

# SIMULACIÓN NUMÉRICA Y OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS DE FUNDICIÓN EN MOLDE PERMANENTE PARA LA FABRICACIÓN DE ELEMENTOS DE INTERCONEXIÓN ELÉCTRICA.

A. Duque <sup>(1)</sup>, A. Morales <sup>(1)</sup>, E. Mendoza <sup>(1)</sup>, E. Uribe <sup>(2)</sup> y H.V. Martínez <sup>(1)</sup>

(1) Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín – COLOMBIA

(2) Dirección Técnica, Inversiones Uribe Molina, Medellín – COLOMBIA

E-mail: [adunque@consultainteligente.com.co](mailto:adunque@consultainteligente.com.co)

## RESUMEN

*Las pérdidas de energía y/o generación de puntos calientes en líneas de distribución eléctrica, son en muchos casos ocasionadas por fenómenos asociados a la defectología de materiales, así como también por la deficiencia en el control de procesos de producción de los conectores eléctricos. En particular, en el caso de grapas y conectores de alta y baja tensión, se utilizan a menudo aleaciones metálicas (base Al, Cu) y procesos de fundición tradicional; susceptibles en muchos casos de presentar defectos micro y macroestructurales.*

*Las nuevas herramientas computacionales para la simulación de procesos han mostrado ser muy efectivas de cara a la optimización de geometrías, tiempos y demás características asociadas, tanto nivel del material, como del proceso de manufactura.*

*Este trabajo pretende reportar la implementación del proceso de fundición de aluminio en moldes permanentes como reemplazo de técnicas tradicionales de fundición en arena. Con el uso de herramientas de simulación numérica y técnicas de caracterización de materiales se da la optimización de geometrías en sistemas de alimentación y la predicción de diferentes fenómenos térmicos asociados al flujo y solidificación del metal dentro del molde.*

*La innovación asociada al presente trabajo de investigación aplicada radica en la integración de técnicas de simulación numérica, técnicas de caracterización de materiales y el uso de tecnologías de fusión con hornos regenerativos que lograron en conjunto maximizar la eficiencia del proceso para la fabricación de las piezas objetivo.*

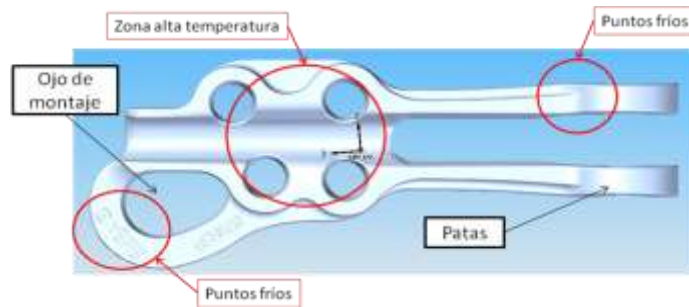
## Tópico 2: Materiales Metálicos

### 1. INTRODUCCIÓN

El uso de técnicas de fundición de aluminio con moldes permanentes (metálicos) hacen que el productor de piezas metálicas encuentre grandes retos al implementar la tecnología en la planta de producción, dado que los parámetros de proceso varían en cuanto a la temperatura de vaciado, temperaturas del molde, tiempos de solidificación y ciclos de proceso, así mismo el molde conlleva a operaciones adicionales de pintura, calentamiento y ajustes mecánicos. Todas estas variables llevan a que la implementación de la tecnología necesite apoyarse en métodos de simulación numérica para predecir los efectos de las diferentes variables en la calidad de las piezas metálicas y en la aparición de defectología del proceso.

En el trabajo que se expone a continuación se usaron herramientas computacionales de simulación numérica para identificar los parámetros adecuados para el proceso de fundición en molde permanente, se obtuvieron los parámetros base de ensayos realizados con moldes estandarizados bajo norma ASTM B 108/B 108M – 08, donde se identificaron las temperaturas de vaciado y del molde adecuadas para el correcto llenado de las piezas.

La pieza objeto de estudio (conector eléctrico R39) presenta requerimientos de resistencia mecánica altos en puntos donde la acumulación de defectos es muy probable por las geometrías mismas y la posible distribución de los frentes de metal. La figura 1 indica los puntos donde se presentan altas temperaturas por la presencia de masas de metal mayores y los posibles puntos fríos que puedan generar faltas de llenado. Se trabajó sobre la optimización de los sistemas de alimentación de metal en búsqueda de que el flujo garantizará un correcto llenado, temperaturas del metal homogéneas a lo largo de la pieza y la disminución de puntos fríos.



