

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**OPTIMIZACION DE UN SISTEMA DE ALIMENTACION PARA LA PRODUCCION DE
CABEZAS DE ALUMINIO POR EL PROCESO DE GRAVEDAD.**

TESIS

**EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

PRESENTA

HECTOR POSADAS FABELA

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Diciembre 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



OPTIMIZACION DE UN SISTEMA DE ALIMENTACION PARA LA PRODUCCION DE
CABEZAS DE ALUMINIO POR EL PROCESO DE GRAVEDAD.

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA
MECANICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA

HECTOR POSADAS FABELA

San Nicolás de los Garza, Nuevo León,

Diciembre 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “Optimización de un sistema de alimentación para la producción de cabezas de aluminio por el proceso de gravedad” realizada por la Ing. Héctor Posadas Fabela sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis

Asesor

Dra. Dora Irma Martínez Delgado

Revisor

Dr. Alberto Pérez Unzueta.

Revisor

Dr. Abraham Velazco Téllez

Vo. Bo.

Dr. Moisés Hinojosa Rivera

División de Estudios de Post-grado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Diciembre 2012

INDICE

RESUMEN.	1
CAPITULO 1 INTRODUCCION.	
1.1.- Objetivo, Hipótesis y Metas.	6
1.2.- Metodología.	7
1.3.- Metodología de Diseño.	8
1.4.- Cronograma de Actividades	9
CAPITULO 2 MARCO TEORICO.	
2.1.- Producción y Propiedades del Aluminio.	10
2.2.- Aluminio y sus características	10
2.3.- Fundición.	15
2.4.- Sistema de Alimentación.	20
2.5.- Sistema de Alimentación por gravedad	24
2.5.- Programa de simulación MAGMA	32

CAPITULO 3	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.	
3.1.-	Experimentación	42
CAPITULO 4	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.	
4.1.-	Correlación real	44
CAPITULO 5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	
5.1.-	Conclusiones.	47
5.2.-	Recomendaciones.	48
REFERENCIAS.		49

RESUMEN

La industria automotriz es un campo de continuo desarrollo tecnológico, el gran mercado existente genera que las compañías busquen innovar y mantenerse a la vanguardia en la fabricación de nuevos productos con nuevas aleaciones y/o procesos. El propósito de este proyecto es enfocarnos en la optimización del sistema de alimentación para la producción de cabezas de aluminio, considerando una aleación A319 y un proceso de gravedad en la empresa Nematik S.A de C.V. Básicamente un sistema de colada en una fundición es la parte de la cavidad del molde a través de la cual viaja el metal fundido para llenar el molde. Su diseño es una de las principales herramientas para el control del llenado del molde para obtener una pieza física y envuelve tres pasos: ubicación, diseño y tamaño. Para alcanzar este objetivo, simulaciones computarizadas fueron usadas para definir y optimizar la colada, al mismo tiempo elaborar una base de datos con las variables que propician defectos en la pieza y erosión en el molde. Se le llama Molde Semi Permanente por que tiene moldes permanentes de acero y corazones de arena. El llenado es a base de gravedad, es decir se vierte el aluminio por la copa de vaciado y por la misma fuerza de gravedad el aluminio pasa por el sistema de alimentación hasta llenar la cavidad. Fue posible desarrollar diseños óptimos por medio de técnicas de optimización además definiendo las variables que afectan la formación de defectos y sus soluciones con esto se logro crear una base de datos con las diferentes variables de diseño del sistema de alimentación a partir de una colada estándar y conocer el efecto que tiene esta para los próximos desarrollos esto se logro obtener piezas libres de defectos con un excelente correlación en los simulado y la piezas vaciadas.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

Hoy en día se buscan vehículos más seguros y ambientalmente amigables. Para cumplir con estos requerimientos cada vez se necesitan autos más compactos, más ligeros y con alta rigidez. Por estas condiciones industriales se vienen desarrollando materiales y procesos que conlleven a una reducción en peso, particularmente en las piezas fundidas que tienen una baja flexibilidad de manufactura.

La industria automotriz es un campo de continuo desarrollo ingenieril, el gran mercado existente genera que las compañías busquen innovar y mantenerse a la vanguardia. El aluminio ha sido adoptado por la industria automotriz como el material preferido. Con su ligereza ayuda al óptimo desempeño del vehículo, su maleabilidad da la oportunidad de brindar gran variedad de acabados y su alta conductividad térmica favorece el proceso de combustión permitiendo el ahorro de combustible. El uso de este metal reduce ruido y vibración, además, el aluminio absorbe energía cinética. El aluminio no se oxida como el acero; significa que los vehículos, en zonas climatológicas de gran humedad tendrán una vida más larga.

Las piezas de Aluminio de uso automotriz que se obtienen principalmente por fundición, son aleaciones de Al-Si-Cu. Son principalmente componentes que requieren resistencia a abrasivos, bajo coeficiente de expansión térmica, resistencia a altas temperaturas y resistencia al desgaste.

El proceso de vaciado ha sido una de las técnicas más antiguas empleadas por el ser humano y sigue constituyendo una de las rutas más cortas para obtener el producto final. Casi todos los metales y aleaciones pueden ser vaciados en la forma final deseada. Básicamente, el vaciado de metal es un proceso de llenado que consiste en verter metal líquido dentro de la cavidad de un molde donde solidifica y adopta la forma deseada para el producto final. Por medio de este proceso se pueden elaborar piezas con formas muy complejas e inclusive aquellas que poseen partes huecas.

La industria de la fundición es una industria pesada que sigue en constante innovación en cuanto al diseño y esto con el fin de reducir costos. Estos gastos podrían ser reducidos al optimizar el sistema de colada. Fundiciones de alta calidad requieren de un metal líquido libre de óxidos y gases que forman inclusiones indeseadas. Este tipo de inclusiones son los responsables de problemas de maquinado, picaduras superficiales y reducción de propiedades mecánicas. Usualmente transferidas de la escoria al metal, las inclusiones pueden evitarse con un sistema de alimentación apropiado. En un buen sistema de alimentación las inclusiones deben flotar antes de que el metal entre a las cavidades del molde. También debe prevenir el paso de los óxidos formados al vaciar y evitar la formación de nuevos óxidos durante el llenado.

En la actualidad los procesos de fundición requieren de técnicas de simulación para definir diseños de herramental y de condiciones de proceso que nos lleven a productos con alta calidad y por consiguiente incremento en la productividad. Con el apoyo de la simulación es posible conocer los efectos que podrían traer cambios en el diseño, equipo o proceso sin la necesidad de hacer experimentos costosos en planta con esto se tiene un beneficio en costo y tiempo de producción. Obteniendo la óptima configuración de un sistema de alimentación será posible obtener piezas libres de problemas relacionados al llenado, con buenas propiedades mecánica y reducción de costos.

1.1 Objetivo, Hipótesis y Metas.

Objetivo

➤ Definir un sistema de colada optimizado para el proceso de gravedad de piezas vaciadas de aluminio mediante procesos de simulación, definiendo las variables que afectan la formación de defectos y sus soluciones.

Hipótesis

➤ Es posible desarrollar sistemas de colada óptimos por medios de técnicas de optimización que generen piezas libres de defectos.

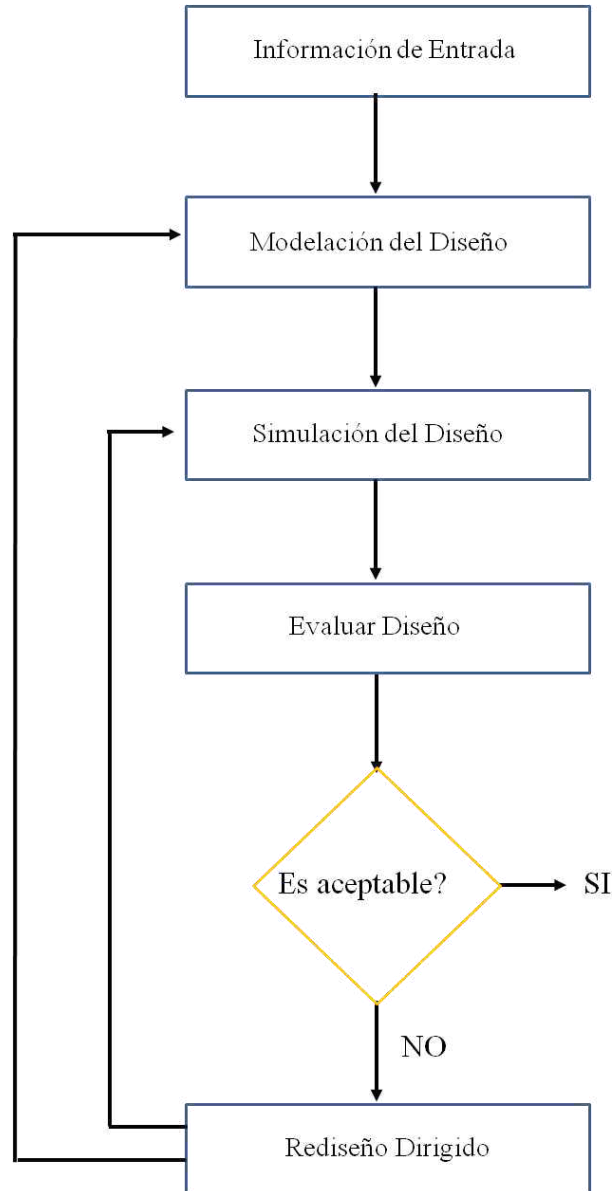
Metas

➤ Crear una base de datos con las diferentes variables de diseño del sistema de alimentación a partir de una colada estándar paramétrica y conocer el efecto que tiene esta variable para los próximos desarrollos.

1.2 Metodología.

Partiendo de una colada estándar Paramétrica y simulaciones computarizadas las cuales serán usadas para definir y optimizar la colada. Mediante el uso del programa de diseño Unigraphics se modificaran las dimensiones de cada uno de los componentes de la colada los cuales son la copa de vaciado, bastón, choke de bastón, difusor, corredor, trampas, y entradas. Empezando con el análisis de la copa de vaciado, modificando el ancho, altura y la forma, simulando el cambio en el diseño y analizando el efecto de este durante el llenado, y creando una base de datos que incluya el cambio y el efecto presentado. El mejor resultado de copa de vaciado será el que se incluya en la copa optimizada posteriormente se modificara el bastón de colada en el cual se analizara la altura, forma, ángulo de desmoldeo y espesor y esta misma metodología se seguirá para los demás componentes del sistema de alimentación. Hasta obtener el sistema de alimentación con los mejores diseños. Los datos de cada modificación estarán en una base de datos para los próximos lanzamientos de productos y definición de colada de estos.

