

# PROCESO DE FUNDICIÓN EN ESPUMA PERDIDA PARA LA FABRICACIÓN DE AUTOPARTES

## LOST FOAM CASTING PROCESS FOR AUTOMOTIVE PARTS MANUFACTURE

PATRICIA FERNÁNDEZ M.

*Grupo de Investigación sobre Nuevos Materiales, Universidad Pontificia Bolivariana, patricia.fernandez@upb.edu.co*

VLADIMIR MARTÍNEZ

*Grupo de Investigación sobre Nuevos Materiales, Universidad Pontificia Bolivariana.*

ANDRÉS DUQUE

*Grupo de Investigación sobre Nuevos Materiales, Universidad Pontificia Bolivariana*

JAVIER CRUZ

*Grupo de Investigación sobre Nuevos Materiales, Universidad Pontificia Bolivariana.*

Recibido para revisar 21 de Marzo de 2006, aceptado 11 de Julio de 2006, versión final 8 de Noviembre de 2006

**RESUMEN:** El proceso de fundición a la espuma perdida (FEP), es uno de los procesos de fundición preferidos en la actualidad cuando se trata de fabricar piezas de geometría intrincada, estrechas tolerancias dimensionales y buenos acabados superficiales. Cobral Ltda. es una empresa del sector metalmecánico situada en la ciudad de Medellín que desde el año 2000 se ha dedicado a la producción de piezas automotrices en fundición gris y nodular por el proceso FEP. Sin embargo, desde la puesta en marcha del proceso se obtuvieron altos porcentajes de rechazo, entre el 20% y el 50%. El estudio de las variables del proceso y su adecuado control en las diferentes etapas, permitió la minimización de los porcentajes de rechazo y un aumento en la productividad de la planta. Se describen las etapas del proceso FEP y algunos de los aspectos más relevantes de la optimización realizada.

**PALABRAS CLAVE:** Fundición a la espuma perdida, Defectos de fundición, Poliestireno expandido, Hierro gris, Autopartes, Pruebas mecánicas.

**ABSTRACT:** At present, *Lost Foam Casting (LFC)* is one of the foundry processes preferred to manufacture intricate geometry, narrow dimensional tolerances and good superficial finished. Cobral Ltda. is a metal-mechanic sector's company located in Medellín City and since the year 2000 is dedicated to produce automotive parts in grey and nodular iron by LFC process. However, from the process was starting up, high percentages of rejection was obtained, between 20% and 50%. The study of the process variables and their proper control in the different stages, allowed the rejection percentages minimization and an increase in the plant productivity. The *LFC* process stages and some relevant aspects about the optimization that was carried out, are described.

**KEY WORDS:** Lost foam casting process (LFC), Casting defects, Expandable polystyrene, Gray iron, Automotive parts, Mechanical tests.

### 1. INTRODUCCIÓN

Aunque el uso de modelos de espuma fue patentado el 15 de abril de 1958 por H. F. Shroyer y su desarrollo a nivel comercial se llevó a cabo por Merton C. Flemings en 1962, los procesos de fundición que usan moldes de

arena sin aglutinantes son vías alternativas y diferentes a los procesos convencionales de moldeo con arenas verdes [1-2]. Dentro de este conjunto de nuevos procesos se destaca el proceso de fundición en espuma perdida (FEP) o *Lost Foam Casting (LFC)*, que ha comenzado a adquirir importancia gracias a la posibilidad que

ofrece en la fabricación de geometrías complejas y de tolerancias estrechas. Solo alrededor de 32 plantas de fundición a nivel mundial tienen implementado este proceso de manera eficiente, en países como Francia, Japón, Canadá y Estados Unidos [3]. Cobral Ltda. es la única planta de FEP en Latinoamérica, lo cual dio una mayor relevancia a la necesidad de optimizar el proceso FEP instaurado en dicha empresa para la producción de discos y campanas de freno. Una de las metas planteadas fue la de tener una calidad tal que los discos y campanas de frenos tuvieran las condiciones para ser exportables a otros países.

Con el fin de tener una visión completa del proceso FEP, se dará una breve revisión a los conceptos básicos que esta técnica comprende, para luego dar paso a las actividades más importantes llevadas a cabo durante el proyecto y sus respectivos resultados.