**Figura 1.** Lugar puntos críticos en temperatura y acumulación de defectos.

## 2. LA IMPORTANCIA DEL CORRECTO DISEÑO Y CONFIGURACIÓN DE MOLDES

Para lograr una fundición con una óptima calidad y nivel de defectología bajo, el diseño de los moldes usados para la producción debe contar con 3 parámetros fundamentales: El primero, un diseño de canales de alimentación que permita un flujo uniforme sin turbulencias y que garantice la alimentación del metal durante el llenado y solidificación de las piezas, el segundo, una eficiencia de fundición adecuada que se ciña a los requerimientos de productividad solicitados por la empresa manufacturera y el tercero, un sistema mecánico que ofrezca un ensamble con el ajuste adecuado, la posibilidad de calentamiento y refrigeración con control de la temperatura y una fácil operación de apertura, cierre y extracción de las piezas, buscando maximizar la eficiencia del ciclo de producción, entendiéndose por ciclo el grupo de pasos que se realizan para llegar a las piezas fundidas, los siguientes pasos son el resumen de un proceso básico:

- Calentamiento de molde: La temperatura del mismo influye directamente en la calidad de la pieza fundida y aumenta o disminuye los ciclos de proceso debido a que a una mayor temperatura se extienden los tiempos de solidificación del metal
- Aplicación de pintura desmoldante: La misma con al finalidad de generar un mejor acabado en la piezas fundida y preservar el molde del desgaste por fricción con metal fundido
- Ajuste del molde: Operación de cierre del molde para formar la cavidad del molde

Para que el molde facilite la operación con una productividad adecuada debe contar con ciertas características geométricas, la configuración propuesta para los moldes usados en el presente estudio se muestra en la figura 2. La misma incluye sistemas de guías para alinear y facilitar el correcto cerrado del molde, así como un sistema de extracción de piezas automático que al abrir el molde se acciona y extrae la pieza solidificada sin intervención del operario, lo cual automatiza el proceso y disminuye los tiempos de ciclo entre piezas.

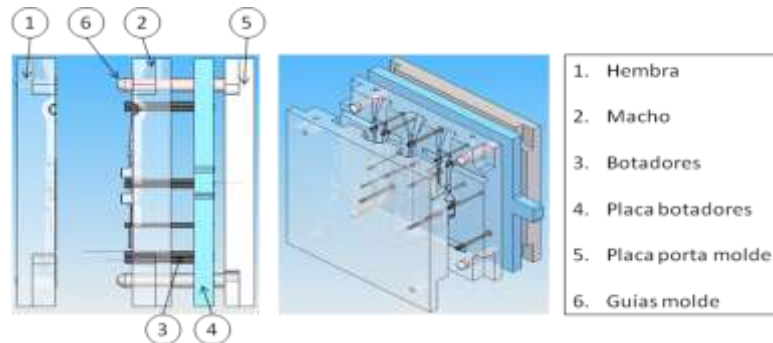
## 3. ANÁLISIS PRELIMINAR

Se realizó un diagnóstico preliminar al proceso de fundición con molde en arena, en el cual se encontraron irregularidades en el flujo de metal y altas concentraciones de defectos asociadas al diseño del molde.

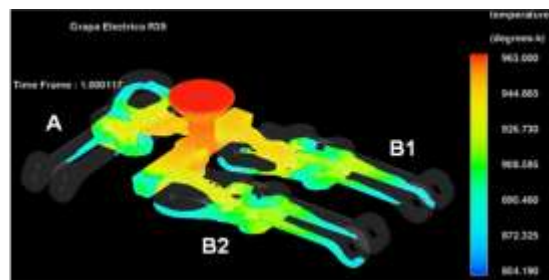
Por facilitar la repetibilidad y los ensayos en producción, se uso esta técnica para verificar las simulaciones y parametrización de propiedades del metal fundido ingresadas al software.

Se encontró con la simulación un comportamiento igual al presente en los ensayos de producción. El diseño en arena se caracterizó por presentar un frente de metal homogéneo debido a la disposición de las piezas, sin embargo las entradas de metal son desiguales y el balance del flujo no fue el adecuado por el posicionamiento de las piezas. Se observó una condición de flujo desbalanceado entre la pieza A y las piezas B1 y B2 (figura 3) que al final del llenado desarrolló un gradiente de temperatura entre las mismas, lo cual, inclusive, generó variaciones micro estructurales entre piezas del mismo molde. Viéndose reflejado dicho fenómeno en variaciones de las propiedades mecánicas entre una pieza y otra. La condición de un flujo con mayor velocidad que presenta la pieza B1 hace que al encontrar un geometría más complicada, el flujo se distribuya con una condición turbulenta y se de una gran cantidad de aire en el frente de metal. Lo contrario pasa en las otras piezas donde el frente de metal permite una menor concentración de aire atrapado. Al mismo tiempo, se aprecia que

el llenado para la pieza A es más lento y presenta un nivel menor de aire atrapado, condición que es benéfica para el llenado de dicha pieza



