



Trabajo Fin de Grado

Análisis de sistemas de alimentación y simulación mediante QuikCAST del proceso de fundición por gravedad de una pieza de aluminio

Analysis of feeding systems and simulation by QuikCAST of the gravity casting process of an aluminum piece

Autor

Dña. Laura Val Lacarta

Director

Dña. Ana Cristina Majarena Bello

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales
Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Zaragoza

-
Diciembre 2018

**Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza**

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./Dª. Laura Val Lacarta,

con nº de DNI 72975750Q en aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) Grado, (Título del Trabajo)

Análisis de sistemas de alimentación y simulación mediante QuikCAST del proceso de fundición por gravedad de una pieza de aluminio

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 13 de noviembre de 2018

Fdo: Laura Val Lacarta

Laura Val

Análisis de sistemas de alimentación y simulación mediante QuikCAST del proceso de fundición por gravedad de una pieza de aluminio

RESUMEN

El presente trabajo se va a centrar en el proceso de fundición de aluminio en molde permanente para la obtención de una pieza determinada.

En primer lugar, se ha realizado un estudio previo del proceso de fundición del aluminio para conocer cuál es el procedimiento más adecuado y los posibles problemas que se pueden dar durante la fundición para tenerlos en cuenta a la hora de diseñar los modelos. Este estudio también ha permitido hacer la selección de los materiales que se van a utilizar tanto para el molde como para el macho y que es conveniente realizar un tratamiento al aluminio antes de verterlo en el molde para disminuir la posibilidad de que aparezcan defectos en la pieza.

A continuación, se ha decidido el diseño del molde para la fabricación de la pieza a partir del estudio que se ha realizado previamente y se han hecho los cálculos necesarios para la obtención de las dimensiones que deben tener los distintos componentes del molde.

A partir de los cálculos obtenidos con anterioridad, se han diseñado los distintos modelos mediante el programa Solid Edge.

Una vez se han tenido los modelos ya diseñados y terminados, se introducen en el programa QuikCAST y se realizan las convenientes simulaciones del proceso de fundición. Esto permite obtener los valores de los distintos parámetros que intervienen a lo largo del proceso de fundición.

Cuando se tienen todos los resultados de este proceso, se ha realizado su estudio para determinar si el molde es apto o no y de esa forma obtener una configuración adecuada que cumpla las especificaciones necesarias.

Analysis of feeding systems and simulation by QuikCAST of the gravity casting process of an aluminum piece

ABSTRACT

The present work is going to center in the process of casting of aluminum in permanent mold for the obtaining of a certain piece.

First of all, a preliminary study of the aluminum smelting process has been carried out to find out which is the most suitable procedure and the possible problems that can be encountered during the smelting to take them into account when designing the models. This study has also allowed to make the selection of materials that are going to be used for both the mold and the male and that it is convenient to make a treatment to the aluminum before pouring it into the mold to reduce the possibility of defects appearing in the piece.

Then, the design of the mold for the manufacture of the piece has been decided on from the study that has been previously carried out and the necessary calculations have been made to obtain the dimensions that the different components of the mold must have.

Based on the calculations obtained previously, the different models have been designed using the Solid Edge program.

Once the models have been already designed and finished, they are introduced in the QuikCAST program and the convenient simulations of the casting process are carried out. This allows obtaining the values of the different parameters that intervene throughout the casting process.

When you have all the results of this process, your study has been done to determine if the mold is suitable or not and thus obtain an adequate configuration that meets the necessary specifications.

Índice de Contenidos

CAPÍTULO I. Introducción.....	1
1.1. Objetivo.....	1
1.2. Alcance	2
1.3. Resumen de la memoria	2
CAPÍTULO II. Proceso de fundición por gravedad	3
2.1. Descripción del proceso de fundición	3
2.2. Defectos	4
2.3. Materiales: Aluminio y acero.....	5
2.3.1. Pieza	5
2.3.2. Características de la colada	5
2.3.3. Molde	6
2.3.4. Macho	6
2.4. Proceso de tratado del aluminio	7
CAPÍTULO III. Diseño del sistema de alimentación y del molde	9
3.1. Cálculo del bebedero, sistemas de llenado y sistemas de alimentación.....	9
3.2. Molde.....	15
3.2.1. Primer modelo.....	15
3.2.2. Segundo modelo	16
3.2.3. Tercer modelo	17
CAPÍTULO IV. Simulación del proceso en QuikCAST.....	20
CAPÍTULO V. Resultados	22
5.1. Primer modelo.....	22
5.2. Segundo modelo	24
5.3. Tercer modelo.....	26
CAPÍTULO VI. Conclusiones y líneas futuras	32
Notación.....	34
Bibliografía.....	36

CAPÍTULO I.

Introducción

1.1. Objetivo

En el presente proyecto se va a realizar el diseño de los sistemas de alimentación para la fabricación de la pieza que se muestra a continuación mediante el proceso de fundición por gravedad con el software Solid Edge, para posteriormente proceder a realizar las convenientes simulaciones a partir del software QuikCAST y comprobar que el molde es apto para la fabricación de dicha pieza.



Ilustración 1. Pieza

Ilustración 2. Pieza

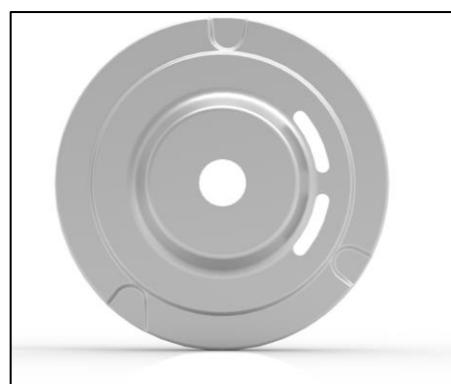


Ilustración 3. Pieza

La pieza se trata de una “carcasa tubo” cuya finalidad es proteger el cooler del turbo de un motor. Como se puede observar es una pieza con una geometría complicada, que presenta tanto zonas delgadas, en las que será necesario estudiar cómo va a ser el comportamiento del metal fundido, como zonas gruesas, dónde se va a producir la mayor concentración de energía calorífica y dónde pueden aparecer defectos.

Dicha pieza se quiere fabricar de una aleación de aluminio, en concreto de AlSi₇Mg, cuyas propiedades se explicarán más adelante.

1.2. Alcance

Se realizará el análisis y diseño de diferentes sistemas de alimentación de una pieza de aluminio para fabricarla mediante el proceso de fundición por gravedad, además del correspondiente cálculo teórico de las dimensiones necesarias de los sistemas de alimentación.

A partir del diseño se realizará el modelado con el software Solid Edge, para posteriormente simular el proceso de fundición por gravedad de la pieza mediante el software QuikCAST y analizar los resultados obtenidos.

1.3. Resumen de la memoria

El presente trabajo se va a centrar en el proceso de fundición de aluminio en molde permanente para la obtención de una pieza determinada.

En primer lugar, se ha realizado un estudio previo del proceso de fundición del aluminio para conocer cuál es el procedimiento más adecuado y los posibles problemas que se pueden dar durante la fundición para tenerlos en cuenta a la hora de diseñar los modelos. Este estudio también ha permitido hacer la selección de los materiales que se van a utilizar tanto para el molde como para el macho y que es conveniente realizar un tratamiento al aluminio antes de verterlo en el molde para disminuir la posibilidad de que aparezcan defectos en la pieza.

A continuación, se ha decidido el diseño del molde para la fabricación de la pieza a partir del estudio que se ha realizado previamente y se han hecho los cálculos necesarios para la obtención de las dimensiones que deben tener los distintos componentes del molde.

A partir de los cálculos obtenidos con anterioridad, se han diseñado los distintos modelos mediante el programa Solid Edge.

Una vez se han tenido los modelos ya diseñados y terminados, se introducen en el programa QuikCAST y se realizan las convenientes simulaciones del proceso de fundición. Esto permite obtener los valores de los distintos parámetros que intervienen a lo largo del proceso de fundición.

Cuando se tienen todos los resultados de este proceso, se ha realizado su estudio para determinar si el molde es apto o no y de esa forma obtener una configuración adecuada que cumpla las especificaciones necesarias.

CAPÍTULO II.

Proceso de fundición por gravedad

2.1. Descripción del proceso de fundición

El moldeo o fundición es uno de los procesos de conformado metálico que más ha perdurado en el tiempo. Este proceso consiste en introducir el metal fundido en un molde hueco cuya cavidad coincide con el tamaño y la forma de la pieza que se quiere fabricar, para su posterior solidificación y obtención de la pieza deseada.

Los procesos de moldeo permiten obtener series altas de piezas para minimizar los costes de fabricación tanto de materiales férreos como no férreos. También abarca un amplio rango de tamaños puesto que permite fabricar tanto piezas de reducidas dimensiones como piezas de gran volumen.

Para la fabricación del molde es necesario diseñar los conductos para el vertido del metal líquido y su conducción a la cavidad, llamados canales de llenado y distribución, además de elementos que permitan la acumulación de líquido para garantizar el llenado completo del molde, denominados respectivamente bebedero y mazarotas. Si la pieza presenta formas complicadas puede ser necesario introducir machos, que son elementos que deben insertarse en el interior del molde al realizar el proceso de fundición.

Los moldes utilizados para el proceso de fundición pueden ser de dos tipos:

- Moldes no permanentes: son moldes que una vez ha finalizado el proceso de fundición son destruidos para extraer la pieza moldeada. Se utilizan materiales como arena, yeso, cerámica y resinas, junto con aglomerantes para mantener la cavidad del molde inalterable hasta el vertido del metal fundido.

