



Federación
Iberoamericana
de Ingeniería
Mecánica



8º CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERIA MECANICA

Cusco, 23 al 25 de Octubre de 2007

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

Duque Mesa A. F.^a, Herrera J.^b, Cruz L. J.^a, Fernández G. P. y Martínez H. V.^a

^a Grupo de Investigación sobre Nuevos Materiales GINUMA. Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Pontificia Bolivariana. A.A. 56006. Medellín. Colombia.

^b Cobral Ltda. A.A. 51051. Medellín. Colombia.

andres.duque@upb.edu.co

RESUMEN

La técnica de LFC (Lost Foam Casting) posee hoy día gran interés a nivel industrial para la producción de piezas de geometría compleja y excelentes acabados, con tolerancias dimensionales muy precisas. Sin embargo, la puesta a punto de dicho proceso y su optimización son realizadas en muchos casos mediante ensayo – error, encontrando muy pocos casos en los cuales se hace uso de la modelización matemática para la predicción de defectos en piezas fundidas. En este trabajo se reporta la simulación mediante Flow-3D de diversos fenómenos térmicos que dan lugar a la defectología de partes fundidas por LFC. Para la misma, se han considerado mallas simples y de bloques múltiples, buscando la mayor precisión en los modelos. En particular, el calor transferido desde el metal hasta la espuma es usado para calcular el volumen de espuma que se degrada, la velocidad y el tiempo de llenado de los moldes. Finalmente, la simulación asociada del proceso de solidificación permitió encontrar los puntos de mayor contracción y concentración de defectos, lo cual facilitó la implementación y la optimización de parámetros de proceso para la fundición por LFC de hidrantes en una empresa ubicada en Latinoamérica.

PALABRAS CLAVE: Lost Foam Casting, Simulación, CFD, Flow-3D

INTRODUCCIÓN

Con el pasar del tiempo y el incremento de herramientas computacionales, se ha facilitado la posibilidad de simular los procesos de fundición de metales. Esta brecha científica, tuvo su origen en los años cuarenta con la modelación de la transferencia de calor en modelos de fundición. La aplicación principal, durante esta época, fue la obtención de isotermas en el momento del vaciado del metal, accediendo así la predicción de puntos calientes en los moldes de fundición [1]. Sarjant y Slack [2], calcularon posteriormente la distribución interna de temperatura en lingotes de acero, usando métodos numéricos para modelar el flujo de calor por conducción. Ya en los 60's, la primera aplicación utilizando computadoras digitales fue realizada por Fursund en Dinamarca, encontrando que la difusión de calor, en el proceso de fundición en arena, afectaba el acabado superficial del acero fundido.

De otro lado, el proceso de Fundición a la Espuma Perdida (LFC) o Lost foam Casting (LFC) ha sido utilizado en los últimos años para la fabricación de un sin número de partes de diferentes complejidades y requerimientos, incluyendo piezas automotrices, aeronáuticas y de transporte de fluidos, para las cuales se requiere alta calidad y desempeño, y por lo tanto, con cero rechazos durante su manufactura. Es así como para dicha tecnología de fundición, se han venido desarrollando igualmente diferentes herramientas de simulación, que permitan predecir defectos e irregularidades durante el llenado y la solidificación de piezas.

En el proceso LFC se utiliza espuma de poliestireno (EPS) con la forma de la pieza a producir, a la cual se adicionan solidariamente un sistema de alimentación y bajante (también de EPS). Este modelo en conjunto, es recubierto con pintura refractaria y luego colocado en un recipiente metálico donde se cubre con arena. Posteriormente, el modelo de espuma es fundido y degradado químicamente al contacto con el metal líquido.

Durante mucho tiempo, las mejoras en la calidad de productos fabricados por LFC, se ha fundamentado en conocimientos empíricos, obtenidos con metodologías de ensayo error dentro de las empresas productoras. La modelación numérica 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 el caso que fue de interés en esta investigación, se han realizado una serie de simulaciones del proceso LFC mediante Flow-3D (Flow Science Inc.), en las cuales se ha utilizado el método *VOF Free-surface Tracking Method* de Hirt [9-11]. 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.