**Figura 2.** Configuración de los moldes usados en el estudio



**Figura 3.** Simulación molde en arena para la referencia R39

#### 4. PARAMETRIZACIÓN PROCESO DE FUNDICIÓN EN MOLDE PERMANENTE

La fabricación de un molde tipo coquilla bajo norma ASTM B 108/B 108M – 08 permitió obtener los parámetros claves para el diseño de coquillas en cuanto a proporciones de los espesores y tamaños de las entradas de metal a la pieza. Se tomaron las recomendaciones de fabricación de la norma como lineamiento para el desarrollo de los demás moldes para la empresa productora. El molde no incluyó sistema de extracción de piezas debido a que no es un molde de producción y únicamente se utilizará para fabricación de probetas como control de calidad de cada colada, para fines de parametrización del proceso y estandarización de las propiedades usadas en la simulación.

Fueron realizados ensayos de producción de probetas bajo diferentes condiciones de proceso, la variación de la temperatura del molde fue la variable más crítica del proceso, puesto que una temperatura baja generó puntos fríos que obstruyeron el flujo impidiendo el correcto llenado del molde. La figura 4 muestra el efecto de la baja temperatura durante el llenado del molde, defecto que no fue identificado en la simulación numérica previa puesto que la geometría simulada varió con respecto al molde fabricado por problemas del fabricante.

Asimismo, se identificaron problemas en el mecanizado de las entradas y canales de alimentación del molde que promovieron un llenado incompleto y frentes de metal desiguales. La figura 4 muestra los puntos donde el espesor y los radios variaron con respecto a la norma ASTM B 108/B 108M – 08.



**Figura 4.** Molde para fabricación de probetas.

Los parámetros con los que el molde llenó de una manera adecuada se identificaron y los mismos fueron usados en la simulación numérica. La tabla 1 muestra los parámetros de proceso usados para la simulación de moldes metálicos, así como los parámetros del molde y del material fundido. Los parámetros no conocidos fueron tomados de las bases de datos del Software Flow 3D y del Metal handbook.

**Tabla 1. Parámetros** seleccionados para la simulación

Propiedad	Valor	Unidad
Metal A356		
Densidad metal líquido	2533	kg / m <sup>3</sup>
Densidad metal sólido	2650	kg / m <sup>3</sup>
Conductividad térmica metal líquido	75.2	W / m K
Conductividad térmica metal sólido	164.8	W / m K
Calor específico metal líquido	1211	J / kg K
Calor específico metal sólido	1088	J / kg K
Temperatura de líquido	596	°C
Temperatura de sólido	450	°C
Viscosidad	0.00207	Pa-s
Fracción de sólidos crítica	0.67	%
Calor latente de fusión	4 e5	J/Kg
Molde H13		
Material	H13	
Conductividad térmica	23	Watt/m*K
Densidad * Calor específico	5e+6	gm/cm/s2/K
Temperatura inicial	330 -500	°C
Coefficiente de transferencia de calor	8 e+6	Watt/m2 K
Proceso		
Temperatura de vaciado	700	°C
Presión de vaciado	101.300	Pa
Velocidad de vaciado	n/a	Kg/s
Presión atmosférica	101.300	Pa
Temperatura ambiente	30	°C

## 5. PROPUESTAS DE DISEÑO MOLDE METÁLICO PARA LA REFERENCIA R39

### 5.1. DISEÑO 1 R39

Fue diseñado el sistema de alimentación de metal para el molde de la referencia R39, el diseño se realizó de manera que el sistema conservara un equilibrio ideal del flujo y fuera de fácil remoción. Sin embargo no se tuvieron en cuenta las proporciones entre las áreas de los canales de alimentación y las entradas a la pieza.

La geometría del diseño preliminar del sistema de alimentación se muestra en la figura 5a, el diseño facilita la remoción de las piezas ya que entra en contacto sólo en el punto de alimentación. Además se tuvieron en cuenta las áreas de ingreso del metal de una forma tal que el metal fuera encontrando de manera progresiva una mayor área en cada paso del llenado. Las entradas se diseñaron planas para estabilizar el flujo que llega de los canales de alimentación de una manera turbulenta.

### 5.2. DISEÑO 2 R39

Se diseñó un sistema de moldeo basado en la norma ASTM B 108 (Standard Specification for Aluminum-Alloy Permanent Mold Castings) (Figura 5b), en el cual se definieron las áreas de las secciones en los sistemas de alimentación con la relación recomendada por la norma, buscando evitar el flujo turbulento y las inclusiones de aire. Se probó el sistema de correderas que garantiza un llenado más estable y térmicamente garantiza una masa de metal fundido durante todo el proceso de solidificación de la pieza. Sin embargo el molde presenta una eficiencia de moldeo baja de 50% que no ayuda al incremento de la productividad.