1.3 Metodología de Diseño



CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Producción y propiedades del Aluminio.

Las aleaciones de aluminio se usan ampliamente gracias a su versatilidad. Las propiedades del aluminio que lo hacen tan atractivo son: apariencia, ligereza, maquinabilidad, buenas propiedades físicas, mecánicas y anticorrosivas, posee alta conductividad eléctrica y térmica, así como gran reflectividad. Es un material dúctil y maleable. En la actualidad las aleaciones de aluminio son los materiales más utilizados en la industria automotriz ya que al ser materiales ligeros y con buena resistencia a medios altamente corrosivos, benefician a una combustión más completa, haciendo más eficiente el uso de combustible.

2.2 Aluminio y sus características

Las propiedades del aluminio que lo hacen tan atractivo son: apariencia, ligereza, maquinabilidad, buenas propiedades físicas, mecánicas y anticorrosivas además de poseer alta conductividad eléctrica y térmica.

El aluminio es un material dúctil y maleable. Presenta una densidad de 2.6984 g/cm^3 a 20°C , aproximadamente un tercio de la del acero (8.53 g/cm^3). Muestra gran resistencia a la corrosión, incluso en ambientes salinos.

El aluminio es utilizado para muchas aplicaciones el cual se encuentra clasificado. La clasificación hecha por ASM (American Society of Metals) para las aleaciones base aluminio es la siguiente tabla 1:

Tabla 1. Serie de aleaciones de Aluminio maquinadas.

Serie	Componente
1xx.x	Al > 99%
2xx.x	Cu
3xx.x	Si+Cu/Mg
4xx.x	Si
5xx.x	Mg
6xx.x	No usada
7xx.x	Zn
8xx.x	Sn
9xx.x	No usadas o Futuras Aleaciones

En el caso de las aleaciones vaciadas la AA (Asociación del Aluminio) se hace la siguiente designación como se muestra en la siguiente tabla2:

Tabla 2. Serie de aleaciones de Aluminio vaciadas.

Designacion	Forma de producto
0	Pieza vaciada
1	Lingote estándar
2	Lingote con composiciones cercanas a la de los lingotes estándar

Cuando existen variaciones en los límites de composición que son muy pequeños como para requerir un cambio en la designación numérica, se indica con una letra que precederá al número entero (A 319, B 319, C 319, etc.).

El hierro es la impureza más común en el aluminio. Presenta alta solubilidad en estado líquido y baja en estado sólido. Se presenta comúnmente como intermetálico secundario. Reduce el tamaño de grano y en aleaciones Al-Ni-Cu aumenta la resistencia a altas temperaturas.

El silicio es la segunda mayor impureza, después del Fe en aluminio comercial este reduce la posibilidad de fractura por fatiga, da junto con Mg el intermetálico Mg_2Si , el cual hace de la aleación una aleación tratable térmicamente, sin embargo solo es en concentraciones del 0.5% al 4%.

El aluminio utilizado a nivel mundial parte de dos fuentes principales:

- Primario: producción directa de la mena.
- Reciclado: metal recuperado de escorias o material reciclado, también llamado recuperación secundaria.

En su mayoría los productos fabricados de aluminio son por medio de fundición y de extrusión. Respecto a piezas por fundición, la industria automotriz es quien ha ocupado el mayor mercado, mientras que respecto a la extrusión son varias industrias, dada la maleabilidad del metal.

De las series mostradas anteriormente, la serie 3xx (aleaciones aluminio-silicio) es, por mucho la más utilizada para fundición. Tienen características, tales como buena fluidez, buena resistencia a la corrosión, además de ser fácilmente soldadas y maquinadas. Algunas de las aleaciones más usadas para estas necesidades son las mencionadas a continuación.

Aleaciones Al-Si.

Son las aleaciones de más importancia para piezas fundidas, tienen alta fluidez, por lo que es fácil de alimentar los moldes con ella. Además el Si no reduce la resistencia a la corrosión del Al puro. El diagrama de fases es un eutéctico.

Las aleaciones más importantes son la 443 (5.3% Si) y la 413 (12% Si). Las partículas del eutéctico Al-Si es modificado al agregar Na, Sr o P en pequeña proporciones, alrededor de 0.025%, y refina el Si primario así por ejemplo al agregar Na a una aleación de 7% Si, la UTS (Tensión Última) pasa de 6 a 10%, y al refinar el Si el Na mejora la alimentación del aluminio en el molde.

Aleaciones Al-Mg-Si.

Se puede aumentar la resistencia mecánica de las Al-Si, si se agrega 0.35% Mg. El Mg produce un envejecimiento por precipitación. En estas aleaciones hay que disminuir su contenido de hierro, ya que éste forma agujas de $Fe_2Si_2Al_9$, porque el Fe reduce drásticamente la ductilidad de 14% a 1% y la UTS (Tensión Última) de 213.75 a 75.85 MPa.

Estas aleaciones son vaciadas tanto en moldes de arena como metálicos. Son utilizadas preferentemente para producir piezas automotrices, entre otras aplicaciones. La aleación 319 se obtiene a partir de reciclaje y es utilizada, por ejemplo, para producir pistones y múltiples de admisión. Las aleaciones 356 y 357 se utilizan en aplicaciones automotrices y aeronáuticas. Diversas partes automotrices, como rines y cilindros maestros de frenado, son realizadas con aleación 356.0. Por otro lado, la aleación hipereutéctica 390.0 se ha comenzado a utilizar en monoblocks de motores automotrices a través de procesos de fundición de alta presión.

2.3 Fundición

Fundiciones de calidad requieren de un metal líquido libre de óxidos y gases. Las inclusiones producto del proceso de fundición estas dificultan el posterior maquinado de la pieza, corrosión localizada superficial y reducen las propiedades mecánicas. La mayoría de las inclusiones son transferidas de la escoria y del óxido al metal. Estas pueden eliminarse con un diseño apropiado del sistema de alimentación.

Para aminorar estos problemas, el limpiado de la fundición debe ser una de las últimas operaciones. Esto normalmente se efectúa por un desgasificador de Nitrógeno, causando que los óxidos dispersos floten.

El proceso de vaciado por gravedad normalmente involucra altas velocidades de flujo que tienden a formar turbulencias y aire atrapado. Tanto las turbulencias como el aire atrapado serán formadores de óxidos.

El oxido inicial (escoria) se forma cuando el metal líquido queda en contacto con el oxígeno, formando una capa delgada en la superficie. Hay aleaciones altamente sensibles a la formación de óxido, como lo es el aluminio y sus aleaciones. La delgada capa formada es de Al_2O_3 y es bastante clara su formación, ya que el metal fundido pasa de un color brillante a un color gris opaco.

La escoria por otro lado es causada por una reacción química entre los óxidos metálicos y el horno, la olla o el molde refractario. Típicamente las escorias tienen una menor densidad que el metal fundido por lo que se ubicarán en la parte superior de la olla.

Mediante un buen sistema de alimentación, las inclusiones pueden flotarse al exterior del metal fundido antes de que éste entre a las cavidades del molde. En general hay tres grupos de metales respecto a su sensibilidad, estos son:

- Baja sensibilidad.- hierro, gris, hierro maleable y fundiciones rojas,
- Mediana sensibilidad.- hierro dúctil y acero,
- Alta sensibilidad.- aluminio y magnesio.

Solidificación

La mayoría de los productos metálicos parten de un estado líquido hacia uno sólido. Este proceso de solidificación por el cual pasan las piezas, es fundamental porque es donde se generan los posibles defectos de la pieza, tales como: porosidades, micro-grietas, inclusiones no metálicas, segregación de elementos de aleación, formas heterogéneas de grano o rechupes.

El control de calidad de las piezas depende de muchas variables como la nucleación, tamaño de grano, comportamiento de la interfase sólido-líquido, la rapidez de enfriamiento, distribución del soluto y elementos aleantes.

Nucleación.

La transformación de líquido a sólido se puede dividir en dos etapas: la nucleación de la fase sólida en la líquida y dos el crecimiento de los núcleos conforme desciende la temperatura. La coexistencia de las fases durante la solidificación y la relación entre rapidez de nucleación y crecimiento determinará la forma y el tamaño de los granos sólidos.

En los procesos mencionados encontramos dos significantes resistencias: la formación de una superficie entre el líquido y el sólido; y el ordenamiento de los átomos en el sólido en formación.

Existen dos tipos de nucleaciones:

- i. La Nucleación Homogénea: ocurre cuando no hay sustratos en el interior de la fase líquida. Por lo tanto cuando el líquido se enfría lentamente por debajo de su temperatura de equilibrio, se genera un núcleo cuyo radio crítico está formado por un cierto número de átomos. Cuando el tamaño crítico es alcanzado, el núcleo crece por la adición continua de átomos.
- ii. La Nucleación Heterogénea: ocurre cuando existen objetos especiales denominados sustratos en el interior de la fase líquida, los cuales ayudan a la formación de núcleos.

Las anteriores resistencias a la nucleación exigen un sobre-enfriamiento para que se inicie el proceso de solidificación; el sobre-enfriamiento será mayor para una nucleación homogénea, es decir, aquella por la cual se forma un núcleo en el seno mismo del líquido. Por otra parte, la nucleación heterogénea está caracterizada por la formación de núcleos sobre superficies sólidas existentes como paredes del molde o partículas sólidas en suspensión. El diagrama Temperatura (T) v/s tiempo (t) tendrá la siguiente forma para la solidificación de un metal puro este se muestra en la figura 1.

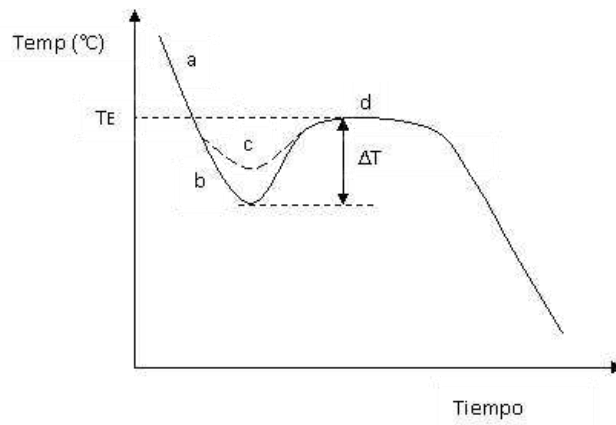


Figura 1. Curva típica de enfriamiento para un metal puro.