MODELAMIENTO MATEMÁTICO

Estado del arte

Para la solución del problema convectivo (Transferencia de calor, masa y cantidad de movimiento), se han propuesto diferentes modelos matemáticos, útiles en la predicción del llenado durante el LFC. En tal sentido, Warner et-al [4], han propuesto una zona de cinética, existente en el espacio formado por el frente de avance del metal y el modelo de espuma que se degrada. Sin embargo, la simulación de todo el proceso se torna laboriosa y compleja, debido a las reacciones en la zona de cinética.

A nivel computacional, para la simulación del llenado de un molde, se han utilizado herramientas CFDs (Computational Fluids Dynamics). Una de éstas técnicas es la desarrollada por Hirt y Nichols [5], denominada *Volume of Fluid* (SOLA-VOF), la cual ha sido ya implementada en Flow-3D para la simulación de todo tipo de procesos donde intervengan fenómenos de flujo. De forma similar, Wang et-al [6], plantearon un modelo matemático para simular el llenado del proceso LFC en un software para simulación de fundición tradicional, Wang asumió que la velocidad de descomposición de la espuma es una función lineal de la presión metaloestática y la temperatura del frente de avance de metal. A nivel del fenómeno, se ha establecido que durante el llenado, los gases generados por la degradación de la espuma se presurizan en el espacio entre ésta y el metal. Este fenómeno, que controla la velocidad y la calidad del flujo en el frente de metal, fue predicho en un modelo matemático, recientemente publicado por Liu

et-al [7], el cual incluyó la presión en la zona de cinética de Warner. Con su modelo, Liu et-al, pudieron cuantificar la velocidad del frente de metal para un modelo simple en 1D. Para el mismo fenómeno, Mirbagheri et-al. [8] desarrollaron un modelo que tenía en cuenta la fuerza ejercida por la presión de gas, la eliminación del mismo y la permeabilidad del recubrimiento refractario. El valor de esta fuerza fue ajustada para estudiar el proceso de llenado del molde, utilizando la técnica SOLA-VOF.

Modelo-generalidades

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 energía para el metal fundido. También incluye 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. Para esto, se incluye en el modelo el calor de transformación de la vaporización de la espuma, el cual da cuenta de la energía entregada por el metal. Debido a la condición de aislamiento que presenta la espuma, el modelo ignora la conducción térmica a través de la espuma. El modelo calcula la velocidad con la cual el frente de metal se desplaza dentro del molde por medio de la Ec. (1).

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

donde, x es coeficiente de transferencia de calor metal–espuma y ρ es el producto de la densidad por el calor específico de la espuma.

Para lograr una calidad adecuada en las piezas fundidas, en el proceso LFC es importante controlar la cantidad de gas generado durante la degradación de la espuma, así como la permeabilidad del recubrimiento refractario. Esta es además fundamental debido a que si es muy baja, se genera una alta presión de gas entre el frente de metal y la espuma, generando defectos a lo largo de la pieza. Junto con las características de la espuma (densidad, temperatura de degradación, etc.), el coeficiente de transferencia de calor metal–espuma, gobierna el proceso de llenado y como señala la Ec. 1, controla la velocidad de llenado del molde [9, 10].

El efecto de los gases acumulados en el frente de metal es tenido en cuenta por el modelo incorporado en Flow-3D con la función transferencia de calor, que viene dada por la relación entre el coeficiente de transferencia de calor metal–espuma y la gravedad, Ec (2).

$$h = HOBS \cdot (1 + \text{sign}(GHT) \cdot CGFOB) \left[\frac{GVEL}{GVEL + \frac{HOBS1}{RCOBS}} \right] \quad (2)$$

donde

$$GVEL = \sqrt{|GHT| \cdot ROUGH} \quad (3)$$

$HOBS$ es el coeficiente de transferencia de calor metal espuma, $RCOBS$ es el producto de la densidad por el calor específico, $ROUGH$ es la rugosidad definida para el modelo de espuma y $CGFOB$ es el efecto de la gravedad en la

transferencia de calor metal–espuma. La rugosidad describe las características de la interfase metal espuma .entonces el llenado es controlado por las condiciones de transferencia de calor y no por condiciones de velocidad y momentum [9].