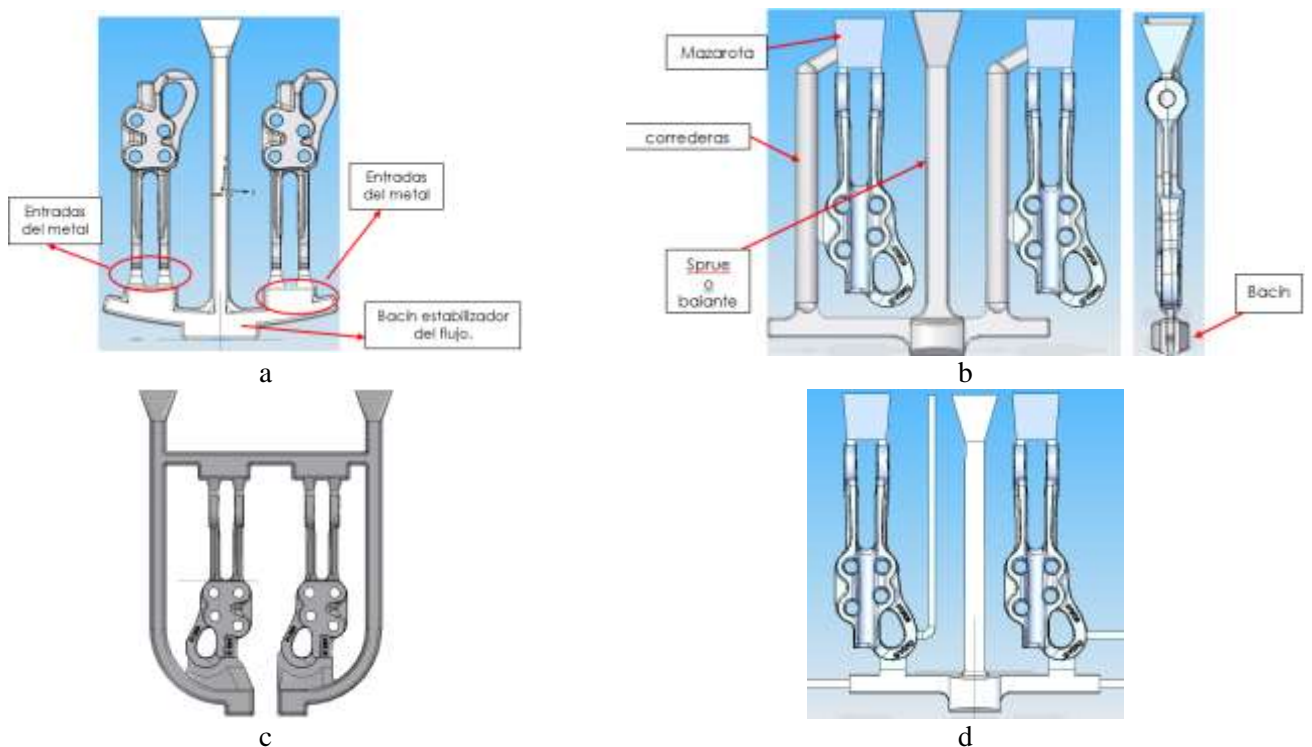
### 5.3. DISEÑO 3

El diseño propuesto en este caso se basó en los parámetros de diseño de los moldes usados en producción de ollas, los cuales cuentan con secciones transversales trapezoidales que estabilizan el flujo de metal y disminuyen la turbulencia. Asimismo son usadas reducciones de área en las entradas a la pieza en la zona de ojo de montaje que buscan conseguir un flujo laminar del metal al ingresar a la pieza.

Del diseño se rescatan las entradas de metal y las secciones transversales de los canales de alimentación, sin embargo no es seleccionado por la baja eficiencia de moldeo que presenta 40%. La figura 5c muestra el diseño mencionado.

#### 5.4. DISEÑO 4 (SELECCIONADO)

Evaluando las características geométricas contra los resultados de las simulaciones para cada uno de los diseños preliminares se planteó un nuevo diseño que mezcla las características de secciones transversales trapezoidales y unos espesores suficientes para garantizar un correcto llenado, se mejoró el espesor de las entradas a la pieza y hasta llevarlo a 12 mm, lo cual generó un resultado óptimo en las simulaciones en cuanto al llenado de la pieza. Igualmente se implementaron respiraderos en los puntos donde el flujo de metal puede bloquear la salida del mismo generando atrapamiento de aire.



**Figura 5.** Diseños moldes propuestos para la ref R39. a. Diseño molde 1 R39, b. Diseño molde 2 R39 con parámetros ASTM, c. Diseño 3 molde R39 y d. Diseño seleccionado

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. ANÁLISIS DE TEMPERATURA.