Una característica importante de la cristalización de los sólidos es que a presión constante poseen una temperatura característica de equilibrio sólido / líquido, T_E . Solamente a esta temperatura existe el equilibrio, por lo tanto, podemos decir que las energías libres del sólido y del líquido son iguales.

En la Figura 1 podemos ver que el líquido es enfriado hasta T_E , corresponde a la zona a, el líquido debe ser sobre-enfriado en una cantidad ΔT para comenzar la nucleación. El ΔT será mayor para nucleación homogénea, (Curva b), que para nucleación heterogénea, (Curva c) y si continúa el crecimiento de los núcleos, se eleva la temperatura hasta T_E , producto del calor latente de solidificación, y de esta manera se mantiene constante esta temperatura. Cuando la solidificación termina y ya no hay más calor latente entregado al sistema, la temperatura de sólido comienza a descender, zona d.

Tamaño de grano.

La nucleación es un fenómeno dado en las fronteras de grano o en las zonas con mayor energía libre, es decir, las más inestables. Por esta razón los llamados refinadores de grano están basados en la nucleación heterogénea.

El refinador agregado a la fase líquida provee de sustratos los cuales facilitan la nucleación heterogénea. Los núcleos formados en las paredes del molde inducen la generación de granos más grandes en comparación con los granos formados por la adición de un agente nucleante.

Realizar una refinación de grano ayuda a mejorar la distribución de defectos como impurezas, porosidad y fases duras; también mejora la respuesta de la pieza a esfuerzos desarrollados en una dirección preferencial.

2.4 Sistema de Alimentación

Una de las claves para la realización de una pieza es un buen sistema de alimentación. Básicamente un sistema de alimentación en una fundición es la parte de la cavidad del molde a través de la cual viaja el metal fundido para llenar la pieza. Su diseño es una de las principales herramientas de control del llenado del metal en el molde y envuelve tres pasos: ubicación, diseño y tamaño; los cuales conforman un libre flujo del líquido. La importancia del sistema de colada radica en [2]:

- La rapidez y dirección del metal debe ser tal que asegure el llenado completo del molde antes del enfriamiento.
- El flujo debe ser suave y uniforme, con un mínimo de turbulencias. Deben evitarse fenómenos tales como: aire atrapado, oxidación del metal y erosión del molde.
- Debe proporcionarse una distribución de temperatura tal que el patrón de enfriamiento sea favorable a la alimentación.
- El sistema puede incorporar trampas o filtros para atrapar las inclusiones metálicas. Éstas pueden colocarse a lo largo del sistema de colada o en el metal.

Es decir, el sistema de alimentación debe: reducir la turbulencia del metal fundido, eliminar gas y aire atrapado, disminuir la velocidad del líquido, prevenir solidificación prematura y desarrollar apropiados gradientes térmicos

Acorde a las recomendaciones de un sistema de colada convencional no presurizado debe ser aplicado para aleaciones con alta sensibilidad a la oxidación como las aleaciones de aluminio.

La técnica de llenado debe diseñarse tomando en cuenta el peso y la forma de la pieza a fundir, la fluidez del metal y su susceptibilidad a la oxidación. Dentro de la industria automotriz no se deja de buscar reducir pesos y costos de los productos. Las fundiciones de aluminio han resultado ser una excelente opción para cumplir estos requerimientos industriales [3].

El sistema de alimentación incluye: la copa de vaciado, el bastón, el corredor y las entradas, entre otros canales y elementos de control. La copa debe tener un tamaño capaz de recibir gran cantidad de metal líquido y debe posicionarse para suavizar el caudal de llenado del metal líquido, establecerá un perfil constante y la separación inicial de óxidos. El bastón transporta el metal a uno o más corredores, que posteriormente distribuirán el metal líquido a las cavidades. Típicamente el bastón es cónico (largo y con un pozo al final) en forma para minimizar las turbulencias y no permitir mezclar el aire con el metal líquido. El corredor es el canal principal que dirige el metal hacia las entradas hacia las cavidades, suele tener una sección transversal larga y una forma tal que delimite el paso del metal y reduzca el flujo hasta que sea lo más uniforme posible. Las entradas dirigen el metal al molde, típicamente tienen pequeñas secciones transversales para controlar el flujo del metal en las cavidades y permitir una fácil separación pieza-molde, en la figura 2 se muestra un sistema de colada típico [3].

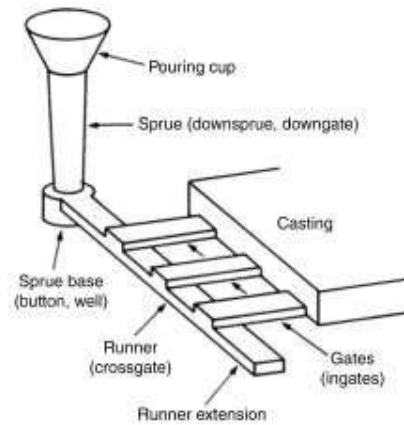


Figura 2. Sistema de Alimentación de gravedad típico.

Una de las primeras consideraciones es la menor área transversal en el sistema debido a una presión inicial que regulará la rapidez de llenado de la pieza, la cual es también el punto de mayor velocidad o turbulencia esto podría causar problemas severos en ciertas aleaciones.

El sistema de alimentación ayuda a disminuir fallas como porosidades y rechupes, por medio de las mazarotas ubicadas en una o más lugares. La mazarota es un almacenador de metal líquido que ejerce la función de continuar alimentando a la pieza con metal líquido hasta que esté completamente solidificada. De esta forma se suministra metal líquido a la zona de posible encogimiento, no permitiendo así los defectos. Para ayudar a contrarrestar los defectos se ayuda de ciertos detalles en la geometría de la pieza [4].

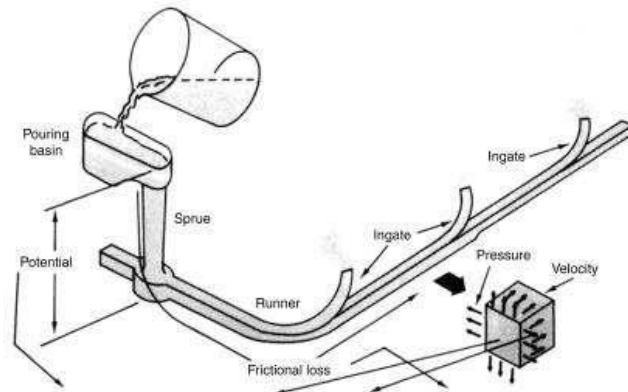


Figura 3. Diagrama del vaciado de un metal en un sistema de alimentación de gravedad.

Los sistemas de alimentación suelen clasificarse como: presurizados o no presurizados según el punto de ubicación del choke. El choke será el que controla el flujo de entrada al molde y tiene la menor área transversal de todo el sistema. En un sistema presurizado el choke está localizado en las entradas; mientras que en un sistema no presurizado está al fondo de la bajada.

La ley de la continuidad determina que el volumen del líquido que fluye a través de un canal es la misma en todos los puntos del mismo canal. Aplicado a un sistema de alimentación nos dice que la misma cantidad de metal que fluye a través del sistema permanece constante siempre y cuando se mantenga lleno. Algún cambio en la sección transversal de uno de los componentes sólo modificará por ende la velocidad de llenado. Siendo la sección transversal y la velocidad variables inversamente proporcionales.

El diseño de coladas se fundamenta en las variables antes mencionadas. Al reducir la velocidad permitimos que el sistema haga flotar los óxidos y otras inclusiones fuera del caudal del metal y los mantenga en el molde de arena. Por otro lado al aumentar la velocidad el sistema tiende a mantener los óxidos en el metal y podría causar que nuevos óxidos se formasen en aleaciones sensibles.

Un sistema de alimentación no presurizado ofrece ventajas para esas aleaciones consideradas sensibles a la formación de escoria. El choke, localizado al fondo de la bajada determina el flujo, causando que el metal pueda mantenerse y llenar por completo la bajada rápidamente. Esto reduce la velocidad del metal y restringe la formación de óxidos. La sección transversal del corredor se aumenta para reducir la velocidad y permitir que los posibles óxidos en la bajada tengan el tiempo suficiente para salir del metal e irse a la interfase con el molde. Todos los óxidos y la escoria deben haber sido ya eliminadas en la bajada y el corredor, cuando el metal alcanza la primer entrada.

El área transversal de las entradas es típicamente de 2 a 4 veces mayor que la del choke. Este alargamiento hace que los sistemas no presurizados sean muy útiles para las aleaciones sensibles a la formación de escoria, ya que no permite una re-oxidación.

El flujo en un sistema presurizado es estable en las entradas y trabaja mejor en aleaciones con menor sensibilidad. En estos sistemas, la bajada y el corredor tienen una mayor área transversal total comparada con la suma de todas las entradas. Mientras que en los sistemas no presurizados, las entradas tienen la menor área transversal total del sistema y son los puntos de mayor velocidad y turbulencia.

Esta alta velocidad de flujo impactando a los moldes o corazones podría provocar defectos de erosión y en el caso de aleaciones sensibles re-oxidarlas al entrar en la cavidad del molde. Uno de sus beneficios es que reduce el trabajo requerido para remover el sistema de alimentación y reduce las áreas de contacto de las entradas.

2.5 Sistema de Alimentación por Gravedad

En general las recomendaciones para el diseño de un sistema de colada por gravedad con aleaciones de aluminio son:

1. Uso de un filtro en el bastón.
2. Uso de una buena base del bastón.
3. Cambios bruscos en la dirección de flujo y la sección de corte deben ser evitados.
4. Sistemas de baja presión, normalmente razones en la sección transversal de 1:2:2, 1:2:4 o 1:4:4, siendo estas área del bastón: área corredor: entradas.
5. Combinación de corredores en el drag y entradas en el cope.
6. Llenado inferior en la cavidad del molde.

Siguiendo las líneas, los componentes básicos de un sistema de colada convencional para una partición de molde horizontal son presentados en la Figura 4.

