

## CARACTERIZACIÓN DEFECTOLÓGICA DE PIEZAS FUNDIDAS POR LOST FOAM CASTING MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA

### Characterization of defects in lost foam casting by numerical simulation

#### RESUMEN

Se reporta la simulación mediante Flow-3D de fenómenos térmicos que dan lugar a la defectología de partes fundidas por LFC (Lost Foam Casting). Para una mayor precisión en los modelos, se han considerado mallas simples y bloques múltiples. En particular, el calor transferido desde el metal hasta la espuma es usado para calcular el volumen de espuma degradada y la velocidad del proceso de llenado.

Mediante la simulación del proceso de solidificación, se encontraron puntos de mayor contracción y concentración de defectos, lo cual facilitó la optimización de parámetros a nivel industrial, así como la manufactura de hidrantes por LFC.

**PALABRAS CLAVES:** Fundición a la espuma perdida, optimización, simulación de procesos

#### ABSTRACT

*A Flow 3-D simulation is reported on the thermal phenomena that give rise to defects in LFC parts. In order to obtain a higher precision of the models, simple meshes and multiple blocks have been considered. Particularly, metal-foam heat transfer is used to calculate the lost foam volume and the rate of the filling process.*

*High contraction points and defect concentration were obtained by means of the simulation of the solidification process, which facilitated the optimization of parameters at an industrial level, as well as the LFC production of hydrants.*

**KEYWORDS:** Lost foam casting, optimization, process simulation

#### 1. INTRODUCCIÓN

En el proceso de Fundición a la Espuma Perdida (Lost foam Casting LFC), se utiliza un modelo de espuma de poliestireno (EPS) con la forma de la pieza a producir. Solidario al modelo, son adicionados un sistema de alimentación y bajante (también de EPS). El conjunto es recubierto con pintura refractaria y posteriormente colocado en un recipiente metálico, donde se cubre con arena. En una etapa posterior, el conjunto de espuma es fundido y degradado químicamente al contacto con el metal líquido, tomando éste la forma del modelo y reproduciendo con precisión la forma de la pieza.

Hoy día, con el incremento de las herramientas computacionales es posible establecer modelos matemáticos de diferentes procesos de fundición de metales [1, 2]. En el caso del LFC, la simulación matemática ha sido utilizada para la optimización de partes de diferentes complejidades y requerimientos, incluyendo piezas automotrices, aeronáuticas y de transporte de fluidos entre otras.

Durante mucho tiempo, las mejoras en la calidad de productos fabricados por LFC, se habían fundamentado en los conocimientos empíricos de diferentes empresas

productoras. La modelación del proceso LFC es por lo tanto una metodología reciente, que se basa en los fenómenos de descomposición y degradación del modelo de espuma [3].

Para la solución del problema convectivo en fundición de metales (transferencia de calor, masa y cantidad de movimiento), se han propuesto diferentes modelos matemáticos. En lo referente al llenado de cavidades, aspecto clave para el desarrollo y comprensión de los defectos en piezas fundidas por LFC, Warner et-al [4], reportaron la existencia de una zona de cinética, existente entre el frente de avance del metal y el modelo de espuma que se degrada. Dicho fenómeno, que controla la velocidad y la calidad del flujo en el frente de metal, fue además predicho en un modelo reciente, reportado por Liu et-al. [5]. Este modelo incluyó como parámetro la presión en la zona de cinética de Warner, pudiendo cuantificar la velocidad del frente de metal para un modelo simple en 1D.

De otra parte, asumiendo que la velocidad de descomposición de la espuma es una función lineal de la presión metalostática y la temperatura del frente de avance de metal, Wang et-al. [6], habían desarrollado un

#### ANDRÉS F. DUQUE MESA\*

Ingeniero Mecánico  
[andres.duque@upb.edu.co](mailto:andres.duque@upb.edu.co)

#### PATRICIA FERNÁNDEZ\*

Ingeniera Metalúrgica. M. Sc.  
[patricia.fernandez@upb.edu.co](mailto:patricia.fernandez@upb.edu.co)

#### JULIO HERRERA

Ingeniero Mecánico  
 Gerente General. COBRAL Ltda.