El comportamiento térmico del metal fue analizado para cada uno de los diseños de colada.

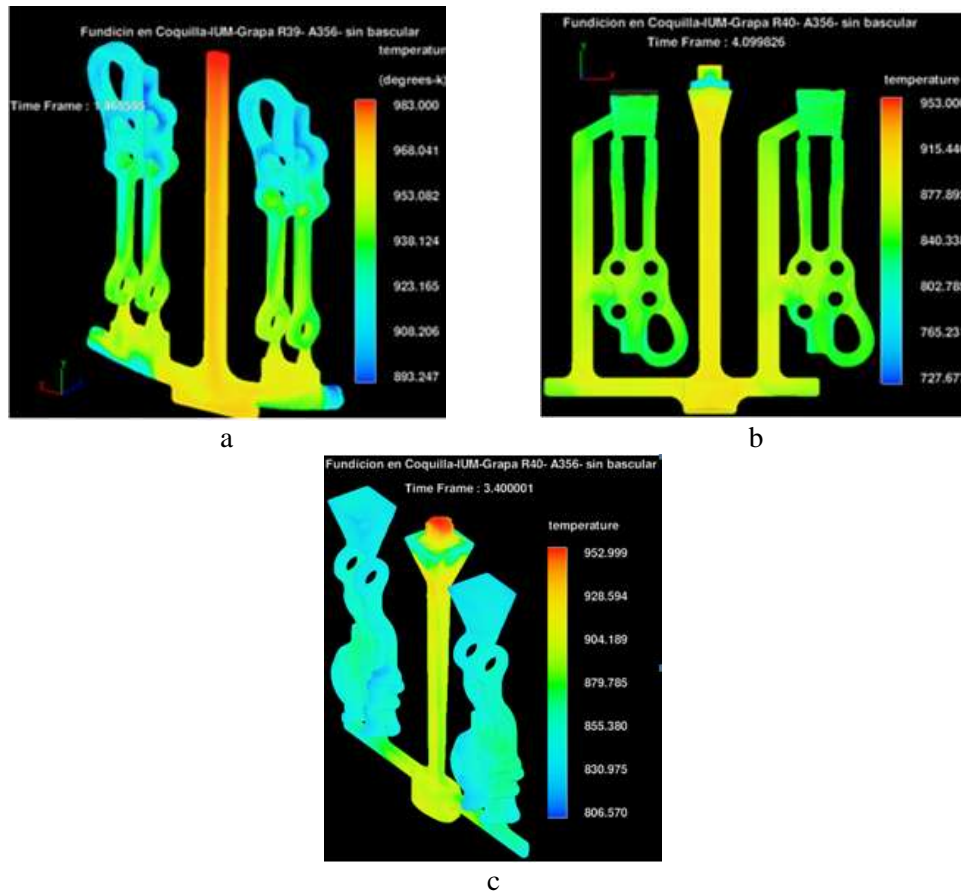
En el diseño preliminar para la grapa R39 la distribución de temperatura durante el llenado es uniforme mostrando que toda la masa de aluminio se mantiene por encima de la temperatura de líquidos, se encontró que la estabilidad térmica es buena en la zona de las patas pero en las zonas del ojo de montaje y los agujeros de ensamble la temperatura tiene un gradiente de 100°C apenas finalizado el vaciado, lo cual genera contracciones y disminución de las propiedades mecánicas.

En el diseño bajo norma ASTM para la grapa R39 (Figura 6b) se observa una distribución térmica más homogénea sin gradientes de temperatura localizados. Al finalizar el llenado la pieza presenta una temperatura similar en todo el volumen, lo cual garantiza una solidificación uniforme. La zona que presenta la mayor masa de metal recibe el metal con la mayor temperatura hasta el final del

llenado y logra la mayor temperatura en la pieza, lo que ayuda en la solidificación para evitar contracciones desiguales con otros puntos de la pieza, además la entrada de metal es aleada a esta zona y facilita que la pieza reciba metal líquido proveniente del CORREDERA durante la solidificación. Las mazarotas ubicadas en la parte superior del sistema de moldeo ayudan a que las patas no se contraigan desigualmente y reciban metal líquido gradualmente al contraerse.

El diseño 3 no fue analizado debido a su baja eficiencia de moldeo.

En el diseño 4 se encontró un sistema de mayor eficiencia de moldeo y que garantizó una estabilidad térmica mayor durante el llenado, conservando la temperatura por encima de la línea de sólidos y garantizando un llenado de todas las partes de la pieza. La figura 6c muestra la homogeneidad de temperatura presente en toda la pieza al finalizar el llenado.