## 2. PROCESO FEP [1, 4-6]

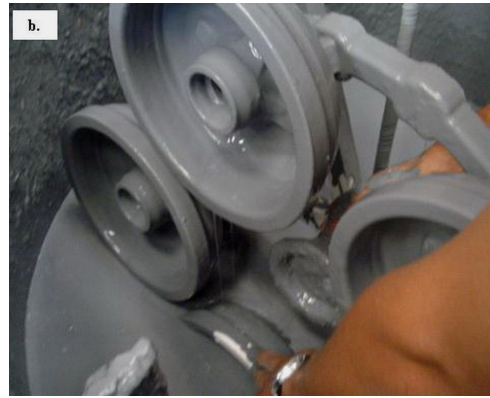
El proceso FEP consiste en la generación de una pieza metálica a partir de un modelo de espuma de poliestireno expandido (EPS). La etapa inicial tiene como objetivo la obtención de los modelos de las piezas a fabricar en EPS, los cuales van luego a ser ensamblados a un árbol de modelos (figura 1a). El término árbol se refiere al conjunto que contiene los modelos pegados al sistema de alimentación y las entradas que también están fabricados en EPS, de esta manera se pueden fundir varias piezas en una sola colada. Luego el árbol ensamblado es recubierto por una capa de pintura refractaria (figura 1b), que posteriormente debe ser secada en un horno a temperatura controlada entre los 50 °C y 60 °C por un período no inferior a 2 horas.

En la figura 1c se ilustra la posición del sistema de alimentación de la colada a los árboles de modelos que se encuentran totalmente secos y estabilizados; y en la figura 1d se muestra cuando son introducidos en un recipiente de moldeo donde se procede a tapar con arena sin aglomerar, la cual es compactada y distribuida de manera uniforme por toda la geometría de las piezas moldeadas mediante vibración, figura 1e. Una vez compactada la arena, se realiza el vaciado del metal líquido dentro del molde sin extraer en ningún momento el modelo de espuma recubierto con pintura refractaria. Cuando se realiza el vaciado; el metal fundido evapora la espuma, los gases generados se liberan a través de la arena y el metal solidifica tomando el lugar donde estaba ubicado el modelo. Finalmente, la arena es retirada mediante basculado del recipiente; momento en el cual es retirado también el árbol con las piezas fundidas para su limpieza y control inicial. La arena pasa a un sistema de enfriamiento para ser recirculada.

En piezas que presentan complejidad para ser fundidas, el proceso FEP es utilizado mundialmente con gran versatilidad; obteniéndose mediante esta técnica piezas con requerimientos dimensionales y geométricos especiales que no podrían ser fundidas con otras técnicas. Adicionalmente, las piezas fundidas por la técnica de FEP presentan un buen acabado superficial y unas tolerancias dimensionales muy estrechas logrando una calidad insuperable por otras técnicas de fundición [7-9].



a) Ensamble de árbol con modelos en EPS



b) Recubrimiento con pintura refractaria



c) Árbol completo con bajante



e) Llenado y moldeo con arena seca



d) Árbol en la caja de moldeo

**Figura 1.** Etapas generales del proceso FEP  
**Figure 1.** LFC process general stages

### 3. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO FEP

Para la optimización del proceso FEP se tenían dos objetivos: la minimización de los porcentajes de rechazo y el aumento de la productividad de la planta. Se planteó una metodología consistente en las diferentes actividades que se describen a continuación [10-14].

#### 3.1 Diagnóstico inicial

El proyecto de investigación se inició con la realización de un diagnóstico del proceso que se estaba llevando a cabo en la empresa Cobral Ltda. desde los inicios de su producción mediante la técnica de FEP, con lo cual fue posible detectar las variables involucradas en cada etapa y como estaban siendo manejadas por el personal de la planta. Esta actividad incluyó el estudio de materias primas y sus proveedores, el análisis de rechazos y de los defectos involucrados en los mismos [13].

Para cada una de las etapas del proceso, se obtuvieron los valores de cada una de las variables utilizadas, los cuales fueron analizados a fin de determinar si eran los adecuados o estaban por fuera de lo especificado. En la actividad correspondiente a la implementación de mejoras, se mostrarán los diferentes cambios que en gran porcentaje fueron generados por el diagnóstico inicial.