#### JAVIER CRUZ\*

Ingeniero Mecánico, Ph.D.  
[luis.cruz@upb.edu.co](mailto:luis.cruz@upb.edu.co)

#### VLADIMIR MARTÍNEZ\*

Ingeniero Mecánico, M.Sc. Ph.D.  
[hader.martinez@upb.edu.co](mailto:hader.martinez@upb.edu.co)

\*Grupo de Investigación Sobre Nuevos Materiales (GINUMA) Universidad Pontificia Bolivariana Circular 1ª. 70-01. A.A. 56006. Medellín

modelo para la simulación del llenado durante el proceso LFC. Más recientemente, Mirbagheri et-al. [7], reportaron un modelo que además de tener en cuenta la presión de gas, incluía la eliminación del mismo y la permeabilidad del recubrimiento refractario.

Para el caso que fue de interés en esta investigación, fueron realizadas una serie de simulaciones mediante Flow-3D (Flow Science Inc.), utilizando el método FSTM (Free-surface tracking method) de Hirt y Barkhudarov [8-11]. Como ejemplo, se ilustra el estudio de las zonas de concentración de defectos y los problemas debidos al llenado de moldes para la producción de hidrantes en una empresa colombiana.

## 2. ASPECTOS CINÉTICOS

El llenado del molde durante el proceso LFC se caracteriza por tener una condición transitoria con una frontera móvil. El modelo matemático para caracterizar este tipo de flujo se fundamenta en las ecuaciones de continuidad, momentum y de energía para el metal fundido. También se incluyen condiciones de frontera que permiten evaluar la transferencia de calor desde el metal hacia la espuma y a su vez el enfriamiento del metal dentro del molde de arena.

El modelo para LFC en Flow-3D se basa en el cálculo de la cantidad de calor transferida desde el frente de metal hasta la espuma. Esta cantidad es usada para cuantificar el volumen de espuma que es degradada y que alcanza la temperatura del metal. Dicho volumen, será entonces el ocupado por el metal que entra al molde. Adicionalmente, debido al carácter aislante de la espuma se ignora en el modelo la conducción térmica a través de la espuma.

Estas consideraciones son importantes ya que para lograr una calidad adecuada en las piezas fundidas, es importante controlar la cantidad de gas generado durante la degradación de la espuma, así como la permeabilidad del recubrimiento refractario. Sobre la permeabilidad del refractario, se tiene que si la misma es muy baja, se generará una alta presión de gas entre el frente de metal y la espuma, multiplicando los defectos superficiales en la pieza.

Así, además de las características de la espuma de EPS (i.e. densidad, temperatura de degradación, entre otras), el coeficiente de transferencia de calor metal-espuma ( $x$ ), gobierna el proceso de llenado y como señala la ecuación (1), controla la velocidad y flujo en cavidades [9, 10].

$$u = \frac{x}{\rho} \quad (1)$$

donde  $\rho$  es el producto de la densidad por el calor específico de la espuma.

El efecto de los gases acumulados en el frente de metal es tenido en cuenta por el modelo incorporado en Flow-3D mediante una función de transferencia de calor, que relaciona el coeficiente de transferencia de calor metal-espuma, la densidad, los calores específicos, la rugosidad del modelo de espuma y el efecto de la gravedad en la transferencia de calor metal-espuma, de suerte que el llenado es controlado por las condiciones de transferencia de calor y no por la transferencia de momentum.