**Figura6.** Análisis de temperatura modelos R39

## 6.2. VELOCIDAD Y AIRE ATRAPADO

Para el sistema de moldeo inicial en la grapa R39 se encuentra con el análisis de velocidad que la magnitud de la misma tiene una variación muy alta entre las diferentes secciones del molde debido a la gran turbulencia presente en la sección del canal de alimentación por el impacto del metal contra el molde. Se nota que el flujo llega con una gran energía y velocidad a las entradas de la pieza, por lo tanto las salpicaduras afectan en gran medida la estabilidad buscada en esta zona.

La solución a este problema sería descentrar las entradas de metal a la pieza con respecto al canal de alimentación o disminuir el espesor de los canales para que el material logre estabilizar su condición antes de ingresar a la pieza.

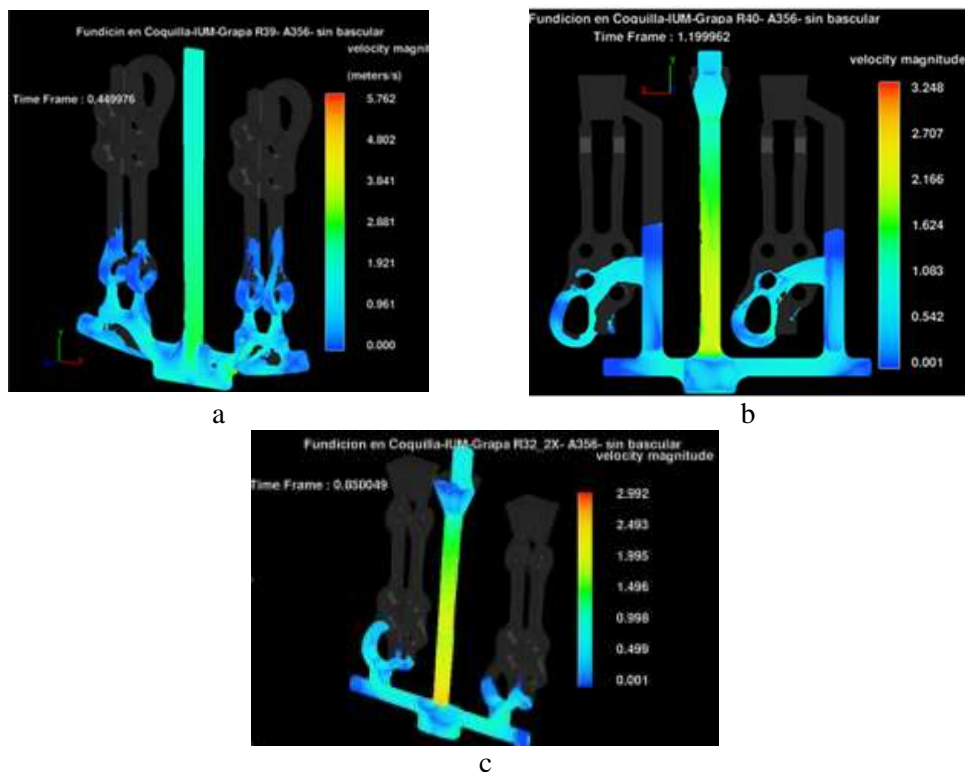
Igualmente, el diseño de los canales de alimentación no cuenta con un sistema para evacuar los gases, generando un atrapamiento de aire alto y posiblemente falta de llenado en la producción real. La figura 6a muestra los resultados para el sistema de moldeo inicial de la grapa R39.

El sistema para de moldeo de la grapa R39 bajo norma ASTM incluye el sistema de CORREDERA que busca disminuir la turbulencia del metal antes de ingresar a la pieza, igualmente se incluyeron las mazarotas que permiten la salida de los gases por estar abiertas a la atmósfera y ayudan en la alimentación de metal líquido durante la solidificación. La figura 6b muestra que el sistema de

CORREDERA controló adecuadamente el flujo y logró disminuir la turbulencia en el sistema, consiguiendo que el flujo llegara a la pieza a una baja velocidad e ingresara de manera laminar en la misma. La velocidad más alta se consigue en el bajante (Sprue), alcanzando un valor de 2.4 m/s y el bacín que recibió el flujo logró disminuir la velocidad llevándola a valores aceptables para el flujo hacia la pieza.

Pueden ser observados frentes de metal desiguales en el llenado de la pieza debidos a la ubicación del punto de ataque del metal, la figura 6b muestra el fenómeno de generación de frentes desiguales y salpicaduras de metal, que al final generan atrapamiento de gases, inclusiones no metálicas debidas a la oxidación del frente metálico y puntos fríos por solidificaciones tempranas de las salpicaduras.