#### 3.2 Identificación de defectologías

En cuanto a las defectologías propias del proceso de FEP, éstas pueden provenir por dos vías: las generadas en la etapa de producción de los modelos de espuma y las que están relacionadas con el proceso de fusión del metal. Mediante un listado completo de las defectologías obtenidas con su correspondiente registro fotográfico, fue posible obtener un cuadro de defectologías para ambos casos, donde se describen los defectos más típicos con sus causas y posibles soluciones. A continuación se hará una breve descripción de las defectologías más relevantes obtenidas en el proceso FEP [15-26].

#### 3.2.1 Defectos generados en el proceso de fabricación del modelo de espuma

La fabricación de las secciones de espuma es considerada como una de las etapas más críticas del proceso de FEP, pues del adecuado control de cada una de sus variables depende la obtención de un modelo en EPS que sea la replica exacta de la pieza a fundir. Las defectologías típicas de este proceso son: el llenado incompleto del modelo, superficie con perlas con fusión deficiente, rebabas, poliestireno crudo, superficies quemadas, deformidades, defectos de eyección del modelo, variaciones dimensionales del modelo, contaminación del modelo y daño por almacenamiento, manipulación y transporte. En la figura 2 se ilustran tres ejemplos de los defectos de mayor frecuencia: a) Rebabas, b) Superficie quemada por sobrecalentamiento y c) Desnivel.

#### 3.2.2 Defectos debidos al proceso de fundición

Entre los defectos debidos al proceso de FEP y dejando de lado aquellos defectos típicos producidos por las técnicas de fundición convencionales, se encontraron los siguientes: carbono brillante, inclusiones de carbono, incrustaciones de arena y penetración del metal, inclusiones no metálicas, porosidad debida a la pirólisis del modelo, distorsión del modelo, erosión del modelo, fracturas en caliente, colapso del molde y desmoronamientos. En la figura 3 se muestran tres de los defectos mencionados de mayor aparición en las piezas analizadas: a) Grafito brillante, b) Inclusiones de arena y c) Superficie rugosa causada por el modelo de EPS.

### 3.3 Implementación de mejoras

#### 3.3.1 Fabricación del modelo de espuma y ensamble [27-31]

El polímero utilizado para la fabricación de los modelos en espumas es el poliestireno expandible (EPS), el cual presentó un buen comportamiento. El EPS es suministrado en forma de pellets con una densidad aproximada de  $640 \text{ kg/m}^3$  y con un contenido aproximado de un 5% en pentano (agente expansor que actúa durante la preexpansión de la espuma), valores

que deben ser chequeados antes de iniciar el proceso de fabricación de las secciones de espuma. Para que el EPS sea útil en la fabricación de los modelos, mediante un proceso

de preexpansión se reduce su densidad hasta alcanzar un valor entre 16-27 kg/m<sup>3</sup>.



**Figura 2.** Defectos típicos en los modelos de espuma de poliestireno:  
**Figure 2.** Typical defects of polystyrene foam patterns



**Figura 3.** Defectos debidos al proceso de fundición  
**Figure 3.** Defects caused by the foundry process

Unas de las mejoras instauradas en esta etapa es el pesaje del poliestireno pre-expandido como parte del control de calidad luego de ser descargado. Posteriormente, el PS preexpandido es almacenado con el fin de enfriarlo y permitir su estabilización durante un tiempo entre 6 a 12 horas. Mediante el adecuado manejo del tiempo y de la temperatura del preexpansor, se obtiene el control de la densidad del modelo, parámetro que debe permanecer estrictamente en un margen del 2 % del valor determinado.

Con el fin de evitar el fenómeno de post-expansión experimentado por los modelos de espuma durante el período de enfriamiento, el EPS conformado se deja enfriar en la cavidad de moldeo, generalmente se utiliza aspersión de agua para ayudar al proceso. Una vez el modelo este frío puede ser retirado de la prensa de moldeo.