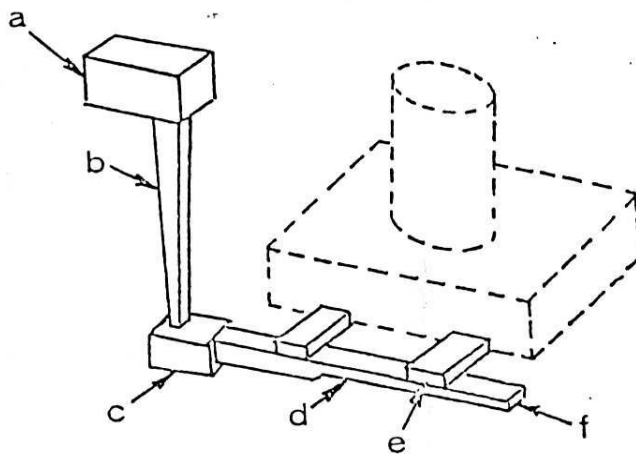


Figura 4. Sistema de alimentación convencional recomendado en la literatura para aleaciones sensibles; como Al o Mg. (a) Copa de vaciado; (b) bastón; (c) base del bastón; (d) corredor; (e) entradas; y (f) extensión del corredor.

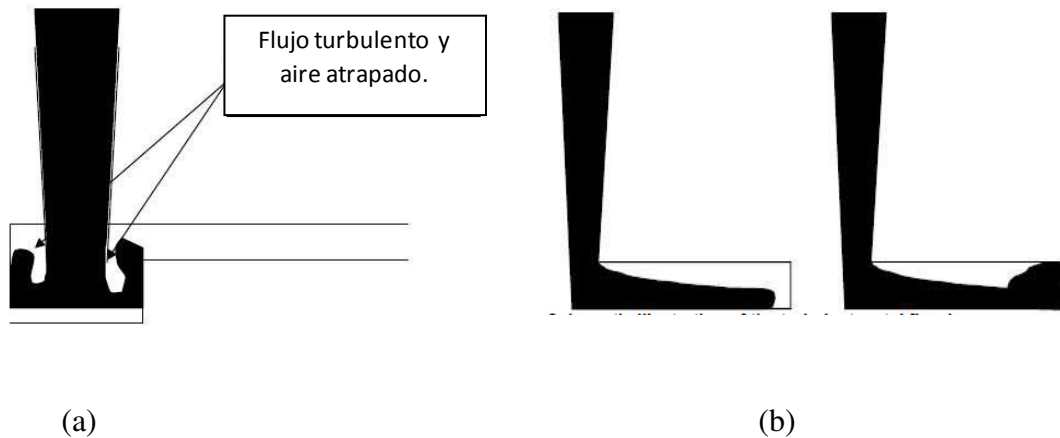


Figura 5. (a) Movimiento turbulento del flujo metálico debido al alargamiento del área de la sección transversal en la base del bastón; (b) Flujo metálico turbulento en un sistema no presurizado.

Aunque los sistemas no presurizados garantizan un llenado no turbulento puede llegar a producir burbujas de aire e inclusiones de óxidos en el bebedero y la base de la bajada, los corredores y las entradas.

Posibles Correcciones de un Sistema de Alimentación por Gravedad

Durante el llenado del molde pueden aparecer etapas críticas, como:

- i. Exposición de grandes áreas de metal al aire, ocasionando una posible oxidación de la superficie.
- ii. Al vaciar la energía potencial se convierte en energía cinética, incrementando la velocidad del metal, alcanzando su máximo normalmente entre $200 - 300 \text{ cms}^{-1}$ en la base de la bajada.

- iii. Al entrar el metal con una alta velocidad esta se debe bajar en los corredores y en las entradas, de otra manera se provocarían turbulencias al llenar el molde.

Efectos del diseño de colada en la calidad de las Piezas.

Dependiendo de la rapidez del flujo las turbulencias del caudal del metal líquido llegarán a la superficie, colapsando con la capa superficial de óxidos, fragmentando y atrapando a los óxidos en el líquido.

Se sabe que la estabilidad durante el llenado debe mantenerse para poder evitar óxidos atrapados debido a las posibles turbulencias en la superficie. Para lograr dicha estabilidad se necesita controlar la rapidez del líquido por debajo de 50 cms^{-1} . Es importante notar que esta velocidad crítica está en función de una altura del bebedero.

En la actualidad, una rapidez de flujo mayor a la crítica se toma como aceptable, porque el flujo del metal se mantiene, de tal forma que el metal líquido no se separa de las paredes del molde. Esto mediante el diseño de los corredores y de la unión entre el bebedero y los corredores.

Como no hay paredes de molde que restrinjan el flujo del metal mientras entra a las cavidades del mismo, la rapidez de flujo debe reducirse por debajo de la velocidad crítica, de 50 cms^{-1} , antes de llegar al punto deseado.

Así que las condiciones de diseño que garantizan la producción de piezas sanas de aluminio, son:

- i. El caudal del metal debe ser restringido por las paredes del sistema, sin separarlo de la superficie aún a velocidades mayores a la crítica.
- ii. La rapidez de flujo del metal debe reducirse por debajo del valor crítico, antes de llegar a la cavidad del molde, para prevenir turbulencias y aire atrapado durante el llenado.

Mediante estas condiciones, para mejorar el diseño del sistema de alimentación se deben seguir las siguientes observaciones:

- i. Se debe considerar la menor altura posible entre la cuchara de vaciado y el molde, se recomienda el uso de una copa de vaciado.
- ii. El caudal del metal líquido debe mantenerse en contacto con las paredes del molde, principalmente cuando se tienen velocidades mayores a la crítica, para prevenir zonas de baja presión y formación de burbujas de aire.
- iii. La velocidad del metal debe reducirse después del bebedero alcanzando la cavidad del molde a una velocidad menor a la crítica y disminuyendo la posibilidad de turbulencia.
- iv. La posición de las entradas debe planearse de tal forma que se disminuya al mínimo la caída del metal dentro de la cavidad del molde, dando así preferencia al llenado inferior.

De estas observaciones las más difíciles de conseguir son la segunda y tercera; el principal problema es cómo reducir la rapidez de flujo del metal sin causar turbulencia y sin incrementar el tiempo de vaciado.

Dentro del bebedero la caída libre del metal acelerará el flujo, reduciendo proporcionalmente su área transversal (Ley de Continuidad). En la base del bebedero la velocidad del flujo es alta (normalmente alrededor de 200 cms^{-1}). La reducción de velocidad puede obtenerse alargando el área de los corredores, pero esto implicaría aire atrapado debido a un llenado posterior del corredor como se muestra en la Fig. 6.

Rezvani et al propusieron la aplicación de sistemas delgados de tal modo que el corredor alargue su sección transversal. La entrada une el sistema al final del corredor, como se puede ver en la Figura 6. El espesor del corredor fue de 6 mm mientras que el de las entradas de 10 mm.

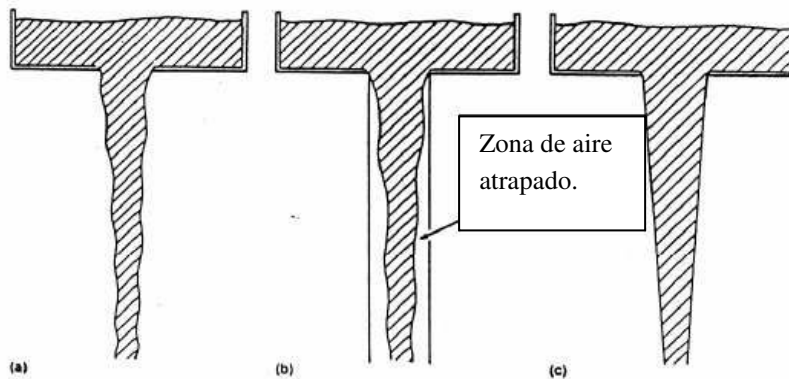


Figura 6. Ilustración de las ventajas de un bebedero tapado. (a) Flujo natural en caída libre; (b) Flujo de un bebedero derecho; y (c) Flujo en un bebedero bloqueado.

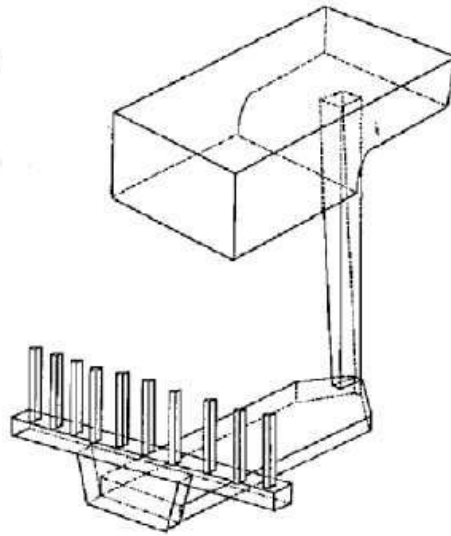


Figura 7. Vista de un sistema de alimentación no presurizado con un corredor delgado (6 mm espesor) para minimizar turbulencias en el llenado y permitir la elongación del área transversal del corredor.

El espesor y longitud del corredor incrementa las fuerzas de fricción reduciendo la velocidad del metal y las turbulencias.

2.6 Software de Simulación Magma

Software 3D de análisis e ingeniería CAE líder en simulación y optimización de procesos de fundición, muy útil para fundidores, diseñadores de herramental y diseñadores de colada de origen alemán.

MagmaSoft es un software enfocado al análisis del proceso de fundición de diferentes materiales como acero y aluminio, con una tecnología orientada para entender mejor el llenado, solidificación, propiedades mecánicas, esfuerzos térmicos, etc. Se maneja a través de una interface grafica de menús fácil de usar y opera bajo un modelador de sólidos. Contiene interfaces para importar datos CAD y una base de datos de Magmasoft para apoyar todo el proceso de diseño, producción y calidad.

MagmaSoft ayuda a evitar y predecir problemas de llenado debido al diseño de colada, problemas de diseño de moldes lo que ayuda a bajar costos de proceso. MagmaSoft se compone de módulos en diferentes áreas para tener una solución completa.

Las ventajas de usar el MAGMA 5 en la fundición o en el diseño son:

La reducción de defectos que provienen de corredores, turbulencias, óxidos y escoria atrapada, erosión de moldes, problemas causados durante la solidificación además de la predicción de defectos por el tratamiento térmico.

En la figura 8 se muestra se muestra la interface de resultados en la primer imagen se muestra un diseño de un neumático con el resultado de microestructura y los resultados de sdas y en la segunda imagen se muestra el análisis de llenado en velocidad para un diseño de una transmisión por el proceso de alta presión.

