

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**MEJORAMIENTO DEL RENDIMIENTO METÁLICO Y DE MOLDE  
EN LA FUNDICIÓN DE HIERRO NODULAR Y MOLDEO CON  
RESINAS FURÁNICAS**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO**

**CARLOS ANTONIO PORRAS FONSECA** (Componente B)

**carlos.porras01@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: ING. OSCAR EFRAIN SOTOMAYOR GÁLVEZ M.Sc.**

**oscar.sotomayor@epn.edu.ec**

**DMQ, febrero 2022**

## CERTIFICACIONES

Yo, Carlos Antonio Porras Fonseca declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



---

**CARLOS ANTONIO PORRAS FONSECA**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Carlos Antonio Porras Fonseca, bajo mi supervisión.

**OSCAR EFRAIN  
SOTOMAYOR  
GALVEZ**

Firmado digitalmente por OSCAR  
EFRAIN SOTOMAYOR GALVEZ  
Nombre de reconocimiento (DN):  
cn=OSCAR EFRAIN SOTOMAYOR  
GALVEZ,  
serialNumber=190421184236,  
ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION DE  
INFORMACION, o=SECURITY DATA S.A.  
2, c=EC  
Fecha: 2022.03.02 15:40:00 -05'00'

---

**ING. OSCAR SOTOMAYOR. Msc.  
DIRECTOR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

CARLOS ANTONIO PORRAS FONSECA

ING. OSCAR SOTOMAYOR. Msc.

## **DEDICATORIA**

A mis queridos padres Miriam y Carlos mis primeros maestros, quienes a su forma despertaron en mi la curiosidad propia de un ingeniero.

También a mis hermanos Valeria y Arturo, por motivarme a siempre ser mejor.

Finalmente, a todos mis amigos, con quienes entre risas y desvelos hicieron de esta experiencia politécnica algo imperecedero.

## **AGRADECIMIENTO**

A el Ing. Oscar Sotomayor, por compartir de su conocimiento, además de su continuo acompañamiento y consejo para llevar a cabo el presente proyecto.

De manera especial a la empresa FUNDIRECICLAR por abrirme sus puertas y a sus colaboradores quienes estuvieron siempre dispuestos a facilitar el desarrollo del presente trabajo de integración curricular.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Alcance.....	2
1.4 Marco teórico.....	3
Proceso de obtención de piezas metálicas fundidas.....	3
Hierro Dúctil.....	3
Molde perdido.....	4
Sistemas de alimentación.....	5
Generalidades.....	6
Partes.....	6
Base de Vertido.....	6
Bebedero.....	7
Base del bebedero.....	8
Distribuidor.....	9
Indicadores.....	10
Rendimiento metálico.....	10
Rendimiento de molde.....	10
Método por elementos finitos.....	10
Diseño de experimentos y el método de Taguchi.....	12
2 METODOLOGÍA.....	13
Dimensionamiento del sistema de alimentación.....	15
1. Recolección de propiedades físicas de la pieza a fundir.....	15
2. Módulo.....	15
<b>3. Número de entradas.....</b>	<b>16</b>
6. Caudal de vertido.....	18
7. Áreas de sección del bebedero.....	20
8. Áreas de sección del distribuidor y alimentadores.....	21

Modelado CAD .....	22
Simulación por elementos finitos .....	24
Metodología de Taguchi.....	27
Factores y niveles.....	27
Diseño de arreglo ortogonal .....	27
Análisis del método de Taguchi .....	28
<b>3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>34</b>
<b>3.1 Resultados .....</b>	<b>34</b>
Dimensionamiento y modelado del sistema de alimentación. ....	34
Simulación .....	36
Metodología de Taguchi.....	37
Obtención del modelo .....	42
<b>3.2 Conclusiones.....</b>	<b>44</b>
<b>3.3 Recomendaciones .....</b>	<b>46</b>
<b>4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>47</b>
<b>5 ANEXOS .....</b>	<b>49</b>
ANEXO I .....	49
ANEXO II .....	51
ANEXO III .....	53
ANEXO IV .....	55
ANEXO V .....	57
ANEXO VI.....	59
ANEXO VII.....	61
ANEXO VIII.....	63
ANEXO IX.....	65

## RESUMEN

El presente trabajado de integración curricular describe el procedimiento para obtener los modelos para la fabricación de la tapa de alcantarillado D600C fundida en hierro dúctil 80-55-06 mediante el proceso de molde perdido constituido en resina furánica, catalizador y arena, considerando como parte del diseño la optimización de los indicadores de rendimiento metálico y de molde. Para esto se partió del dimensionamiento de un sistema de alimentación de forma analítica, para después fusionarlo con la metodología de Taguchi generando múltiples experimentos, que lograron predecir y evitar la generación de defectos durante la fase de diseño. La evaluación de las distintas propuestas tuvo un enfoque numérico, donde en base a la simulación por elementos finitos se representaron los fenómenos de llenado y de solidificación. Como resultado se obtuvo la relación idónea de proporciones de áreas del bebedero, distribuidor y alimentador que permiten fabricar un elemento circular fundido sin defectos. Finalmente, con el modelo CAD propuesto se obtiene el modelo CAM para su fabricación mediante modelado por deposición fundida; notándose un incremento del diez por ciento y una reducción del 12% para los rendimientos metálicos y de molde respectivamente.

**PALABRAS CLAVE:** Rendimiento metálico, molde perdido, fundición, hierro dúctil, metodología de Taguchi.

## **ABSTRACT**

The following work of curricular integration describes the procedure to obtain the models for the manufacture of the D600C manhole cover cast in ductile iron 80-55-06 by means of the die casting process constituted in furan resin, catalyst, and sand, considering as part of the design the optimization of the metallic and mold performance yield. For this, the starting point was the dimensioning of a filling system in an analytical way, to later merge it with Taguchi's approach, generating multiple experiments, which were able to predict and avoid the generation of casting defects during the design phase. The evaluation of the different proposals had a numerical approach, where, based on finite element simulation, the filling and solidification phenomena were represented. As a result, the ideal ratio of the proportions of the sprue, runner and gate areas was obtained to produce a circular cast element without defects. Finally, with the proposed CAD model, the CAM model was obtaining for its manufacture by fused deposition modeling; noticing an increase of ten and decrease of twelve percent for the metallic and mold yields respectively.

**KEYWORDS:** Metal yield, die casting, casting, ductile iron, Taguchi's approach.

# 1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El presente trabajo de integración curricular detalla el proceso de obtención de cajas de moldeo mediante proceso CAD/CAM para optimizar indicadores de rendimiento metálico y rendimiento de molde, para la empresa FUNDIRECICLA. SA

El proceso medular consistió en desarrollar un óptimo diseño del sistema de alimentación para la tapa de alcantarillado D600C facilitada por la empresa, enfocándose en dar forma a los canales que permitirán el flujo del metal fundido (hierro dúctil 80-55-06) hacia la cavidad del molde, considerando que mientras menos masa tenga el sistema de alimentación mayor va a ser el rendimiento metálico; por su parte el indicador del rendimiento de molde logra presentar una mayor eficiencia cuando la cantidad de arena utiliza para constituir el modelo es mínima, lo cual se consigue en primera instancia gracias al incremento del rendimiento metálico, pero también es función de la geometría del molde, como de la orientación de la pieza a fundir. Cabe recalcar que el tipo de molde diseñado fue un molde perdido debido a que el rotulado o leyenda de la tapa de alcantarillado cambia con cada orden de trabajo.

En primera estancia se desarrolló una primera iteración para dimensionar el sistema de alimentación en base a métodos convencionales que guardan un trasfondo empírico debido a lo complicado que resulta tratar de modelar el fenómeno de llenado y de solidificación de manera analítica para las fundiciones. Sin embargo, llevar a cabo una metodología netamente experimental demanda un alto grado de recurso, por lo que se decidió optar un enfoque numérico, donde en base al método de elementos finitos se realizaron múltiples simulaciones para intentar predecir y eliminar o disminuir hasta un grado admisible la presencia de defectos inherentes a la fundición, tales como porosidad, rechupes y aire atrapado; tanto en la etapa de llenado, como la de solidificación, integrando para esto la metodología de Taguchi, donde se presentan un grupo de experimentos para optimizar la geometría de las secciones del bebedero, distribuidor y alimentador. Siendo estos los factores que influyen en la generación del presente defecto incúrrete de falta de llenado en el elemento a fundir.

Finalmente, tras haber alcanzado un diseño CAD que cumpla con los requisitos mencionados, se desarrolló el modelo CAM del conjunto para su fabricación mediante un proceso de manufactura aditiva a escala en base a la técnica de modelado por deposición fundida, obteniendo de esta forma el modelo listo para su conformación en arena.

## **1.1 Objetivo general**

Mejorar el rendimiento metálico y de molde en la fundición de hierro nodular y molde con resinas furánicas.

## **1.2 Objetivos específicos**

1. Recopilar información bibliográfica y estado del arte.
2. Determinar y calcular forma y tamaños de bebedero, alimentadores distribuidores
3. Determinar y calcular tamaños y ubicaciones de mazarotas y posibles mazarotas exotérmicas
4. Simular numéricamente el llenado del molde con mejoras propuestas.
5. Simular numéricamente la solidificación del elemento y molde propuesto
6. Actualizar iterativamente nuevos diseños hasta arribar heurísticamente a un modelo superior

## **1.3 Alcance**

La fabricación de tapas de alcantarilla se encuentra normada por la NTE INEN 2499 y la NTE INEN 2496 para los requerimientos de material y de diseño respectivamente, sin embargo, el diseño del sistema de alimentación no se encuentra regulado; por lo que el presente trabajo de integración curricular se basará en primera instancia en formulas analíticas y recomendaciones empíricas que permitan dimensionar las magnitudes de las distintas áreas que compone un sistema de alimentación, obteniendo así un dimensionamiento preliminar, mismo que será evaluado en base a un análisis por elementos finitos, proponiéndose a este como un indicador de los defectos encontrados durante la solidificación, además del comportamiento del metal fundido durante el proceso de llenado.

Como segunda instancia se implementará la metodología de Taguchi para dar solución en el caso de presentarse algún tipo de defecto o de precisar obtener un mejor rendimiento de alguno de los dos indicadores mencionados.

Durante la tercera fase ya habiendo obtenido un diseño que cumpla con incrementar los índices de los indicadores, sin comprometer la funcionalidad de la tapa de alcantarilla D600C debido a la presencia de defectos; se procederá a desarrollar el modelo CAM de las cajas de moldeo, para finalmente fabricarlo en base a el proceso de manufactura aditiva de modelado por deposición fundida.

## 1.4 Marco teórico

### Proceso de obtención de piezas metálicas fundidas

Para el caso del presente estudio se detallará el proceso de producción por molde perdido, por ser precisamente este el empleado en FUNDIRECICLAR debido a el modelo de negocio de la empresa; previamente se discutirá sobre la obtención del metal líquido Hierro dúctil 80-55-06, como constituyente de la tapa D600C.

El proceso empieza con la selección de chatarra, misma que es analizada en el laboratorio de la empresa acreditado por el SAE, previo a su compactación para la formación de tochos que ingresarán al horno para ser fundidos.

### Hierro Dúctil

Este material tiene su procedencia a partir del hierro fundido al cual tras agregar Magnesio y/o Cerio dará origen a su característica microestructura donde el grafito mantiene su forma química, pero en vez de constituir hojuelas como en el caso del hierro gris, este precipita en forma de nódulos a los cual debe su nombre de hierro nodular, como también se lo conoce (Callister & Rethwish, 2014). El hierro dúctil normalmente presenta una matriz ferrítica o perlítica en función al tratamiento térmico utilizado.

Se registra que su composición química puede variar entre los rangos mostrados en la tabla 1.1

**Tabla 1.1** Composición típica del hierro dúctil (Brown, 2000)

%Mg	%Ti	%Ce	%Ca	%Al	%Si	%Fe
4.5 – 5.5	8 – 10	0.3 – 0.4	≤ 1	≤ 1.5	50 – 54	balance

Para obtener hierro dúctil, se debe llevar al hierro base hasta una temperatura de 1350°C, alcanzando una densidad de 6400kg/m<sup>3</sup> (Dávila-Maldonado et al., 2008) de tal suerte que se podría emplear un horno de cubilote (Apraiz, 1963), sin embargo, se obtiene una mejor

fusión del hierro base en un horno de inducción. Se debe notar que el hierro base (chatarra) debe contener un máximo de 0.035 % de Azufre (Brown, 2000) con el afán de garantizar que este debido a su alta afinidad electrónica con Magnesio, no termine consumiendo todo el elemento nodulizante, produciendo hierro gris en su defecto.

Previo a colar se debe evitar que los nódulos ya formados se disuelvan en el metal fundido por lo que un proceso de inoculación es mandatorio, añadiéndose comúnmente entre el 0.2% y 0.5% de Ferro Silicio a la colada. (Brown, 2000)

Respecto a sus propiedades físicas el hierro nodular es más resistente que otras fundiciones al igual que dúctil, propiedad a la cual debe su nombre más común. Cabe recalcar su superioridad respecto a propiedades mecánicas las cuales son semejantes a las del acero. Mostrando magnitudes comparables en cuanto a la resistencia mínima a la tracción que varían entre 60-120 ksi, el límite elástico entre 40-90 ksi y una ductilidad que varía entre 2 - 18%.(Callister & Rethwish, 2014)

También denominado por la ASTM como A536 el hierro dúctil a medida que incrementa su resistencia y disminuye su ductilidad es empleado usualmente para la fabricación de contenedores a presión, accesorios de agua potable, elementos de máquinas de alta resistencia, piñones, engranes roladoras y cortadoras.(Callister & Rethwish, 2014)

Una vez lograda la solución líquida de hierro dúctil se procede a verterla en un molde previamente constituido.

### **Molde perdido**

Cuando se requieren obtener piezas metálicas mediante fundición existen dos posibles técnicas básicas a emplear, siendo estas por molde permanente o molde perdido figura 1.1

La diferencia entre ambos sistemas consiste en que al fundir mediante la técnica de molde perdido una vez solidificado el metal, para desmoldar la pieza, el molde debe ser destruido.

Ahora bien, ambas técnicas presentan diversas ventajas que terminan definiendo su elección al momento de la producción de elementos fundidos.

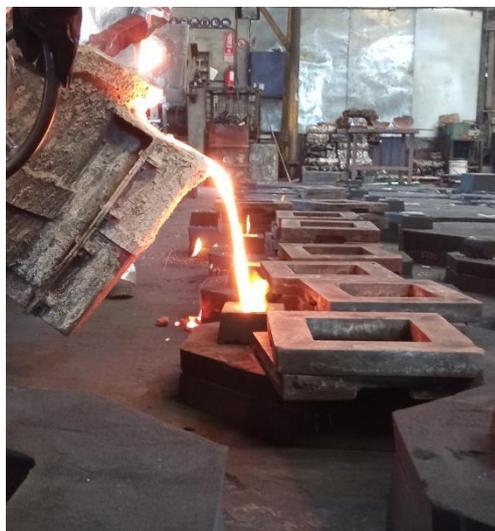
Entre las ventajas de los moldes permanentes frente a utilizar moldes perdidos se puede mencionar:

- Incremento de la productividad; alrededor de un 40%.(Srinivasan, 2012)

- Mejor conformidad dimensional.
- Superior resistencia a la fatiga y flexión estática, debido al menor tiempo de enfriamiento que se logra gracias a la generación de un grano más fino.
- Se alcanza un mejor acabado superficial.
- Energéticamente hablando dentro del ciclo productivo el proceso es más eficiente ya que el calor almacenado en el molde no es eliminado.
- Considerando que los moldes no tienen vida infinita su impacto frente a la generación de residuos es menor, ya que se producen menos gases contaminantes y no genera arena de desecho.

En contraste las ventajas de los moldes perdidos frente a moldes permanentes se tienen que:

- Se puede fabricar piezas con secciones transversales más pequeñas.
- El abanico de materiales a fundir no es tan restrictivo.
- El proceso productivo es más económico si se requiere producir pocas piezas.



**Figura 1.1** Colado en moldes perdidos (FUNDIRECICLAR.)

### **Sistemas de alimentación**

El glosario de la *American Foundry Society* define al sistema de colado como “El ensamble completo de postes, distribuidores, canales y cavidades de vaciado en el molde”(AFS, 2014)

## Generalidades

El sistema de alimentación mostrado en la figura 1.2 consta de múltiples partes que conectadas entre sí permiten el flujo del metal fundido desde su colado por la copa, pasando por el bebedero, seguido del distribuidor, la mazarota y el alimentador hasta finalmente ser vertido mediante los alimentadores en la cavidad que dará forma al producto final.

Según (RAO, 2020) y (Brown, 2000) un sistema de alimentación correctamente diseñado cumple su objetivo si:

El llenado de la cavidad del molde se completa de manera total en el menor tiempo posible.

Se mantiene un régimen de llenado laminar

Ningún material ajeno al metal fundido ya sea aire, escoria metálica o no metálica hayan logrado colarse dentro de la cavidad del molde.

Se preserva la integridad del molde durante el colado

La presencia de porosidades y rechupes es admisible.

El rendimiento metálico y de molde han sido maximizados.

Se permite una práctica construcción del moldeo y desmolde del producto final a obtener.