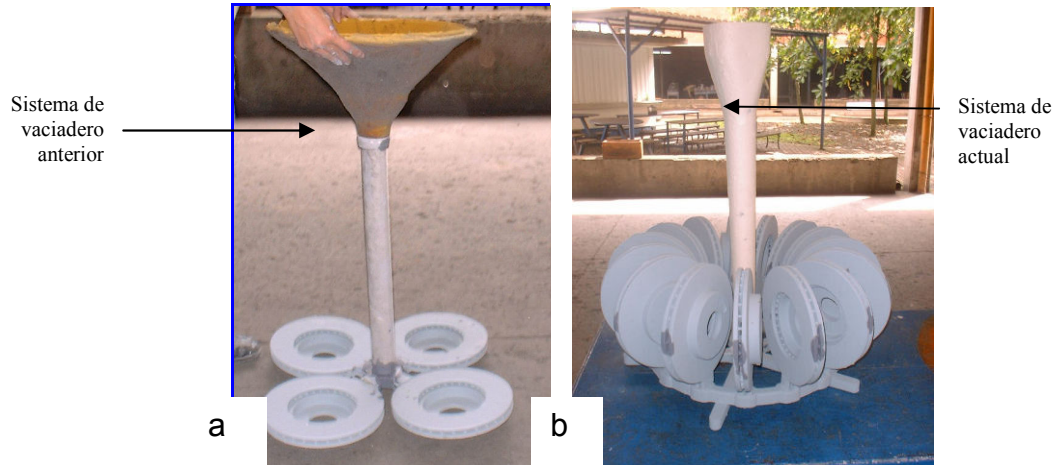
Para el ensamble de los árboles es utilizada una pega de tipo polimérico, la cual es calentada entre 120 °C y 130 °C y aplicada manualmente para la unión de múltiples modelos de EPS con los vertederos y sistemas para la posterior distribución del metal. Para el control de calidad de las secciones de espuma previamente a su ensamble, se adecuaron sistemas de luz blanca en las mesas de pegado. Por otra parte, el chequeo de las uniones se realizó mediante la rotura aleatoria de un árbol ensamblado de manera que se visualizará que el daño no se diera por la región de la unión con la pega.

El cambio realizado en la cantidad y distribución de los discos y campanas en la configuración del árbol fue uno de los mayores logros como mejora implementada. Este cambio consistió en pasar de una configuración inicial de un árbol de discos con una cantidad de 4 unidades dispuestas de



manera horizontal a un árbol con una cantidad de 15 unidades distribuidas de manera vertical, como se muestra en la figura 4. En el caso de las campanas, inicialmente se tenían 4 unidades por árbol y se implementó una nueva distribución

con 10 campanas, aunque se continuó con la disposición de manera horizontal. El cambio en la configuración de los árboles contribuyó ostensiblemente al aumento en la productividad y rendimiento de la planta [12, 32].



**Figura 4.** Disposición del árbol modelos de discos de freno a) antes y b) después  
**Figure 4.** Disposition of breaker wheel patterns tree a) before b) after

### 3.3.2 Aplicación del recubrimiento refractario a los modelos [1-2, 33-37]

Fue establecido que para la selección del recubrimiento refractario es importante tener en mente que éste debe ser compatible con la arena de moldeo, poseer buenas características de transferencia de calor y tener un bajo costo en lo posible. Adicionalmente, el recubrimiento deberá cumplir con las funciones de crear una barrera entre la superficie lisa del modelo y la arena del molde, y permitir la permeabilidad controlada para facilitar la salida de los gases durante la vaporización del modelo de espuma en el proceso de vaciado del metal.

En el caso de la pintura refractaria, se determinaron condiciones y tiempos de almacenamiento de manera que no aparecieran hongos, los cuales son muy frecuentes en este tipo de productos. Antes de que el recubrimiento refractario pueda utilizarse, éste debe ser mezclado con agua agitada mediante un mezclador durante unos 30 minutos, llevando un control al tiempo y velocidad de mezclado y realizando un chequeo cada 10 a 15 minutos a los valores de densidad entre 60 a 70 Baumé.

Existen varios métodos para la aplicación del recubrimiento refractario, en la planta de Cobral éste es aplicado mediante inmersión de la pieza en la pintura refractaria, método que es considerado más rápido que la aspersión o el uso de la brocha. El recubrimiento aplicado posee altos porcentajes de humedad para el proceso FEP, por lo tanto el modelo recubierto debe ser sometido a un secado en horno, el cual debe realizarse colocando los modelos de manera que se sequen uniformemente mediante aire forzado a una temperatura moderada entre 50 °C y 60 °C y un tiempo entre 2 a 6 horas.