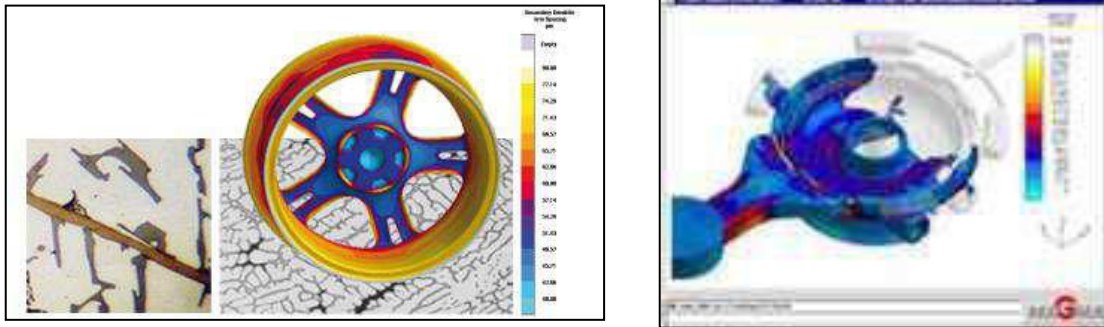


Figura 8 Muestra el resultado de microestructura y de velocidad durante el llenado

Antecedentes

Introducción

En las piezas vaciadas por el método de gravedad con aleaciones base aluminio debido a la sensibilidad de la aleación tiene la tendencia de generar óxidos durante el llenado y si no se tiene un sistema de alimentación adecuado algunos defectos se pueden presentar en las piezas debido a un mal llenado como pueden ser juntas Frías, Aire atrapado y Erosión como se muestra en la figura 9.

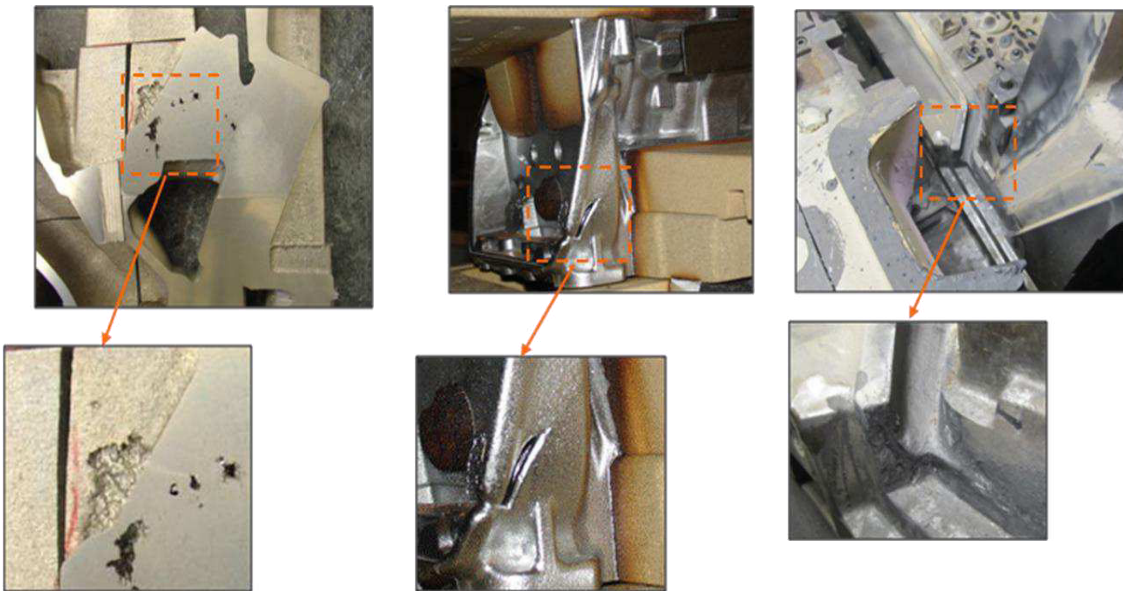


Figura 9 Muestra problemas comunes causados por un mal sistema de alimentación por el proceso de gravedad en piezas con aleaciones base aluminio

Diseño de sistema de colada para pieza de aleación de magnesio

El sistema de colada de una pieza cilíndrica de magnesio ha sido diseñado usando múltiples optimizaciones objetivas y el método Taguchi. Los procesos de llenado y solidificación en el molde fueron simulados usando MagmaSoft. Los resultados de la simulación indican que el sistema de colada tiene un efecto significativo en la calidad de las piezas de magnesio. Cuatro parámetros del sistema de colada llamados altura de entrada, anchura de entrada, altura de corredor y anchura de corredor fueron optimizados considerando múltiples criterios objetivos incluyendo la velocidad de llenado, porosidad por contracción y fatiga del producto.



Figura 10 Muestra las dimensiones modificadas en el sistema de colada y el resultado de estos cambios usando Magmasoft

CAPITULO 3

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Introducción

División de una colada por gravedad:

*Copa (Basin): Debe tener un tamaño capaz de recibir gran cantidad de metal líquido y debe posicionarse para suavizar el caudal de llenado del metal líquido esta establecerá un perfil constante y la separación inicial de óxidos.

- Baston (Sprue): Transporta el metal a uno o más corredores, típicamente el bastón es cónico para minimizar las turbulencias y no permitir mezclar el aire con el metal líquido
- Choke: Es el que controla el flujo de entrada al molde y tiene la menor área transversal de todo el sistema
- Difusor: Su función es dirigir al metal hacia el corredor reduciendo la velocidad debido al cambio de partición.

- Corredor (Runner): Es el canal principal que dirige el metal hacia las entradas hacia las cavidades, suele tener una sección transversal larga y una forma tal que delimite el paso del metal y reduzca el flujo hasta que sea lo más uniforme posible.
- Entradas (Gates): Dirigen el metal al molde, típicamente tienen pequeñas secciones transversales para controlar el flujo del metal en las cavidades y permitir una fácil separación pieza-molde.
- Trampas: Su función es la de atrapar los óxidos generados en el corredor además de reducir la velocidad.

Experimentación

Se desarrollaron procesos de simulación utilizando MagmaSoft, por medio de técnicas de diseño de experimentos, evaluando cada uno de los componentes de la colada vaciada por gravedad analizando el efecto de cada una de las variables que intervienen en el diseño de un sistema de alimentación a partir de un diseño paramétrico.

- Diseño óptimo de la copa (Basin)

El primer componente a analizar fue la copa de vaciado en donde se modificó la dimensión A de la copa mostrada en la figura 11.

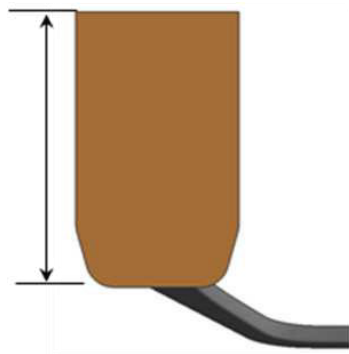


Figura 11 muestra la dimensión modificada de la copa de vaciado

El análisis en la copa de alimentación consistió en ver el efecto en el cambio de dimensión y la generación de turbulencias durante el llenado con este cambio, en las siguientes figuras 12 se muestra la mejor dimensión y la condición menos adecuada debido a la generación de turbulencias.

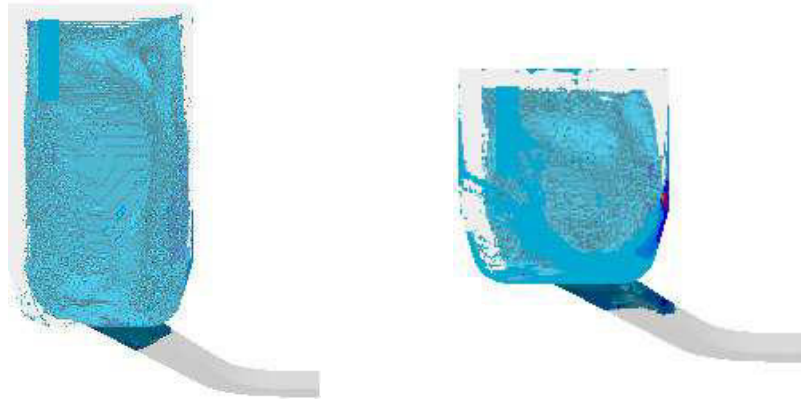
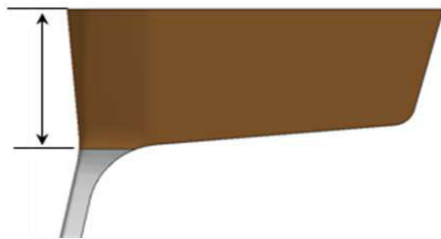


Figura 12 muestra la mejor condición en el diseño de la copa de alimentación
y la condición menos favorable en su diseño

Otra dimensión que fue analizada fue la altura de la copa en las dimensiones mostradas en la siguiente figura 13.



La figura 13 muestra la modificación de la altura de la copa de alimentación

Para determinar la mejor altura de la copa se simularon diferentes alturas y en cada una se analizaba la generación de turbulencia y la velocidad de caída en la figura 14 muestra la velocidad de caída y la generación de turbulencia para el mejor diseño y la menos favorable.

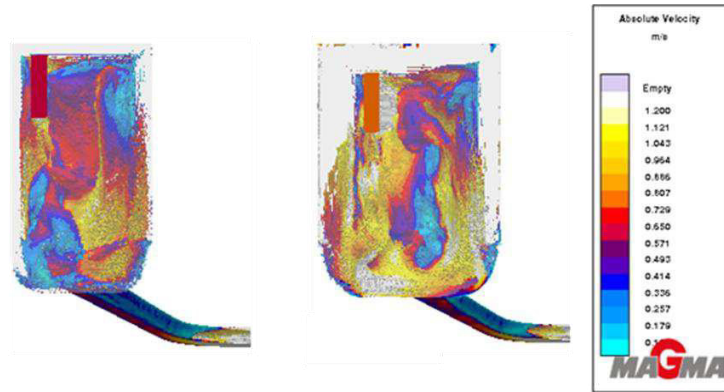


Figura 14 muestra la mejor condición para la altura de la copa y la menos favorable en la cual se aprecia la generación de turbulencia y altas velocidades debido a la altura

- Diseño óptimo del bastón (Sprue)

Una vez teniendo el mejor diseño de la copa este se tomó y se continuó con la determinación del mejor diseño del bastón, se realizaron simulaciones modificando radios y ángulos de inclinación partiendo de la colada paramétrica establecida y el mejor diseño de copa.

El primer radio modificado fue interno de la copa como se muestra en la siguiente figura 15.

