual.



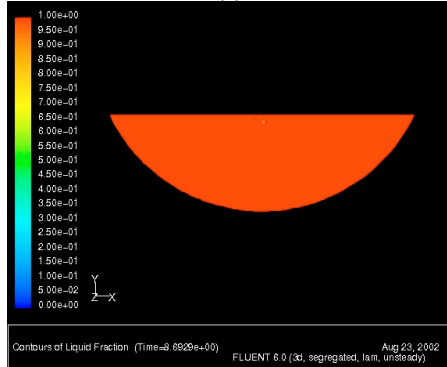
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5: Contornos de fracción de líquido en diferentes instantes de tiempo; (a) $t=0,02$ [s]; (b) $t=0,05$ [s]; (c) $t=0,08$ [s]; (d) $t=0,12$ [s], en el plano $Z_m=0,0965$.

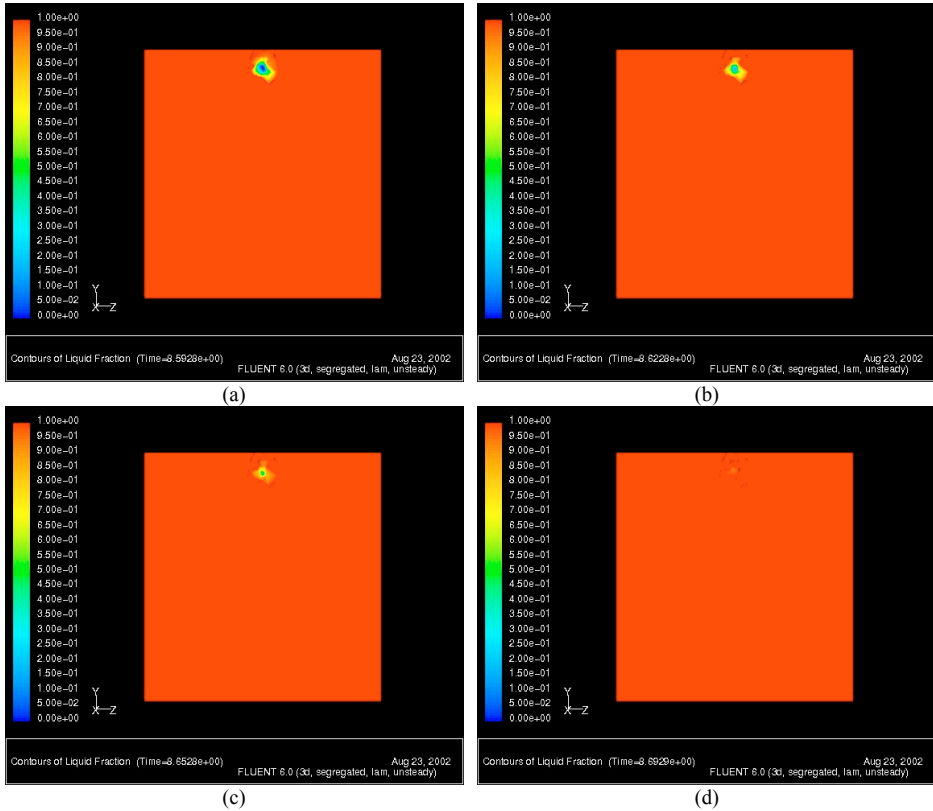


Figura 6: Contornos de fracción de líquido en diferentes instantes de tiempo; (a) $t=0,02$ [s]; (b) $t=0,05$ [s]; (c) $t=0,08$ [s]; (d) $t=0,12$ [s], en el plano $X_2=0$.