### 3.3.3 Vaciado del metal [1-2, 5-6, 37-42].

El estudio granulométrico de la arena utilizada permitió determinar que el tipo de arena que se estaba utilizando no era la óptima para el proceso FEP. Para el moldeo de fundiciones férreas, la arena más adecuada es la sílice subangular con un índice de finura de 35-45 AFS. Puesto que la arena para el moldeo se utiliza seca y en ausencia de aglutinantes, su reciclabilidad se convierte en una de las ventajas más sobresalientes del proceso FEP. Es por ello que otro frente de trabajo se dirigió hacia el mejoramiento de las condiciones de reciclabilidad de la arena, la cual paso a ser

enfriada antes de ser recirculada y se implementó un control para el tamaño de grano para evitar los finos generados por el uso. Con el estricto control del tamaño de grano, temperatura y porcentaje de humedad en la arena, se pueden lograr moldes de una alta permeabilidad evitando defectologías como la porosidad por productos gaseosos.

El análisis granulométrico también permitió el control del inoculante y del tipo de escoriante utilizado. De igual manera, fue necesario establecer la composición química apropiada para el tipo de material fundido.

Por otra parte, el vaciadero utilizado desde un principio estaba compuesto por tres piezas elaboradas en EPS y cáscara cerámica. Debido a que algunos de los defectos encontrados en las piezas fundidas se encontraban en los puntos de unión de este sistema, se optó por cambiarlo por un sistema que consta de una sola pieza y fabricado en un material de fibra que no se desmorona durante el vaciado. En la figura 4 se muestran ambos tipos de vaciaderos.

Es fundamental que durante el vaciado de las piezas en el molde de FEP, el vaciadero de la colada permanezca completamente lleno con el metal líquido. Es necesario que al momento del vaciado se aseguren velocidades de alimentación que permanezcan en promedios de 25 a 30 libras de material por segundo y que la temperatura de vaciado esté alrededor de los 1450°C. Debía garantizarse una presión hidrostática positiva de metal fundido en todo momento, cualquier falla puede resultar en un colapso del molde. La temperatura y el tiempo de vaciado son factores críticos y deben ser controlados con la misma precisión que se usa en otros métodos de fundición. Para esta etapa se implementaron pirómetros para control de temperatura.

#### 4. RESULTADOS OBTENIDOS

Para la caracterización y evaluación técnica de la producción mejorada fueron realizadas una serie de pruebas, químicas, mecánicas, dimensionales y de producto; así como también se realizaron ensayos no destructivos para detección de defectologías. Para la recolección de los datos

obtenidos en las pruebas realizadas, fue necesario el diseño de los formatos apropiados. Para la evaluación de las campanas y los discos de frenos se tuvieron en cuenta los aspectos que eran solicitados para la certificación, para lo cual fue necesario cumplir con diferentes especificaciones reunidas en éste caso por las normas Venezolanas Covenin las cuales todas fueron cumplidas satisfactoriamente [13, 18, 44]. A continuación se describen algunas de ellas.

**Metrología: dimensiones y tolerancias:** Tanto las campanas de frenos como los discos se encontraron dentro de los intervalos especificados para dimensiones y tolerancias. De igual manera, se fabricaron tres tipos de galgas para la medición de espesores y diámetros para su rápida utilización en los puestos de control de calidad.

**Composición Química:** En la composición química se incluyeron los valores medidos para los porcentajes de carbono equivalente, los cuales se encontraron dentro de los valores especificados entre 3.2 y 3.7.

**Microestructura:** La microestructura que debía presentar la fundición utilizada para la fabricación de los discos y campanas de freno, debía cumplir por norma: a) el grafito presente y b) el tipo de matriz presente. Las muestras evaluadas se encontraron dentro de la especificación mostrando, tanto para campanas como para discos, un contenido de grafito correspondiente al tipo A y la matriz de perlita laminar 100%.

**Resistencia a la tracción:** Para el grado de fundición FG250 se debe cumplir con una resistencia a la tracción como mínimo de 25,0 kg/mm<sup>2</sup>. Tanto las campanas como los discos evaluados se encontraron dentro de lo especificado con valores entre los 30 kg/mm<sup>2</sup> y los 35 kg/mm<sup>2</sup>.