Para su construcción se suelen utilizar modelos que reproducen la geometría de la pieza y que pueden estar fabricados en madera o metal. Hay que tener en cuenta que dicho modelo se debe extraer fácilmente una vez se ha compactado la arena, por lo que conviene fabricarlo en varias partes. Además, para mejorar su extracción es necesario fabricar las caras del molde con cierta inclinación, atendiendo a su dirección de extracción. El valor de esta inclinación está normalizado y se aconseja que sea de entre 1° y 3° para modelos de madera y de entre $0,5^{\circ}$ y 1° para modelos de metal.

Si la pieza tiene cavidades internas o formas complicadas se utilizan machos en los moldes. Hay que tener en cuenta que deben soportar temperaturas muy elevadas y que se deben deshacer fácilmente para poder sacarlos del molde una vez ha solidificado la pieza.

Además de moldes de madera o metal se pueden utilizar otros materiales y métodos para la fabricación de moldes, como pueden ser el moldeo en cáscara o el moldeo a la cera perdida.

- Moldes permanentes: se utilizan para la producción continua de piezas y se fabrican con materiales metálicos, grafito o refractarios cerámicos, que son capaces de soportar altas temperaturas.

Si las piezas que se quieren fabricar presentan huecos internos, se suelen utilizar machos que pueden estar fabricados con metal, grafito o arena. Las cavidades internas del molde se deben recubrir con algún material refractario como pueden ser grafito o arcillas, esto permite que se forme una barrera térmica entre el molde y el material fundido, lo que reduce la velocidad de enfriamiento.

Es aconsejable precalentar el molde hasta unos 200°C aproximadamente para que la variación de temperatura no sea tan elevada.

Este tipo de moldes permite obtener piezas con buenos acabados superficiales y propiedades mecánicas, y es el que se va a utilizar para la fabricación de la pieza del presente proyecto.

2.2. Defectos

Es necesario someter a las piezas obtenidas mediante procesos de fundición a un cuidadoso control en el desmoldeo, acabado y maquinado, para poder verificar sus propiedades mecánicas y comprobar que no tengan defectos.

Los defectos pueden ser de tipo estructural (la estructura y las medidas de la pieza no se corresponden con las requeridas), interno (defectos en el interior de la pieza), superficial (la superficie de la pieza no es homogénea o presenta defectos) y mecánicos (no cumple los requisitos mecánicos exigidos).

Para visualizar los distintos defectos se pueden utilizar ensayos no destructivos que no afectan a la pieza. Estos pueden ser:

- A simple vista visualizando la pieza.
- Realizar un trazado de las dimensiones de la pieza.
- Observar el comportamiento de las grietas utilizando fluidos a presión.
- Realizar un examen magnético o de tintas penetrantes para revelar posibles grietas o discontinuidades.
- Utilizar rayos X, ultrasonidos y gammagrafías para poder ver el interior de las piezas sin que sea necesario destruirlas.

Los defectos más comunes que pueden aparecer en una pieza son:

- Rechupes: se pueden producir durante la contracción de la pieza. Para evitar que se produzcan es aconsejable la utilización de mazarotas.

- Tensiones internas: pueden surgir debido a esfuerzos internos producidos durante la contracción. Es un defecto que es posible que no sea detectado durante la realización del análisis a la pieza y que puede provocar una rotura de ésta durante su mecanizado o una vez ya ha sido mecanizada.
- Inclusiones: su aparición es debido a las posibles impurezas que pueda contener el metal en el momento de la colada. Éstas pueden estar formadas por los propios óxidos y sulfuros que contenga el metal o por escorias y partículas metálicas procedentes del molde.
- Segregaciones: surgen como consecuencia de una mala solidificación del metal, lo que provoca que ciertos elementos de la aleación o impurezas se concentren en ciertas regiones de la pieza.
- Gotas frías: este defecto se produce cuando la colada se realiza de forma directa. Las gotas salpican, se oxidan y solidifican muy rápidamente. Si la temperatura de la colada no es lo suficientemente alta para refundirlas, estas gotas quedan en el interior de la pieza.

2.3. Materiales: Aluminio y acero

2.3.1. Pieza

Como se ha comentado con anterioridad, la pieza debe estar fabricada de la aleación de aluminio AlSi₇Mg. Este material se utiliza cuando se requieren espesores de paredes medios y gruesos, alta resistencia mecánica y tenacidad (endurecimiento térmico), además de resistencia a la corrosión. Por lo que es un material apto para utilizarlo en piezas de automoción.

Dicha pieza presenta tanto zonas delgadas donde se deberá estudiar cómo se comporta el metal fundido, como zonas más gruesas en las que pueden aparecer rechupes u otros defectos debido a la concentración de energía calorífica.

Las características dimensionales más relevantes son las siguientes:

- Volumen de la pieza: $V_p = 3576,514 \text{ cm}^3$.
- Masa: $m = 9,621 \text{ kg}$.
- Espesor mínimo de la pieza: 9,6 mm.

En el Anexo 1 se pueden observar las dimensiones generales de la pieza.

2.3.2. Características de la colada

Conocer las características de la colada sirve para saber cuál va a ser el comportamiento del material durante todo el curso del llenado del molde y de la solidificación. Este conocimiento permite obtener una pieza con una estructura uniforme, de grano fino y sin defectos como pueden ser rechupes, inclusiones no metálicas, poros, grietas o tensiones.

	Densidad (kg/m ³)	Intervalo de solidificación (°C)	Temperatura de colada (°C)	Contracción en fundición (%)	Colabilidad relativa
AlSi7Mg	2700	550-625	700	1.2	Muy buena

Tabla 1. Características del AlSi7Mg

2.3.3. Molde

Para la fabricación de esta pieza se va a utilizar un molde permanente fabricado en acero X40CrMoV₅ (AISI H13) que está compuesto por 0,4% de carbono, 1% de silicio, 0,35 % de manganeso, 5,3% de cromo, 1,4% de molibdeno y 1% de vanadio.

Se trata de una aleación de acero que presenta un buen equilibrio entre tenacidad, resistencia a la formación de grietas debidas al choque térmico y resistencia al desgaste. Es un acero resistente a temperaturas elevadas, por lo que es ideal para utilizarlo en moldes de fundición a presión.

2.3.4. Macho

Los machos son una parte del molde que se utiliza para generar cavidades en las piezas y solucionar el problema de las contrasalidas durante el desmoldeo. Deben ser resistentes para poder extraerlos sin problemas en el desmoldeo de la pieza y durante la colada, aguantar bien el calor y deformarse poco por dilatación para no generar defectos internos en las piezas y ser permeables para que los gases se evacuen fácilmente.

Para la elaboración de esta pieza es necesaria la utilización de un macho, que en este caso se va fabricar en arena verde, puesto que por la geometría de la pieza no se puede utilizar un macho permanente ya que se crearía una contrasalida y no se podría separar el macho de la pieza una vez solidificada. Por ello, se ha seleccionado un material que permite crear la cavidad en el interior de la pieza y que una vez solidificada se pueda romper el macho solucionando este problema.

La arena verde es una mezcla de arena de sílice y bentonita (un derivado de la arcilla) a un 30 - 35 % con una cantidad moderada de agua. La arena se somete a un proceso en el que se mezcla dicha arena con varios tipos de arcilla y aditivos químicos a modo de aglutinantes. Una vez se tiene esta mezcla, se comprime el preparado según un patrón a determinadas presiones y temperaturas para asegurar que mantenga su forma durante su manipulación y durante el proceso de fundición. La proporción que se suele utilizar para su fabricación es de un 90% de sílice, un 7% de arcilla y un 3% de agua.

La geometría que tiene este macho en concreto es la que se muestra en las imágenes a continuación. Se ha diseñado de forma que genere la geometría deseada en la pieza a fabricar y además sea fácil saber su colocación en el molde de acero por parte del operario puesto que su forma debe encajar con la del molde.



Ilustración 4. Macho

Ilustración 5. Macho

2.4. Proceso de tratado del aluminio

Al tratarse de un molde cerrado, en el que no hay ninguna salida para la evacuación de los gases, es necesario realizar un tratamiento previo al aluminio para eliminar dicho gas, para ello se va a utilizar el método de Desgasificado por Rotación.

Cuando se funde el aluminio las impurezas más comunes que se pueden encontrar son hidrógeno disuelto e inclusiones sólidas. El hidrógeno disuelto va saliendo del seno del fluido conforme éste se va enfriando, lo que genera porosidades en la pieza. Además, el aluminio en estado fundido en contacto con el oxígeno atmosférico hace que se cree una capa de óxido en la superficie del metal durante el proceso de fundición, lo que hace que este óxido se transfiera posteriormente al metal fundido. Estas impurezas pueden crear defectos en la pieza final, disminuyendo sus propiedades mecánicas, por lo que es necesario eliminarlas para conseguir una calidad óptima.

El tratamiento mencionado antes es un proceso físico para el cual es necesaria la utilización de un flujo de gas inerte. El proceso consiste en difundir el hidrógeno, que se encuentra disuelto en el metal fundido, en burbujas de flujo gaseoso y transportarlo de esta manera a la superficie del metal en estado fundido.