## Partes

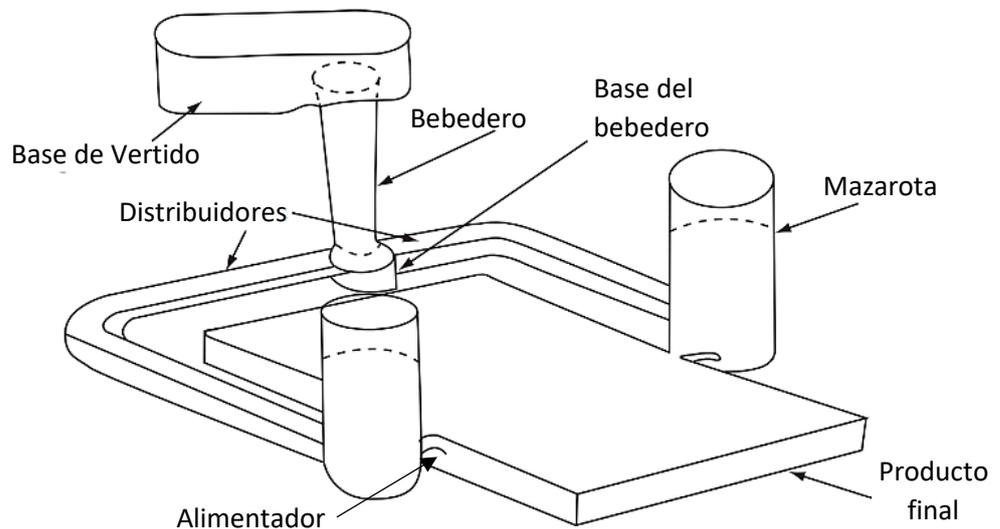


Figura 1.2 Partes de un sistema de alimentación (Rao, 2019, p.153)

## Base de Vertido

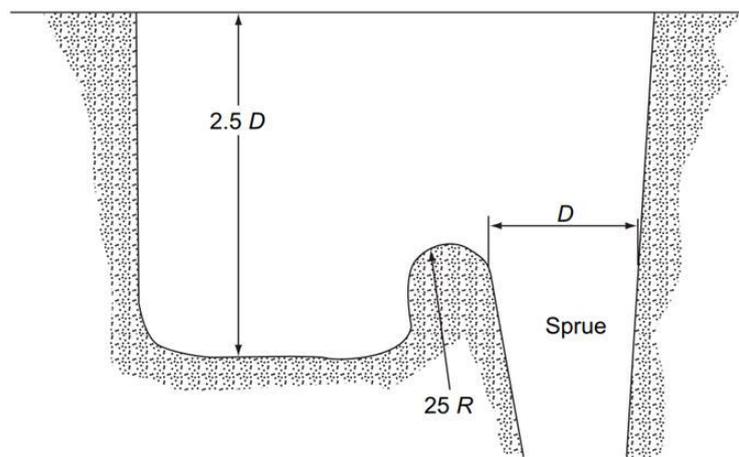
El primer contacto del metal fundido con el molde empieza en la base de vertido, misma que por razones de optimización del rendimiento metálico, se prefiere el uso de una copa de vertido; entre sus funciones consta:

Reducir el momento del metal fundido, evitando la formación de vórtices.

Permitir la flotación de escoria

Evitar que el aire entre hacia la cavidad del molde.

Según Rao el contacto entre el bebedero y la copa debe tener un radio mínimo de acuerdo de 25mm, además de que la altura de la copa en base a la experiencia no debe ser menor a 2,5 veces el diámetro menor del bebedero, mostrado en la figura 1.3. Por otra parte, señala que con una inclinación de 45° en sus paredes puede evitarse la generación de vórtices debido a que el efecto de succión sucede primero.



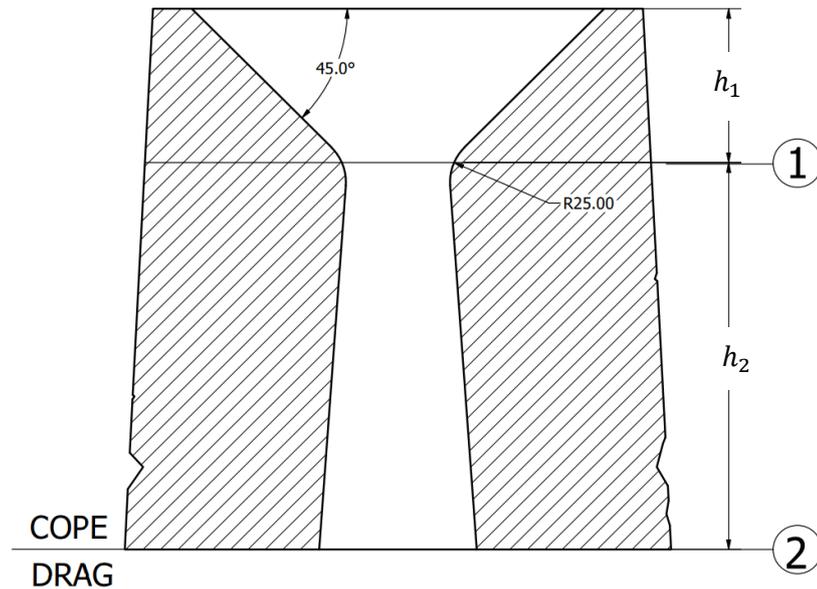
**Figura 1.3** Proporciones de la base de vertido (Rao, 2019, p.155)

Finalmente se debe considerar que durante el colado la copa debe trabajar llena durante todo el tiempo de vertido. Esto con el objetivo de evitar discontinuidades en el colado, sin embargo, en base a la experiencia de FUNDIRECICLAR se ha notado que de preferencia la copa debe trabajar vacía o semillena, siendo así un indicador del fin del colado cuando esta se llena por completo.

### **Bebedero**

Una vez el metal fundido abandona la copa, ingresa por un nuevo elemento llamado bebedero, este debe ser capaz de comunicar el fluido con el distribuidor sin generar presiones negativas mismas que debido a la permeabilidad de la arena, pueden producir el ingreso del aire hacia el interior de la cavidad. Para eliminar este imperfecto Rao propone dotar de cierta conicidad al bebedero sin embargo, dicha conicidad debe ser

invertida con el afán de permitir un correcto desmolde, tal como se muestra en la figura 1.4



**Figura 1.4** Copa y bebedero cónico invertido (Adaptado de Rao, 2019, p.157)  
COPE y DRAG parte superior e inferior respectivamente del molde.

La relación de la conicidad expuesta anteriormente puede ser calculada partiendo de la ecuación de la continuidad, donde se relaciona el área y la velocidad en los puntos superior e inferior 1 y 2 respectivamente de la figura 1.4

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad [1.1]$$

conociendo además el teorema de Torricelli, el cual dicta que la velocidad de un fluido acelerado por acción de la gravedad puede expresarse como:

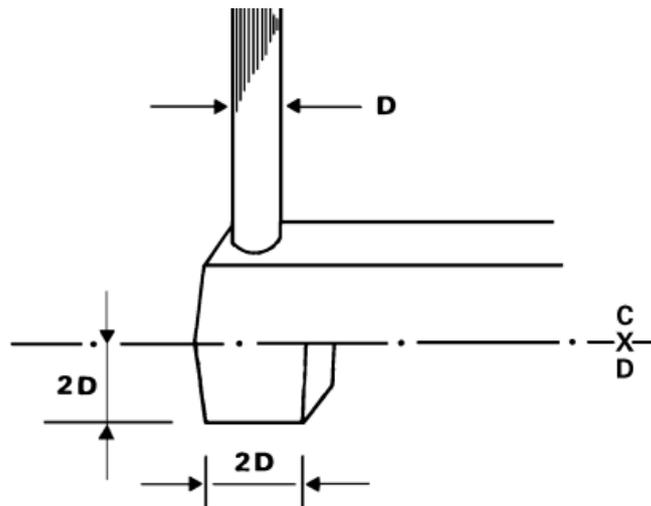
$$V = \sqrt{2gh} \quad [1.2]$$

Agrupando las ecuaciones 1.1 y 1.2 se obtiene que las áreas de sección 1 y 2 guardan la siguiente relación

$$A_1 = A_2 \sqrt{\frac{h_1 + h_2}{h_1}} \quad [1.3]$$

### Base del bebedero

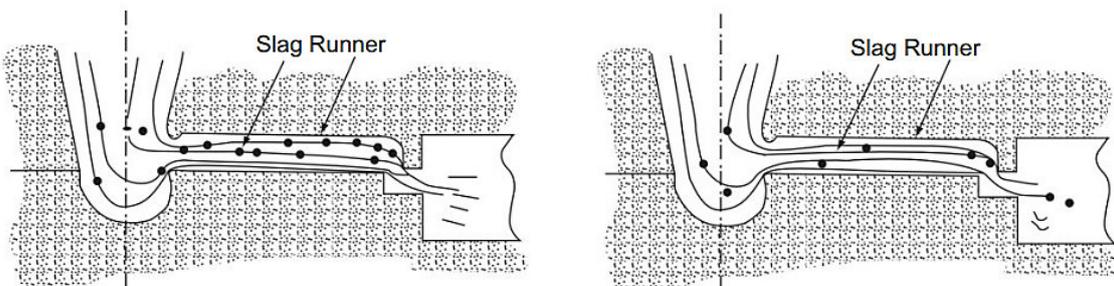
También conocida con el nombre de reservorio, este tipo de cuenca logra disminuir la velocidad ganada por el metal fundido al desplazarse anteriormente por el bebedero, permitiendo que el fluido ingrese de manera uniforme hacia la cavidad del molde. Para lograr este efecto (RIT, 2000) propone que la base del reservorio no debe ser cóncava, ya que esto solo aceleraría el fluido, incrementado la turbulencia, por lo que se sugiere emplear una superficie plana. Tal como se muestra en la figura 1.5, por otra parte, sus dimensiones son función del diámetro del bebedero. De emplear un bebedero cónico se recomienda utilizar como referencia el diámetro (D) más pequeño.



**Figura 1.5** Base del bebedero plana (Rit, 2000, p.13)

### Distribuidor

Su función principal consiste en comunicar el metal fundido, manteniendo un flujo constante en cada uno de los alimentadores, mientras filtra la escoria de la colada, esto gracias a una práctica muy común en sistemas de alimentación de metales ferrosos, donde los distribuidores se mantienen en el *cope* mientras que los alimentadores en el *drag*, tal como se aprecia en la figura 1.6a



**Figura 1.6** Efecto de Distribuidor Lleno a); frente a uno parcialmente lleno b) (Rao, 2019, p.158)

Sin embargo, el efecto de filtrado sustentado en la diferencia de densidades, para funcionar correctamente, requiere que el distribuidor trabaje completamente lleno, caso contrario partículas de escoria indeseadas terminan colándose dentro del molde, tal como se muestra en la figura 1.6b

### Indicadores

Se busca una forma de identificar cuan bueno es el diseño de las cajas de moldeo respecto al uso de recursos, para lo cual se definen los siguientes rendimientos:

#### Rendimiento metálico

El rendimiento metálico ec.1.4 se define como la relación entre la masa del producto final y la masa del producto en bruto (sistema de alimentación más producto final ), con el afán de obtener una medida sobre la eficiencia de empleo del metal para obtener un producto fundido, considerando que su valor máximo es de 1 o del 100% (Nimbulkhar & Dalu, 2016)

$$Rendimiento_{metálico} = \frac{masa_{p\ final}}{masa_{p\ final} + masa_{sis.alim}} \quad [1.4]$$

#### Rendimiento de molde

Se propone como indicador del rendimiento de molde ec.1.5 a la relación entre la masa del producto en bruto respecto a la cantidad de arena utilizada para constituir las cajas superior e inferior del molde; *cope* y *drag* respectivamente

Al igual que el rendimiento anterior su valor máximo es 1 e indica el ahorro en arena al producir los moldes.

$$Rendimiento_{de\ molde} = \frac{masa_{p\ final} + masa_{sis.alim}}{masa_{arena}} \quad [1.5]$$

#### Método por elementos finitos

La técnica de elementos finitos es un método numérico empleado para dar solución a diversos problemas en ingeniería, que, debido a su complejidad, no pueden ser modelados en base a ecuaciones diferenciales que gobiernen el fenómeno físico. Dando una solución aproximada, que en contraste a la solución analítica exacta permite encontrar resultados en puntos discretos.(Moaveni, 2015)

De manera general se puede entender al método de elementos finitos como una aproximación donde se discretiza a una porción del objeto de estudio, para dar solución en base a una ecuación continua, proceso que logra modelar al fenómeno de manera aproximada al conectar todos los elementos e interpolar sus resultados entre si dando solución al sistema.

Los pasos básicos en el método de elementos finitos consisten en tres fases:

### **Preprocesado**

Se divide en un número finito de nodos o elementos al objeto de estudio, para después asumir una función de forma que represente el comportamiento del elemento, Una vez se haya definido este paso, se desarrolla una ecuación que modela el comportamiento del elemento.

A continuación, se ensambla la matriz de rigidez, para aplicar condiciones iniciales

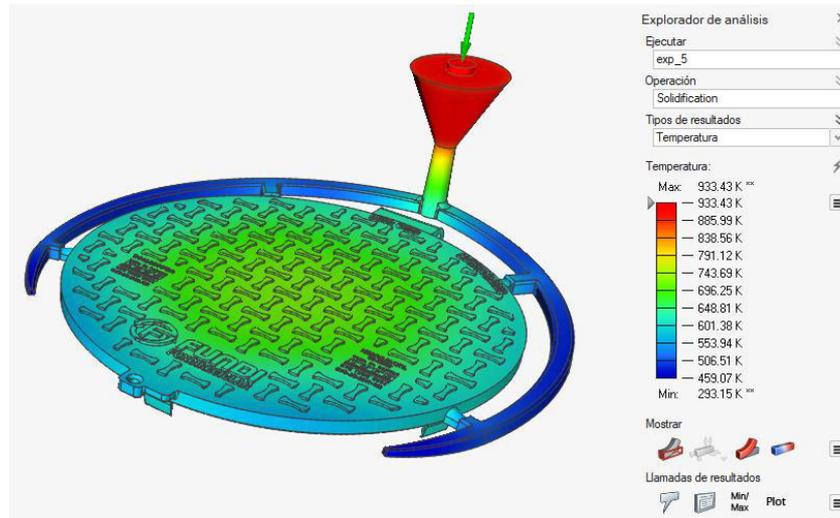
### **Solución**

Se da solución al conjunto de ecuaciones lineales planteadas en la matriz anterior, encontrando la respuesta del fenómeno en cada nodo

### **Pos procesado**

En esta fase se obtiene otra información relevante que se puede calcular en base a los resultados previos.

Es así como esta técnica desarrollada por Curant desde 1943 (Moaveni, 2015) ha sido incorporada en múltiples paquetes computacionales orientándola como una herramienta dedicada al análisis de sensibilidad del diseño para la optimización de componentes (Bhatt et al., 2021). De tal suerte que el presente proyecto emplea dicha técnica para poder visualizar las implicaciones de las variaciones en las secciones transversales del sistema de alimentación, propuesto en los distintos modelos conceptuales CAD. Brindando valiosa información como velocidades y presiones durante el llenado de molde, así como defectos relacionados a las funciones durante la solidificación. Fig1.7



**Figura 1.7** Simulación de variación en la temperatura durante la solidificación por el método de elementos finitos (Fuente propia)

### Diseño de experimentos y el método de Taguchi

Originalmente el diseño de experimentos DEO (del inglés *Design of experiments*) fue inventado por Fisher, en 1920 siendo una técnica estadística utilizada para estudiar los efectos de múltiples variables y sus interacciones de forma simultánea. Sin embargo, fue Taguchi quien se encargó de modificar y estandarizar el método DOE permitiendo su integración con la industria en 1940. (Roy, 2001)

El diseño de experimentos hace referencia a la combinación de los factores en el estudio, de tal suerte que en base a la expresión que define a una combinatoria

$$N. \text{ combinaciones} = N. \text{ niveles}^{N. \text{ factores}}$$

Se puede conocer el número de experimentos a desarrollar. Para ejemplificar, de tener 2 niveles (límites de una variable) y 7 factores o variables, debería llevarse a cabo 128 experimentos, lo cual no es práctico desde la óptica de recursos puesto a que el tiempo, así como del costo que demandarían llevar a cabo dicho número de experimentos, sería considerable. Es por eso por lo que Taguchi mediante sus arreglos ortogonales propone reducir el número de combinaciones o experimentos a tan solo los necesarios.

La innovación del método DEO de Taguchi y su inherente relación con la calidad fue posible en base a la estandarización del método donde al hacer uso de sus arreglos ortogonales

antes que implantar un factorial total (todo el número de combinaciones posibles) nace una metodología capaz de dar soluciones reales sin demandar múltiples recursos.