SIMULACIÓN MEDIANTE FLOW-3D

Para la evaluación del proceso LFC, fue seleccionado como elemento de análisis una de las piezas mas complejas producida por una empresa localizada en Colombia. La parte seleccionada fue una boca de riego (hidrante) que cuenta con variación de espesores y una alta complejidad geométrica. Para esta, se realizaron diferentes simulaciones modificando el número de hidrantes por sistema de moldeo, la eficiencia de moldeo y la ubicación de las piezas. Posterior al proceso de simulación se realizaron pruebas en planta para validar los resultados de la simulación, buscando contrarrestar los mapas de concentración de defectos y los perfiles de llenado con la realidad del proceso.

Originalmente se diseñaron cuatro tipos de sistemas de moldeo, estos incluían de 1 a 4 hidrantes por modelo. Para cada uno de estos se realizó la simulación mediante Flow-3D, buscando evaluar cuál entre ellos, presentaba el mejor balance entre la eficiencia de moldeo y la probabilidad de defectos mostrada por el software. Las eficiencias de los sistemas de moldeo se listan en la Tabla 1.

Tabla 1. Eficiencias de moldeo para los modelos ensayados

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

Luego del diseño de modelos, fueron exportadas las geometrías al software Flow-3D, en éste fue realizada la parametrización de la simulación para el proceso LFC. 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 para las coordenadas xy, xz y yz de 1.01mm.

Mediante el método *Fractional Area-volume obstacle representation (FAVORtm)* [11], se validó la geometría y la estabilidad numérica del planteamiento, permitiendo optimizar el mallado con la definición de un tamaño de celda adecuado. La Figura 1 muestra el análisis realizado por medio del método *FAVOR* para el modelo de 4 hidrantes. Con el mismo, se facilitó la identificación de discontinuidades en el modelo reconocido por la malla.

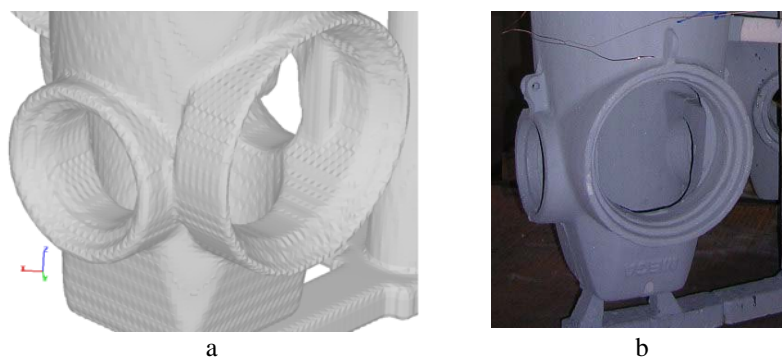


Figura 1. Método FAVOR para modelo de 4 hidrantes por modelo: (a) Sólido creado digitalmente por la definición de malla en Flow-3D y (b) Modelo de espuma real

En la Figura 2 se observa que algunas áreas del modelo no quedan bien definidas porque el tamaño de las celdas no logra una alta precisión. Por tal motivo, fue definida una frontera de presión en el lado superior de la malla, se determinó además un valor de presión equivalente para un vaciado a presión atmosférica. La Figura 2 muestra el diseño de malla con las fronteras definidas. Las fronteras marcadas como -S- indican una frontera simétrica por la cual se permite el flujo de calor.

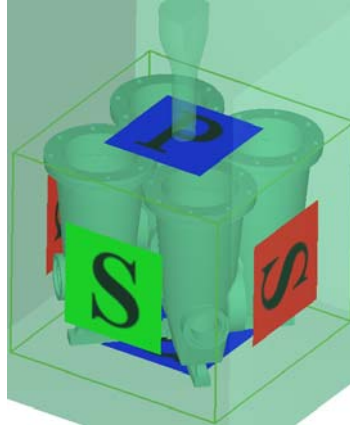


Figura 2. Diseño de fronteras del sistema

Los parámetros usados en la simulación (Tabla 2), se basan 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, hierro, etc.).