Para el molde 3 se encuentra que el llenado es uniforme y la velocidad fue la más baja encontrada para todos los diseños. Esta característica fue lograda aumentando el área de entrada del metal a la pieza y el volumen, y profundidad del bacín que recibe el metal proveniente del bajante (figura 6c). La velocidad de llenado más alta fue de 0.3m/s y no se identificaron salpicaduras o frentes de metal desiguales.



**Figura 1.** Análisis de velocidad y aire atrapado en moldes diseñados para la ref R39. a. Molde 1, b. molde 2 y c. Molde 3

### 6.3. CONCENTRACIÓN DE DEFECTOS GENERADOS POR EL LLENADO.

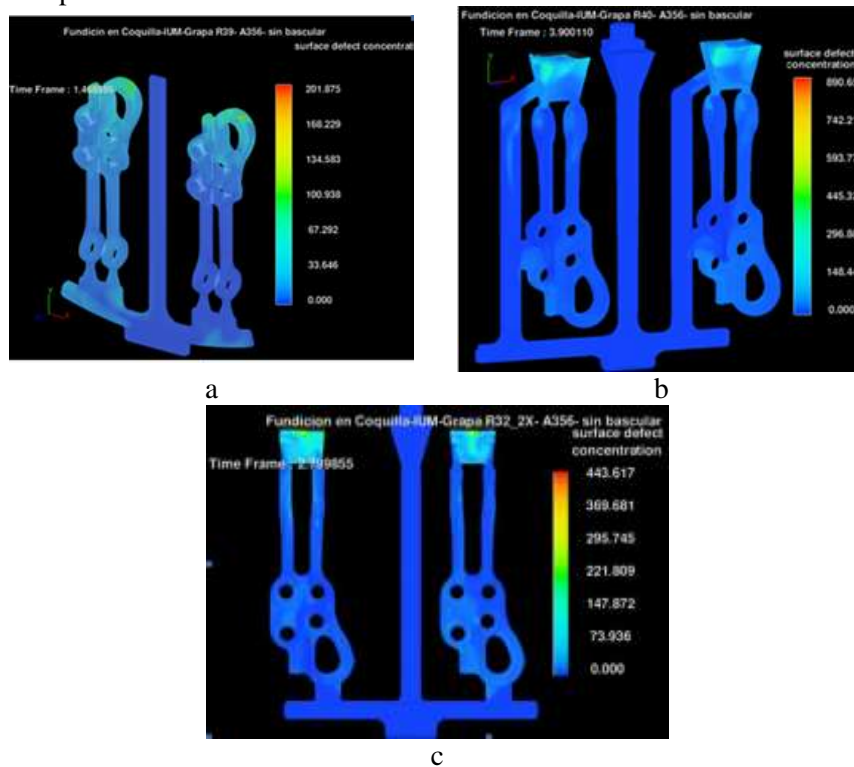
En el sistema de alimentación inicial Figura 7a se presenta una turbulencia muy alta con presencia de salpicaduras que pierden temperatura rápidamente y pueden llegar a solidificar antes de que el frente principal las embeba. La condición anterior genera puntos fríos en la pieza que disminuyen las propiedades mecánicas. Igualmente la falta de canales para salida de los gases provoca que en la parte superior de la pieza (figura 7b, ojo de montaje) se presente una gran porosidad y falta de llenado.

El diseño bajo parámetros ASTM logró un nivel bajo de defectos (figura 7b), sin embargo existen algunos puntos de media concentración de defectos en la zona de las patas cerca de las conexiones de la pieza con las mazarotas. Se recomienda aumentar el área del canal en este punto para que el aire remanente en la fundición y las impurezas logren pasar hasta la mazarota.

Con las salidas de aire propuestas, la simulación mostró un nivel menor de defectos durante el llenado así como un llenado más uniforme, de baja velocidad y sin presencia de flujos turbulentos.

El diseño 3 mostró que la gran concentración de defectos se presenta en las mazarotas, donde se alojan todas las impurezas y porciones de aire atrapado en el frente de metal. El gran porcentaje de la

pieza se encuentra con niveles muy bajos de defectos, asociados principalmente a óxidos de metal en la superficie de la pieza.



**Figura7.** Concentración de defectos en los modelos R39

#### 6.4. ANÁLISIS SOLIDIFICACIÓN

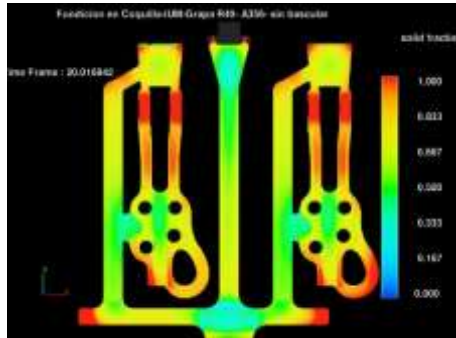
El análisis para la grapa R39 en el diseño seleccionado muestra que la temperatura del molde influye directamente en la calidad de la pieza. Con una temperatura de molde de 350°C se encontró que el metal solidifica en un gran porcentaje justo después de finalizar el llenado o en algunos casos no llena el molde, lo cual afecta las condiciones mecánicas de la pieza y puede generar grietas por contracción desigual.