Una vez obtenidos los resultados de los experimentos planteados; la metodología propone que se analicen los resultados en base a un estadístico denominado señal a ruido S/N (del inglés Signal to Noise), el cual permite asegurar un diseño robusto ante la variabilidad de los resultados, con el objetivo de poder optimizar los parámetros escogidos, enfocándose de tal forma en dotar de robustez al diseño. Para este efecto el estadístico puede trabajar en base a tres estudios de robustez definidos en la tabla 1.2

**Tabla 1.2** Estadísticos de robustez (Roy, 2001)

Características del estadístico	Razón N/S
Más pequeño es mejor	$-10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right]$
Más grande es mejor	$-10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right]$
Valor nominal es mejor	$10 \log \left( \frac{\bar{Y}^2}{S^2} \right)$

Donde:

$n$ : tamaño de la muestra

$Y_i$ :  $i$ -ésimo termino de experimento

$S$ : varianza

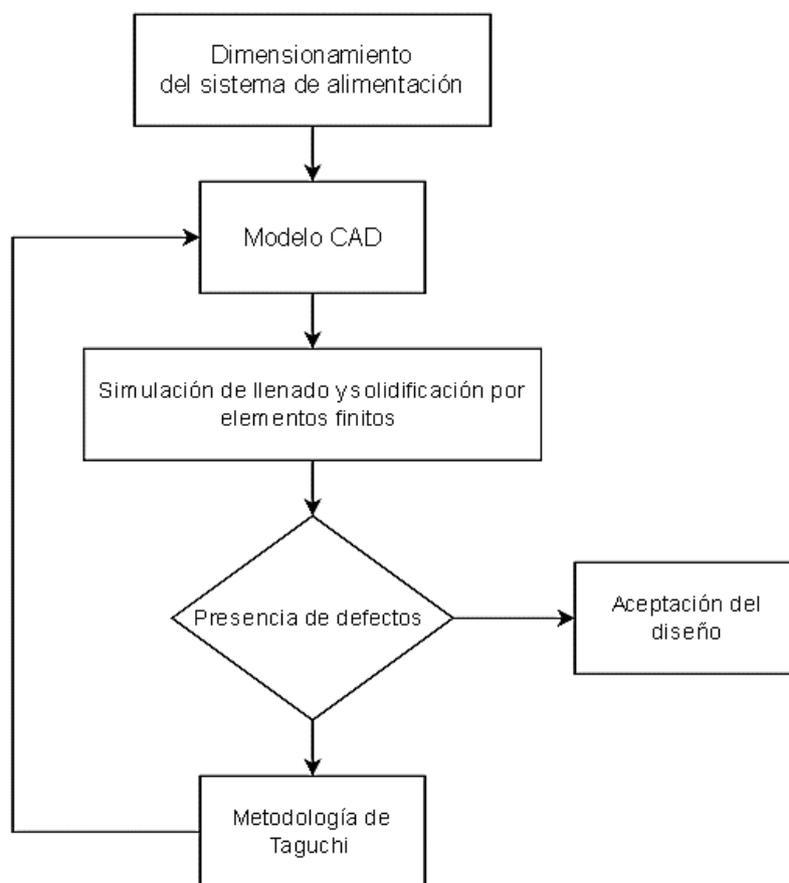
Se debe recalcar que los resultados de este estadístico pueden ser esquematizados, dando origen a las gráficas de efectos principales. Misma que evidencian el nivel en el que debe colocarse a los factores, para optimizar el diseño

## 2 METODOLOGÍA

El presente estudio expone una metodología numérica con un enfoque cuantitativo empezado por una primera iteración en el diseño del bebedero, distribuidor y alimentador

del sistema de alimentación de la Tapa D600C figura 2.2 simulando mediante elementos finitos los procesos de llenado y solidificación.

El objetivo intrínseco de la simulación mencionada consiste en evaluar la presencia de posibles defectos, para de una forma iterativa llegar a ajustar un diseño aceptable, bajo los criterios de defectos, rendimiento metálico y de molde, para lo cual se hará uso de la metodología de Taguchi también denominada diseño robusto, donde en base al desarrollo de experimentos en los cuales se variarán las dimensiones de las áreas transversales del bebedero, distribuidor y alimentador se analizará el efecto de sus combinaciones para alcanzar un diseño óptimo; tal como se muestra en la figura 2.1



**Figura 2.1.** Metodología propuesta (Fuente propia)



**Figura 2.2** Tapa D600C (FUNDIRECILAR)

### **Dimensionamiento del sistema de alimentación**

#### **Recolección de propiedades físicas de la pieza a fundir**

El elemento a fundir es la tapa de alcantarillado D600C como el INEN la define es una “Pieza que cierra en la parte superior el pozo de revisión”(NTE INEN 2496:2009, 2009) fabricada en hierro dúctil 80-55-06, con cota de paso de 600mm perteneciente al grupo C es decir que soporta una carga de ensayo de 400 kN

**Tabal 2.1** Propiedades físicas de la tapa D600C fabricada en hierro dúctil 80-55-06

<b>Propiedad</b>	<b>Magnitud</b>
Masa, $m$ [kg]	32.018
Área, $A$ [mm <sup>2</sup> ]	986451.887
Volumen, $V$ [mm <sup>3</sup> ]	4478037.873

### **Módulo**

Con la información de la tabla 2.1 se calcula el módulo de la pieza.

El módulo se define como el inverso de la razón de enfriamiento(RAO, 2020), calculado por el cociente de el volumen de la pieza a fundir y el área efectiva de enfriamiento

$$M_{pieza} = \frac{V}{A}$$

$$M_{pieza} = \frac{4478037.873 \text{ mm}^3}{986451.887 \text{ mm}^2}$$

$$M_{pieza} = 4.539 \text{ mm}$$

Ahora bien, según (RIT, 2000) si el molde a utilizar es resistente y posee un módulo mayor 25.4mm se puede optar por utilizar una mazarota parcial, una mazarota de seguridad o no utilizar una mazarota, sin embargo como el objetivo del presente estudio es incrementar el rendimiento metálico y ya que para conseguir este efecto, se requiere reducir el peso del sistema de alimentación y como el molde es elaborado en base de arena y resina furánica lo cual dota de resistencia al mismo; aunque el módulo de la pieza es menor al valor recomendado, se decide no utilizar mazarota en este diseño.

### **Número de entradas**

Pese a que no se emplearan mazarotas en el diseño propuesto, se partirá del cálculo del número de mazarotas para determinar la cantidad de entras requeridas por la pieza a alimentar.

El cálculo empieza determinado el módulo de la mazarota, la cual según (RAO, 2020) en base al estudio empírico de Wlodawer; si el módulo de la mazarota es 1.2 veces mayor al módulo de la pieza, su alimentación durante la solidificación resultará satisfactoria.

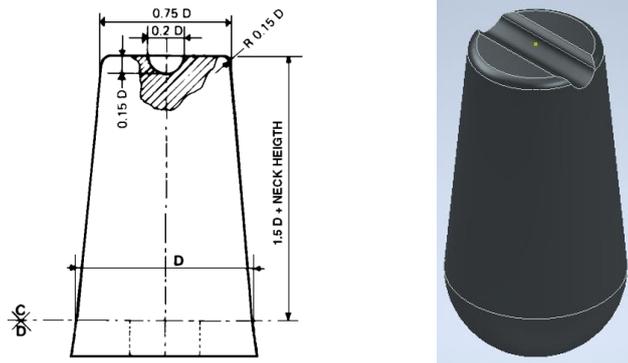
Notándose que este método presenta un origen empírico Fundireciclar a adoptado un coeficiente propio utilizando un 2 por el mencionado 1.2

$$M_{mz} > 2 M_{pieza}$$

$$M_{mz} > 2(4.539\text{mm})$$

$$M_{mz} > 9.078$$

En base a el diseño de mazarota tipo II contacto en el drag de RIT se procede a dibujar el CAD figura 2.3 derecha para las medidas mencionadas en la figura 2.3 izquierda; donde para diferentes diámetros se obtiene la tabla 2.3



**Figura 2.3** Mazarota TIPO II: Pano paramétrico (Izq.), Modelado CAD (Der.) (RIT, 2000)

**Tabal 2.2** Propiedades físicas Mazarota tipo II - Hierro dúctil 80-55-06

$D_{mz}$ [mm]	$m_{mz}$ [kg]	$A_{mz}$ [mm <sup>2</sup> ]	$V_{mz}$ [mm <sup>3</sup> ]	$M_{mz}$ [mm]
10	0.008	610.535	1144.754	1.87
20	0.065	2442.138	9159.709	3.75
30	0.221	5494.81	30914.078	5.63
40	0.524	9768.918	73277.692	7.5
50	1.023	15263.935	143120.492	9.376

De tal suerte que se escoge la mazarota de 50mm de diámetro, con un módulo de mazarota  $M_{mz}$  de 9.376 mm

Al trabajar con metales fundidos, la presencia de contracción es inevitable y el hierro dúctil no es la excepción ya que según la (AFS, 2014) este tiende a contraerse un uno por ciento.

$$m_{compensar} = 1\% m$$

$$m_{compensar} = 1\%(32.012kg)$$

$$m_{compensar} = 3.2018kg$$

Por otra parte, se debe considerar que las mazarotas en función a su diseño solo pueden alimentar a la pieza durante la solidificación con cierta masa, de tal forma que se habla de una eficiencia de la mazarota, misma que se encuentra en un 76% (Brown, 2000), es decir que cada mazarota aportara con

$$m_{aportemz} = 76\% m_{mz}$$

$$m_{aportemz} = 76\%(1.023)$$

$$m_{aportemz} = 0.777kg$$

Finalmente se obtiene el número de mazarotas mediante el cociente de la masa a compensar y la masa aportada por la mazarota

$$\frac{m_{compensar}}{m_{aportemz}} = \frac{3.2018kg}{0.777kg}$$

$$\frac{m_{compensar}}{m_{aportemz}} = 4.1$$

Deduciendo que el sistema de alimentación debe presentar 4 entradas.

### Caudal de vertido

Se empieza determinando el tiempo de colado el cual se puede determinar en base la siguiente expresión, cuya naturaleza es empleada en primera instancia para fundiciones de hierro gris menores a 450kg; misma que es considerada como una aproximación aceptable puesto a que se puede obtener hierro dúctil en base a añadir un nodulizante (Manganeso) al hierro gris.

$$t = K \left( 1.41 + \frac{T}{14.59} \right) \sqrt{W} \text{ [s]}$$

Donde:

$$k = \frac{\text{Fluides[in]}}{40}$$

$T = \text{espesor promedio de los canales mm}$

$W = \text{masa del elemento a fundir kg}$

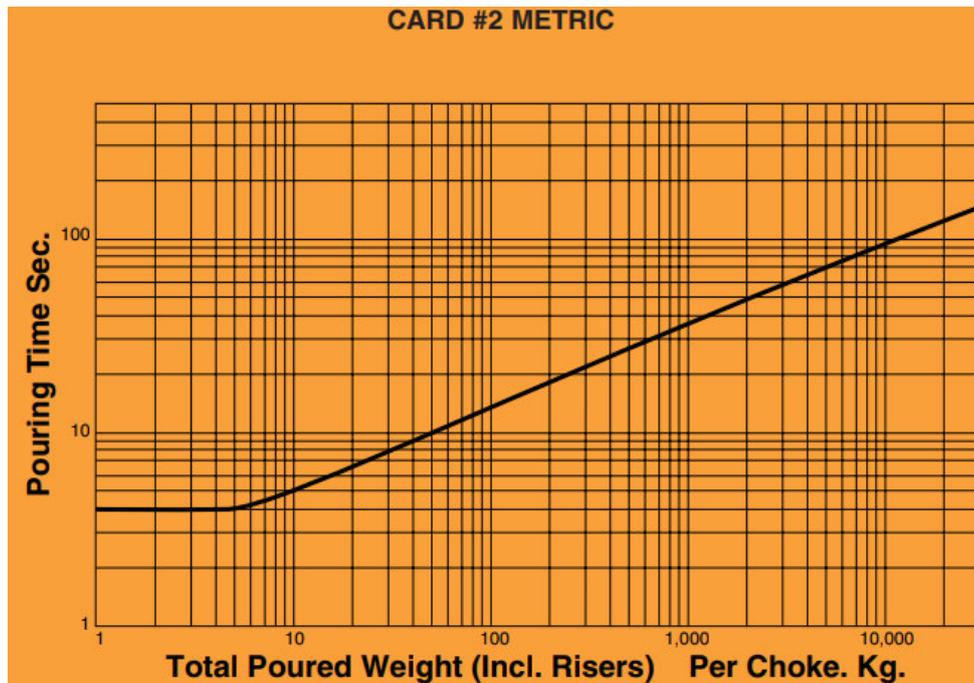
$$t = \frac{28 \text{ in}}{40} \left( 1.41 + \frac{\frac{43 + 58 + 10}{3}}{14.59} \right) \sqrt{32.018kg} \text{ [s]}$$

$$t = 15.62 \text{ s}$$

La primera estimación es verificada mediante la figura 2.4 diagrama empírico, específico para el hierro dúctil, donde para un peso de 32kg le corresponde un tiempo de 8 s, el cual

es aproximadamente la mitad del tiempo calculado de forma analítica. Debido a la diferencia entre estas dos magnitudes se prefiere trabajar con el tiempo aportado por (RIT, 2000) en su carta métrica número 2 debido a su naturaleza experimental.

Una vez definido el tiempo de colado para llenar totalmente el molde se procede a determinar el flujo másico  $\dot{m}$



**Figura 2.4** Tiempo de colado para el hierro ductil (RIT, 2000)

$$\dot{m} = \frac{\text{masa de pieza a fundir}}{\text{tiempo de colado}}$$

$$\dot{m} = \frac{32 \text{ kg}}{8 \text{ s}}$$

$$\dot{m} = 4 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Sin embargo (Cambell, 2011) recomienda que la tasa de llenado de diseño sea el doble de la calculada en primera instancia, de tal forma que el flujo másico propuesto es de  $8 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

Finalmente se obtiene el caudal (Q) al dividir el flujo masico para la densidad del metal líquido

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

$$Q = \frac{8 \text{ kg/s}}{7000 \text{ kg/m}^3}$$

$$Q = 1.143 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

### Áreas de sección del bebedero

Una vez que el metal fundido es vertido por la cuchara, ingresando por la copa es acelerado por acción de la gravedad de tal forma que 2 áreas de sección transversal pueden ser calculadas, tanto a la entrada como a la salida del bebedero

$$v_1 = \sqrt{2gh_1}$$

$$v_1 = \sqrt{2 \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (0.1\text{m})}$$

$$v_1 = 1.4\text{m/s}$$

Conociendo que el caudal también puede ser realizado como el producto de la velocidad por el área, se despeja de esta relación el área de sección correspondiente.

$$Q_1 = v_1 A_1$$

$$A_1 = \frac{1.143 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{1.4\text{m/s}}$$

$$A_1 = 8.164 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 816\text{mm}^2$$

Partiendo de que el bebedero tendrá forma cónica, tal que su sección transversal corresponde a un círculo, se deriva la siguiente expresión para calcular el diámetro en dicho punto, despejando el diámetro de la expresión para calcular el área de un círculo.

$$D_1 = \sqrt{\frac{4 A_1}{\pi}}$$

$$D_1 = \sqrt{\frac{4(816\text{mm}^2)}{\pi}}$$

$$D_1 = 32.23 \text{ mm}$$

Lo propio se realiza para el cálculo de la siguiente área, donde la base del bebedero se encuentra a 200mm respecto a la copa

$$v_2 = \sqrt{2gh_1}$$

$$v_2 = \sqrt{2 \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) (0.2m)}$$

$$v_2 = 1.98m/s$$

$$Q_2 = v_2 A_2$$

$$A_2 = \frac{1.143 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s}}{1.98m/s}$$

$$A = 5.772 \times 10^{-4} m^2 = 5777mm^2$$

$$A = \frac{1.143 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s}}{1.4m/s}$$

$$A = 8.164 \times 10^{-4} m^2 = 816mm^2$$

$$D_2 = \sqrt{\frac{4 A_2}{\pi}}$$

$$D_2 = \sqrt{\frac{4 (577.27mm^2)}{\pi}}$$

$$D_2 = 27.11 mm$$

### Áreas de sección del distribuidor y alimentadores

Rao propone áreas de secciones típicas para sistema de alimentación de hierro dúctil, mismas que para las áreas de; salida del bebedero : distribuidor : alimentador; corresponden las siguientes proporciones; 1.15 : 1.1 : 1.

De tal modo que las áreas propuestas son mostradas en la tabla 2.3

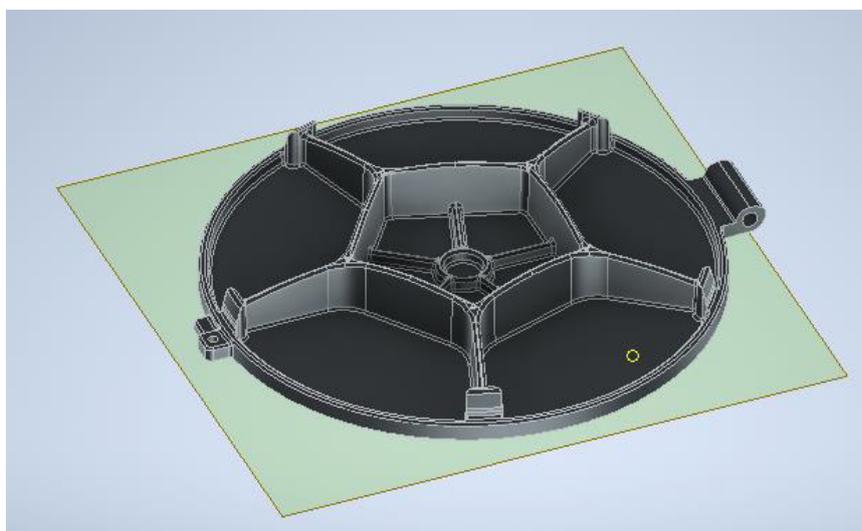
**Tabal 2.3** Áreas de sección para el sistema de alimentación

Áreas de sección [ $mm^2$ ]		
Bebedero	Distribuidor	Alimentador
816	780.9	709.91

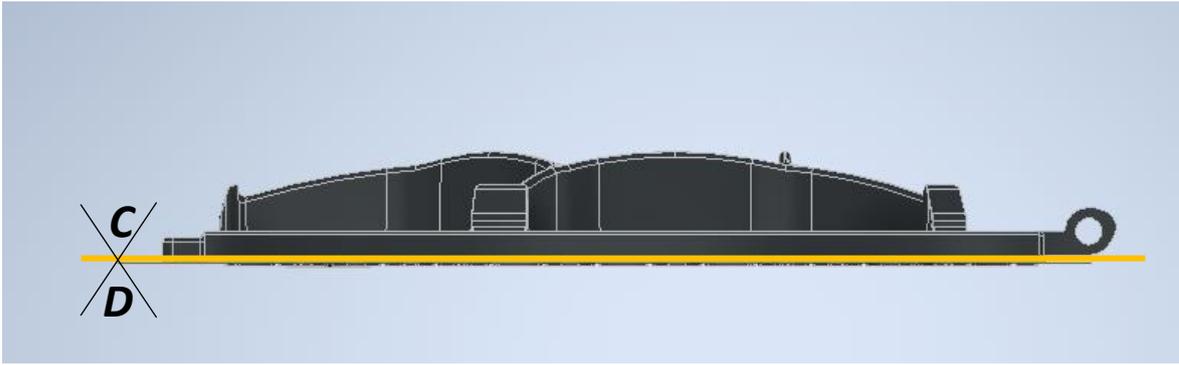
### Modelado CAD

Se dibuja el modelo CAD mediante el software inventor precisando de un plano que permita discernir entre el *cope* (molde superior) y el *drag* (molde inferior) para dotar al posible conjunto de una facilidad de moldeo como de desmolde.