Tabla 2. Parámetros y propiedades utilizadas para la simulación en Flow-3D

Propiedad	Valor
Espuma	
Densidad EPS	1200 [12]
Conductividad térmica Watt/m*K [10]	0.039
Coefficiente de transferencia de calor Watt/m ² K	18.67e ²
Densidad por calor específico (gm/cm/s ² /K)	3.5e5 [13]
Temperatura inicial K	303
Metal	
Densidad metal liquido (kg / m ³)	7000
Densidad metal sólido (kg / m ³)	7160
Conductividad térmica metal liquido (W / m K)	2.49e ²
Conductividad térmica metal sólido (W / m K)	2.57e ²
Calor específico metal liquido (J / kg K)	6.9e ²
Calor específico metal sólido (J / kg K)	6.7 e ²
Temperatura de liquido (°C)	1663
Temperatura de sólido (°C)	1453
Viscosidad (Pa-s)	0.0078
Expansión térmica (m/m/K)	
Calor latente de fusión (J/Kg)	2.72e5s
Arena	
Conductividad térmica arena Watt/m*K	0.65
Densidad * Calor específico (gm/cm/s ² /K)	1.5 e ⁷ cgs
Temperatura inicial K	303
Coefficiente de transferencia de calor (Transferencia de calor al fluido) Watt/m ² K	2.0e ² cgs

ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Los defectos encontrados en los hidrantes producidos durante los ensayos de validación, muestran que los gases formados durante la degradación de la espuma son los principales generadores de defectos. Evidenciándose en gran cantidad poros por gases atrapados y carbono brillante, los cuales coinciden en ubicación con los mapas de concentración de defectos obtenidos analíticamente.

Llenado del molde

Generalmente en el proceso LFC la temperatura de la arena y la espuma se encuentra entre 40°C a 50°C, mientras que la temperatura del hierro nodular para la producción de piezas esta alrededor de 1500°C [14]. 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. Este fenómeno fue detectado por la formación de un barril en esta zona, de difícil evacuación a través del recubrimiento refractario. Lo anterior, hace que se forme una mezcla de arena, restos de espuma y metal que finalmente quedan embebidos en la pieza.

De otro lado, la simulación presentó una presión que excedía los límites de convergencia del software durante el llenado del modelo, lo cual mostraba un retroceso del fluido o pérdidas de fluido durante el llenado. La Figura 3 muestra el fenómeno presentado durante la simulación y los resultados de los ensayos realizados para los diferentes hidrantes.