Para que el proceso de desgasificado sea lo más eficaz posible se deben cumplir una serie de requisitos:

- Las burbujas de gas inerte que atraviesan el metal fundido deben ser de pequeño tamaño y estar bien distribuidas para que abarquen la mayor sección posible, con la finalidad de atrapar todo el hidrógeno e impurezas que pueda haber en el seno del metal fundido.
- Mover el metal fundido para acelerar el transporte del hidrógeno a las burbujas de gas inerte.
- Los óxidos o inclusiones de otros metales que pueda tener el aluminio fundido se eliminan al igual que el hidrógeno. Son removidas por flotación por las burbujas de gas inerte y flotan hasta la superficie del baño.

Para generar estas burbujas se utilizan desgasificadores rotatorios, que se encargan de producir burbujas muy finas de gas inerte distribuidas consistentemente a través del metal fundido. El gas inerte que se usa más comúnmente es el nitrógeno. Estos desgasificadores se suelen fabricar en grafito y están formados por dos piezas ensambladas, que son un eje y una cabeza de rotor. Estos rotores de grafito se degradan durante su uso fácilmente debido a que sus componentes se erosionan. Conforme se van degradando y perdiendo la geometría, su eficiencia en la eliminación de hidrógeno se va reduciendo. Para evitar esto y alargar la vida útil de los desgasificadores se les somete a tratamientos de resistencia a la oxidación.

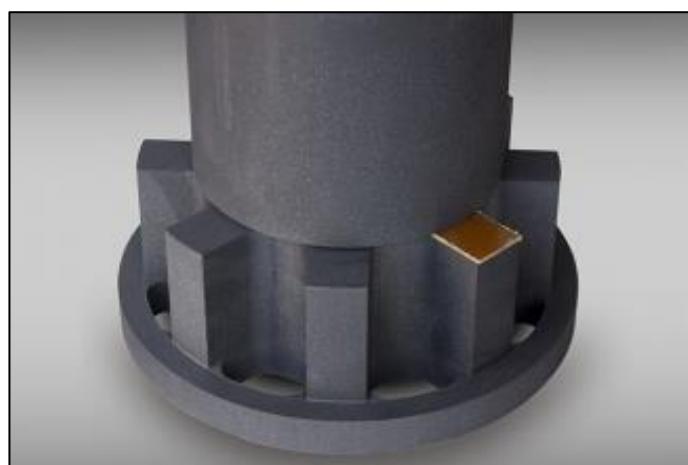


Ilustración 6. Desgasificador



Ilustración 7. Desgasificador CarboSystem

CAPÍTULO III.

Diseño del sistema de alimentación y del molde

Antes de la fabricación del molde y de la pieza, es necesario realizar una serie de ensayos para conseguir una configuración adecuada, que permita obtener la pieza sin defectos y con la geometría y dimensiones deseadas. Para ello, se han probado distintas configuraciones hasta llegar a la que se ha considerado la más adecuada para la fabricación de la pieza. Antes de dibujar los modelos con el programa Solid Edge se han realizado los cálculos pertinentes para la obtención de las dimensiones que deben tener tanto los sistemas de alimentación como las mazarotas.

3.1. Cálculo del bebedero, sistemas de llenado y sistemas de alimentación

3.1.1. Bebedero y sistemas de llenado

El sistema de llenado está formado por el bebedero, los canales de colada y las entradas a la pieza. Para realizar el cálculo será necesario conocer la masa de la pieza, el material del que se quiere fabricar y el tiempo de llenado.

El proceso para el cálculo de los parámetros necesarios es el siguiente:

1º) Cálculo del volumen de la huella

El volumen de la huella (V_h) se corresponde con el volumen de la pieza (V_p) más el volumen del sistema de alimentación. Se considera que el volumen de los sistemas de alimentación está comprendido entre el 30% y el 100 % del volumen de la pieza, por lo que el volumen de la huella será de 1,3 a 2 veces el volumen de la pieza.

Para la fabricación de esta pieza se va a utilizar una aleación aluminio-silicio, para la cual se suele tomar como valor que el volumen de la huella es 1,5 veces el volumen de la pieza.

$$V_h = 1,5 V_p$$

2º) Cálculo del tiempo de llenado

Se busca que el tiempo de llenado sea lo suficientemente rápido para evitar la diferencia de temperaturas entre distintas partes de la pieza y para que la pieza se llene correctamente, y lo suficientemente lento para que no haya turbulencias y el aire se evacue correctamente.

Para determinar el tiempo de llenado se puede realizar principalmente mediante dos métodos:

a) Método de Jander

Este método se utiliza para piezas que tienen un peso comprendido entre 0,1 kg y 1 kg. El cálculo del tiempo de llenado se realiza como indica la tabla siguiente:

Método de Jander		
Tipo de ataque	Aleaciones: Al.Cu, Al.Zn, Al.Mn, Al.Mg	Aleaciones: Al.Si, Al.Cu.Si,
Superior	$T = e$	$T = e+1$
Lateral	$T = e-1$	$T = e$
Inferior	$T = e-2$	$T = e-1$

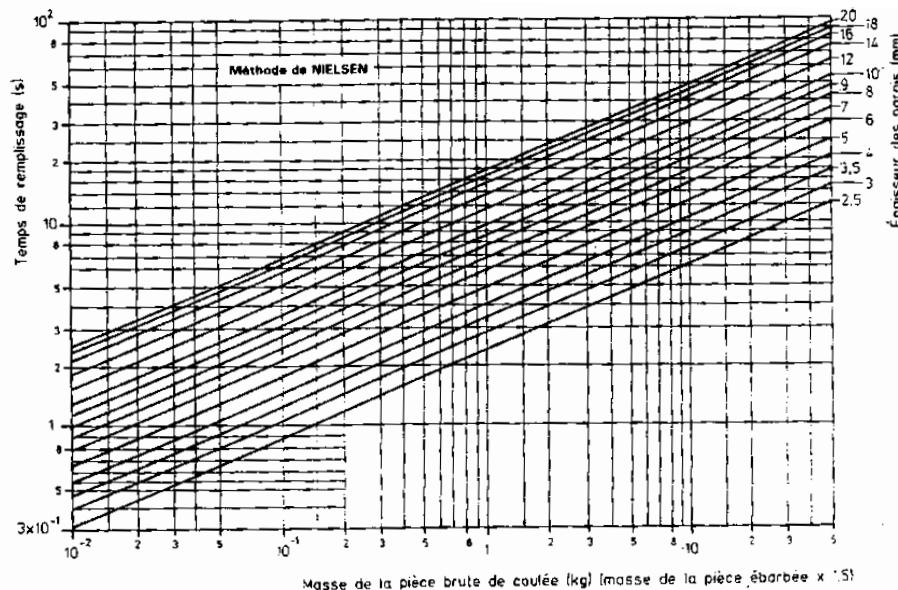
Tabla 2. Cálculo del tiempo de llenado por el método de Jander

Siendo “T” el tiempo de llenado en segundos y “e” el espesor mínimo de la pieza en milímetros.

b) Método de Nielsen

Este método permite calcular el tiempo de llenado en función del espesor mínimo y el peso de la pieza. Se puede utilizar para piezas que tienen un peso comprendido entre 10 g y 50 kg.

El tiempo de llenado se obtiene mediante el ábaco de Nielsen, que es el siguiente:



Gráfica 1. Ábaco de Nielsen

3º) Cálculo de la velocidad de llenado.

Para el cálculo de la velocidad de llenado hay que tener en cuenta la energía metaloestática del metal y las pérdidas de energía que sufre el metal durante la colada. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$v = K\sqrt{2gh}$$

En la cual los coeficientes significan lo siguiente:

K es el coeficiente de pérdida de energía, cuyo valor depende del sistema de alimentación:

Sistema de alimentación	Valor de K
Por arriba	0,8
Por un lado	0,7
Por abajo	0,5

Tabla 3. Selección del valor de K en función del sistema de llenado

g es la aceleración de la gravedad.

h es la altura de carga efectiva, cuyo valor depende del sistema de alimentación:

Sistema de llenado	Valor de h
Por arriba	$h = h_1$
Por un lado o por abajo	$h = (h_1 + h_2)$

Tabla 4. Selección del valor de h en función del sistema de llenado

Siendo h_1 la altura total de la bajante hasta S_d incluyendo el bebedero y h_2 la distancia entre la parte alta de la pieza y la parte superior del molde, como se puede observar en la siguiente imagen:

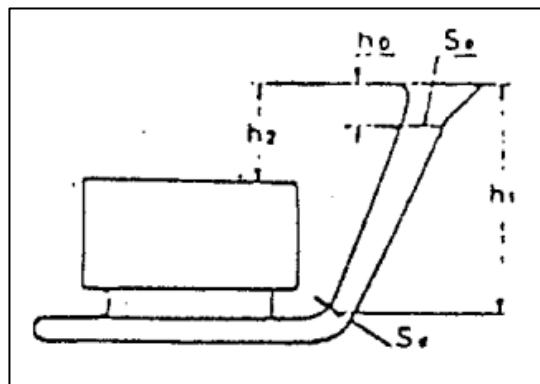


Ilustración 8. Representación de las alturas y secciones del sistema de llenado

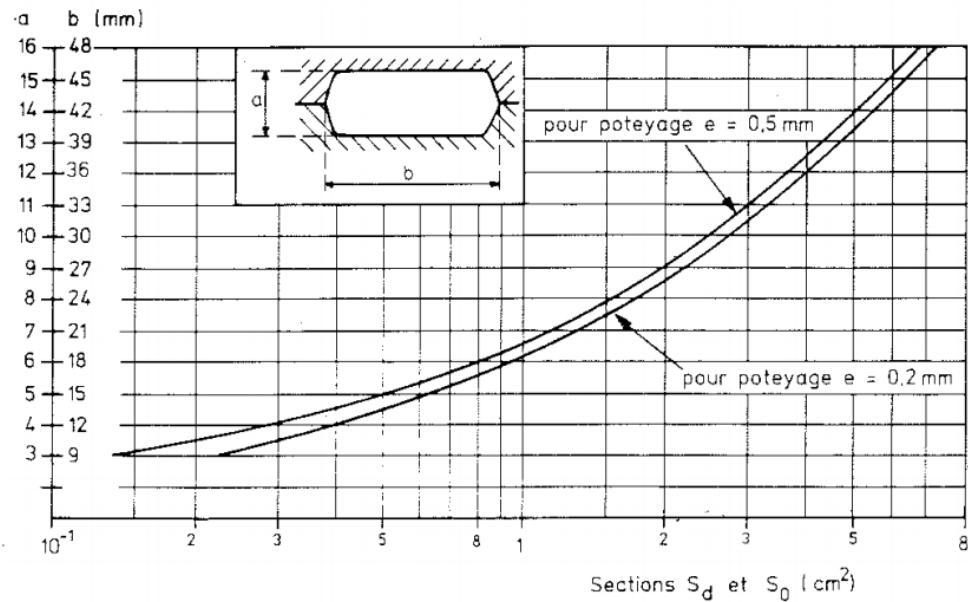
4º) Cálculo de la sección en la parte más baja de la bajante (S_d) para saber el caudal que pasa por dicha bajante.

Para su cálculo habrá que tener primero en cuenta como es el sistema de llenado:

Sistema de llenado	Representación	Fórmula
Por la parte superior		$S_d = \frac{V_h}{0,8 T \sqrt{2gh_1}}$
Por el lateral		$S_d = \frac{V_h}{0,7 T \sqrt{g(h_1 + h_2)}}$
Por la parte inferior		$S_d = \frac{V_h}{0,5 T \sqrt{g(h_1 + h_2)}}$

Tabla 5. Representación de las alturas y secciones de un sistema de llenado

Una vez se ha calculado la sección, ya se pueden calcular las dimensiones de la bajante con el siguiente ábaco:



Gráfica 2. Ábaco para obtener los valores de las dimensiones que debe tener la sección 5º) Cálculo de la sección del bebedero.

Para que el metal fundido no se despegue de las paredes del molde durante el llenado es necesario diseñar los canales de colada con un perfil cónico. Por lo que la sección de entrada al bebedero debe ser mayor que la sección de la parte más baja de la bajante. La relación que debe haber entre ambas secciones se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$S_o = S_d \sqrt{\frac{h_1}{h_0}}$$

dónde:

S_o es la sección de la parte superior de la bajante en cm^2

S_d es la sección en la parte más baja de la bajante en cm^2

h_1 es la altura total de la bajante hasta S_d incluyendo el bebedero

h_o es la altura del bebedero

Está establecido que la configuración más recomendable es que $h_o = \frac{h_1}{6}$ y $S_o = 2,4 S_d$ si la colada entra por el lateral, y si la colada entra por la parte de abajo $h_o = \frac{h_1}{3}$ y $S_o = 1,7 S_d$.

Es muy importante realizar el correcto cálculo del sistema de llenado puesto que de esa manera se pueden controlar las turbulencias del fluido además de retener los posibles óxidos e impurezas que pueda contener el metal. Si la pieza tiene una geometría muy complicada se puede mejorar la retención de los óxidos utilizando filtros. Como dichos elementos reducen la sección donde están colocados habrá que tenerlos en cuenta cuando se realicen los cálculos de los sistemas de llenado.

3.1.2. Sistemas de alimentación

Los sistemas de alimentación son necesarios puesto que la mayor parte de los metales cuando pasan de estado líquido a sólido disminuyen su volumen. A este fenómeno se le denomina contracción volumétrica y se produce en tres etapas:

- 1º) Contracción fluida: del metal fundido al enfriarse antes de su solidificación.
- 2º) Contracción de solidificación: durante el cambio de fase de líquido a sólido.
- 3º) Contracción sólida: del metal sólido conforme su temperatura baja hasta la ambiental (contracción térmica).

Estas contracciones volumétricas se deben evitar puesto que ocasionan defectos indeseados en la pieza, para ello se colocan sistemas de alimentación, como son las mazarotas, cuya función es evitar los defectos compensando la contracción aportando metal líquido durante el proceso. Las mazarotas pueden ser tanto abiertas como cerradas.

Para seleccionar el lugar donde deben ir colocadas las mazarotas, el método general a seguir es el siguiente:

- 1º) Descomponer si es posible la pieza en partes elementales.
- 2º) Definir en qué orden va a solidificar cada una de las partes que componen la pieza, teniendo en cuenta que primero van a solidificar las zonas más delgadas.
- 3º) Elegir el sentido de la colada de forma que el llenado del molde sea sencillo y económico y que las mazarotas deben ser el último elemento que solidifique.

Al elegir la forma de las mazarotas hay que tener en cuenta que se tienen que desmoldear cuando se abra el molde y que deben tener el volumen más pequeño que sea posible para minimizar el peso y la cantidad de metal a utilizar.

Es aconsejable situar un pequeño testigo para poder diferenciar la mazarota de la pieza, con la finalidad de poder separarlas más fácilmente.

Las mazarotas deben cumplir una serie de requisitos en cuanto a dimensiones, puesto que tiene que permanecer líquida durante más tiempo que el resto de la pieza, por ello debe cumplir que el volumen de la mazarota debe ser mayor o igual que el volumen de la pieza multiplicado por un coeficiente. El coeficiente por el que se suele multiplicar es 0,5.

Para aumentar el tiempo de solidificación de la mazarota, y por lo tanto aumentar su eficacia, aumentar la calidad de la pieza y disminuir la cantidad de metal necesario, hay varios recursos. Estos recursos son los siguientes:

- Utilizar una capa aislante sobre la superficie del molde, aunque resulta complicado que esta capa mantenga el espesor constante por todo el molde.
- Calentar el molde en las zonas donde sea necesario con mecheros exteriores. Cumple su función, pero hace el trabajo más complicado y hace que el molde se desgaste antes.
- Colocar en el molde materiales aislantes o calorifugantes.

- Dejar cámaras internas entorno a la mazarota para que se llenen de aire o rellenarlas con materiales aislantes.

Para el diseño de los moldes se ha tenido en cuenta que para el cálculo de las mazarotas el volumen de la mazarota debe ser 1,5 veces superior al volumen de la pieza.

3.2. Molde

Para la obtención del molde adecuado para la fabricación de la pieza, se han probado varias configuraciones que se han ido modificando hasta la obtención de un modelo más adecuado. Las más representativas son las que se van a mostrar a continuación, siendo cada uno de ellos una mejora del modelo anterior.

3.2.1. Primer modelo

La primera configuración que se analizó fue la que se muestra en la siguiente imagen:

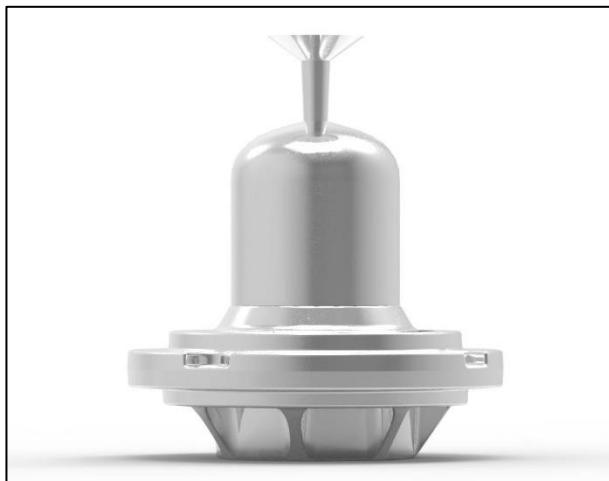


Ilustración 9. Representación de la configuración del primer modelo

Como se puede observar, se trata de un llenado por la parte superior de la pieza. Para el cálculo del sistema de llenado y mazarota se han utilizado las fórmulas explicadas con anterioridad, obteniendo las siguientes dimensiones y parámetros:

PRIMER MODELO	
T(s)	25
Sd (cm ²)	2,709618538
h (cm)	5
S ₀ (cm ²)	4,606351515
r _d (cm)	0,928707903
r _o (cm)	1,210886959
v (cm/s)	79,19595949

Tabla 6. Resultados de las dimensiones y parámetros del primer modelo

El molde resultante es el siguiente:

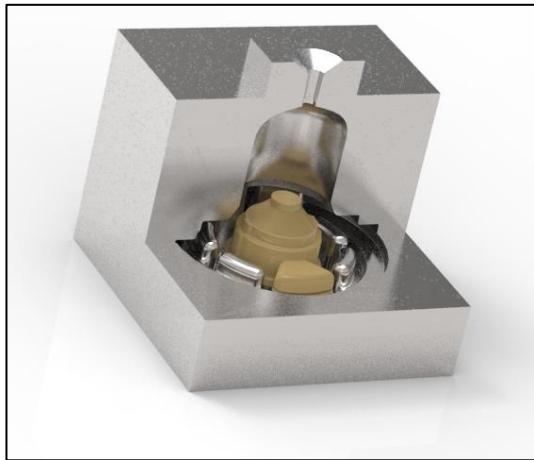


Ilustración 10. Molde del primer modelo

El proceso de llenado de este modelo se va a realizar de forma basculante, es decir que el modelo durante el llenado no se va a dejar fijo en posición vertical, si no que se va a variar su posición de 0 a 90° de forma progresiva. Esto se hace así porque al ser un llenado directo, el metal fundido caería bruscamente al interior de la cavidad, lo que ocasionaría defectos como gotas frías en la pieza y además el molde se deterioraría muy rápido debido al choque térmico producido. Por ello, se ha optado por un llenado basculante para que el líquido descienda más lentamente.