En esta instancia es necesario preguntarse si la tapa debe ser colocada con el relieve en el *cope* o en el *drag*, existen una ventaja principal al trabajar con el relieve en el *drag* y es que al ser las letras de la leyenda lo primero que se lleva debido a la mayor fluides del metal gracias a su mayor temperatura, se logra un mejor acabado superficial dotando de mayor definición a las letras, por otra parte, con el afán de lograr un mayor rendimiento de molde se puede lograr que la altura del *drag* reduzca considerablemente si los nervios de la tapa se encuentran en el *cope*, puesto a que se aprovecharía de la altura del molde desocupada donde yace el bebedero Figura 2.6

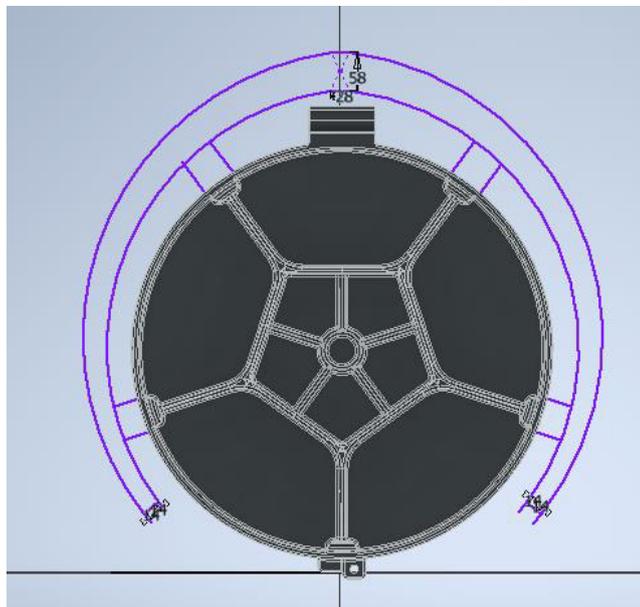


**Figura 2.5** Plano de división de los dos moldes: Isometría (Propia)



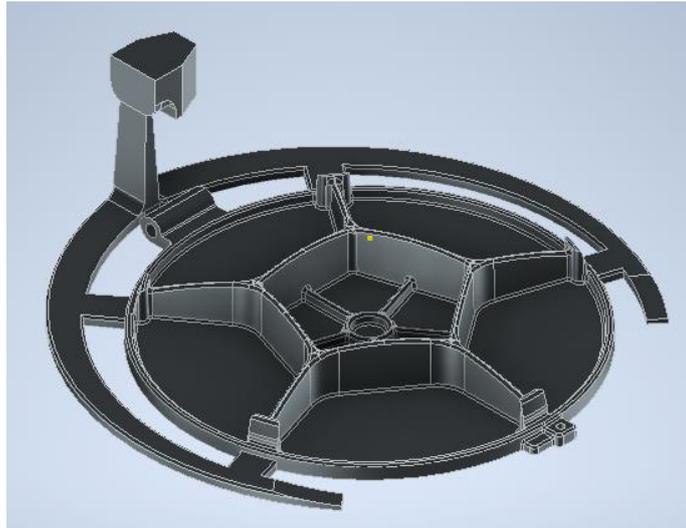
**Figura 2.6** Plano de división de los dos moldes (*Cope* y *Drag*): Vista frontal (Propia)

Una vez definido el plano divisor de los moldes se bosquejan los dos distribuidores y los cuatro alimentadores figura 2.7, para ser extruidos a 4°, lo cual facilita el desmolde.



**Figura 2.7** Bosquejo de los distribuidores y alimentadores (Propia)

(Cambell, 2011) Sugiere que al momento de definir las geometrías de cada una de las partes del sistema de alimentación la mejor forma de garantizar un régimen laminar para el flujo del metal líquido se logra al definir secciones más anchas que altas, para lo cual se propone el ensamble de la figura 2.8



**Figura 2.8** Sistema de alimentadores, primera opción (Op.1) (Propia)

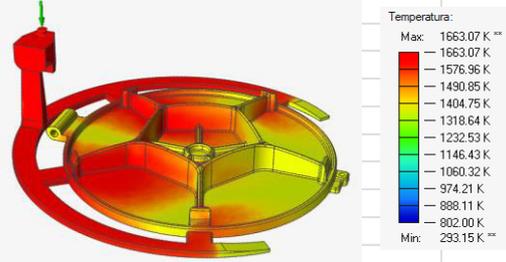
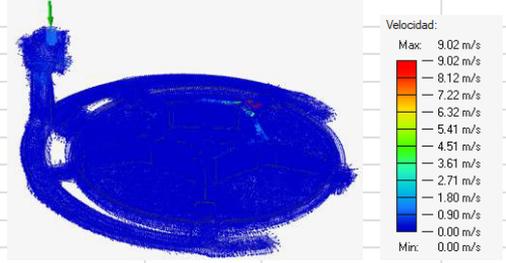
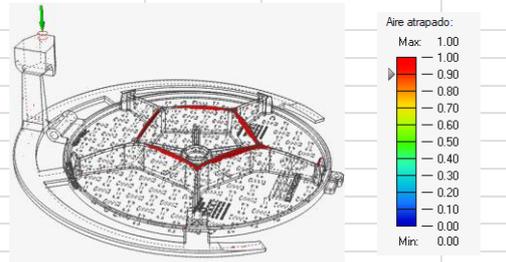
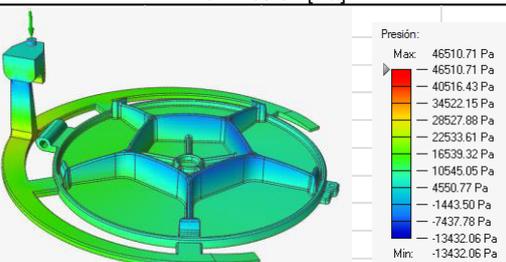
### Simulación por elementos finitos

Se simula el comportamiento de ambas fases: llenado y simulación bajo la definición de las siguientes propiedades tabla 2.4

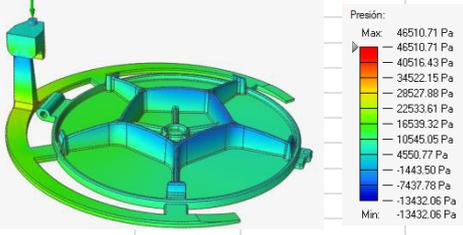
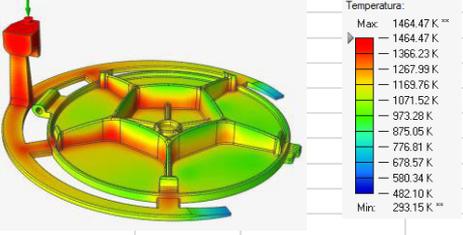
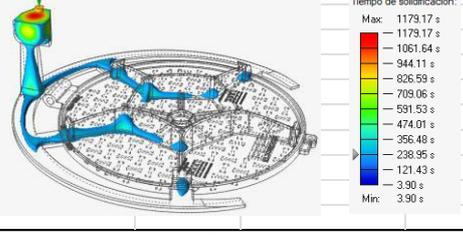
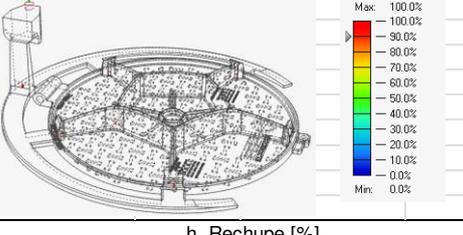
**Tabal 2.4** Propiedades definidas para la simulación por elementos finitos (Propia)

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Material para colar	Hierro dúctil
Temperatura de colado[°C]	1389.85
Sección de entrada de colado[m]	0.02
Material del molde	Arena, Catalizador y Resina furánica
Temperatura de molde [°C]	21
Tiempo de Vertido [s]	8
Altura de cuchar [m]	0.5
Índice de flujo [m <sup>3</sup> /s]	0.001143

Una vez definida las condiciones de contorno se procede a correr la simulación proponiéndose el siguiente esquema para su respectivo análisis tabla 2.4

<b>RESULTADO DEL ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS</b>				
		<b>Elemento simulado</b> Tapa D600C		Opción 1 (Op1)
<b>Propiedades del elemento simulado</b>				
	Tapa	Tapa + Sis. Alim	<b>Rendimiento</b>	
Masa [kg]:	32,018	44,921	Metálico:	71,28%
Área [mm <sup>2</sup> ]:	986.380	1.256.317,638		
Volumen [mm <sup>3</sup> ]:	4.478.032	6.282.703,218		
<b>Secciones transversales del sistema de alimentación</b>				
Bebedero [mm]:	58X28	Distribuidor [mm <sup>2</sup> ]:	43X14	Alim. [mm <sup>2</sup> ]: 50X14
<b>1. LLENADO</b>				
<b>a. Temperatura [K]</b>			<b>Observaciones</b>	
			<p>El llenado se da de forma semi-simétrica. Las zonas más calientes están cerca del sistema de alimentación.</p>	
<b>b. Velocidad [m/s]</b>			<b>Observaciones</b>	
			<p>La velocidad máxima es de 0.3 m/s dentro del molde, lo que indica que no habrá metal líquido turbulento.</p>	
<b>c. Aire atrapado [-]</b>			<b>Observaciones</b>	
			<p>Se evidencia que existe aire atrapado en los nervios de la tapa, lo cual por su volumen es un defecto inadmisibles de diseño</p>	
<b>d. Presión [Pa]</b>			<b>Observaciones</b>	
			<p>La presión metalostática máxima se produce en la sección inicial del distribuidor.</p>	

**Tabal 2.4** Resultado de análisis por elementos finitos (Propia)

d. Presión [Pa]	Observaciones
	<p>La presión metalostática máxima se produce en la sección inicial del distribuidor.</p>
<b>2. SOLIDIFICACIÓN</b>	
e. Temperatura [K]	Observaciones
	<p>Se evidencia que la última zona en solidificar se produce dentro del distribuidor.</p>
f. Tiempo de solidificación [s]	Observaciones
	<p>Se observa que, durante la solidificación, la presencia de defectos estos se localizarán dentro del sistema de alimentación y con una alta probabilidad de aparecer dentro de la pieza</p>
g. Porosidad [%]	Observaciones
	<p>Existe la presencia de reducidas porosidades en la base de los nervios.</p>
h. Rechupe [%]	Observaciones
	<p>Se revela que existe un único rechupe en la parte superior del tazón de vertido.</p>
<p><b>Conclusiones:</b> El sistema de alimentación para la tapa D600C muestra que no producirá rechupes, ni porosidades considerables, puesto a que se encuentran en un grado admisible. Sin embargo, la presencia de aire atrapado en el interior de la pieza resulta ser un defecto inadmisibles que compromete la funcionalidad de la pieza. Por otra parte, se mantiene una velocidad de flujo promedio de 0,2 m/s, lo cual evitara la formación de turbulencias.</p>	

**Tabla 2.4** Continuación

## Metodología de Taguchi

Tras analizar la simulación del sistema de alimentación inicial, se puede evidenciar que el aire atrapado es uno de los principales problemas detectados en la opción de diseño base, por lo que para dar solución a este defecto se propone implementar la metodología de diseño robusto de Taguchi para corregir los errores en esta fase inicial y no en una futura fase de control de calidad durante la producción.

### Factores y niveles

Uno de los pasos cruciales durante la implantación del método de Taguchi, radica en la correcta selección de los factores. Por lo que para determinar estos, se parte dando respuesta al por qué se genera el defecto de falta de llenado, representado por el aire atrapado en la figura anterior, de tal forma que (Cambell, 2011) propone que el aire atrapado es ocasionado por moldes mal constituidos debido a modelos mal logrados, áreas de sección de bebederos, distribuidore o alimentadores mal dimensionadas o finalmente debido a que la velocidad dentro del molde es mayor a la velocidad crítica.

Al analizar las posibles causas del defecto en cuestión se decide trabajar con el área de sección tanto del bebedero, distribuidor y alimentador ya que en medida de que estas incrementan o disminuyan su área; varían la velocidad del metal líquido a la. Esta manera de optimizar el diseño variando las áreas principales en base a la metodología de Taguchi a sido implementada por varios autores comprobando la valides y aplicabilidad de la técnica (Apparao & Birru, 2017)(Sultana, 2017)

Una vez definidos los factores debe buscarse entre que valores se los quiere hacer variar, es así como (RAO, 2020) propone que al trabajar con hierro dúctil existen dos variaciones empíricas de áreas de sección probadas 1.15 : 1.1 : 1 y 1.25 : 1.13 : 1; correspondientes al bebedero : distribuidor : alimentado.

Proponiendo así 3 factores con 2 niveles cada uno para llevar a cabo los experimentos, tal como se muestra en la tabla 2.4

**Tabal 2.4** Factores y niveles para la experimentación. (Fuente propia)

Factor: Área	Nivel	
	1	2
A Bebedero[mm <sup>2</sup> ]	1162,450173	1256,64
B Distribuidor [mm <sup>2</sup> ]	525,4274782	720,00
C Alimentador [mm <sup>2</sup> ]	232,49	289,23

### Diseño de arreglo ortogonal

Como se tiene 3 factores y 2 niveles, la literatura propone un arreglo [ $L^4$ ], tal como se muestra en la tabla 2.5

**Tabal 2.4** Diseño de experimentos con 3 factores y 2 niveles(Roy, 2001)

Experimento	Factor		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	4	2	1

Lo que vuelve atractivo al método de Taguchi para el diseño de experimentos es que optimiza el uso del recurso, reduciendo el número de experimentos solo a el necesario, de tal suerte que para un arreglo [ $L^4$ ], en vez de realizar 8 experimentos, se terminan desarrollando solo la mitad.

Mostrándose los experimentos en la tabla 2.5

**Tabal 2.5** Factores y niveles para la experimentación. (Fuente propia)

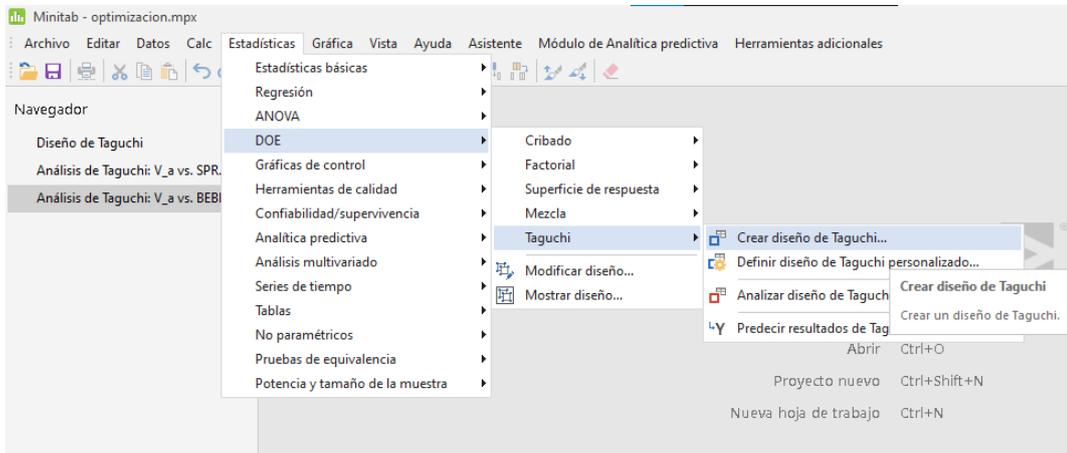
Experimento	Sección	Área [ $mm^2$ ]	Alto H [ $mm^2$ ]	Ancho W [ $mm^2$ ]	Diámetro D [ $mm^2$ ]
1	Bebedero	1162,45	130.00	-	38,47
	Distribuidor	525,42	18,87	22,92	-
	Entrada	232,49	17,68	10,63	10,63
2	Bebedero	1162,45	130.00	-	38,47
	Distribuidor	720.00	22,09	26,83	-
	Entrada	289,23	16,29	13,41	13,41
3	Bebedero	1256,63	130.00	-	40.00
	Distribuidor	525,42	18,87	22,92	-
	Entrada	289,23	17,68	10,63	10,63
4	Bebedero	1256,63	130.00	-	40.00
	Distribuidor	720.00	22,09	26,83	-
	Entrada	232,49	17,685	10,63	10,63

### Análisis del método de Taguchi

Para la tarea de analizar las interacciones de los resultados obtenidos mediante la experimentación se hace uso del software Minitab 20, por su capacidad de realizar análisis estadísticos en base a diferentes técnicas, en este caso el diseño de experimentos mediante la metodología de Taguchi.