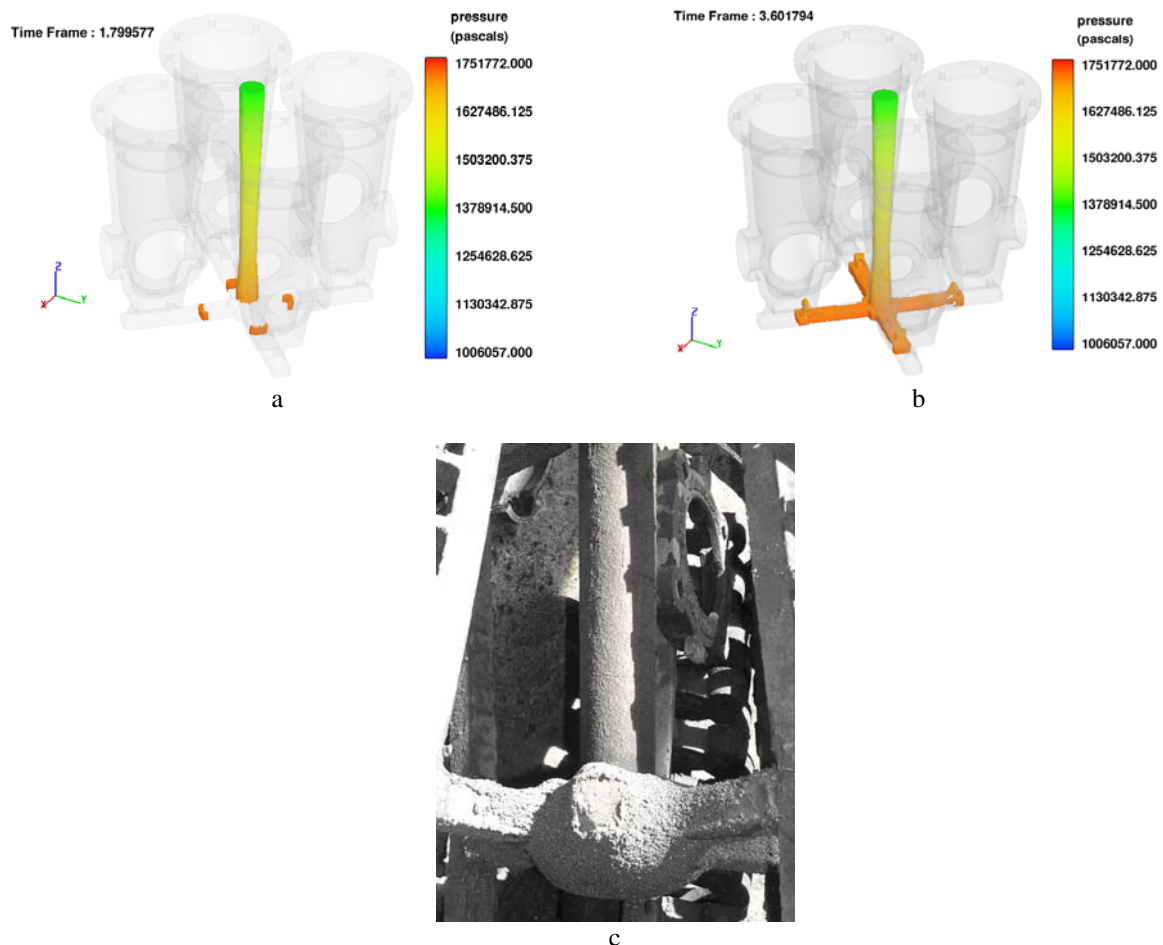


Figura 3. Comparativo simulación vs producción de hidrantes por LFC: (a) Pérdida de la continuidad en el flujo de metal por excesiva presión durante el llenado, (b) Presión excesiva durante la simulación en Flow-3D del modelo de 4 hidrantes y (c) Barril formado durante el vaciado en la producción de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

Para evitar el desmoronamiento inicial y la formación del barril, 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. Para ello, el sistema de alimentación debió ser pintado con una pintura de 500cp por debajo de la pintura usada en la pieza objetivo. Se encontró 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].

La simulación realizada para el modelo de un hidrante (Figura 4) muestra un enfriamiento rápido, que crea un alto índice de concentración de defectos en las zonas de la brida de conexión y las salidas de agua. Además, existe 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.

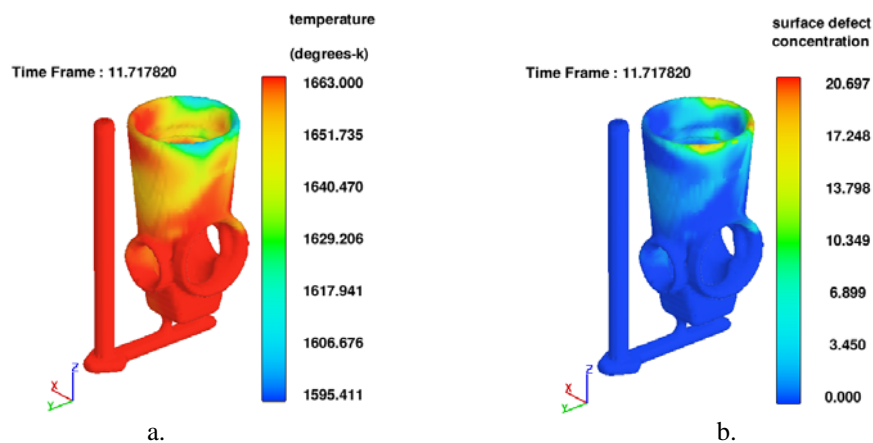


Figura 4. Distribución de temperatura durante el procesamiento de hidrantes por LFC

La simulación del modelo de 2 hidrantes mostró una superficie de concentración de defectos muy extensa a través de la pieza. En la Figura 5 se identifican 3 frentes de metal en la pieza durante el llenado, 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.