**Flexión Estática:** Este parámetro deberá resistir para el grado de fundición FG250 como mínimo una carga de rotura transversal de 1112 kg corregida para las probetas tipo B y de acuerdo a la resistencia a la tracción de 25 kg/mm<sup>2</sup> para las campanas y, una carga de rotura transversal

corregida de 593 kg para las probetas tipo A y de acuerdo a la resistencia a la tracción de 25 kg/mm<sup>2</sup> para los discos. Las muestras evaluadas se encontraron dentro de especificación tanto para las campanas como para los discos.

**Deflexión:** La deflexión deberá resistir para el grado de fundición FG250 como mínimo 6,10 mm. Las muestras evaluadas se encontraron dentro de especificación, mostrando valores entre 6.5 y 7.7 mm.

**Dureza Brinell:** En las campanas y discos de frenos mecanizadas para uso en vehículos automotores con una microestructura de grafito laminar tipo A y una matriz perlítica laminar, la dureza deberá estar en el intervalo entre 207 – 255 HB. Las muestras evaluadas se encontraron dentro de especificación con los siguientes valores en HB: 236 a 246 y 211 a 222, para las campanas y los discos, respectivamente.

**Balaceo Dinámico o Estático:** El desbalanceo máximo presentado por las muestras evaluadas se encontró dentro de la especificación de un valor máximo de 90 g-cm para las campanas y de 50 g-cm para los discos.

**Radiografía:** Se utilizó principalmente para detectar grietas por contracción, grietas por golpe y defectos internos como rechupes, poros y algunas inclusiones que no fueran perceptibles en el microscopio. Se tomaron 350 radiografías, 270 a las campanas y 80 a los discos, todas fueron realizadas y calificadas bajo la norma ASTM E446.

**Metalografía:** Debido a que los defectos en las piezas fundidas se presentaron en forma reiterativa y afectaban el proceso de maquinado posterior al de fundición, se practicó una evaluación en los discos de freno fabricados por FEP, la cual consistió en llevar tres secciones de un disco de freno al microscopio y evaluar los defectos que se presentaban por la composición química del metal y algunas impurezas microscópicas. Las partículas de inclusión de arena fue el defecto de mayor aparición. También se encontraron partículas no disueltas de post inoculante y adheridas a éste se hallaron partículas de arena y una gran concentración de

carburos. Igualmente, se encontraron porosidades por contracción en algunas de las muestras evaluadas.

## 5. CONCLUSIONES

El conocimiento del proceso FEP con una mayor claridad, permitió el control de cada una de las variables, posibilitando a su vez una disminución bastante significativa en las piezas de rechazo por lote producido, pasando del 20% para campanas y el 50% en discos de freno, a niveles del 5% en promedio.

Se determinó que los parámetros de control del proceso FEP deben ser ensayados de manera independiente y luego en forma global en producciones piloto. De igual manera, es totalmente necesario el control de calidad de todas las materias primas, del modelo en EPS, del sistema de vaciado, la pieza fundida, entre otras. En este caso en particular, algunas de las materias primas como bajantes, pintura refractaria y pegante fueron cambiadas totalmente.

Por otra parte, la documentación de los defectos permite un análisis más rápido de los mismos al igual que las posibles soluciones. La elaboración de fichas con las especificaciones de cada uno de los insumos y los instructivos de proceso marcaron la pauta para mantener la optimización lograda de manera constante. La capacitación del personal es una herramienta clave para el buen desarrollo del proceso FEP en cada una de las etapas.

El mantenimiento de los equipos debe ser lo más estricto posible, especialmente en la pre-expansora; ya que es la encargada de la elaboración del modelo en espuma. Los equipos deben ser automatizados para un mayor control de las variables del proceso.

El aumento de la eficiencia y productividad en el proceso se logró mediante el rediseño del árbol. En términos de productividad, el proyecto permitió a la empresa la utilización de su capacidad real en un 100% y garantiza el suministro de piezas para la industria automotriz. Las siguientes cifras e indicadores más notables, evidencian el éxito del proyecto: los porcentajes



de piezas con no conformidad en el proceso de mecanizado pasaron del 9% al 1.2%, el aprovechamiento de la placa aumentó del 52% al 67%, la cantidad de hierro por molde paso de 38.4 kg a 115 kg y la capacidad de moldeo por hora se incrementó en un 300%.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a COLCIENCIAS por el financiamiento del proyecto N°1210-08-13155 del cual hace parte este trabajo. De igual manera, los autores agradecen a la empresa COBRAL LTDA. por la confianza depositada en el grupo GINUMA de la UPB para la realización de este proyecto.