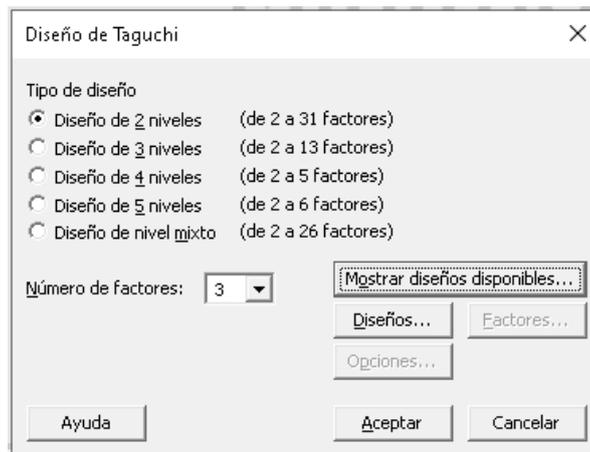
En este apartado se definirá como crear un diseño de Taguchi, para a continuación analizarlo.

Una vez en el programa para crear el diseño, se parte de la pestaña de Estadísticas siguiendo la ruta mostrada en la figura 2.5 en base a la presente ruta: DOE → Taguchi → Crear diseño de Taguchi



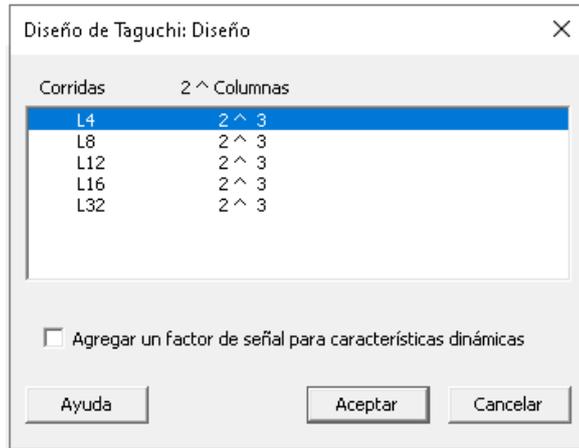
**Figura 2.5** Minitab - Creación del diseño de Taguchi (Fuente propia)

A continuación, se definen los números de niveles en 2 y el de factores en 3. Figura 2.6



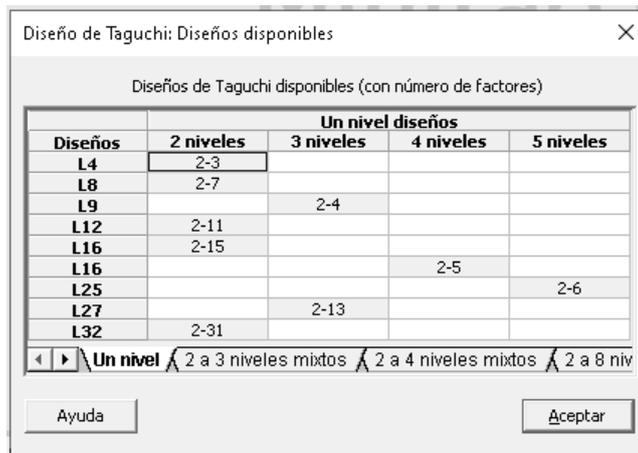
**Figura 2.6** Minitab – Definición del arreglo (Fuente propia)

Tras presionar en el botón diseño se despliega una ventana donde se puede escoger el número de corridas o experimentos en base al arreglo escogido anteriormente es decir un  $L^4$  Figura 2.7



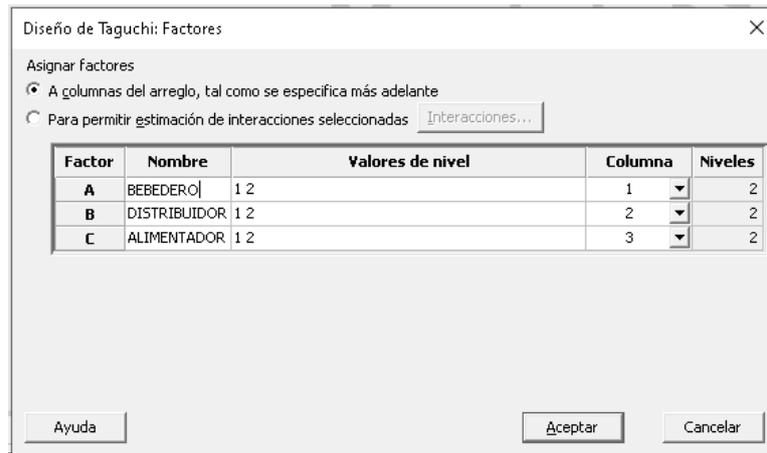
**Figura 2.7** Minitab – Selección del tipo de arreglo (Fuente propia)

Una vez definido el tipo de arreglo se escoge entre uno de los diseño disponibles para este caso 2-3; niveles y factores respectivamente figura 2.7



**Figura 2.7** Minitab – Selección entre diseños disponibles (Fuente propia)

Como siguiente paso se despliega la ventana de factores representados por las letras A-B-C a las cuales se les puede asignar un nombre al factor en cuestión en la columna de Nombre figura 2.8. Tras dar clic en aceptar se despliegan un numero parcial de posibles combinaciones de factores a distintos niveles, mismos que confirman la selección de la matriz predefinida anterior mente para el presente arreglo figura 2.9



**Figura 2.8** Minitab – Definición de factores (Fuente propia)

↓	C1	C2	C3
	BEBEDERO	DISTRIBUIDOR	ALIMENTADOR
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

**Figura 2.9** Minitab – Diseño de experimentos (Fuente propia)

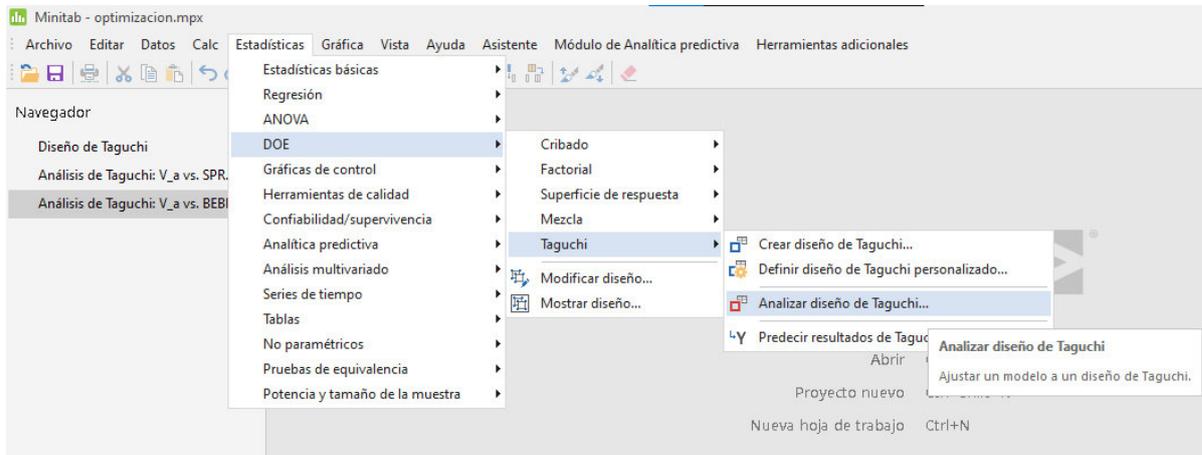
Como segundo inicia el análisis del diseño de Taguchi, para esto en primera instancia se requiere modificar la matriz de experimentos con sus valores correspondientes, además de crear una nueva columna donde consten los resultados de los experimentos, para este caso la columna C5 donde se ingreso el área proyectada por el aire atrapado dentro de la pieza, tal como se muestra en la figura 2.10.

C1	C2	C3	C4	C5
BEBEDERO	DISTRIBUIDOR	ALIMENTADOR		V_a
1162,45	525,427	232,490		1737,1
1162,45	720,000	289,234		3206,1
1256,64	525,427	289,234		2996,2
1256,64	720,000	232,490		25850,9

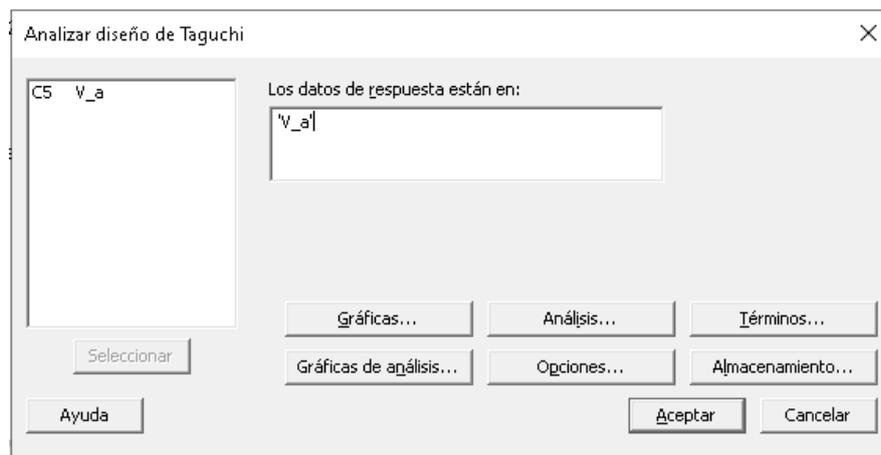
**Figura 2.10** Minitab – Arreglo de experimentos y resultados (Fuente propia)

Una vez generado el arreglo con la información de los experimentos actualizados se sigue la ruta mostrada en la figura 2.11 en base a la siguiente ruta: Estadísticas → DOE → Taguchi → Analizar diseño de Taguchi

Desplegándose la ventana de análisis figura 2.12 donde se configuran las gráficas, tipo de análisis y opciones.

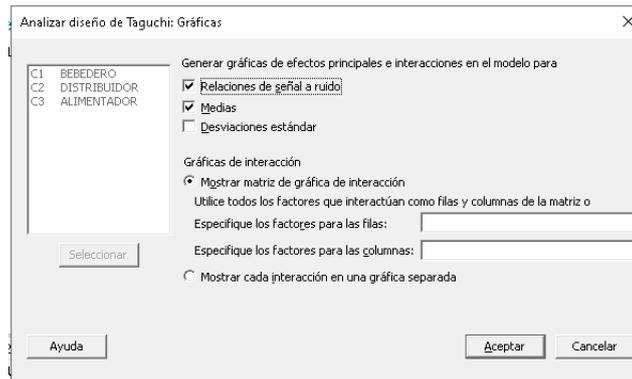


**Figura 2.11** Minitab – Análisis del diseño de Taguchi (Fuente propia)

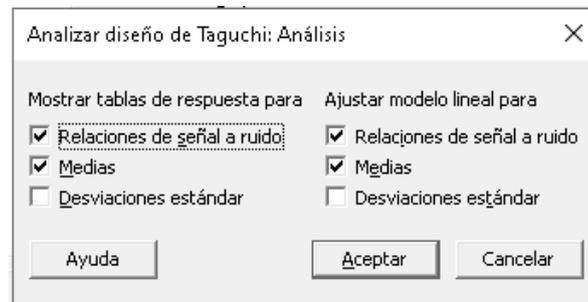


**Figura 2.12** Minitab – Análisis del diseño (Fuente propia)

Para el análisis se quiere evaluar las relaciones Señal ruido y las medias, por lo que se seleccionan, las dos opciones de la figura 2.13 de tal suerte que los resultados serán graficados para un mejor entendimiento. A continuación, mediante el botón análisis se selecciona mostrar la tabla y el ajuste del modelo lineal figura 2.14.

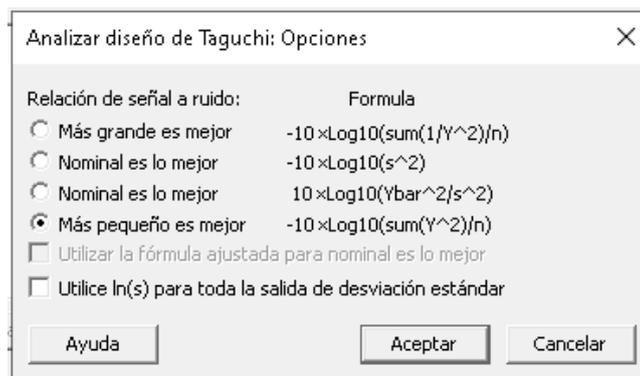


**Figura 2.13** Minitab – Generación de graficas (Fuente propia)



**Figura 2.14** Minitab – Resultados y ajustes de modelo (Fuente propia)

Finalmente se selecciona en opciones el tipo de relación señal ruido, para este caso en base a que la menor cantidad de aire atrapado es requerido, se seleccionar el criterio de “Más pequeño es mejor” figura 2.15



**Figura 2.15** Minitab – Definición de la relación señal ruido (Fuente propia)

### **3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Una vez alcanzado el diseño inicial y tras llevar un análisis para identificar sus ventajas y desventajas, se destaca lo siguiente:

- El bebedero trabaja lleno, lo que no resulta favorecedor ya que al momento del llenado; el colado no va a ser constante puesto a que los operarios tendrán que detenerse para evitar el derrame del metal fundido, lo que provocará que el flujo del metal líquido comience a generar turbulencias, además de que la presencia de aire atrapado incrementaría.
- Los distribuidores trabajan llenos, lo que permite afirmar que la escoria y el aire absorbido flotarán en la parte superior de los canales debido a la diferencia de densidad respecto al hierro dúctil fundido
- Aun que se logra un buen efecto de filtrado al mantener al aire y escoria flotando en el distribuidor; al encontrarse los alimentadores a la misma altura, estos no trabajan de tal forma que eviten el ingreso de elementos ajenos a la colada dentro de la cavidad de la pieza
- Finalmente, aunque la presencia de rechupes y porosidades es despreciable, la presencia de aire atrapado es un problema.

Es por esto, que previo a la implementación de la metodología de Taguchi en un intento de obtener un sistema de alimentación eficiente que reduzca la presencia de ruido cuando se ejecute el método. Es que se decide buscar tres alternativas de diseño adicionales en base a la conservación de las áreas de sección transversal tanto para el bebedero, distribuidor y alimentador, pero modificando sus geometrías

#### **3.1 Resultados**

##### **Dimensionamiento y modelado del sistema de alimentación.**

Se proponen tres alternativas nuevas de diseño siendo estas las opciones 2, 3 y 4.

Como segunda opción figura 3.1 se propone un bebedero de sección cónica invertida considerando la facilidad para el desmolde del mismo, además de que se busca lograr que el bebedero trabaje semilleno. Se mantiene la misma disposición del distribuidor que en la opción número 1, sin embargo, los alimentadores son colocados bajo del distribuidor para corregir el ingreso de impurezas hacia el interior de la cavidad del molde.



**Figura 3.1** Modelo CAD segunda opción de diseño (Op.2) (Fuente propia)

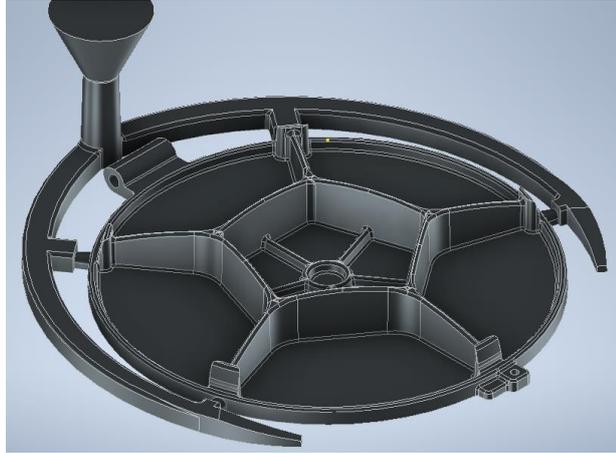
La opción número tres figuras 3.2 presenta un bebedero de sección cónica más ancho que el mostrado en la opción 2, puesto a que, a raíz de un cambio en la geometría del distribuidor, la sección del bebedero también debe ser corregida. Por su parte el distribuidor reduce su ancho y es compensado mediante la ganancia de altura. Desde esta opción de diseño se incorpora el uso de difusores para los alimentadores con afán de retener al aire y las impurezas dentro del distribuidor evitando su paso hacia la cavidad del molde.



**Figura 3.2** Modelo CAD tercera opción de diseño (Op.3) (Fuente propia)

Como última propuesta de diseño se decide utilizar la razón de sección de área 1.15:1.25:1 para el bebedero, alimentador, y distribuidor respectivamente para la nueva sección del bebedero escogida en la opción 3 (RAO, 2020), dando como resultado el modelo mostrado en la figura 3.3 donde además se disminuye la distancia entre la tapa y distribuidor, debido al incremento de su conicidad, finalmente esta opción propone una reducción progresiva

de la sección del distribuidor para mantener una velocidad estable mientras el fluido avanza.