3.2.2. Segundo modelo

Para el segundo modelo se ha propuesto cambiar la colocación de la pieza, de forma que en lugar de estar plana como en el caso del primer modelo, esté en posición vertical. La geometría que presenta el segundo modelo es la siguiente:



Ilustración 11. Representación del segundo modelo

Las dimensiones y parámetros del modelo se han obtenido mediante las fórmulas explicadas con anterioridad, al igual que en el caso del primer modelo. Obteniendo los siguientes valores:

SEGUNDO MODELO	
T(s)	25
Sd (cm²)	2,709618538
h (cm)	5
So (cm²)	4,606351515
Mirando la gráfica 2	
Sd (cm²)	1,1x3,3
So (cm²)	1,4x4,2
v (cm/s)	79,1959595

Tabla 7. Resultados de las dimensiones y parámetros del segundo modelo

El molde que se obtiene será basculante como en el primer modelo y será el que se muestra a continuación:



Ilustración 12. Molde del segundo modelo

3.2.3. Tercer modelo

En el tercer y último modelo, se ha colocado la pieza en posición horizontal y se ha cambiado el llenado por la parte superior por un llenado lateral. Se ha diseñado el llenado de esta manera para que el metal fundido tenga un mayor recorrido a través de los sistemas de llenado, lo que permite que llegue de forma más homogénea a la cavidad de la pieza en el molde. El arco que hay antes de los dos canales de distribución que vierten el metal a la pieza, se ha creado así para que el fluido antes de entrar a la pieza choque con los extremos de dicho arco. De esta manera, se facilita que se queden en esos extremos posibles impurezas que pueda contener el metal y además el fluido pase de un flujo turbulento a uno laminar. Esto último es lo más deseable para llenar el molde, puesto que disminuye la probabilidad de que se produzcan imperfecciones en la pieza.

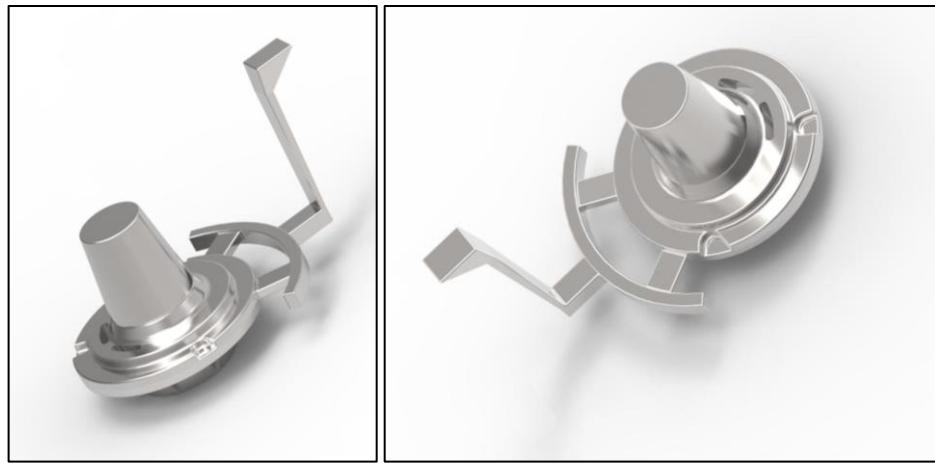


Ilustración 13. Representación de la configuración del tercer modelo

Las dimensiones y parámetros se obtienen de la misma manera que para el primer y segundo modelo y son los siguientes:

TERCER MODELO NIELSEN	
T(s)	25
Sd (cm²)	1,778033884
h1 (cm)	26
h2 (cm)	4,333333333
So (cm²)	4,267281322
Mirando la gráfica 2	
Sd (cm²)	0,9x2,7
So (cm²)	1,3x3,9
v (cm/s)	170,68138

Tabla 8. Resultados de las dimensiones y parámetros del tercer modelo

El molde resultante es el que se muestra a continuación:

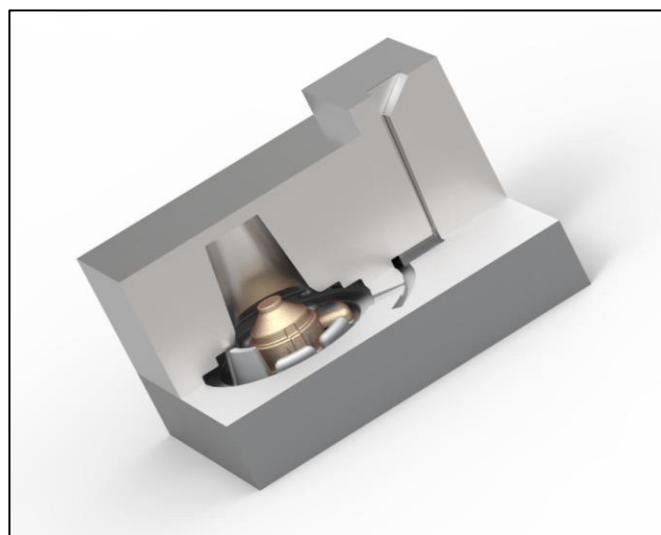


Ilustración 14. Molde del tercer modelo

Este molde se ha diseñado de forma que las cavidades de los sistemas de llenado que más van a deteriorarse debido al choque térmico estén separadas del resto. Lo que permite que, con el paso del tiempo, sea sólo necesario reemplazar esa parte del molde cuando este deteriorada, pudiendo conservar el resto durante más tiempo, alargando su vida útil.

CAPÍTULO IV.

Simulación del proceso en QuikCAST

A partir de los modelos diseñados mediante el programa Solid Edge, se hacen las simulaciones con el programa QuikCAST. Para su realización es necesario introducir los materiales y los parámetros que serán necesarios durante la fundición. En este apartado sólo se van a indicar los parámetros que van a influir en el proceso de fundición, el guion sobre el manejo del programa se encuentra en el anexo 2.

Las condiciones para la fundición serán las mismas para los tres modelos, lo único que cambia es la geometría.

Se considera que la temperatura inicial de fundición es de 700° C, puesto que el material a fundir es aluminio, y que la temperatura del molde va a ser de 200° C. La temperatura del molde es de 200°C porque se ha precalentado antes del proceso de fundición. Esto se hace de esta manera para disminuir el choque térmico, consiguiendo reducir a su vez la posibilidad de que aparezcan imperfecciones y además alargar la vida útil del molde.

Se introducen los valores de la velocidad de llenado que se han calculado previamente.

Se indica la permeabilidad del macho y del molde. En este caso sólo es necesario introducir la permeabilidad en el macho de arena que es de $1,2 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$, puesto que el molde es de acero, por lo que su permeabilidad es 0.

Se indica el cambio de rugosidad de la pieza, esto es debido a que la superficie de la pieza que va a estar en contacto con el molde de acero va a tener una rugosidad diferente a la de que este en contacto con el macho de arena. Para el cálculo de la rugosidad se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Rugosidad} = \frac{\text{espesor medio de aspera}}{\text{diámetro hidráulico}}$$

Siendo el espesor medio de aspera de 0.008 mm para el acero y de 0.2 mm para la arena y el diámetro hidráulico debe ser igual al diámetro que se le ha dado a la entrada del fluido en el programa, en este caso es de 20 mm. A partir de estos valores se obtiene que la rugosidad del acero es de 0.0004 mm y la rugosidad de la arena es de 0.01 mm.

Finalmente se indica que tanto el primer como el segundo modelo son basculantes, esto quiere decir que durante el llenado no permanecen todo el tiempo en posición vertical, si no que se va variando su posición de 0 a 90 ° de forma progresiva. Esto se hace así porque si estuvieran siempre en posición vertical, al verter el metal fundido caería directamente a la cavidad del molde, para evitar esto se va variando su posición para que el llenado sea más lento y progresivo. En el caso del tercer modelo no

es necesario que sea basculante puesto que ya se ha tenido en cuenta esto a la hora de diseñarlo y se ha solventado el problema previamente.

Una vez se han introducido todos los parámetros necesarios ya se puede ejecutar el programa para que realice los cálculos y posteriormente obtener los resultados del proceso de fundición.

CAPÍTULO V.

Resultados

En este apartado se van a explicar los resultados obtenidos mediante las simulaciones con QuikCAST para los tres modelos diseñados. Se pueden encontrar las simulaciones completas en el Anexo 3, puesto que sólo se van a analizar los parámetros más relevantes, y la indicación del parámetro analizado durante cada simulación en el Anexo 2.

5.1. Primer modelo

El primer parámetro que se analiza es el tiempo de llenado, que para esta pieza es de 31.96 segundos. Una vez se ha llenado el molde se procede a analizar el tiempo de solidificación que en este caso es de 197.32 segundos. Como se puede observar en las imágenes siguientes la pieza no solidifica de forma homogénea al principio y además no solidifica la mazarota en último lugar, si no que lo hace la zona que está comprendida entre la mazarota y la pieza, lo que podría ocasionar imperfecciones.