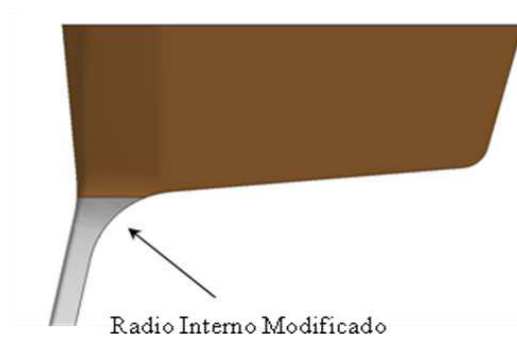


Figura 15 muestra el radio modificado en el inicio del bastón

En la siguiente figura se muestra los resultados de las simulaciones con la modificación del radio interior mencionado para la mejor condición y la menos favorable se analizó el efecto que tenía con respecto al aire atrapado, como resultado se obtuvo que la aplicación de radios grandes ayuda para un llenado más uniforme y que estos generan menor presencia de aire atrapado como se muestra en la figura 16.

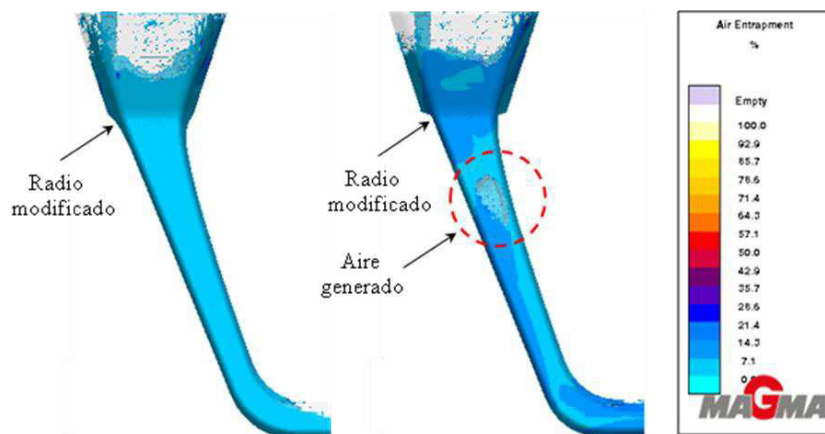
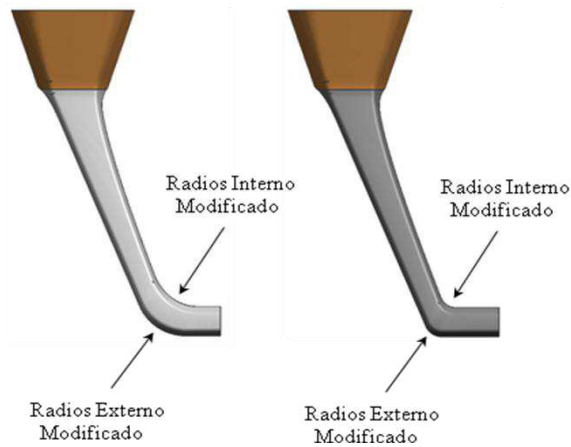


Figura 16 muestra el efecto en la modificación de radios en la cual aplicando radios pequeños en esta zona se presenta la generación de aire atrapado en el bastón.

Otro radio importante modificado fue el de la base del bastón debido a que las velocidades presentes en esta zona son muy altas por la caída libre del metal liquido, en la siguiente figura 17 se muestra el radio modificado estos se variaron cada 5°.



En la figura 17 se muestra los ángulos modificados en la base del bastón

Como resultado de las simulación para la modificación de radio en la zona mencionada se analizo la generación de aire atrapado así como la velocidad generada con esta modificación el resultado se muestra en la siguiente figura18.

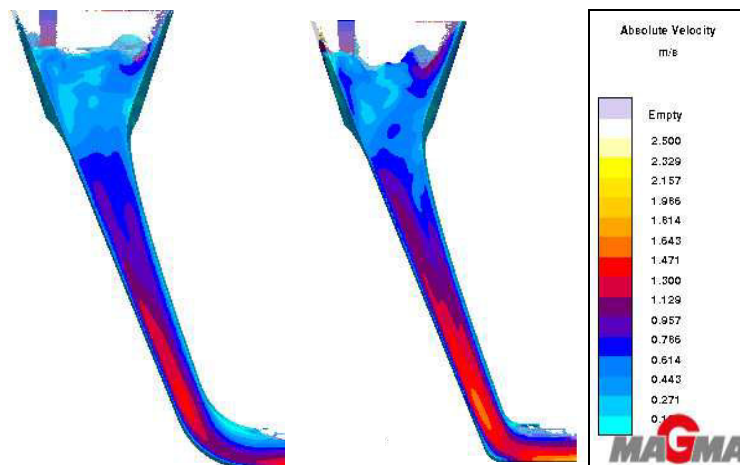


Figura18 muestra el resultado de la simulación con la modificación del ángulo el cual como resultado muestra que la velocidad es reducida cuando se aplican ángulos grandes.

Conociendo que los mejores resultados obtenidos fueron cuando se aplicaron ángulos grandes en las zonas mencionadas, los mejores ángulos se tomaron y se aplicaron para la próxima modificación en el bastón el cual consistió en modificar el ángulo de inclinación del bastón como se muestra en la siguiente figura 19.

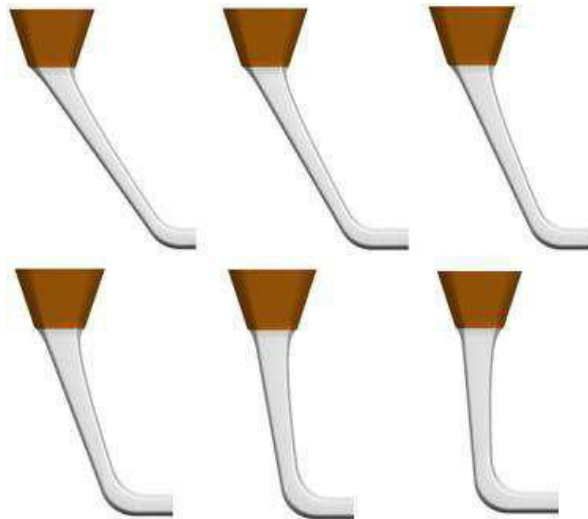


Figura 19 muestra los diseños simulados para la inclinación del bastón

Como resultado de las simulaciones

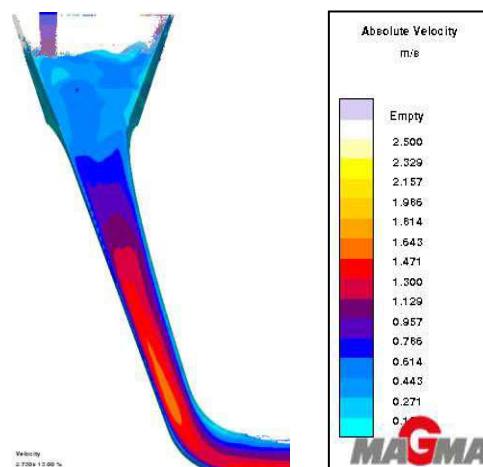


Figura 20 muestra el mejor diseño del ángulo de bastón obtenido de las simulaciones

Con los mejores diseños obtenidos en la experimentación para la copa de vaciado y el bastón partiendo de una colada paramétrica, La siguiente optimización fue la del corredor en la cual se variaron el ancho y la longitud del mismo hasta que se obtuvo el mejor diseño el cual presento la velocidad menor y el menor aire atrapado a lo largo del mismo.

Para obtener el mejor diseño se utilizo el modulo de Magma Frontier el cual nos indica el mejor diseño para esto fue necesario darle valores de entrada en las zonas de inicio y al final del corredor como se muestra en la siguiente figura 21.

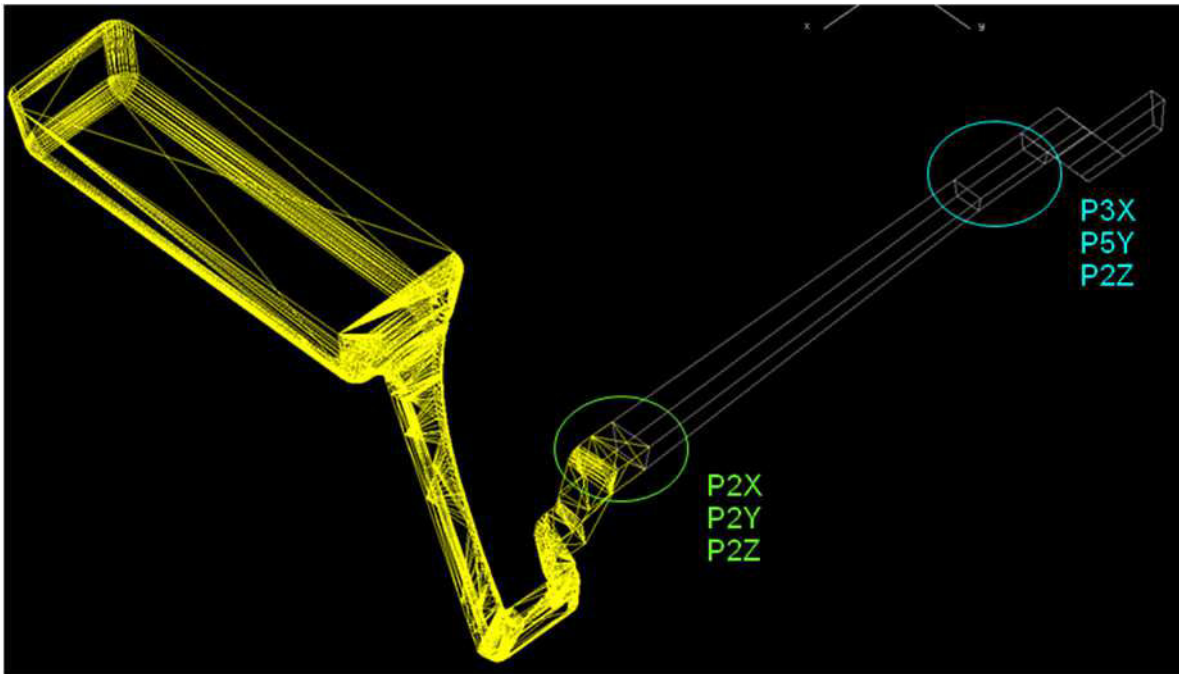


Figura 21 muestra la interface de los puntos de variación en el corredor para la simulación mediante el modulo de Magma Frontier.