## 3. PRELIMINARES

La pieza objeto de evaluación fue una boca de riego (hidrante), que cuenta con variación de espesores y una alta complejidad geométrica. Para ésta, se realizaron diferentes simulaciones modificando el número de hidrantes por sistema de moldeo, así como la ubicación de piezas. Posteriormente, se realizaron pruebas en planta para validar los resultados analíticos, contrastando los mapas de concentración de defectos y los perfiles de llenado con la inspección visual en piezas fundidas.

Originalmente se diseñaron cuatro tipos de sistemas de moldeo en CAD. Éstos incluían desde 1 a 4 hidrantes por modelo. Para cada diseño se buscó el mejor balance entre la eficiencia de moldeo y la probabilidad de defectos calculada luego con Flow-3D (Tabla 1).

Modelo	Eficiencia de moldeo
1 Hidrante por modelo	61%
2 Hidrantes por modelo	74%
3 Hidrantes por modelo	80%
4 Hidrantes por modelo	84%

Tabla 1. Eficiencias de moldeo para los modelos ensayados

Durante la modelación se usaron mallas en coordenadas cartesianas, las cuales permitieron reproducir fielmente las geometrías de los modelos a ensayar. Fue usado un tamaño de celda de 4.5mm y un promedio máximo de tamaño entre celdas de 1.01mm para las coordenadas xy, xz y yz. Mediante el método Fractional Area-volume obstacle representation (FAVOR) [10], se validó la geometría y la estabilidad numérica del planteamiento, permitiendo optimizar el mallado con la definición de un tamaño de celda adecuado.

De otra parte, los parámetros usados en la simulación se fundamentaron en los datos obtenidos en planta, éstos incluyen propiedades térmicas, químicas y físicas de las materias primas usadas en el proceso LFC (EPS, arena, pegante, aleación para fundición entre otras).

#### 4. RESULTADOS Y VALIDACIÓN

Los defectos encontrados en los hidrantes fabricados por LFC, fueron además evidenciados en los mapas de concentración de defectos, obtenidos analíticamente para el llenado de cavidades y la solidificación, tal como se expone a continuación.

##### 4.1. Sistema de moldeo para 1 a 3 hidrantes

La simulación realizada para el modelo de un hidrante (Figura 1) mostró un enfriamiento rápido, que crea un alto índice de concentración de defectos en la brida de conexión y las salidas de agua. Además, para las condiciones de proceso existentes, se genera un gradiente de temperatura de 100°C aprox. entre el volumen que es llenado al inicio del vaciado y el volumen que llena en último lugar. Esta diferencia de temperatura crea una solidificación no homogénea en la pieza, permitiendo contracciones desiguales, que posteriormente facilitan la formación de grietas por esfuerzos residuales.

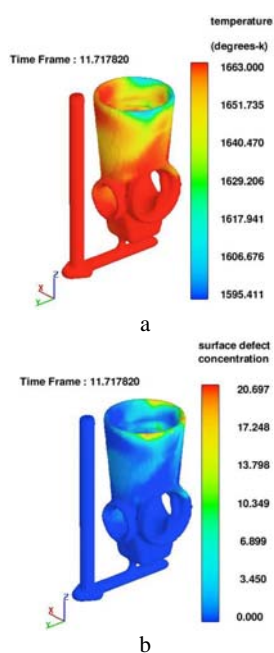


Figura 1. Distribución de temperatura durante el procesamiento de hidrantes por LFC

A continuación, la simulación del modelo de 2 hidrantes mostró una superficie de concentración de defectos muy extensa a través de la pieza. En la Figura 2 la zona amarilla indica una probabilidad alta de formación de poros, inclusiones no metálicas y carbono brillante. El flujo irregular presentado en este modelo se debe a que el llenado ocurre a una alta velocidad y el flujo es dividido con un ángulo muy cerrado.