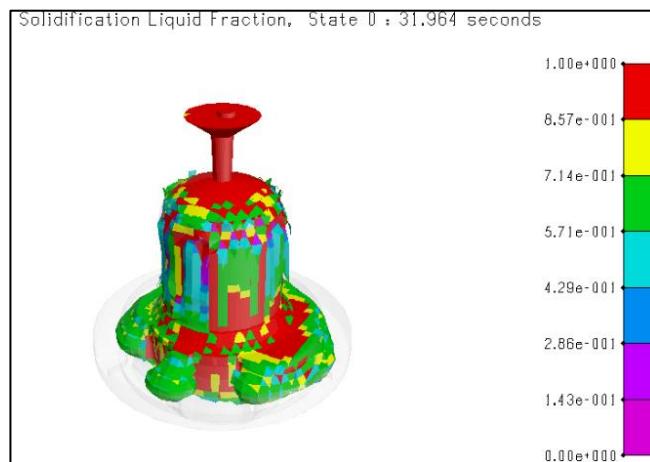


Ilustración 15. Solidification Liquid Fraction $T = 31.964 \text{ s}$

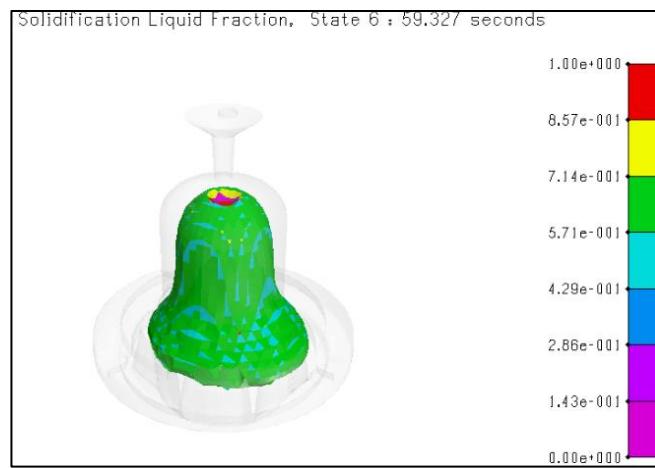


Ilustración 16. Solidification Liquid Fraction T = 59.327 s

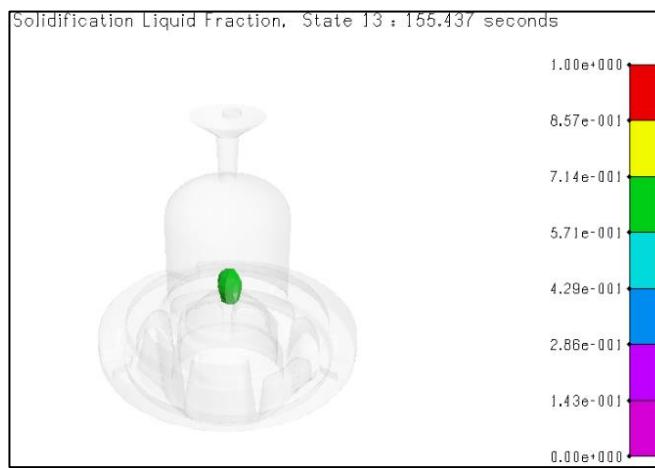


Ilustración 17. Solidification Liquid Fraction T = 155.437 s

Otro parámetro a analizar es la contracción que sufre la pieza durante la solidificación. Como se puede observar en la siguiente imagen, la parte que sufre una mayor contracción está situada en la mazarota. Esto no influye en la pieza, puesto que una vez ha terminado el proceso por fundición se separa la mazarota de la pieza.

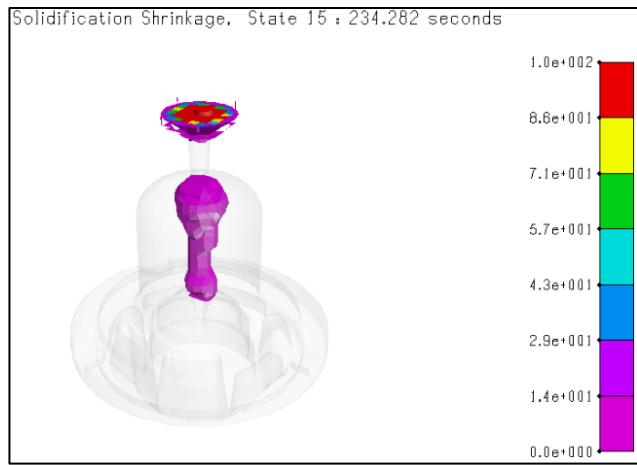


Ilustración 18. Solidification Shrinkage T = 234.282 s

La temperatura de llenado es de 700°C, donde el fluido se encuentra en estado líquido, y va disminuyendo progresivamente hasta temperatura ambiente. La temperatura a la que el fluido comienza a pasar de estado líquido a sólido es a los 517.4°C aproximadamente según el programa, siendo la temperatura teórica de solidificación del aluminio de 550°C.

5.2. Segundo modelo

Como el primer modelo presentaba el problema de que la mazarota no solidificaba en último lugar si no que lo hacia la zona comprendida entre la mazarota y la pieza, se decidió diseñar un modelo diferente. De forma que el llenado no se hiciera con la pieza colocada en posición horizontal si no en vertical, y de esta manera analizar los cambios producidos durante el proceso de fundición con la pieza en esta posición.

El tiempo de llenado en este caso es de 24.16 segundos y el de solidificación de 163.034 segundos, ambos valores inferiores al caso anterior.

Para este modelo, las últimas zonas que solidifican son las que se encuentran en la parte superior en contacto con el macho. Esto no es conveniente, puesto que al solidificar en primer lugar la zona de unión entre mazarota y pieza, hace que la mazarota no cumpla su función y no pueda seguir alimentando a la pieza, por lo que en esa zona se generarán rechupes y falta de material. Por lo tanto, aunque en este modelo la mazarota sí es el último elemento que solidifica, no es adecuado por lo que se ha comentado con anterioridad.

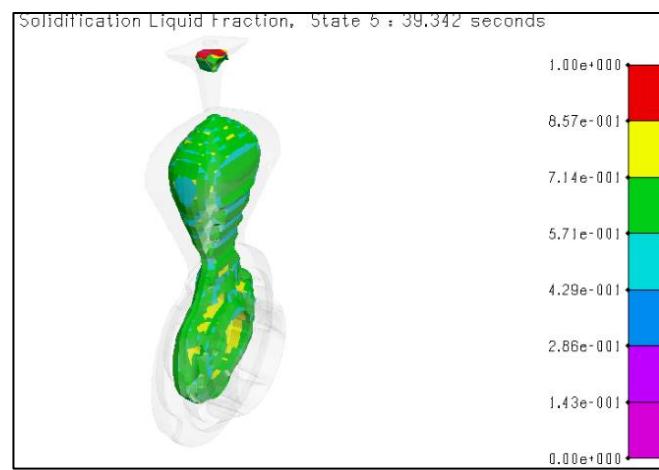


Ilustración 19. Solidification Liquid Fraction T = 39.342 s

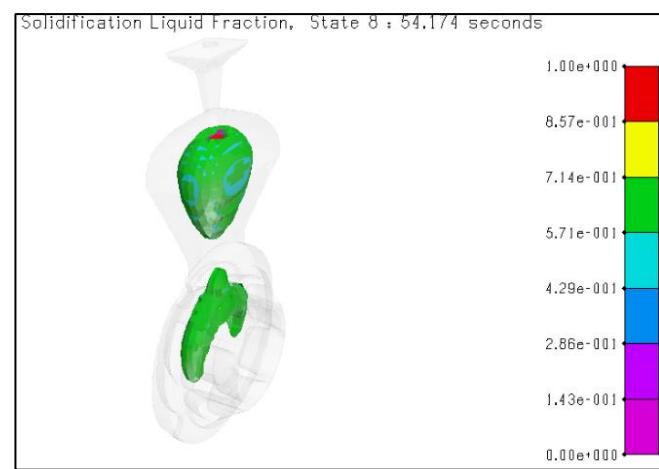


Ilustración 20. Solidification Liquid Fraction T = 54.174 s

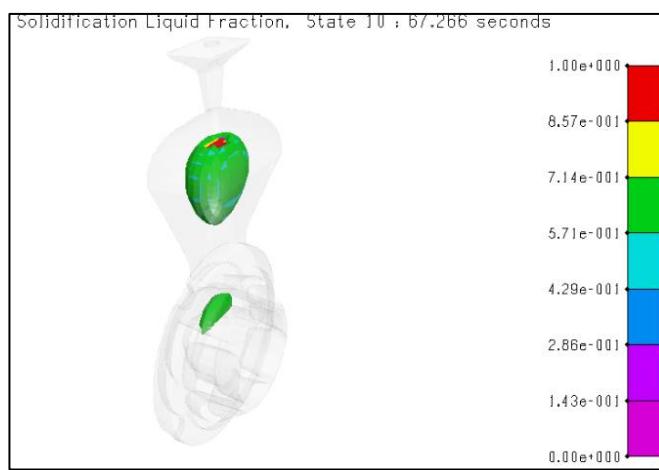


Ilustración 21. Solidification Liquid Fraction T = 67.266 s

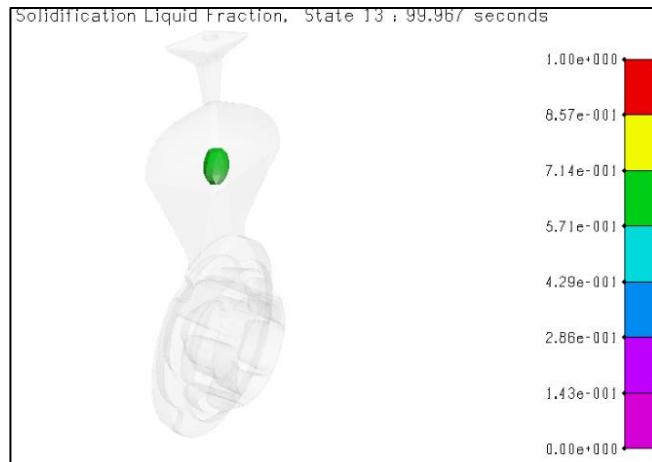


Ilustración 22. Solidification Liquid Fraction $T = 99.967 \text{ s}$

Una vez se ha analizado la solidificación, se procede a analizar los resultados sobre la contracción que se produce en la pieza. Como se puede observar en la siguiente imagen, ha ocurrido lo que se esperaba por cómo se produjo la solidificación y aparecen contracciones en la pieza.