En la siguiente figura 22 se muestra las variables de análisis para la simulación, las variables analizadas fueron la velocidad, el aire atrapado y partículas las cuales nos muestran la generación de turbulencias.

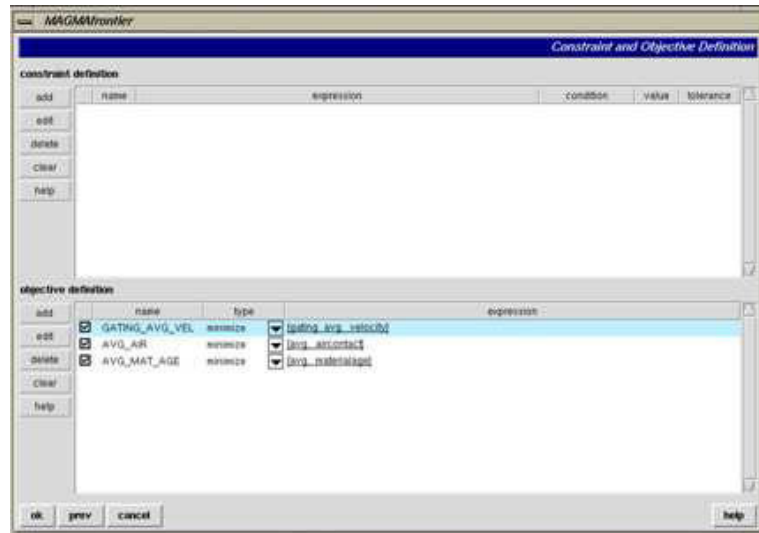


Figura 22 ventana del Magma Frontier en el cual se designan los objetivos los cuales fueron la velocidad, aire atrapado y partículas de llenado

En la siguiente figura 23 se muestra la ventana en donde se definieron los rangos de variación en los puntos de análisis del corredor y el valor de la variación la cual fue de 0,5mm.

variable	lower limit	upper limit	step	dependency
gating - P2X	109	113	0.5	<input type="checkbox"/> variable depends on...
gating - P2V	206	209.5	0.5	<input type="checkbox"/> variable depends on...
gating - P2Z	-39	-32	0.5	<input type="checkbox"/> variable depends on...
gating - P3Z	-25	-21.5	0.5	<input type="checkbox"/> variable depends on...
gating - P5V	195	199.5	0.5	<input type="checkbox"/> variable depends on...

Figura 23 Ventana de variación en los puntos de análisis

En la siguiente figura 24 se muestra el mejor diseño arrojado por la simulación en Magma Frontier en total se analizaron 37 posibles diseños en total. En la figura se muestra la matriz de diseños en la cual cada diseño se muestra como un punto negro, los puntos azules fueron los mejores diseños y el verde fue el diseño óptimo para el corredor el cual está encerrado con un círculo

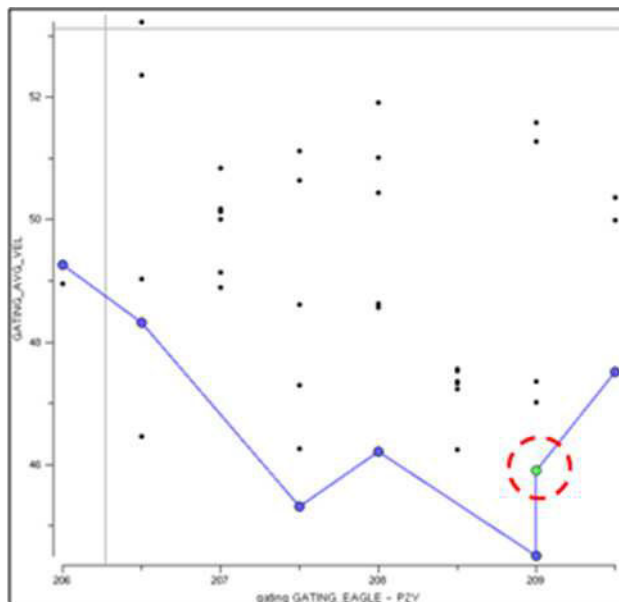


Figura 24 muestra el mejor diseño en la matriz de diseños

Una vez optimizada la colada se continuó con el vaciado de piezas en un molde de prueba en la cual se analizó la funcionalidad de la misma.

CAPITULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sistema de alimentación optimizado fue aplicado en un producto en desarrollo de la empresa Nematik S.A de C.V, para realizar las pruebas físicas y poder validar los datos simulados con los mejores diseños se utilizo un molde permanente de prueba en el cual el mejor diseño obtenido de cada componente analizados previamente con la colada parametrizada y mediante pruebas de llenado y simulación se obtuvo una buena correlación aplicando la metodología de diseño antes mencionada.

A continuación se muestra como fue el desarrollo de cada una de las interacciones de coladas simuladas y validadas en el molde permanente de prueba, la colada que se tomo como base fue un sistema de alimentación el cual pertenecía el molde de prueba, a partir de este se realizaron modificaciones.

Utilizando el programa MagmaSoft para las simulaciones de llenado. En el diseño inicial se aprecia un llenado no adecuado con la presencia de aire atrapado a lo largo del corredor el cual se generaba desde el bastón de alimentación y en la zona de difusor así como una activación de entradas no correcta debido a que no es uniforme como se muestra en las siguientes figura 25

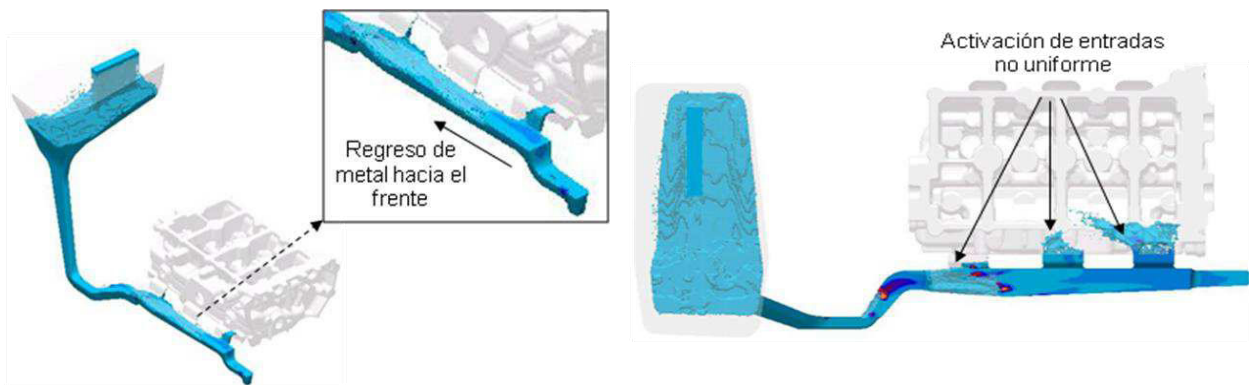


Figura 25 Muestra el diseño inicial de la colada en cual se aprecian altas velocidades y una activación de entradas no uniforme.

En este diseño inicial se aprecian altas velocidades mayores 50cm/s las cuales eran generadas por la presencia de aire atrapado generado desde el bastón a lo largo del corredor. Por lo tanto fue necesario la modificación de dimensiones de la copa de vaciado, el ángulo de inclinación del bastón, ajustar áreas en el difusor así como la forma de este mismo, aplicar los mejores ángulos de la copa y del bastón obtenidos anteriormente con la colada paramétrica.

Partiendo del diseño inicial se realizaron interacciones con los ajustes mencionados anteriormente hasta que se obtuvieron piezas libres de defectos por llenado como se muestra más adelante.

En la quinta interacción se muestra una mejora durante el llenado en la cual el aire atrapado fue reducido y la velocidad a lo largo del difusor fue reducida en donde se aprecia que los paquetes de aire presentes en la primera simulación fueron eliminados como se muestra en la figura 26.

Para las piezas vaciadas las dimensiones originales en las entradas se respetaron contando con tres entradas y para la obtención de la correlación fueron vaciadas piezas con llenados parciales.

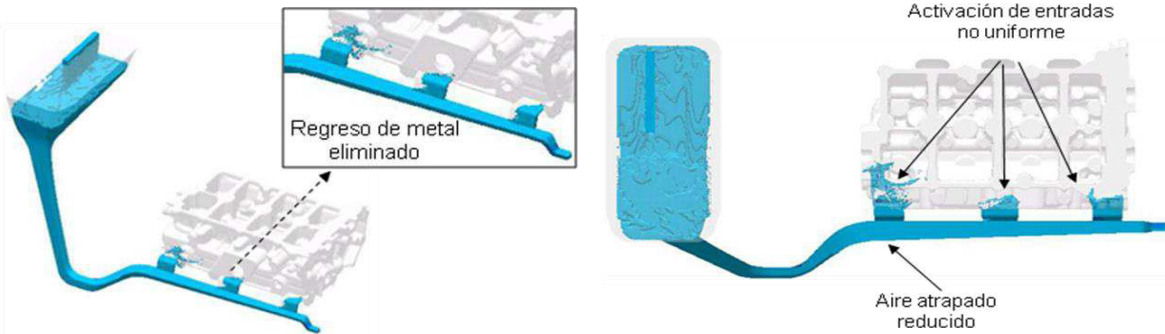


Figura 26 muestra el llenado con los ajustes aplicados para la copa y el bastón en la simulación de MagmaSoft.

Con estas modificaciones se realizaron cambios en el molde de prueba y fueron realizados llenados parciales para ver la correlación con la simulación, se muestra una buena correlación se observa como en ambos casos la activación de la primer entrada es similar. Los parámetros aplicados fueron un tiempo de llenado de 21 segundos y una temperatura de llenado de 725 °C.