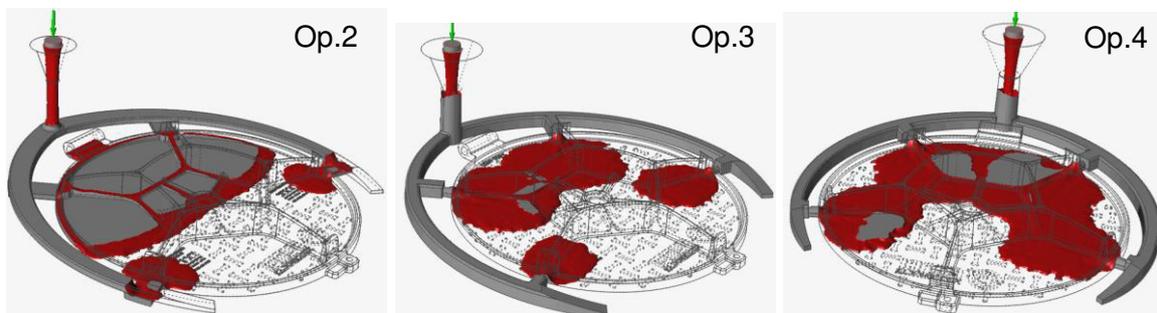
**Figura 3.3** Modelo CAD tercera opción de diseño (Op.4) (Fuente propia)

### Simulación

Una vez definida las tres opciones se evalúa su comportamiento en base a la simulación de llenado y de solidificación detallada en los anexos 1, 2 y 3.

La evaluación empieza con el análisis de la evolución de flujo arrojados por la simulación mostrada en la figura 3.4, donde la opción 2 (Op.2) resulta descartable debido a que no trabaja con el distribuidor lleno, provocando que ingresen libremente escoria metálica y no metálica contaminando la pieza; además que el bebedero continúa trabajando vacío.

Al comparar las opciones 3, 4 se nota que el bebedero trabaja semilleno facilitando la continuidad durante la colada, por otra parte, el aporte de flujo volumétrico difiere, mostrando una mejor respuesta en la opción 4 donde el llenado se da una forma más uniforme lo que evitará la formación de juntas frías.



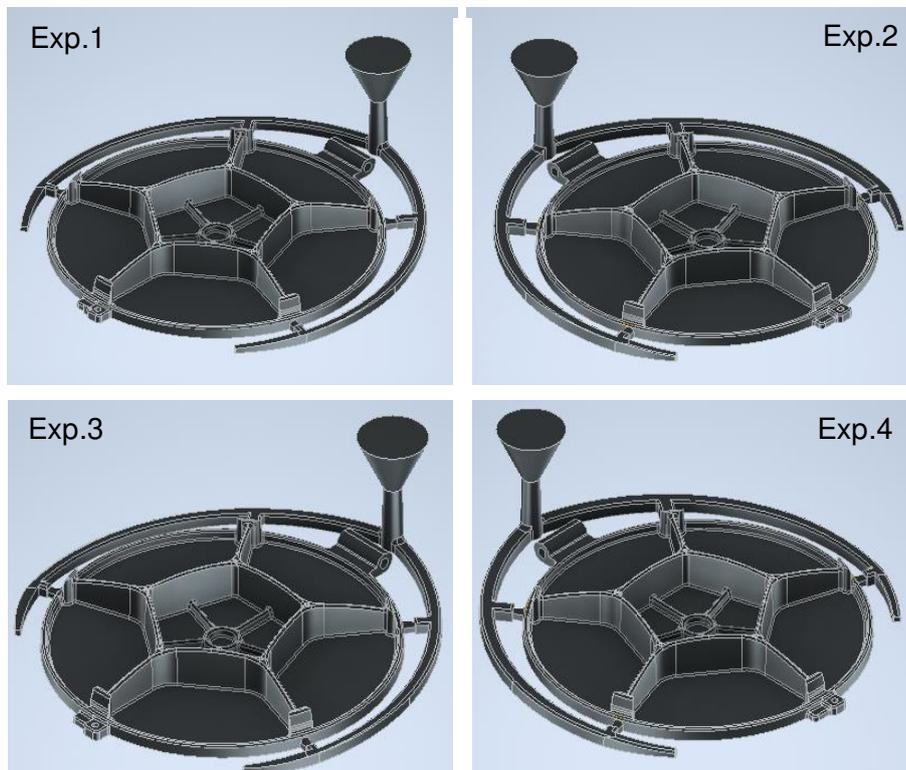
**Figura 3.4** Evolución de flujo opciones 2 (izq.), 3 (cent.) y 4 (der.) (Fuente propia)

Tal como se muestra en los anexos 2 y 3 la presencia de defectos a nivel de rechupes y porosidad es similar para las opciones 3 y 4 respectivamente, por lo que se requiere de otro parámetro que indique alguna ventaja entre estas dos opciones; es así como al analizar la respuesta de la temperatura durante la solidificación, se puede notar un gradiente más homogéneo.

Por lo que se define a esta opción como un punto de partida

### Metodología de Taguchi

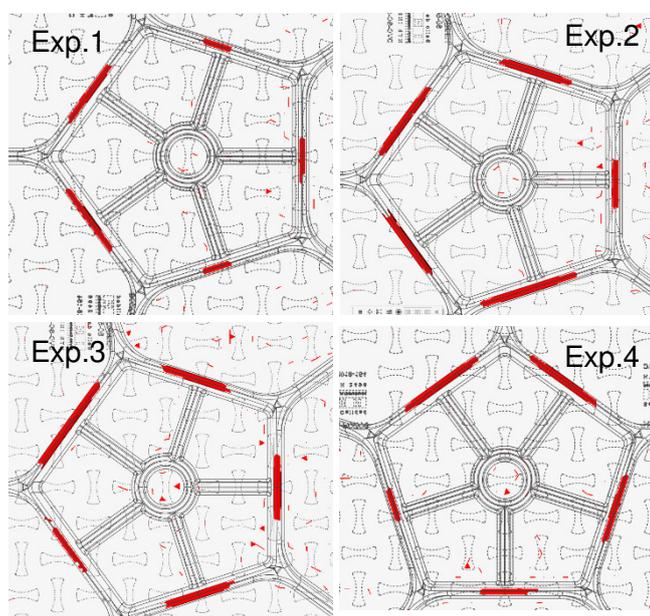
En base a lo expuesto anteriormente, es evidente notar que el defecto más común en cada una de opciones simuladas fue la falta de llenado debido al efecto del aire atrapado; por lo que tras modelar las 4 combinaciones de experimentos requeridas para la elaboración del método de Taguchi se obtiene los sistemas de alimentación para los experimentos mostrados en la figura 3.5 variando las magnitudes de las secciones tanto para el bebedero, distribuidor y alimentador respecto a la tabla 2.5. Es necesario notar que en un intento por incrementar el rendimiento metálico y notar su relación con la generación de defectos, se disminuyó el área de sección transversal guardando las proporciones de las secciones recomendadas.



**Figura 3.5** Sistemas de alimentación desarrollados para experimentos de Taguchi  
(Fuente propia)

Tras definir los experimentos se procedió a simular cada sistema de alimentación (Anexos IV – VII), determinado el grado de aire atrapado presente en cada uno de los ensayos virtuales, tal como se evidencia en la figura 3.6; donde gracias a la ayuda de un correcto escalado mediante un software CAD es posible medir la proyección del aire atrapado. Dando como resultado los valores expuestos en la tabla 3.1

Se debe notar que una forma de garantía la eficacia del método radica en medir de manera correcta las magnitudes de los resultados obtenidos, siendo esta la causa por la cual se decidió medir tan solo el área proyectada por el volumen del aire atrapado y no directamente los milímetros cúbicos pertinentes, ya que a la fecha la última versión del software de simulación no es capaz de entregar una respuesta en magnitud del volumen de aire atrapado.



**Figura 3.6** Aire atrapado experimentos de Taguchi (Fuente propia)

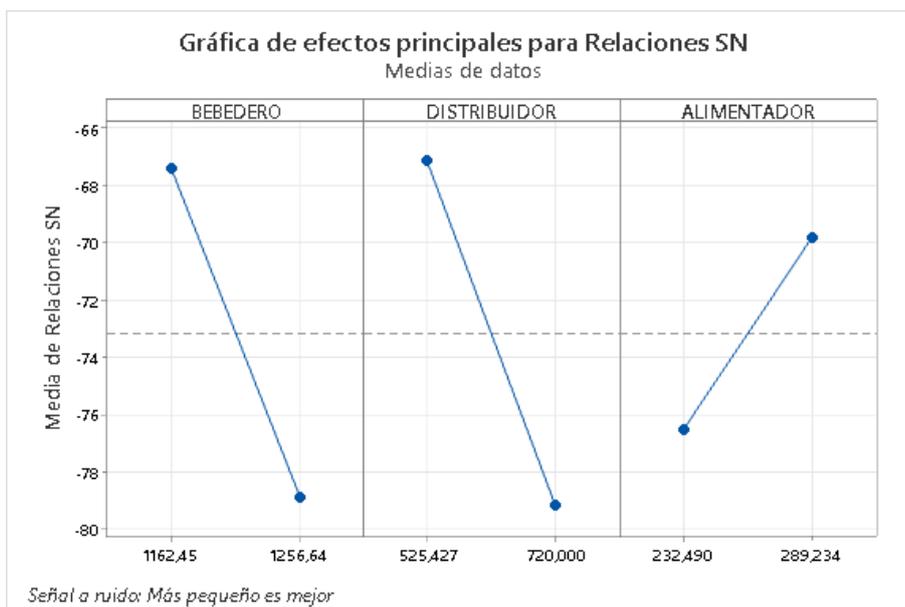
**Tabal 3.1** Resultados de simulación – Proyección de aire atrapado. (Fuente propia)

Experimento N°	Proyección de aire atrapado [ $mm^2$ ]
Exp.1	1737,08
Exp.2	3206,08
Exp.3	2996,19
Exp.4	25850,9

Ya una vez con los resultados de los experimentos listos se corre el método de Taguchi en Minitab obteniéndose la tabla 3.2 de respuestas para relaciones de señal ruido bajo el criterio de “Más pequeño es mejor”. En la presente tabla se muestran los resultados de los niveles y además se muestra el estadístico Delta el cual entrega la diferencia en valor absoluto del resultado de los niveles 1 y 2, para finalmente en la tabla clasificarlos de mayor a menor revelando su nivel de importancia

**Tabal 3.2** Taguchi - Respuestas para relaciones de señal ruido (Fuente propia)

Nivel	BEBEDERO	DISTRIBUIDOR	ALIMENTADOR
1	-67,46	-67,16	-76,52
2	-78,89	-79,18	-69,83
Delta	11,43	12,02	6,70
Clasificar	2	1	3



**Figura 3.7** Taguchi – Gráfica de efectos principales para relaciones de Señal Ruido (Fuente propia)

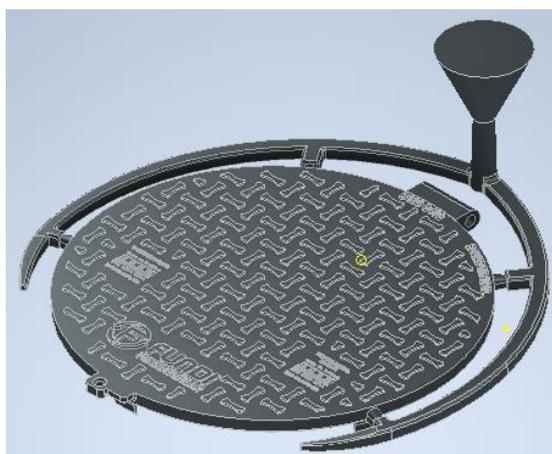
Lo tabulado en la tabla 3.2 se grafica en la figura 3.7; siendo así como se puede visualizar de forma de esquema cual es la configuración óptima de nivel para el bebedero y distribuidor; donde gracias al criterio de “Mas pequeño es mejor” para reducir la

cantidad de aire atrapado, se deben escoger la configuración correspondiente a la de los niveles mayores mientras que para el alimentador en base a su delta de significancia cualquiera de los dos niveles pueden ser escogidos notándose que mientras más pequeño, más atractivo resulta el índice de rendimiento metálico por lo que su nivel más bajo es el seleccionado, mostrándose las relaciones óptimas en las tabla 3.3

**Tabal 3.3** Taguchi - Relaciones optimas (Fuente propia)

<b>Parte sist. alim.</b>	<b>Nivel</b>	<b>Área [<math>mm^2</math>]</b>
Bebedero	1	1162,45
Distribuidor	1	525,43
Alimentador	1	232,49

Por coincidencia la configuración mejorada corresponde a la del experimento número 1 simulada durante la aplicación del método de Taguchi y como es evidente notar en los resultados del Anexo IV. La cantidad de aire atrapado, aunque menor respecto a la del resto experimentos aún permanece en un grado inadmisible, por lo que se decide dar la vuelta a la tapa quedando el relieve en el cope; para este efecto se diseña un nuevo CAD figura 3.8 y se procede a simularlo (ANEXO VIII), notándose que la cantidad de aire atrapado es despreciable, sin embargo como se esperaba debido al intento de incrementar el índice de rendimiento metálico, la presencia de rechupes y porosidad producidas es considerable, por ser precisamente la tapa y no el sistema de alimentación la última zona en solidificar.



**Figura 3.8** CAD con secciones optimizadas y relieve en el Cope. (Fuente propia)

Tras la implantación de la metodología de Taguchi se obtienen dos resultados trascendentes:

1. La proporción de niveles óptima en base a la relación de áreas de sección mostrada en la tabla 3.3, corresponde a las relaciones de 1.15:1.1:1 para el bebedero, alimentador y distribuidor respectivamente.
2. Al intentar incrementar el rendimiento metálico tras disminuir el peso del sistema de alimentación resulta contraproducente ya que al dotar de un menor módulo, la pieza termina siendo el elemento en solidificar al final, generándose en su interior porosidades y rechupes.

De tal suerte que por lo expuesto anteriormente se decidió utilizar el área del alimentador propuesta en la opción 4 (Op.4), previamente estudiada y adaptarla en función a la relación óptima, además de mantener la tapa con el relieve en el cope. Obteniendo el CAD mostrado en la figura 3.9 mismo que dispone alimentadores trapezoidales que evitan el ingreso de contaminantes dentro de la cavidad de la pieza.



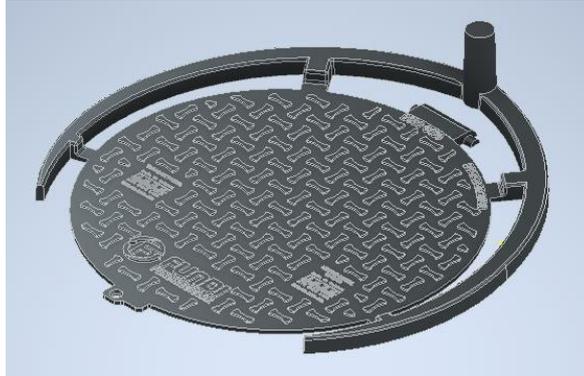
**Figura 3.9** CAD Sistema de alimentación final (Fuente propia)

Finalmente se llevó a cabo una última simulación (Anexo IX) donde se evidencia que el sistema de alimentación final de la tapa D600C muestra que no genera rechupes, ni porosidades. Aun que se evidencia la presencia de aire atrapado en la leyenda de la pieza resulta ser un defecto admisible por su mínimo volumen. Por otra parte, se mantiene una velocidad de flujo promedio de 0,2 m/s menor a la velocidad crítica. Finalmente se obtiene un rendimiento metálico que disminuye en 10 puntos respecto a otras opciones de diseño, pero que en contraste; no muestran presencia de defectología que comprometa su funcionalidad.

## Obtención del modelo

Una vez definida las dimensiones finales del sistema de alimentación el proceso de obtención del molde a partir del modelo es relativamente sencillo, para este efecto se debe tomar en cuenta que el espesor de pared del molde de arena no debe ser inferior a 30 mm (Saada & Mansori, 2021) ni mayor a 50mm en base a la experiencia de Fundireciclar.

Para este efecto se modifica el CAD del diseño final generando un noyó para la bisagra y dividiendo el sistema en dos partes que constituirán el *Cope* figura 3.10 y *Drag* figura 3.11



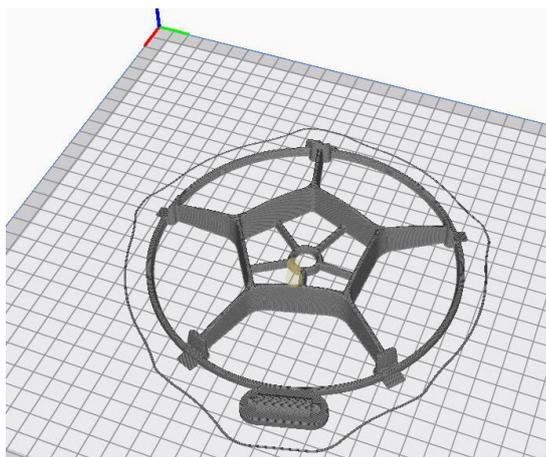
**Figura 3.10** Modelo del Cope (Fuente propia)



**Figura 3.11** Modelo del Drag (Fuente propia)

Ya con los modelos virtuales desarrollados es hora de verificar su funcionalidad para lo que en efecto se decide obtener por la técnica de manufactura aditiva de modelado por deposición fundida (FDM) los dos componentes del modelo a escala 1:4, para esto se parte de los modelos CAD figuras 3.10 y 3.11 guardando los archivos en extensión STL, para a continuación procesar la información con ayuda del software CURA, obteniendo el modelo CAM a fabricar figura 3.12, mimo que en base a un pos procesado permite general el código G que el equipo de FDM reconocerá como el conjunto de instrucción dados en lenguaje de máquina para fabricar el componente.