Ilustración 23. Solidification Shrinkage $T = 163.034 \text{ s}$

La temperatura de llenado va de los 700°C que es la temperatura a la que se vierte el aluminio hasta los 517.4°C , una temperatura algo inferior a la de solidificación del aluminio.

5.3. Tercer modelo

El diseño del tercer modelo parte del primero, puesto que como se ha explicado anteriormente en el segundo modelo se presentó el problema de que se producían contracciones en la pieza, pero se han cambiado tanto los sistemas de llenado y de alimentación como la mazarota. Esto se ha hecho así para evitar hacer el modelo basculante puesto que complica el proceso de fundición. También se ha hecho una partición del molde, separando la parte del molde que contiene los canales de llenado y la parte que contiene la pieza, como se ha explicado en un apartado anterior.

Para este modelo el tiempo de llenado es de 14.12 segundos y el de solidificación es de 110.25 segundos. Como no es basculante se disminuyen tanto el tiempo de llenado como el de solidificación, lo que agiliza el proceso.

Como se puede observar en las imágenes siguientes, la pieza va solidificando de forma más o menos uniforme y la mazarota es lo que solidifica en último lugar. De esta manera se han solucionado los problemas que se producían en los modelos anteriores, disminuyendo así los posibles defectos que se puedan generar en la pieza.

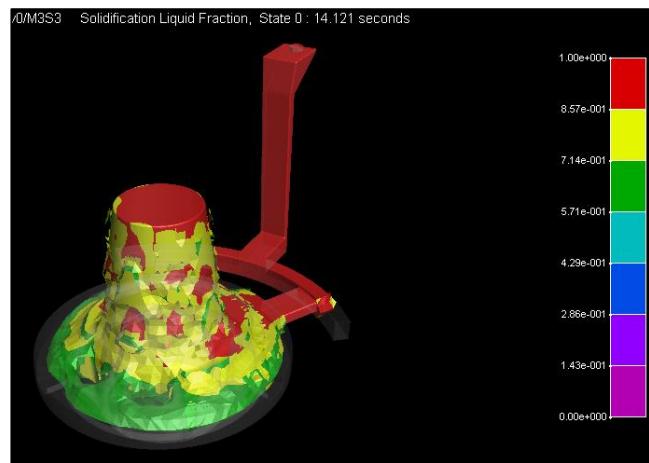


Ilustración 24. Solidification Liquid Fraction $T = 14.121$ s

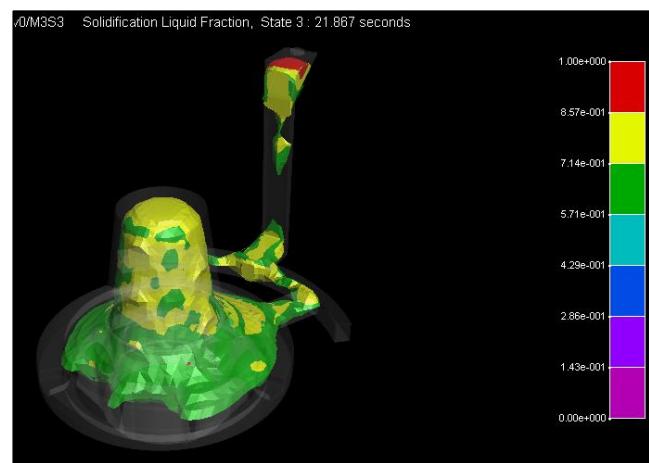


Ilustración 25. Solidification Liquid Fraction $T = 21.867$ s

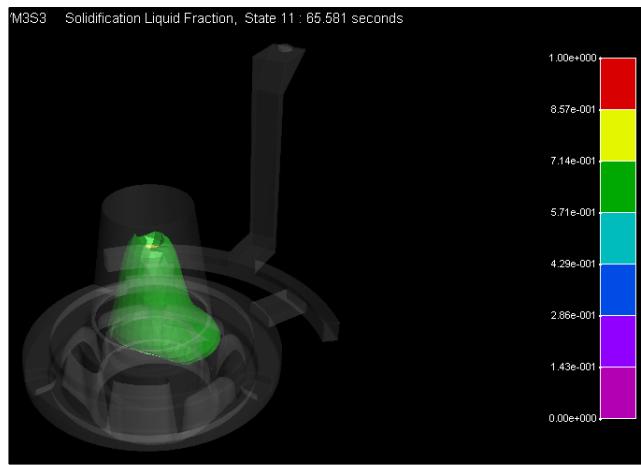


Ilustración 26. Solidification Liquid Fraction $T = 65.581 \text{ s}$

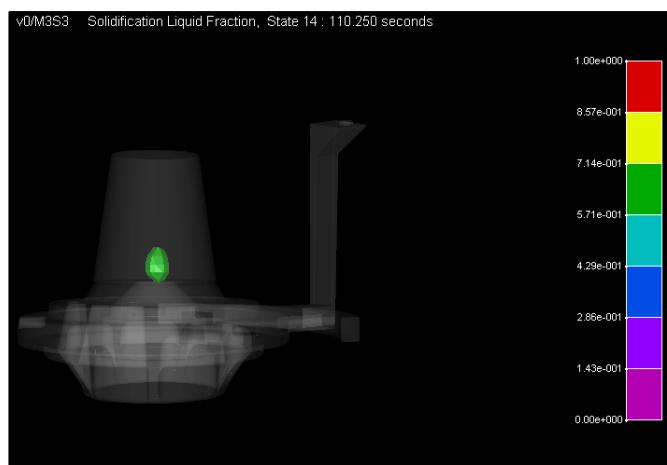


Ilustración 27. Solidification Liquid Fraction $T = 110.250 \text{ s}$

Para este modelo, se producen contracciones pero sólo en la mazarota y los canales de llenado y distribución, por lo que no afectan a la pieza como se puede observar en la siguiente imagen.



Ilustración 28. Solidification Shrinkage $T = 192.801 \text{ s}$

Como se ha demostrado con anterioridad, este modelo es más adecuado que los dos anteriores, por ello se va a analizar un número de parámetros mayor.

El criterio Niyama es una función que depende del gradiente de temperatura y de la velocidad de enfriamiento. Se trata de una predicción de la aparición de porosidad por contracción en las piezas fabricadas mediante fundición, causada por un cambio en el volumen del metal al pasar de estado líquido al estado sólido. Para saber si una pieza va a presentar contracciones no deseables se divide el gradiente de temperatura entre la raíz cuadrada de la velocidad de enfriamiento, y si el resultado en el caso del aluminio esta comprendido entre 0 y 0,3 es muy probable que la pieza contraiga, mientras que si el valor es superiora 0,3 la probabilidad de que la pieza contraiga es menor. Para esta pieza como el valor esta comprendido entre los 2,94 y 5,88 según este criterio no va a presentar este defecto.

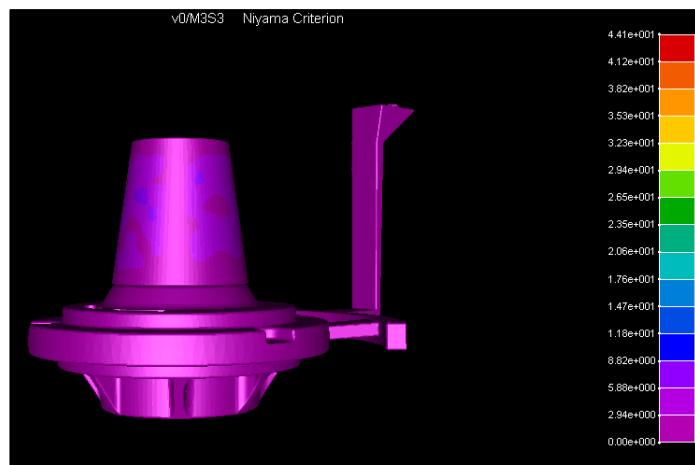


Ilustración 29. Niyama Criterion

Mediante el siguiente parámetro se calcula la velocidad de enfriamiento de la pieza, y como se puede observar en la siguiente imagen dicha velocidad es adecuada puesto que es homogénea por toda la pieza. Sólo se producen variaciones significativas en los canales de llenado y distribución y esta parte no es relevante puesto que una vez ha finalizado el proceso de fundición se separa de la pieza.