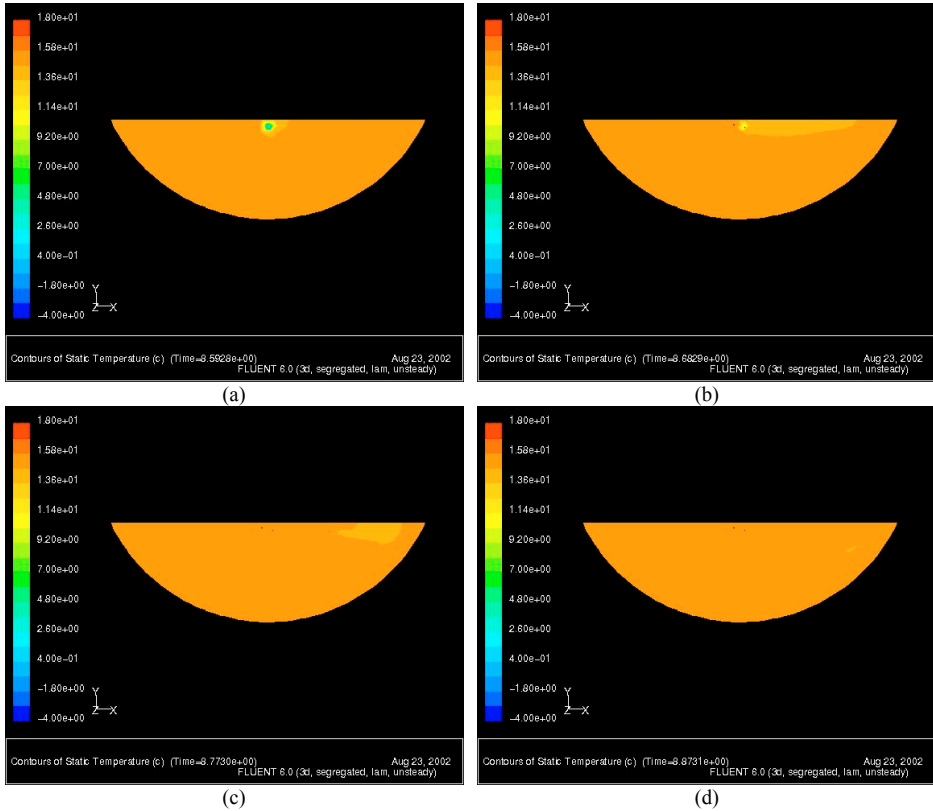


Figura 7: Contornos de temperatura en diferentes instantes de tiempo; (a) $t=0,02$ [s]; (b) $t=0,11$ [s]; (c) $t=0,2$ [s]; (d) $t=0,3$ [s], en el plano $Z_m=0,0965$