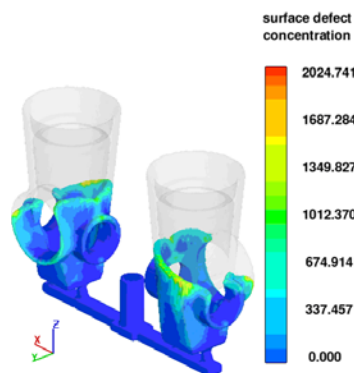


Figura 5. Simulación del llenado para el modelo de 2 hidrantes

Los resultados de la simulación para el modelo de 3 hidrantes mostraron igualmente abundantes superficies de concentración de defectos en la zona de 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. 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. La Figura 6 muestra la simulación realizada para el modelo de 3 hidrantes, comparativamente con los resultados en planta.

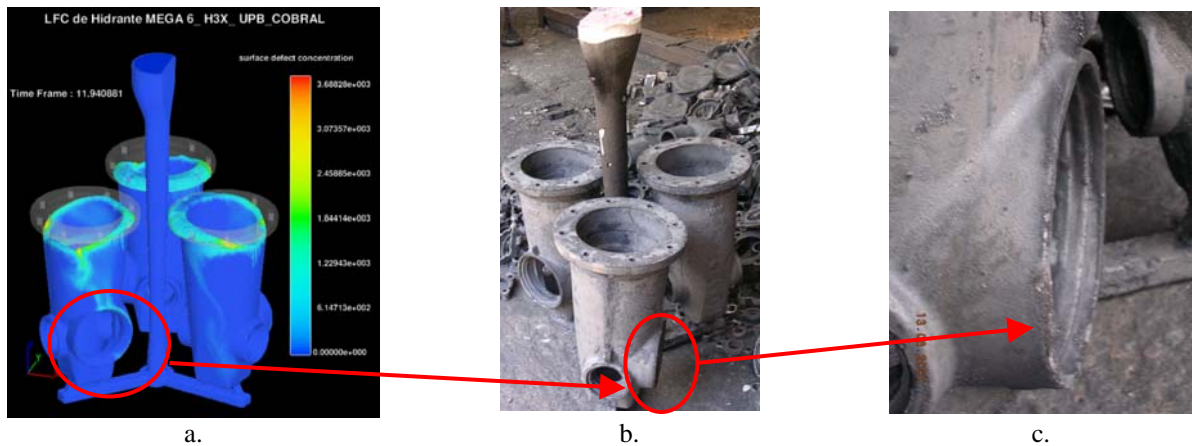


Figura 6. Simulación y producción de hidrantes con modelos de 3 piezas. a. simulación numérica, b. ensayo en planta y c. detalle de porosidad generada en la salida de agua principal del hidrante.

En la Figura 7 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 el software. 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 el hecho de que los gases y productos de la degradación de la espuma, son desplazados hasta la zona que es llenada en el último instante, lo cual hace que las propiedades mecánicas del hierro nodular de la brida de sujeción disminuyan y afecten la durabilidad del producto.