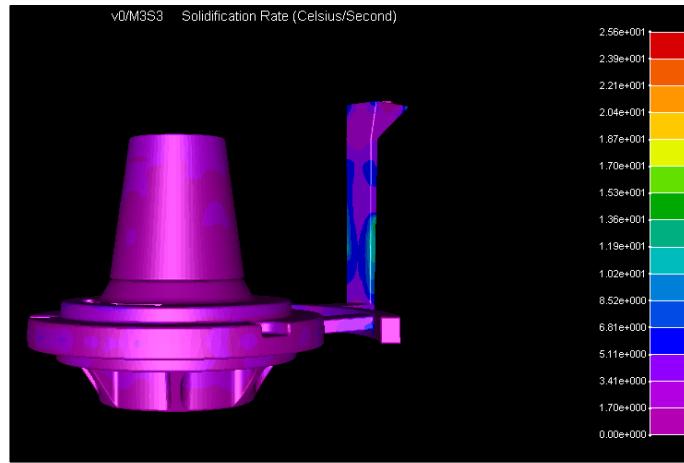


Ilustración 30. Solidification Rate

En la imagen que aparece a continuación se muestra el tiempo que necesita la pieza para alcanzar la temperatura de sólido. Este tiempo está comprendido entre los 12,3 y los 111 segundos, que es una variación bastante grande. Esto se debe a que la parte inferior es la que solidifica primero puesto que tiene partes más delgadas, además la parte superior se llena posteriormente y está en contacto con la mazarota que es lo último que debe solidificar. Como se ha podido comprobar anteriormente la pieza no presenta problemas de contracciones, pero si no fuera así se podría solucionar tanto colocando enfriadores en la zona superior para que esta solidifique más rápido como colocando elementos que aporten calor a la parte inferior del molde para que le cueste más tiempo solidificar. Utilizando cualquiera de los dos métodos se conseguiría el objetivo de que ambas partes, tanto la superior como la inferior solidifiquen casi al mismo tiempo.

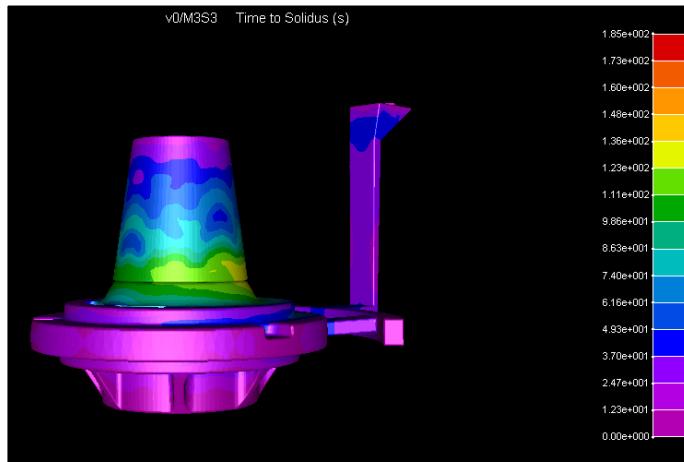


Ilustración 31. Time to Solidus

La siguiente imagen muestra la temperatura de cada una de las partes del modelo una vez el programa ha terminado de realizar los cálculos, puesto que toda la pieza se encuentra en estado sólido. La pieza enfría en todas las zonas por igual, menos en la que se encuentra en contacto con la mazarota como era de esperar.

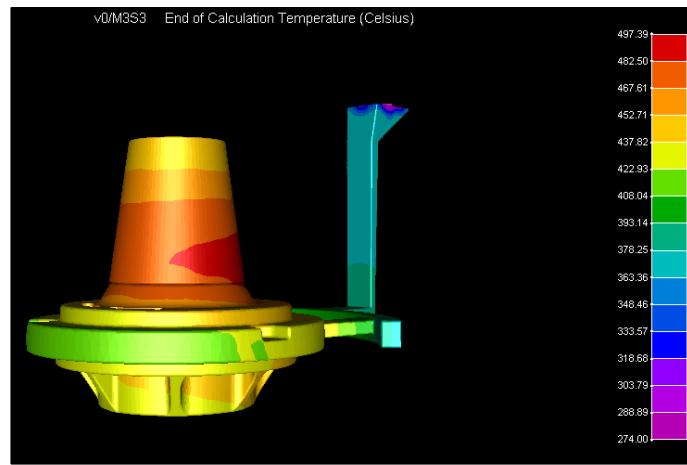


Ilustración 32. End of Calculation Temperature

CAPÍTULO VI.

Conclusiones y líneas futuras

Una vez se han analizado todos los modelos y sus resultados, se ha determinado que el modelo más adecuado para la fabricación de la pieza es el tercer modelo, puesto que es con el que mejores resultados se han obtenido, como se ha explicado a lo largo de este trabajo. Esto no quiere decir que sea la única opción, puesto que se podrían diseñar modelos que funcionen igual o incluso mejor que el elegido. Pero en este caso sería el seleccionado para la fabricación de la pieza, porque como se puede observar en los resultados obtenidos permitiría obtener la pieza correctamente y se reduciría la probabilidad de que ésta saliera del molde con defectos.

El proceso de obtención de los modelos ha sido iterativo. Se han hecho diferentes modificaciones en todos ellos, que no se muestran en este proyecto porque resultaría excesivamente largo hasta llegar a los modelos expuestos. Esto se ha hecho así puesto que para el diseño de los moldes se pueden consultar varios manuales, pero en definitiva es la experiencia lo que más facilita encontrar el modelo idóneo. Por ello se han tenido que probar diferentes configuraciones hasta que se ha encontrado una adecuada.

El programa QuikCAST utilizado para realizar las pertinentes simulaciones no es el más adecuado puesto que para que funcione correctamente ha sido necesario disminuir la calidad de los modelos diseñados mediante Solid Edge, lo que hace que los resultados sean menos precisos. Además, también ha habido que ajustar los tiempos de simulación, puesto que, si no las simulaciones eran excesivamente largas, lo que ocasionaba que el programa dejara de funcionar durante las simulaciones y no se pudieran obtener resultados.

Se ha seleccionado el moldeo por gravedad puesto que es el método más adecuado para la fabricación de la pieza. Este método presenta múltiples ventajas como la obtención de una pieza prácticamente acabada y con buenos acabados superficiales (reduciendo de esta forma el mecanizado posterior), que la pieza tenga una estructura más densa y compacta (mejorando así sus propiedades mecánicas) y la producción es rápida en comparación con otros métodos de fabricación. Pero también presenta algunos inconvenientes que hay que tener presentes a la hora de su selección como método de fabricación y del diseño de los componentes del molde. Uno de ellos es el alto coste de la fabricación del molde, lo que hace que sólo sea económico si se van a fabricar muchas series de la pieza. Otro inconveniente es que es difícil obtener la pieza con las dimensiones requeridas, debido a las contracciones que sufre la pieza durante la solidificación. Además, hay que tener presente que durante la fabricación es posible que el metal fundido se contamine debido a las posibles impurezas que pueda haber en el entorno.

Notación

V_h	Volumen de la pieza más el volumen del sistema de alimentación [cm^3].
V_p	Volumen de la pieza [cm^3].
T	Tiempo de llenado [s].
v	Velocidad de llenado [cm/s].
K	Coeficiente de pérdida de energía [−].
g	Aceleración de la gravedad [cm/s^2].
h	Altura de carga efectiva [cm].
h_1	Altura total de la bajante hasta Sd incluyendo el bebedero [cm].
h_2	Distancia entre la parte alta de la pieza y la parte superior del molde [cm].
h_0	Altura del bebedero [cm].
S_d	Sección de la parte más baja de la bajante [cm^2].
S_0	Sección de la parte superior de la bajante [cm^2].
r_d	Radio de la sección de la parte más baja de la bajante [cm].
r_0	Radio de la sección de la parte superior de la bajante [cm].

Bibliografía

- [1] ESI Group (2011). *QuikCAST 2011. Reference Manual.*
- [2] Powering Collaborative Commerce. (2001). *Manual del Usuario. Introducción a Solid Edge.*
- [3] Puértolas Ráfaes, J A., Ríos Jordana, R., Castro Corella, M. (2016). *Tecnología de los materiales en ingeniería. Metales y aleaciones, polímeros, materiales compuestos, cerámicas y técnicas de conformado.* Síntesis.
- [4] European Aluminium Association (1999). *Training in Aluminium Application Technologies.* Brussels.
- [5] Campbell, J. (2004). *Castings Practice. The Ten Rules of Castings.* Butterworth-Heinemann.
- [6] Vallejo Royo, J. (2013). *Simulación de fundición por ordenador mediante QuikCAST.* Proyecto Final de Carrera. Zaragoza: Escuela de Ingeniería y Arquitectura.
- [7] Moreno García, E J. (2013). *Planificación, análisis y desarrollo de material docente para simulaciones de procesos de moldeo.* Zaragoza: Escuela de Ingeniería y Arquitectura.
- [8] Llumà Fuentes, J. (2011). *Simulación de una pieza obtenida por fundición metálica.* Proyecto Final de Carrera. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña.
- [9] Plaza Urrutia, F J. (2014). *Diseño de los sistemas de distribución en procesos de fundición por gravedad mediante un método analítico.* Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.
- [10] Carrizosa Isaza, P. (2007). Modelación y análisis de un molde para fundición de aluminio por coquilla. Medellín: Universidad EAFIT.
- [11] CarboSystem. *Desgasificadores.*
<<http://carbosystem.com/desgasificador/>> Último acceso el 20/10/2018
- [12] Finite Solutions. *Criterio Niyama.*
<https://finite.solutions/documentation/sc_unit25/> Último acceso el 20/10/2018