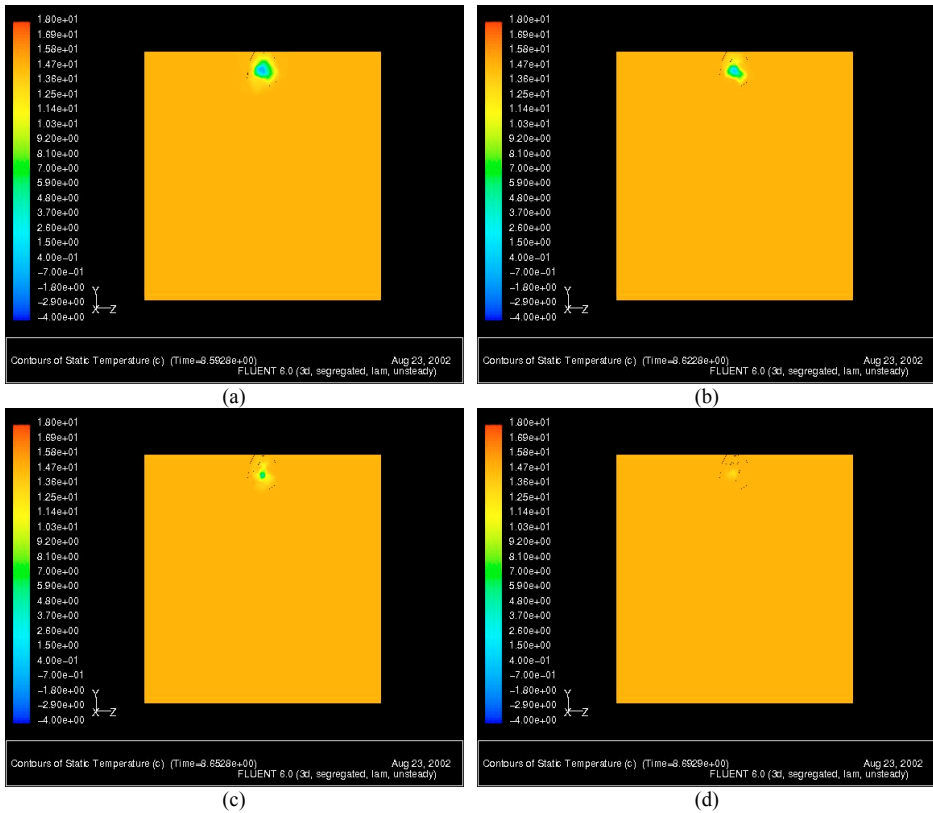
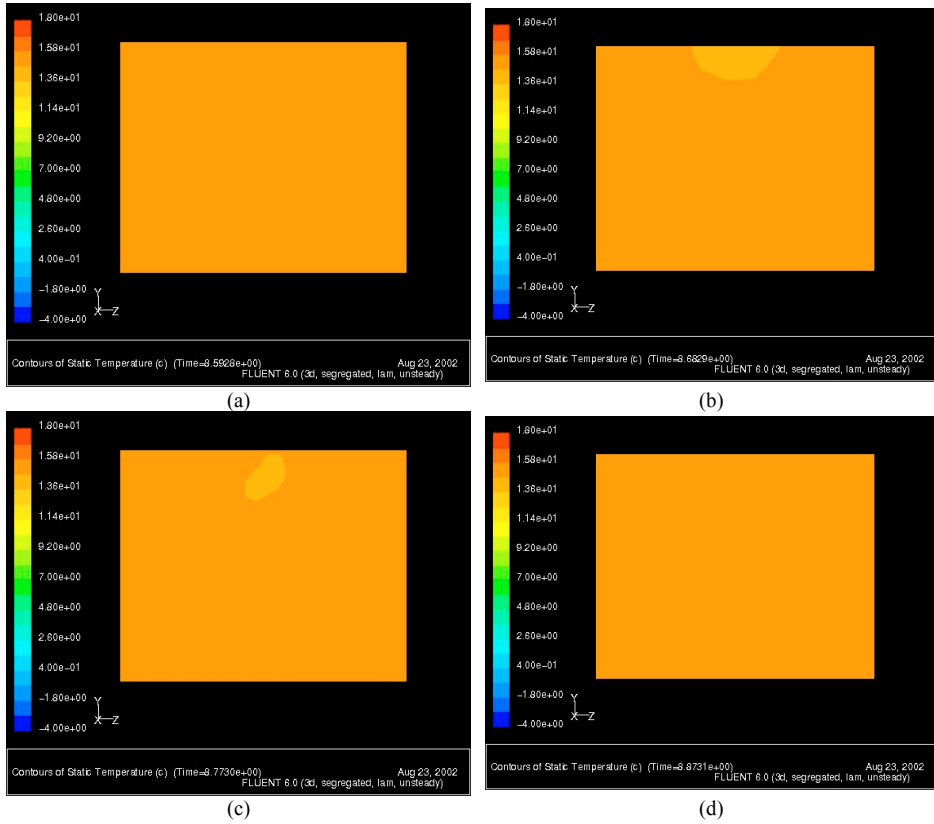


Figura 8: Contornos de temperatura en diferentes instantes de tiempo; (a) $t=0,02$ [s]; (b) $t=0,05$ [s]; (c) $t=0,08$ [s]; (d) $t=0,12$ [s], en el plano $X_m=0,0$



7 Figura 9: Contornos de temperatura en diferentes instantes de tiempo; (a) $t=0,02$ [s]; (b) $t=0,11$ [s]; (c) $t=0,2$ [s]; (d) $t=0,3$ [s], en el plano $X_1=0,178$