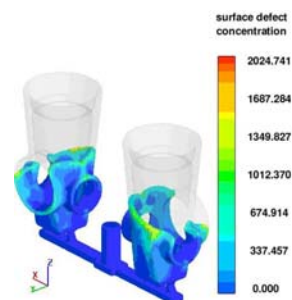


Figura 2. Simulación del llenado para el modelo de 2 hidrantes

Los resultados de la simulación para el modelo de 3 hidrantes presentaron igualmente superficies de concentración de defectos en la brida de conexión. Además, se identificaron porosidades en el área principal de salida de agua, lo que fue evidenciado en la planta de producción (Figura 3).

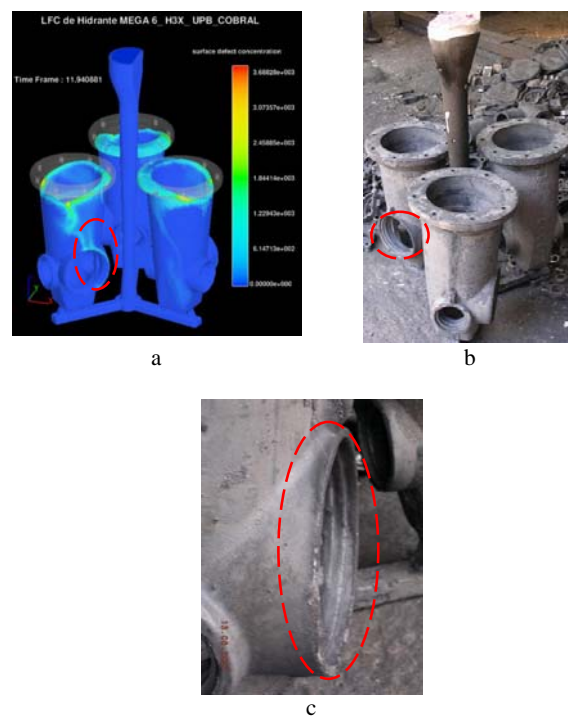


Figura 3. Simulación y producción de hidrantes con modelos de 3 piezas. a. simulación numérica, b. ensayo en planta y c. detalle de porosidad generada en la salida de agua principal del hidrante

La porosidad detectada en las bocas de salida de agua, se asocia a problemas de flujo durante el llenado del molde, donde los productos gaseosos de la degradación del modelo de EPS se trasladan hasta quedar atrapados en áreas de desviaciones drásticas del flujo de metal. Dichas porosidades afectan la productividad del proceso LFC, ya que deben ser incrementadas las operaciones de mecanizado.

#### 4.2. Sistema de moldeo para cuatro hidrantes

Generalmente en el proceso LFC la temperatura de la arena y de la espuma oscila entre 40°C a 50°C, mientras que la temperatura del hierro nodular para la producción de piezas esta alrededor de 1500°C [12]. Esta diferencia genera en algunos casos que se presente un exceso de presión por acumulación de gas en la zona de unión entre el bajante y el sistema de alimentación de metal (Figura 4a-4b), el cual es de difícil evacuación.

Adicionalmente, como consecuencia del exceso de presión en la zona de unión bajante-sistema de alimentación, se forma una mezcla de arena, restos de espuma y de metal que finalmente quedan embebidos en

la pieza. Dicho fenómeno fue detectado por la formación de un barril en esta zona (Figura 4c).

Así las cosas, para evitar el desmoronamiento inicial y la formación del barril en la zona de unión entre el bajante y el sistema de alimentación, fue modificada la viscosidad de la pintura refractaria, buscando incrementar la permeabilidad del recubrimiento en esta zona del modelo, encontrando que el valor de viscosidad adecuado para la pintura refractaria, en la producción de partes por LFC, debe estar en el intervalo de 1900 a 2200cp para la pieza, y entre 1600 a 1800cp para el sistema de alimentación [3].