## REFERENCIAS

- [1]. RAYMOND W. MONROE. Expendable pattern casting. Illinois, Estados Unidos: American Foundrymen's Society Inc, 1992.
- [2]. PIWONKA S., THOMAS. Unbonded sand molds. Molding and Casting Processes. Alabama. 1990.
- [3]. CARTAGENA P., ANDRÉS M Y CHAMORRO A., JUAN C. Fundición a la espuma perdida (FEP). [Trabajo de grado], Medellín, Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana, 2003.
- [4]. GROOVER, MIKELL P. Fundamentos de manufactura moderna. México Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., 1997.
- [5]. ASM International. Metals handbook. 2ª ed. Ohio: Materials Park, 1998.
- [6]. Austin Group LLC. Available: <http://www.lostfoam.com/process/pdf/ironcasting.pdf>. [citado 9 de Febrero de 2003]
- [7]. AFS/Cast Metals Institute, Inc. Lost Foam Casting Process and Applications. Available: <http://www.castmetals.com>. [citado 26 de Febrero de 2003].
- [8]. Compiled Literature Series. Evaporative Pattern Casting. Volume 1. USA: AFS: American Foundrymen's Society.
- [9]. Cleary, Terry. Lost Foam Casting. Available: [http://www.eere.energy.gov/power/tech\\_access/docs/r\\_99\\_541.cfm](http://www.eere.energy.gov/power/tech_access/docs/r_99_541.cfm). [citado 3 de Julio de 2003]
- [10]. DUQUE, ANDRÉS. Optimización del proceso de *lost foam casting* para la obtención de autopartes de exportación. Memorias INGENIAR 2005. UPB Medellín, Mayo 2005.
- [11]. FERNÁNDEZ, P., MARTÍNEZ, H. V. Y CRUZ, L. J. Optimización del proceso de *lost foam casting*. IV encuentro regional de semilleros de investigación. Memorias RedCOLSI, UPB Medellín, Mayo 2005.
- [12]. ----- . Implementación de mejoras en un proceso de fabricación de discos y campanas de frenos por fundición a la espuma perdida. Memorias IX Jornadas de investigación, CIDI – UPB Medellín, 2005.
- [13]. Informe de Dignóstico Planta Cobral Ltda. Documento interno empresa Cobral Ltda., Medellín: agosto de 2004.
- [14]. Fundición A La Espuma Perdida, una técnica que se impone en Colombia, en: Portafolio, Diciembre 23 de 2004.
- [15]. Lost Foam Simulation Helps Reduce Lost Foam Defects. Available: [http://www.moderncasting.com/archive/ProductInnos/Prod\\_053\\_03.asp](http://www.moderncasting.com/archive/ProductInnos/Prod_053_03.asp). [citado 16 de Junio de 2003]
- [16]. U.S. Department Of Energy Office of industrial technologies energy efficiency and renewable energy. Improvement Of The Lost Foam Casting Process. Available: <http://www.oit.doe.gov>. [citado 20 de Marzo de 2003].
- [17]. U.S. Department Of Energy. Office of industrial technologies energy efficiency and renewable energy. Advanced lost foam casting.
- [18]. Standard Renault 02-21-000: Defect in iron foundry. Francia: Normalisation Renault Automobiles, mayo de 2000.
- [19]. ECHEVERRIA, RICARDO. Defectología. Chile: Universidad Nacional de Comahue, Facultad de Ingeniería, 2002.
- [20]. FERNÁNDEZ, JOSEFA; FERNÁNDEZ, MANUEL Y TOVAR, MARCIANO. Mejora de la calidad de piezas fundidas. Madrid: Luis Carcamo, 1974.
- [21]. TOOLEY, GORDON ALWIN et al. Lost foam casting apparatus for reducing porosity and inclusions in metal castings. April 25, 2002. United States Patent.