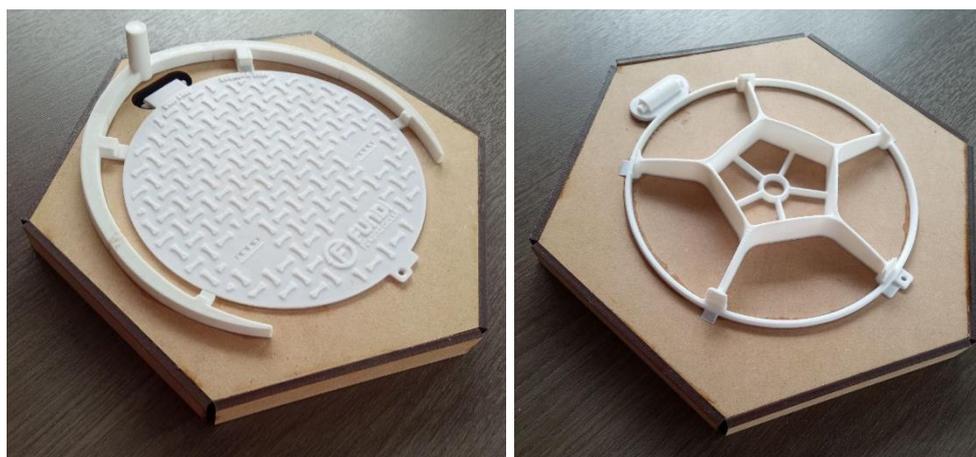
Es necesario notar que las placas de los modelos no son fabricadas en base a FDM ya que no representan mayor reto al momento de ser construidas en madera, material en que habitualmente se fabrican los modelos, puesto a que basta con colocar paredes hexagonales que den forma de caja y permitan constituir el modelo.



**Figura 3.12** Modelo CAM del Drag (Fuente propia)

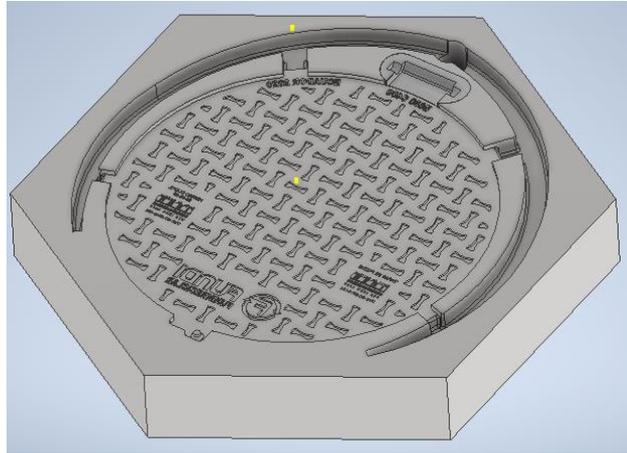


**Figura 3.13** partes de los modelos a ensamblar (Fuente propia)

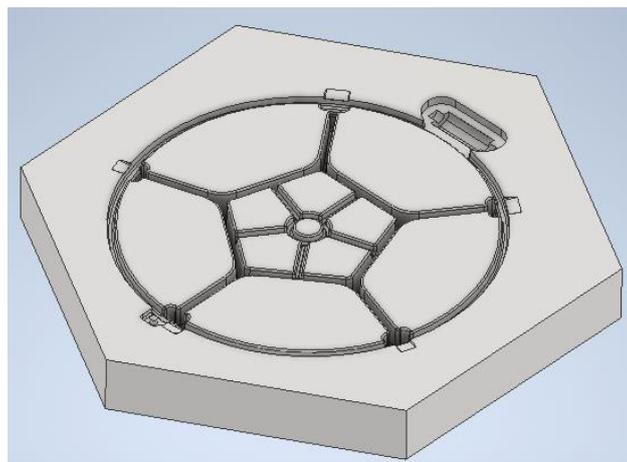


**Figura 3.12** Modelos obtenidos *Cope* (izq.) *Drag* (der.) (Fuente propia)

Es así como tras verificar en físico la facilidad de construcción de los modelos finalmente se procede a esquematizar cual sería el resultado final al moldear con arena, obteniéndose el *Cope* figura 3.13 y *Drag* figura 3.14 finales listos para colar



**Figura 3.13** *Cope* Moldeado en arena – Elemento virtual (Fuente propia)



**Figura 3.14** *Drag* Moldeado en arena – Elemento virtual (Fuente propia)

## 3.2 Conclusiones

- La obtención de una primera alternativa de diseño, mediante un método convencional resulta presentar un comportamiento insatisfactorio, concluyendo así que el diseño de sistemas de alimentación es un proceso iterativo de prueba y error debido a lo desafiante que resulta representar los fenómenos físicos de llenado y solidificación debido al cambio de fase de manera netamente analítica.
- Es imperativo recordar que el proceso de fabricación por fundición mediante moldes perdidos es un método que, debido a su propia naturaleza, llega a presentar algunos tipos de defectos como rechupes, porosidad o aire atrapado por lo que su presencia hasta cierto grado resulta ser permisible, siempre y cuando no comprometa la funcionalidad del elemento fundido; caso contrario se deberá optar por escoger un proceso de fabricación más eficiente.
- La implementación de la metodología de Taguchi resulto muy beneficiosa para el presente estudio pues develo que, de las relaciones de áreas de sección propuestas por Rao, para este caso en especio al trabajar con hierro dúctil y para elementos a fundir circulares, la proporción ideal es de 1.15:1.1:1 para el bebedero, distribuidor y alimentador respectivamente
- Los niveles óptimos de las variables para disminuir la generación de aire atrapado en la tapa D600C se alcanzan con un diámetro de bebedero de 40mm; mientras que al disminuir la sección del distribuido progresivamente desde un ancho de 40mm en la base del bebedero hasta 28mm en la entrada del segundo alimentador mantenido una altura constante de 28mm extruida a 4°, por su parte los alimentadores tiene una sección trapezoidal de 40mm y 28mm por una altura de 6mm para el primer y segundo alimentador respectivamente.
- Es posible llevar a cabo una fundición de calidad sin el uso de mazarotas debido a que el aporte de material durante la solidificación puede ser compensado por el distribuidor en base a la correcta selección de su módulo, evitando la generación de defectos.
- El modelo CAD desarrollado muestra un incremento de alrededor del 10% del rendimiento metálico, mientras que el rendimiento de molde decrece en un 12% debido a que la masa metálica disminuida para incrementar dicho indicador debe ser compensada por arena dentro del molde.

### **3.3 Recomendaciones**

- Se recomienda estudiar la factibilidad de retomar el estudio de la opción número cuatro (Op.4) ya que por el simple hecho de posicionar el relieve de la tapa en el *Drag* se conseguiría en contraste con la actual alternativa, un incremento representativo por parte del índice de rendimiento de molde, puesto a que la altura del drag se reduciría considerablemente gracias al reposicionamiento de los nervios de la tapa en el *Cope*.
- Considerar el efecto de la presión metastática efectiva y su capacidad para evitar defectos de moldes incompletos donde por efecto del aire atrapado y la baja presión, este aire nunca desaparece del todo cuando el relieve de la tapa es colocado en el drag, tal como en la opción cuatro, la cual desde la perspectiva del autor es la configuración más idónea para alcanzar un incremento deseable por parte de ambos indicadores.

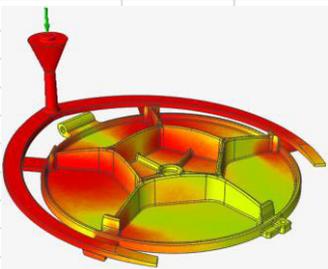
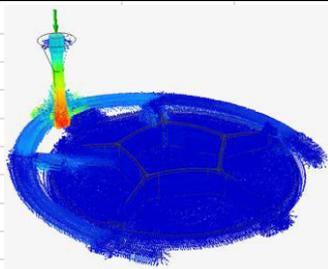
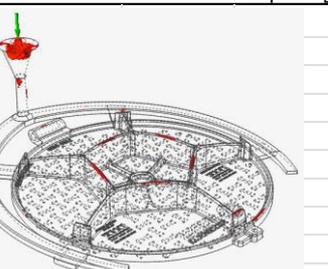
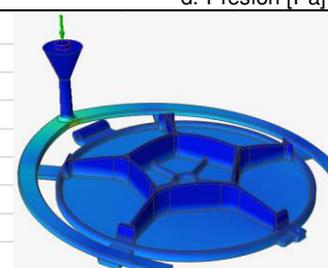
## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

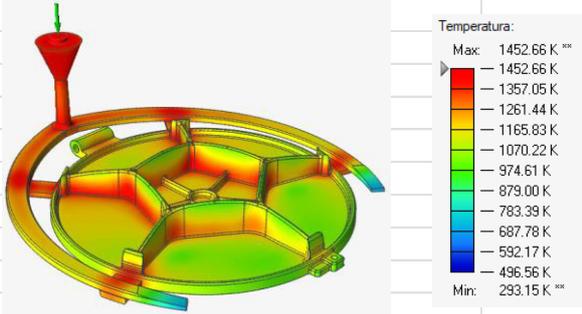
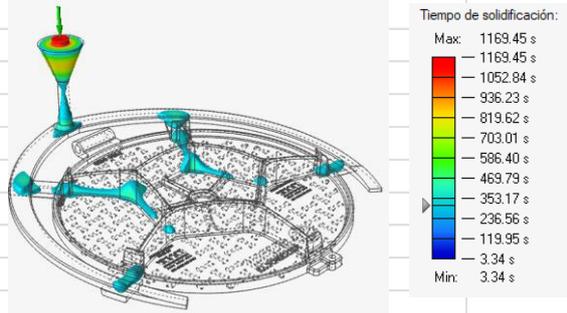
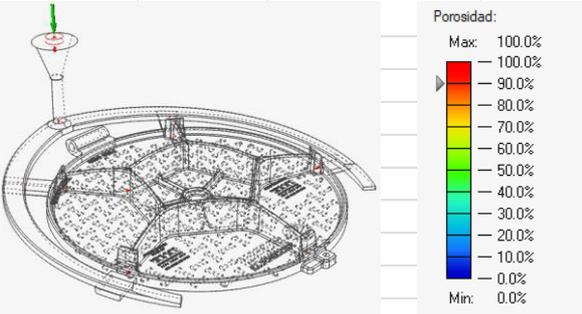
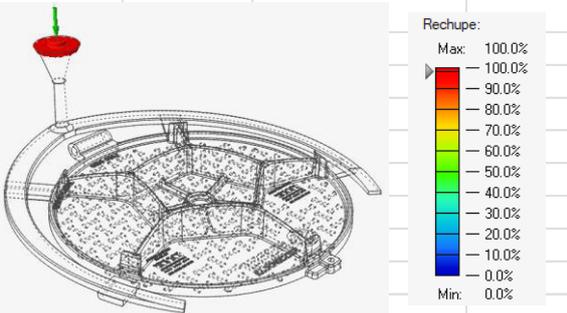
- AFS. (2014). *Principios básicos del diseño de colada y alimentación de las piezas fundidas* (P. Gil (ed.); 1st ed.). American Foundry Society.
- Apparao, K. C., & Birru, A. K. (2017). Optimization of Die casting process based on Taguchi approach. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 1852–1859.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.029>
- Apraiz, J. (1963). *FUNDICIONES* (2nd ed.). Dossat.
- Bhatt, J., Vyas, D., Rajput, A., Somasundaram, M., & Narendra Kumar, U. (2021). A systematic review on methods of optimizing riser and gating system based on energy Nexus approach. *Energy Nexus*, 1(August), 100002.  
<https://doi.org/10.1016/j.nexus.2021.100002>
- Brown, J. R. (2000). *Foseco Ferrous Foundryman ' s Handbook Foseco Ferrous Foundryman ' s Handbook Edited by.* 1–352.
- Callister, W., & Rethwish, D. (2014). *Materials Science and Engineering* (9th ed.). Wiley Binder.
- Cambell, J. (2011). *Complete Casting Handbook Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design.*
- Dávila-Maldonado, O., Adams, A., Oliveira, L., Alquist, B., & Morales, R. D. (2008). Simulation of fluid and inclusions dynamics during filtration operations of ductile iron melts using foam filters. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 39(6), 818–839.  
<https://doi.org/10.1007/s11663-008-9190-2>
- NTE INEN 2496:2009, 17 (2009).
- Moaveni, S. (2015). *Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS* (4th ed., Vol. 2416514). Pearson Education. <http://www.amazon.com/Finite-Element-Analysis-Application-Edition/dp/0131890808>
- Nimbulkar, S. L., & Dalu, R. S. (2016). Design optimization of gating and feeding system through simulation technique for sand casting of wear plate. *Perspectives in Science*, 8, 39–42. <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.03.001>

- RAO. (2020). Manufacturing Technology. In *Foundry, Forming and Welding* (Fifth, Vol. 1, pp. 153–194). McGraw Hill.
- RIT. (2000). *Ductile iron - The essentials of gating and risering system design* (1st ed.). Rio Tinto Iron & Titanium Inc.
- Roy, R. (2001). *Design of xperiments using the Taguchi Approach* (1st ed.). John Wiley & Sons, Inc.,. <https://doi.org/10.1520/jte12406j>
- Saada, M. Ben, & Mansori, M. El. (2021). *Assessment of the effect of 3D printed sand mold thickness on solidification process of AlSi13 casting alloy*. 1753–1766.
- Srinivasan, M. (2012). *Science and Technology of Casting Processes* (I. Lipovic (ed.); 1st ed.). InTech. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/3128>
- Sultana, N. (2017). *Optimization of Sand Casting Parameters for Reducing Casting Defects Using Taguchi Method and Casting Simulation Technique* (Issue March). Khulna University of Engineering & Technology.

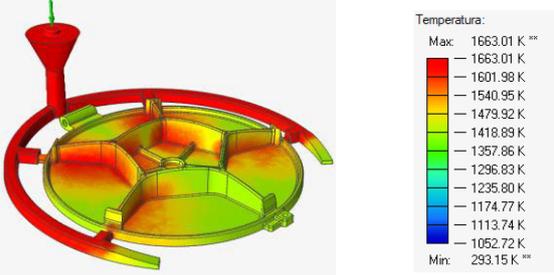
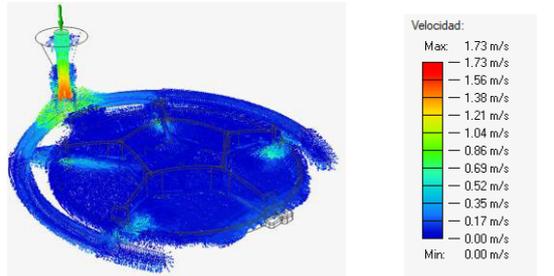
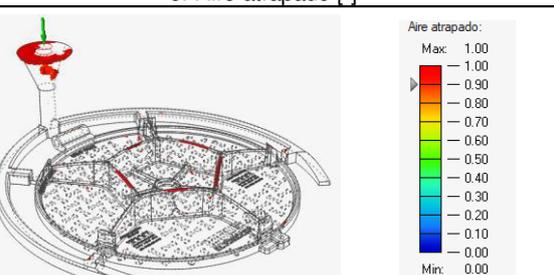
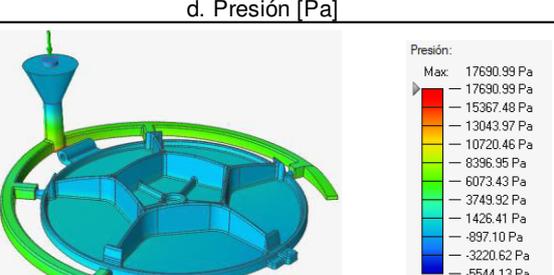
## 5 ANEXOS

### ANEXO I

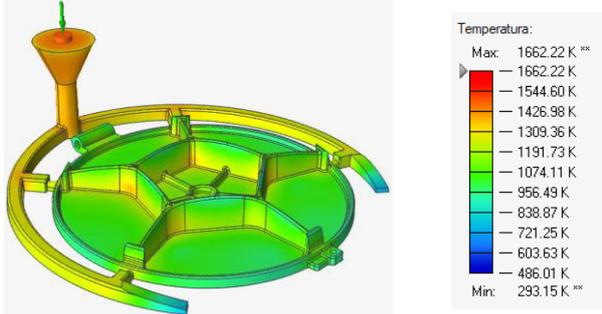
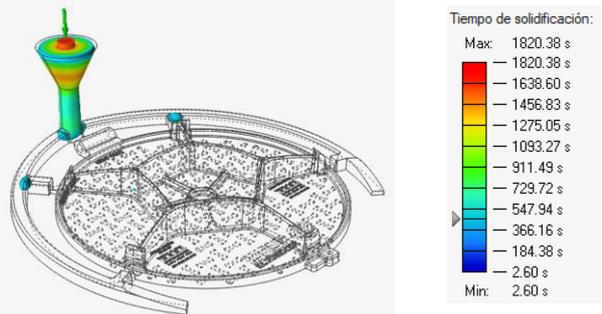
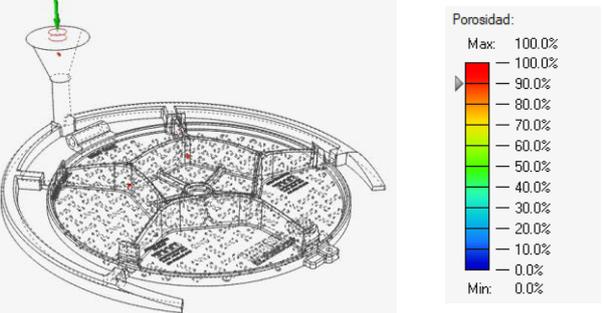
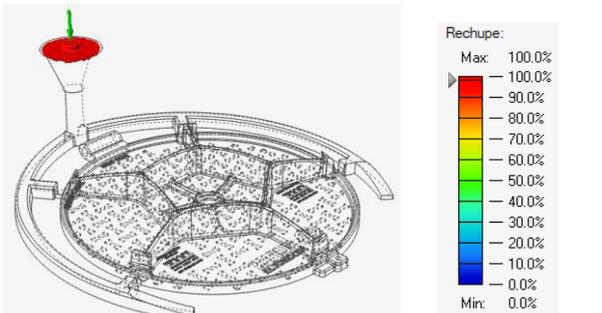
RESULTADO DEL ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS				
Elemento simulado: Tapa D600C - Opción 2 (Op.2)				
Propiedades del elemento simulado				
	Tapa	Tapa + Sus. Alim	Rendimiento	
Masa [kg]:	32,018	44,067	Metálico:	72,66%
Área [mm <sup>2</sup> ]:	986.380	1.242.600,588		
Volumen [mm <sup>3</sup> ]:	4.478.032	6.163.257,424		
Secciones transversales del sistema de alimentación				
Bebedero [mm]:	D=34,59	Distribuidor [mm <sup>2</sup> ]:	43X14	Alim. [mm <sup>2</sup> ]: 50X14
1. LLENADO				
a. Temperatura [K]			Observaciones	
 <p>Temperatura: Max: 1663.01 K Min: 293.15 K</p>			<p>El llenado se da de forma semi-simétrica. Las zonas más calientes están cerca del sistema de alimentación.</p>	
b. Velocidad [m/s]			Observaciones	
 <p>Velocidad: Max: 2.03 m/s Min: 0.00 m/s</p>			<p>La velocidad máxima promedio es de 0.2 m/s dentro del molde, lo que indica que no habrá metal líquido turbulento.</p>	
c. Aire atrapado [-]			Observaciones	
 <p>Aire atrapado: Max: 1.00 Min: 0.00</p>			<p>Se evidencia que existe aire atrapado en los nervios de la tapa, lo cual por su volumen es un defecto inadmisibles de diseño</p>	
d. Presión [Pa]			Observaciones	
 <p>Presión: Max: 17260.32 Pa Min: -1011.14 Pa</p>			<p>La presión metalostática máxima se produce en la sección inicial del distribuidor. Dentro de la cavidad la presión varía de 8,2 - 4,4 kPa</p>	