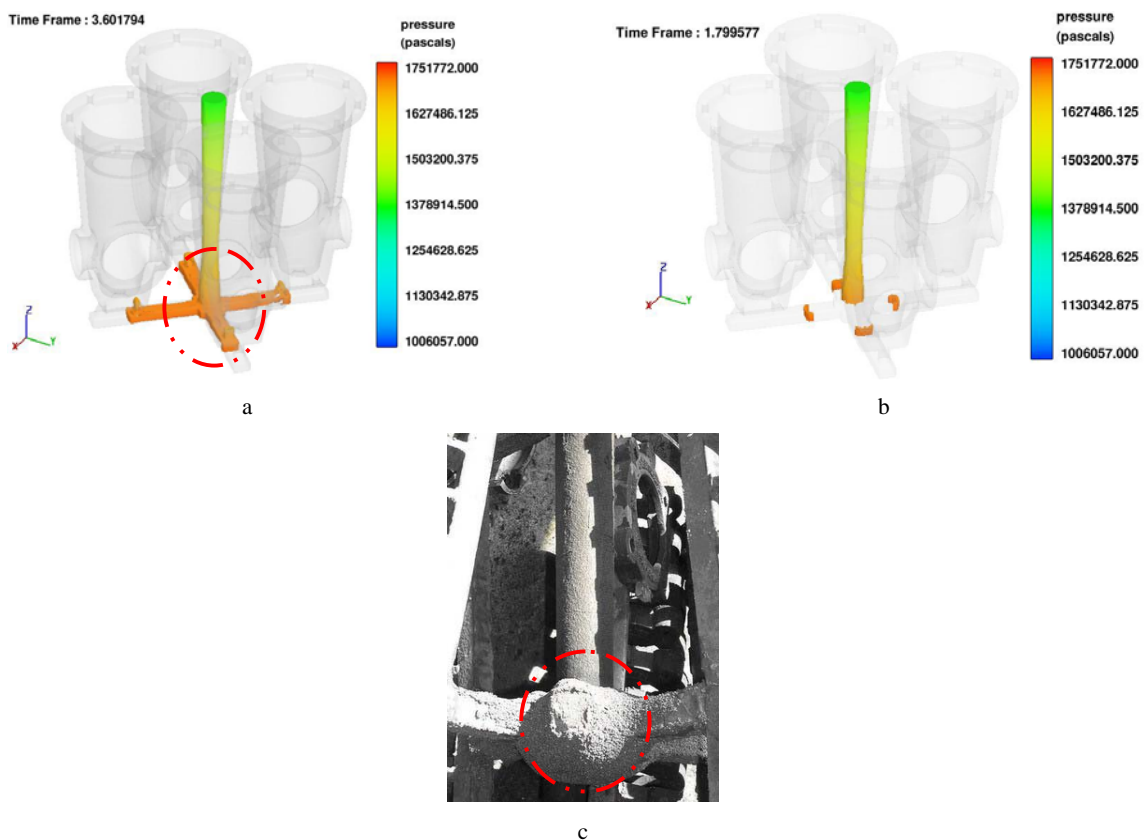


Figura 4. Comparativo simulación vs producción de hidrantes por LFC: (a-b) Pérdida de la continuidad en el flujo de metal por excesiva presión durante el llenado (simulación en Flow-3D del modelo de 4 hidrantes), (c) Barril formado durante el vaciado en la producción de hidrantes

En la Figura 5 se ilustra la identificación de zonas de mayor concentración de defectos para el modelo de 4 hidrantes. Las zonas con colores más claros, muestran una probabilidad mayor de aparición de defectos en la pieza fundida. Se encontró una coherencia entre los resultados de la simulación y el proceso en planta, ya que los defectos presentes en las piezas fundidas se generaron en las mismas zonas predichas por la simulación.

Los defectos encontrados en los hidrantes, para este modelo, fueron en gran porcentaje poros y carbono brillante. La razón que explica estos defectos, se relaciona con los gases y productos de la degradación de la espuma, que son desplazados hasta la zona que es llenada en el último instante, lo cual hace que las propiedades mecánicas del hierro nodular en la brida de sujeción disminuyan y afecten la durabilidad del producto.