- [22]. SHIVKUMAR, S.; YAO, X. AND MAKHLOUF, M. Polymer-melt interactions during casting formation in the LFC. *Scripta Metalurgica*, Vol. 33, N°1, 1995.
- [23]. HIRT, C.W. Predicting Defects in Lost Foam Castings. Flow Science, Inc. 2001.
- [24]. KUO, JER-HAUR et al. Mold Filling Analysis in LFC. *Materials Transactions*, Vol. 44, No.10. 2003.
- [25]. HIRT, C.W. AND BARKHUDAROV, MICHAEL R. Predicting defects in lost foam castings. Available: <http://www.jobwerx.com/news/Archives/foam020203.html>. Flow Science, Inc., New Mexico. [citado 3 de Febrero de 2003].
- [26]. BATES, CHARLES E., GRIFFIN, JOHN AND LITTLETON, HARRY. Expendable Pattern Casting. Volume: Casting Defects Manual. USA: AFS: American Foundrymen's Society, 1994.
- [27]. AUSTIN, TERRY. Expendable pattern casting. Tooling Manual. Illinois, Estados Unidos: American Foundrymen's Society Inc., 1994.
- [28]. CORTÉS ZAMORA, CARLOS DAVID. Caracterización del poliestireno expandido como material de aligeramiento de terraplenes. [Tesis de Maestría]. Bogota, Universidad de Los Andes, 1997.
- [29]. Delft University Of Technology. Advanced materials and casting technology. Laboratory of Materials Science. 1999.
- [30]. GÓMEZ, JORGE. Uso del poliestireno expandido y arena sin aglutinante en la obtención de artículos fundidos. *DYNA*. Vol. 1, No. 116; p. 47-57, 1993.
- [31]. Nova Chemicals. Poliestireno Expandible: guía de seguridad de almacenamiento y manipulación. Painesville, Ohio: s.n., 2003. Available: <http://www.novachemicals.com>. [citado 13 de Julio de 2003]
- [32]. FERNÁNDEZ, P., MARTÍNEZ, H. V. Y CRUZ, L. J. Optimización del procesamiento por *lost foam casting* (LFC) para la fabricación de autopartes. Memorias Seminario y mini foro iberoamericano de tecnología de materiales. Cuba, Mayo 2005.
- [33]. Lost Foam Technology and other Casting Processes. Available: <http://www.atl-usa.com/lostfoam-technology.htm>. [citado 20 de Septiembre de 2004]
- [34]. HOWARD F., TAYLOR Y MERTON C., FLEMINGS. Fundición para ingenieros. México: CECSA, 1961.
- [35]. Lost Foam Metalcasting. Precision Molded Foam. Visalia, Ca: Tempo, 2000. Available: <http://www.tempof foam.com/index.html>. [citado 10 de Septiembre de 2004]
- [36]. HUGH, JACK. Lost Foam Casting (Expandable Pattern). Available: <http://claymore.engineer.gvsu.edu/~jackh/eod/manufact/manufact-189.html>. [citado 31 de Agosto de 2003]
- [37]. RAYMOND, HORTON. American foundrymen's society 101st casting conference. Canada Industry. <http://strategis.gc.ca>. [citado 10 de Julio de 2003]
- [38]. KERR, JIM. Lost foam casting. En: Canadian Driver. Canadá. p.1 Available: <http://www.canadiandriver.com/articles/jk/index.htm>. [citado 20 de Febrero de 2004]
- [39]. RAVINDRAN, C. Recent Advances in Nearnet shape Casting of Non-ferrous Materials: LFC. ASM International. Available: <http://www.asm-detroit.org>. [citado 15 de Abril de 2003].
- [40]. LAWRENCE E. DOYLE, et. al. Procesos y materiales de manufactura para ingenieros. s.l.: Prentice Hall Hispanoamericana, 1992.
- [41]. NELLY, JHON E. Metalurgia y materiales industriales. México, Limusa S.A. 2001.
- [42]. PHILLIP F., OSTWALD Y BEGEMAN L., MYRON. Procesos de manufactura. México: CECSA, s.f.
- [43]. SAWYER, CHRISTOPHER A. Cast In Foam. Available: <http://www.autofieldguide.com>. [citado 10 de Septiembre de 2004]
- [44]. Comisión Venezolana de Normas Industriales. Norma Venezolana COVENIN 2938:92. Vehículos Automotores: Tambores y Discos de freno. Venezuela: Fondonorma, 1992.