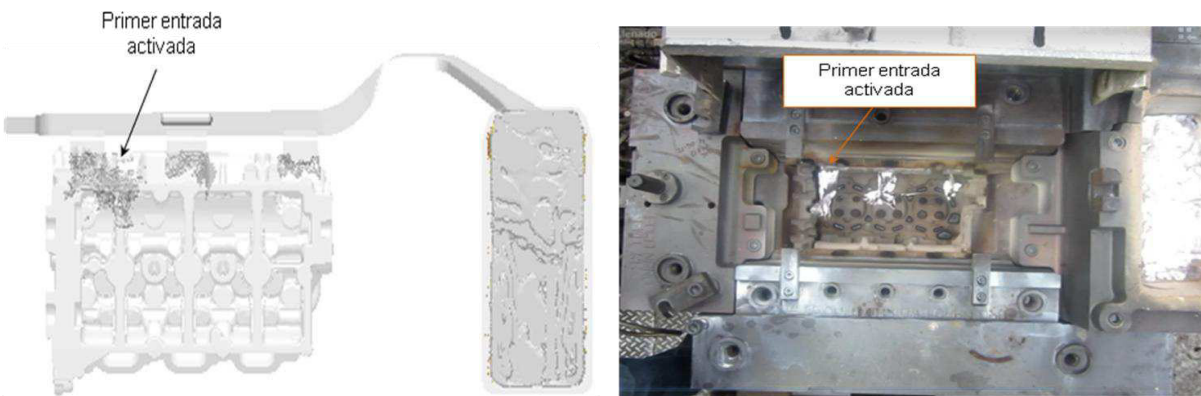


Figura 27 Muestra la correlación entre la simulación y el llenado Real en el Molde

En este nivel de modificación se observan problemas de aire atrapado en la pieza real como se muestra en la siguiente figura 28 en donde se observas cavidades huecas debido a la generación de aire atrapado durante el llenado.

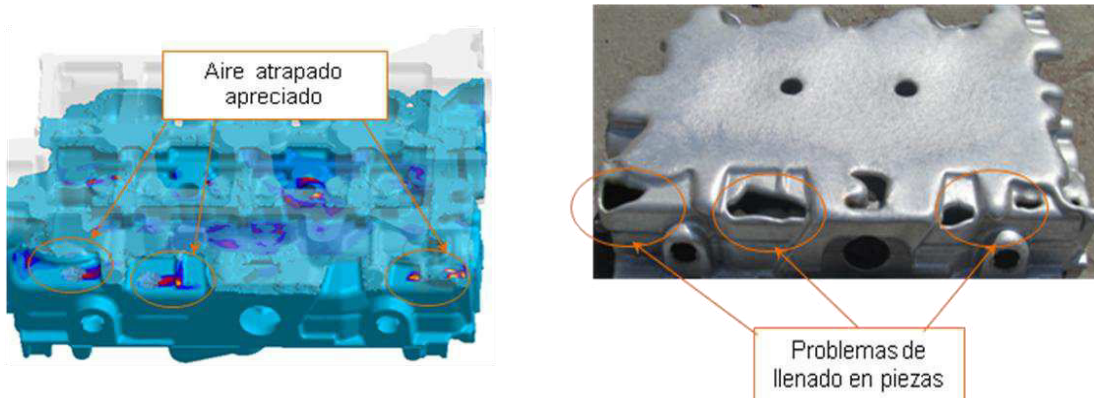


Figura 28 muestra la correlación entre simulación y la Pieza Real en donde se muestran cavidades huecas debido a la generación de aire atrapado

Debido a estos problemas se continuo con la optimización del sistema de alimentación, se analizaron zonas en el corredor que presentaban velocidades altas $> 50 \text{ cm/s}$ por lo cual se aplicaron las dimensiones en el corredor arrojadas por el modulo de Magma Frontier además de la adición de una trampa para eliminar el aire atrapado que restaba en el corredor así como una entrada extra para una mejor distribución de temperatura a lo largo de la pieza y prevenir juntas frías por zonas con baja temperatura durante el llenado estos cambios fueron aplicados en la novena interacción como se muestra en la figura 29.

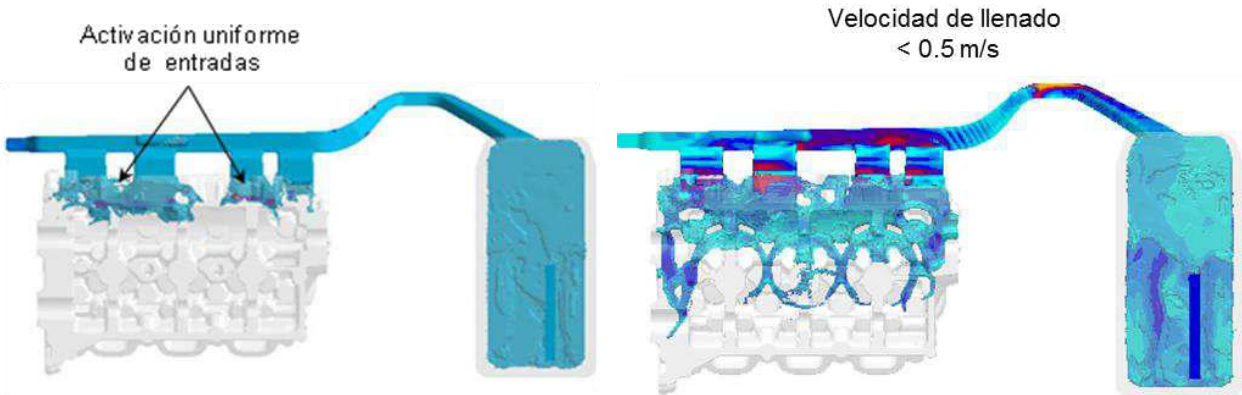


Figura 29 Muestra la activación de entradas uniforme y un llenado uniforme con bajas velocidades a lo largo del corredor.

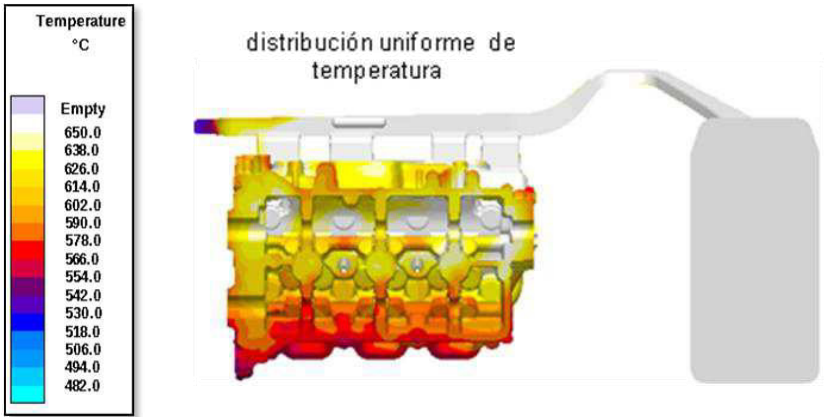


Figura 30 Muestra la distribución de temperatura con la colada optimizada en la simulación

Con los cambios aplicados para cada uno de los componentes del sistema de alimentación, se lograron obtener piezas libres de defectos por llenado como se muestra en las imágenes, con la incorporación de una cuarta entrada se obtuvo una buena distribución de temperatura, en las piezas vaciadas con este sistema de alimentación optimizado no se apreciaron juntas frías, además el aire atrapado que se apreciaba con las interacciones anteriores fue eliminado mostrada en la figura 31 y figura 32.

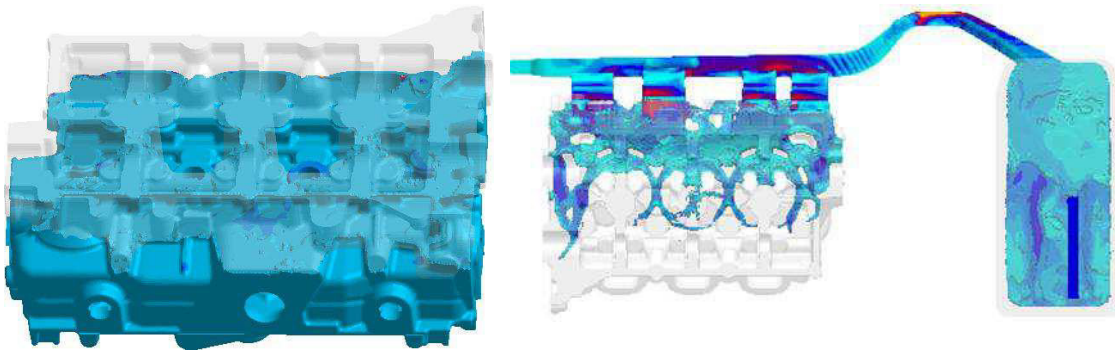


Figura 31 muestra un llenado uniforme con la colada optimizada sin la generación de aire atrapado en la pieza



Figura 32 muestra las piezas Reales vaciadas con la colada optimizada sin defectos causados por el llenado

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Se lograron obtener Piezas sanas libres defectos aplicando la metodología de Diseño para la obtención de un Sistema de alimentación Optimizado aplicando el mejor diseño de cada componente obtenido del análisis de llenado de la Colada y registrando el efecto que tenía el cambio de una variable en el diseño de cada componente partiendo de una colada paramétrica.

Los mejores dimensiones y radios obtenidos fueron aplicados en un Producto en desarrollo obteniendo como resultado un llenado uniforme y piezas sin problemas libres de defectos los cuales son ocasionados por una alimentación no adecuada como turbulencias que generan inclusiones, aire atrapado, altas velocidades de llenado y juntas Frías.

Con los datos obtenidos de la simulación con la modificación de cada variable y el efectos que tiene este cambio, se realizo una base de datos con para próximos desarrollos partiendo de los mejores diseños obtenidos.

Recomendaciones

- Aplicar la metodología de Diseño para los próximos diseños en nuevos herramentales.
- Seguir con el desarrollo de un sistema de alimentación analizando el efecto que tiene el diseño y ubicación del Filtro cerámico y malla en el sistema de alimentación.
- Evaluar el factor de fricción durante el llenado.

Referencias

-Campbell J. Casting Practice: 10 Rules of castings. Oxford: Elsevier Butterword-Heinemann, 32, 40, 44,101.

- New filling system design for bolster casting and computer simulation

Zhang Yutu, Li Guimao, Zhang Wanning and Wang Chengzhi

-A Runner-Gate Design System For Die Casting Dies

Chang-Ho Kim, Taek Hwan Kwon, Dept.of Mechanical Engineering, Dong-Eui University, Kaya-Dong 24, Pusanjin –Ku, Pusan, Korea, 614-714

-MAGMASOFT (version 5.1) Manual, Magma Foundry Technologies, Chicago,

2012

-J.M.Svoboda: American Foundry Men's Society Cast

Metals Institute AFS-CMI

-Type Selection of Gating System based on Bayesian Reasoning

Wang Bin, Tan Gui-Qui, Liu De-Fang and Che Win-Bo

-HandBook of Aluminum II

-Li Dianzhong, Zhang Yutuo, LiYiti. The novel Concept of Gating System Design. Special Casting & Non-ferrous Alloys

-R.P Pischel: Modern Casting 2006 7-24