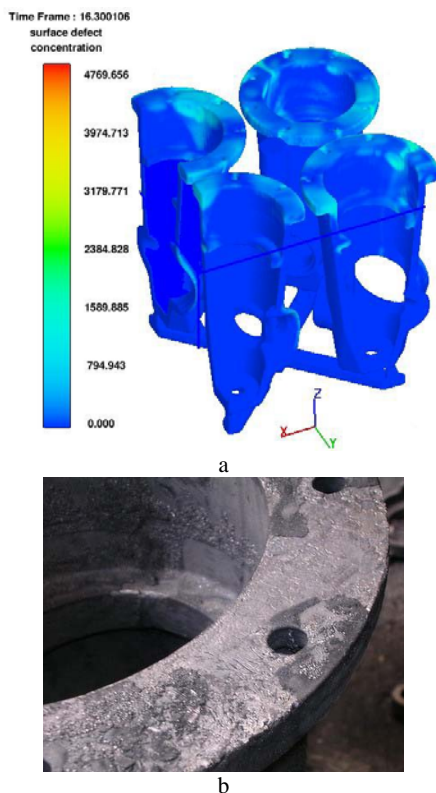


Figura 5. Diagnostico de concentración de defectos en el modelo de 4 hidrantes

### 4.3. Solidificación

Según los resultados analíticos (Figura 6), el tiempo total de solidificación para el modelo de 4 hidrantes fue de 15min., con tiempos de solidificación de 4min. en la porción de las salidas de agua y en el cuerpo del hidrante.

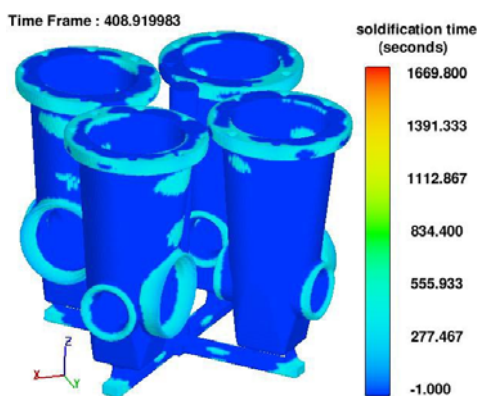


Figura 6. Tiempos de solidificación para zonas en el modelo de 4 hidrantes

Esta diferencia de tiempos de solidificación genera contracciones desiguales, que pueden crear grietas en lugares de la pieza donde hay cambios bruscos de sección.

La tendencia a la solidificación rápida en las zonas mencionadas va de la mano con la distribución y forma del frente de metal entrante durante el vaciado. Debe tenerse en cuenta que la etapa de llenado define la distribución de las temperaturas del molde y del fluido antes del comienzo de la solidificación [13]. Por lo tanto, es adecuado conservar un único frente de metal, disminuyendo el enfriamiento rápido por el contacto entre zonas frías y el aire a temperatura ambiente.

### 5. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Han sido desarrolladas simulaciones matemáticas, relativas al procesamiento por LFC de hidrantes fabricados en hierro nodular. A partir del análisis teórico y la validación en planta, se puede resumir que los defectos encontrados son en gran medida provocados por los gases formados durante la degradación de la espuma. Este comportamiento fue evidenciado en la porosidad por gases atrapados y carbono brillante, los cuales coinciden en ubicación con los mapas de concentración de defectos obtenidos analíticamente.

De igual manera, la permeabilidad del recubrimiento refractario en el proceso LFC juega un papel radical en la calidad de las piezas fundidas, ya que una baja permeabilidad disminuye la transferencia de calor metal-espuma e incrementa la cantidad de poros en la pieza final. En tal sentido, los efectos de la permeabilidad del recubrimiento deben ser incluidos en la simulación por medio de la modificación del coeficiente de transferencia de calor metal-espuma. Por consiguiente, es prioridad implementar un método para determinar este coeficiente según las condiciones del proceso a analizar, buscando optimizar la simulación realizada.