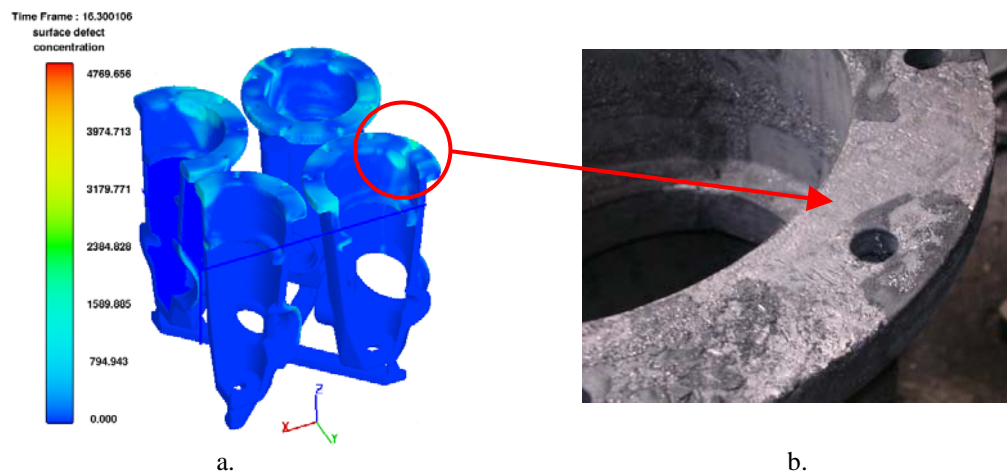


Figura 7. Comparativo simulación vs producción de 4 hidrantes por LFC: (a) Concentración de defectos en la superficie del modelo (Flow-3D) y (b) Defecto de carbono brillante encontrado en la pieza fundida

Solidificación

Según los resultados analíticos (Figura 8), 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. 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 [15], 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.

La preservación de un frente de metal único 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.

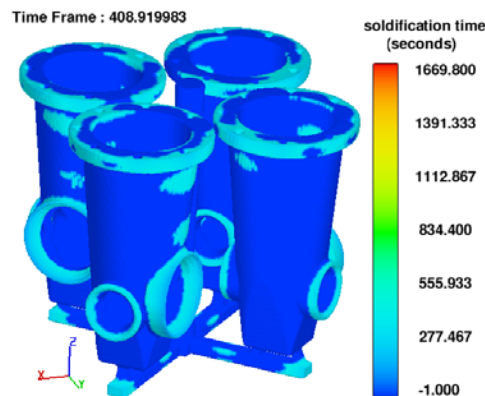


Figura 8. Tiempo de solidificación para el modelo de 4 hidrantes

CONCLUSIONES

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.

Mediante simulaciones en Flow-3D se pudo predecir que 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. Estos se alojan y disminuyen las propiedades del metal.

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.

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 geoméricamente complejas.

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.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a COLCIENCIAS el financiamiento del proyecto CIDI-854-02/06-18, del cual hizo parte este trabajo. Igualmente a la Universidad Pontificia Bolivariana por el financiamiento para la divulgación de resultados del mismo.

REFERENCIAS

1. K. M. Bastian, Casting Process Simulation: A Look Back at the 20th century, *Modern Casting*. http://www.moderncasting.com/archive/Simulation/Simulation_01.asp.
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 Martinez, 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, Reporte proyecto, *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.* 106 (1998) 777–785
5. C. W., Nichols, B. D., Volume Of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, *Journal Computational Physics*, vol. 39, pp.201-225, Enero de 1981.
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*, vol1, pp.897–904, 1993.
7. 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
8. S.M.H. Mirbagheri, S. Serajzadeh , N. Varahram , P. Davami. Modelling of foam degradation in lost foam casting process, *Materials & design*, vol.27,No.2, pp. 115-124, 2006.
9. Flow Science inc, Flow-3D manual, *Mem. Flow-3D Training Course* , Febrero de 2006
10. C.W. Hirt y M.R. Barkhudarov, Modeling the lost foam process with defect prediction, *Flow Science Technical note 03-TN45-1*, abril de 1997
11. 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
12. H. V Martinez, G. P. Fernandez, L. J. Cruz y A. F. Duque, Optimización del proceso de fundición en espuma perdida para la fabricación de autopartes de exportación, Reporte final de proyecto, *Convocatoria Nacional SENA-COLCIENCIAS para el concurso de proyectos de desarrollo científico y tecnológico - Modalidad recuperación contingente – 2002*.
13. C.W. Hirt. Predicting Defects in Lost Foam Castings, *Modern Casting*, pp 31-33, December 2002.
14. 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. Medellín, Marzo de 2007. (ISSN 0012-7353).
15. M. R. Barkhudarov, Is Fluid Flow Important for Predicting Solidification?, *Solidification Processing '97 Conference*, July 1997.