Con la temperatura de 500°C en el molde y al correr la simulación con una temperatura de colada más alta, se encuentra que el metal en el molde no supera una fracción de sólidos del 20%, lo cual indica que el metal se encuentra en estado líquido inmediatamente después de finalizar el llenado. En este punto el modelo inicia la solidificación en el cuerpo de la pieza, seguido por las patas, el ojo de montaje y finalmente el cuerpo de la pieza.

Se encuentra que el tiempo de solidificación es de 10 minutos hasta el final de la solidificación. Dicho tiempo es alto para el sistema de moldeo en molde metálico, para disminuir el tiempo debe ser disminuida la temperatura del molde y usar una mayor temperatura de vaciado. La evolución de la solidificación es homogénea y no hay presencia de zonas con una solidificación desigual que puedan generar contracciones o formación de grietas.

Fue analizado el porcentaje de porosidad dentro del volumen sólido de la pieza. Se encontró que el mayor porcentaje de porosidad (1.35%) se encuentra en el ojo de montaje y las patas de montaje logran el menor nivel de porosidad. A pesar de tener cierto nivel de porosidad el modelo para la grapa R39 logra un nivel de defectos y de porosidad bajo y muestra una calidad adecuada para el proceso de fundición en molde permanente.

Lo contrario sucede con el modelo 2, ya que la solidificación es muy rápida y existe grandes gradientes de metal entre las patas de la pieza y el cuerpo de la misma generando una probabilidad alta de contracciones y microporosidades. (Figura 8)

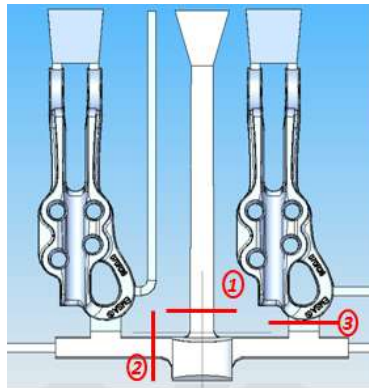


**Figura 8.** Análisis solidificación en modelo R39

#### 4. CONCLUSIONES

La disminución de área en la zona inferior del bajante del sistema de alimentación de metal controla las turbulencias del flujo de metal proveniente de la cuchara de llenado, a pesar del aumento de la velocidad por la estrangulación del bajante se logró controlar la velocidad usando un bacín que recibe el flujo en la zona inferior del molde, consiguiendo reducir la velocidad y dar una condición de flujo estable para el llenado de la pieza. Estas características geométricas ayudaron al control de las turbulencias para el molde seleccionado en la referencia R39.

La proporción de áreas usadas para el diseño en los canales de alimentación de metal en el molde seleccionado ayudó a que las turbulencias del llenado disminuyeran considerablemente, el aire atrapado fuera el mínimo posible y las salpicaduras de metal fueran evitadas. Se consideran tres áreas principales (Figura 9). El área 1 debe ser 2 veces mayor que el área 2, y el área 3 debe ser 5 veces mayor que el área 2. En cuanto a los espesores se trataron de conservar las relaciones establecidas por la norma, el espesor 1 debe ser 2 veces mayor que el espesor del área 2 y 3 veces del área 1 por parte del metal fundido ayudó a que las turbulencias del llenado disminuyeran considerablemente y el aire atrapado fuera el mínimo posible.



**Figura 9.** Definición de áreas en los canales de alimentación

#### REFERENCIAS

1. ASTM B 108 Standard Specification for Aluminum-Alloy Permanent Mold Castings
2. A. F. Duque, J. Herrera, L. Cruz , P. Fernández y H. V. Martínez ,“Simulación del proceso de fundición a la espuma perdida para la predicción de defectos de llenado y solidificación”, 8° congreso iberoamericano de ingeniería mecánica, Cusco, Perú, 23-26 de octubre de 2007
3. A. Duque, HV. Martinez, P. Fernandez, “Desarrollo de hidrantes y collares en hierro nodular, mediante la técnica de fundición a la espuma perdida”, 2008, Universidad Pontificia Bolivariana y COBRAL Ltda. (reporte de proyecto)
4. “Caracterización defectológica de piezas fundidas por lost foam casting mediante simulación numérica”, A. F. Duque, J. Herrera, L. Cruz , P. Fernández y H. V. Martínez, 4° Congreso Internacional de Materiales, Pereira 10 al 14 de septiembre de 2007