La preservación de un frente único de avance de metal facilita la solidificación homogénea, ya que un gran porcentaje de la masa de la pieza conserva la misma temperatura antes del inicio de la solidificación. Igualmente, un solo frente de metal genera una menor probabilidad de aparición de defectos por atrapamiento de gases. En tal sentido, se encontró además, que es preciso generar nuevos diseños en los modelos de EPS, donde la prioridad principal sea la conservación de un único frente de metal, buscando obtener la mínima cantidad de gases atrapados, bajos gradientes de temperatura y homogeneidad en el flujo para zonas geométricamente complejas. Adicionalmente, un gran porcentaje de defectos se ocasiona por los productos de la degradación del modelo que viajan con el frente de metal hasta finalizar el llenado.

Es notable que el uso de herramientas computacionales, para la simulación numérica de procesos de fundición, permite una reducción en el tiempo de puesta a punto de moldes y modelos. Igualmente, se elimina el

procedimiento de ensayo error disminuyendo los costos de fabricación para nuevas piezas.

[13] M. R. Barkhudarov, "Is Fluid Flow Important for Predicting Solidification?", *Solidification Processing '97 Conference*, July 1997.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a COLCIENCIAS el financiamiento del proyecto 501-2005, CIDI-UPB-854-02/06-18, del cual hizo parte este trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] K. M. Bastian, "Casting Process Simulation: A Look Back at the 20th century", *Modern Casting*, vol. 90, pp. 12-43, Dec. 2000.
- [2] R. J. Sarjant, M R Slack. "Internal Temperature in the Cooling and Reheating of Steel Ingot". *Journal of the Iron and Steel Institute*, 1954.
- [3] H. V Martínez, G. P. Fernández, L. J. Cruz y A. F. Duque, "Desarrollo de hidrantes y collares en hierro nodular, mediante la técnica de fundición a la espuma perdida", Programa Nacional de Desarrollo Tecnológico, Industrial y calidad de Colciencias, 2007.
- [4] M. H. Warner, B. A. Miller, H. E. Littleton, "Pattern pyrolysis defect reduction in lost foam castings", *AFS Trans.* vol. 106, pp. 777-785, 1998.
- [5] X. J. Liu, S. H. Bhavnani, R. A. Overfelt, "Simulation of EPS foam decomposition in the lost foam casting process", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 182, pp. 333-342, Febrero de 2007.
- [6] C. Wang, A. J. Paul, W. W. Fincher, O. J. Huey, "Computational analysis of fluid flow and heat transfer during the EPC process", *AFS Trans*, vol. 1, pp. 897-904, 1993.
- [7] S.M.H. Mirbagheri, S. Serajzadeh, N. Varahram, P. Davami, "Modelling of foam degradation in lost foam casting process", *Materials & Design*, vol.27, 2, pp. 115-124, 2006.
- [8] Flow Science Inc, Flow-3D manual, Mem. Flow-3D Training Course, Febrero de 2006.
- [9] C. W. Hirt "Modeling the lost foam process with defect prediction", Flow Science Technical note 03-TN45-1, Abril de 1997.
- [10] C. W. Hirt y M.R. Barkhudarov, "Casting Simulation Mol Filling and Solidification Benchmark Calculation Using Flow-3D", *Modeling of Casting, Welding, and Advanced Solidification Processes VII*, pp. 935-946.
- [11] C. W. Hirt, "Predicting Defects in Lost Foam Castings", *Modern Casting*, pp 31-33, December 2002.
- [12] G. P. Fernández, H. V. Martínez, L. Cruz y A. F. Duque. "Proceso de fundición en espuma perdida para la fabricación de autopartes", *Revista DYNA. Universidad Nacional de Colombia*, vol. 74, No. 151, pp. 15-24. Marzo de 2007.