<b>2. SOLIDIFICACIÓN</b>	
<b>e. Temperatura [K]</b>	<b>Observaciones</b>
	<p>Se evidencia que la última zona en solidificar se produce dentro del distribuidor.</p>
<b>f. Tiempo de solidificación [s]</b>	<b>Observaciones</b>
	<p>Se observa que, durante la solidificación, la presencia de defectos se localizarán dentro del sistema de alimentación y con una alta probabilidad de aparecer dentro de la pieza</p>
<b>g. Porosidad [%]</b>	<b>Observaciones</b>
	<p>Existe la presencia de reducidas porosidades en la base de los nervios.</p>
<b>h. Rechupe [%]</b>	<b>Observaciones</b>
	<p>Se revela que existe un único rechupe en la parte superior del tazón de vertido.</p>
<p><b>Conclusiones:</b> El sistema de alimentación Op.2 para la tapa D600C muestra que no producirá rechupes, ni porosidades considerables, puesto a que se encuentran en un grado admisible. Sin embargo, la presencia de aire atrapado en el interior, aunque menor que Op1 resulta ser un defecto inadmisibles que compromete la funcionalidad de la pieza. Por otra parte, debido al desnivel presente entre el distribuidor y alimentador, el distribuidor no trabaja lleno, lo que provoca que la escoria y el aire ingresen dentro de la cavidad del molde.</p>	

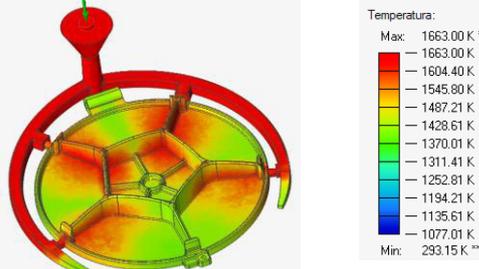
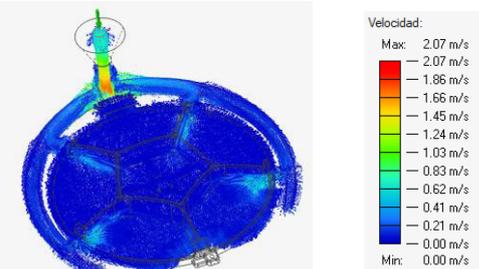
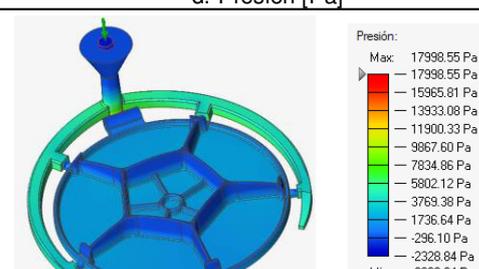
## ANEXO II

<b>RESULTADO DEL ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS</b>			
<b>Elemento simulado: Tapa D600 Opción 3 (Op.3)</b>			
<b>Propiedades del elemento simulado</b>			
	<b>Tapa</b>	<b>Tapa + Sus. Alim</b>	<b>Rendimiento</b>
Masa [kg]:	32,018	50,710	Metálico: 63,14%
Área [mm <sup>2</sup> ]:	986.380	1.274.023,761	
Volumen [mm <sup>3</sup> ]:	4.478.032	7.092.329,574	
<b>Secciones transversales del sistema de alimentación</b>			
Bebedero [mm]: D= 52		Distribuidor [mm <sup>2</sup> ]: 32X28	
Alim. [mm <sup>2</sup> ]: 33X28			
<b>1. LLENADO</b>			
<b>a. Temperatura [K]</b>		<b>Observaciones</b>	
		<p>El llenado se da de forma simétrica. Las zonas más calientes están cerca del sistema de alimentación.</p>	
<b>b. Velocidad [m/s]</b>		<b>Observaciones</b>	
		<p>La velocidad varía entre 0.17-0,52 m/s dentro del molde, lo que supera en ciertas secciones la velocidad crítica.</p>	
<b>c. Aire atrapado [-]</b>		<b>Observaciones</b>	
		<p>Se evidencia que existe aire atrapado en los nervios de la tapa, lo cual por su volumen es un defecto inadmisibles de diseño</p>	
<b>d. Presión [Pa]</b>		<b>Observaciones</b>	
		<p>La presión metalostática promedio varía alrededor de 2,5kPa</p>	

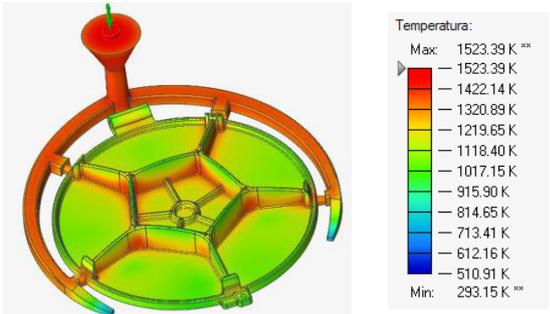
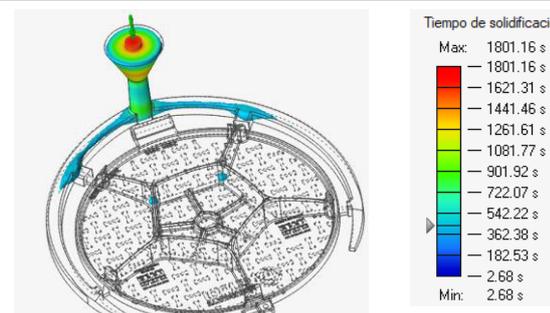
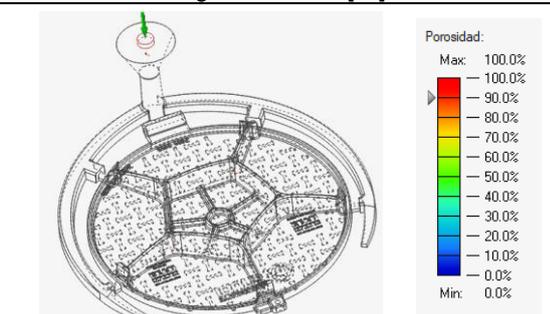
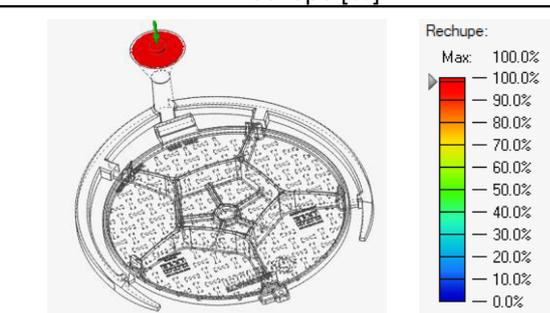
## 2. SOLIDIFICACIÓN

e. Temperatura [K]	Observaciones
 <p style="font-size: small;">Temperatura: Max: 1662.22 K °C Min: 293.15 K °C</p>	<p>Se evidencia que la última zona en solidificar se produce dentro del distribuidor.</p>
f. Tiempo de solidificación [s]	Observaciones
 <p style="font-size: small;">Tiempo de solidificación: Max: 1820.38 s Min: 2.60 s</p>	<p>Se observa que, durante la solidificación, la presencia de defectos se localizarán dentro del sistema de alimentación y con una baja probabilidad de que aparezcan dentro de la pieza</p>
g. Porosidad [%]	Observaciones
 <p style="font-size: small;">Porosidad: Max: 100.0% Min: 0.0%</p>	<p>Existe la presencia de reducidas porosidades en la base de los nervios.</p>
h. Rechupe [%]	Observaciones
 <p style="font-size: small;">Rechupe: Max: 100.0% Min: 0.0%</p>	<p>Se revela que existe un único rechupe en la parte superior del tazón de vertido.</p>
<p><b>Conclusiones:</b> El sistema de alimentación Op.3 para la tapa D600C muestra que no producirá rechupes, ni porosidades considerables, puesto a que se encuentran en un grado admisible. Sin embargo, la presencia de aire atrapado en el interior de la pieza resulta ser un defecto inadmisibles que compromete la funcionalidad de la pieza. Por otra parte, se pone en perspectiva que una disminución en el rendimiento metálico, compensa la generación de defectos.</p>	

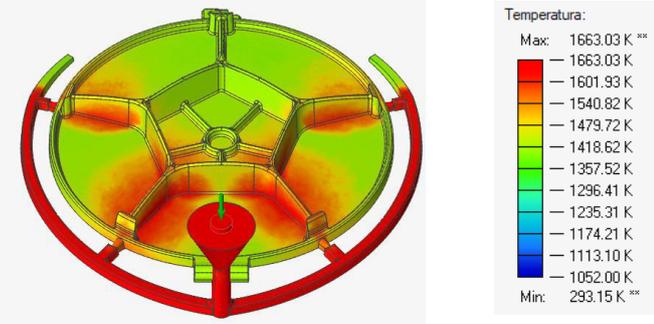
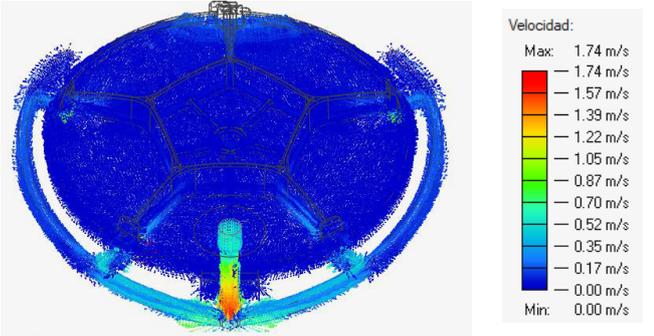
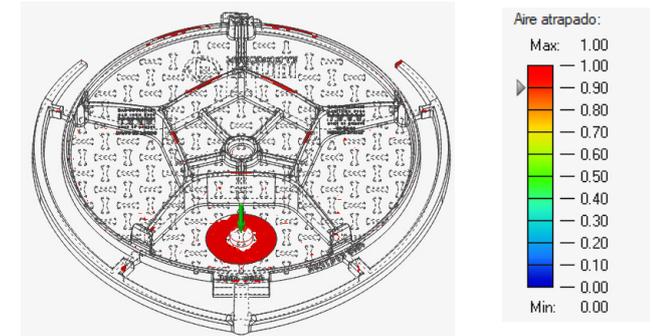
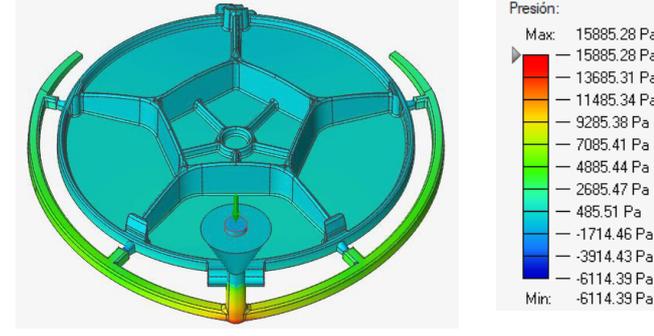
## ANEXO III

<b>RESULTADO DEL ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS</b>			
<b>Elemento simulado: Tapa D600 Opción 4 (Op.4)</b>			
<b>Propiedades del elemento simulado</b>			
	<b>Tapa</b>	<b>Tapa + Sus. Alim</b>	<b>Rendimiento</b>
Masa [kg]:	32,018	51,082	Metálico: 62,68%
Área [mm <sup>2</sup> ]:	986.380	1.266.879,975	
Volumen [mm <sup>3</sup> ]:	4.478.032	7.144.318,533	
<b>Secciones transversales del sistema de alimentación</b>			
Bebedero [mm]: D= 48,76    Distribuidor [mm <sup>2</sup> ]: 31,6X28    Alim. [mm <sup>2</sup> ]: 34X28			
<b>1. LLENADO</b>			
<b>a. Temperatura [K]</b>			<b>Observaciones</b>
 <p style="font-size: small;">Temperatura: Max: 1663.00 K 1604.40 K 1545.90 K 1487.21 K 1428.61 K 1370.01 K 1311.41 K 1252.81 K 1194.21 K 1135.61 K 1077.01 K Min: 293.15 K</p>			A diferencia de las opciones anteriores, cada entrada alimenta con un flujo similar a la pieza. Lo que produce una adecuada distribución del calor, propiciando posteriormente unas solidificación adecuada.
<b>b. Velocidad [m/s]</b>			<b>Observaciones</b>
 <p style="font-size: small;">Velocidad: Max: 2.07 m/s 1.86 m/s 1.66 m/s 1.45 m/s 1.24 m/s 1.03 m/s 0.83 m/s 0.62 m/s 0.41 m/s 0.21 m/s Min: 0.00 m/s</p>			La velocidad máxima es de 0.3 m/s dentro del molde, lo que indica que no habrá metal líquido turbulento.
<b>c. Aire atrapado [-]</b>			<b>Observaciones</b>
 <p style="font-size: small;">Aire atrapado: Max: 1.00 0.90 0.80 0.70 0.60 0.50 0.40 0.30 0.20 0.10 Min: 0.00</p>			Se evidencia que existe aire atrapado en los nervios de la tapa, y aun que su tamaño continúa siendo inadmisibile ha disminuido respecto a las anteriores opciones.
<b>d. Presión [Pa]</b>			<b>Observaciones</b>
 <p style="font-size: small;">Presión: Max: 17998.55 Pa 15965.81 Pa 13933.08 Pa 11900.33 Pa 9867.60 Pa 7834.86 Pa 5802.12 Pa 3769.38 Pa 1736.64 Pa -296.10 Pa -2328.84 Pa Min: -2328.84 Pa</p>			La presión metastática máxima se produce en la sección inicial del distribuidor. En el interior de la cavidad del molde esta se mantiene uniforme en cada sección

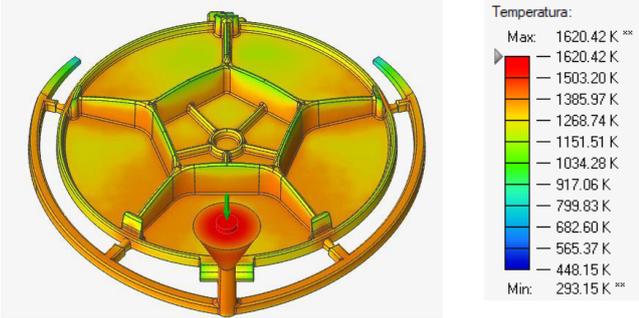
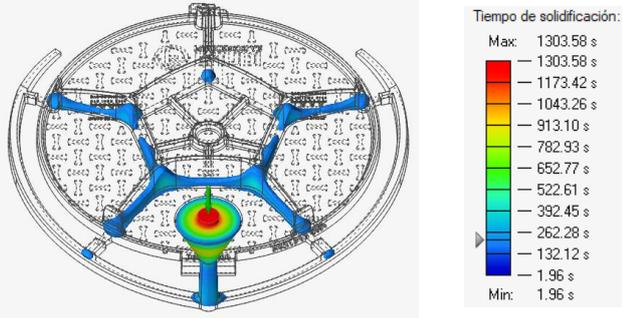
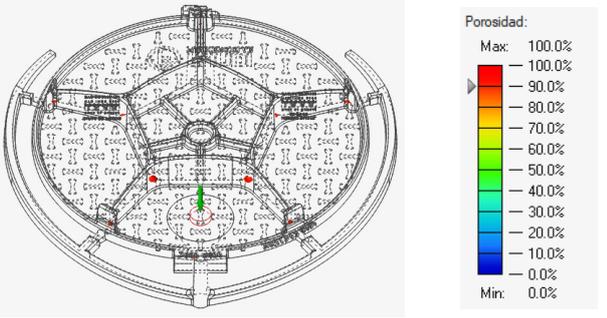
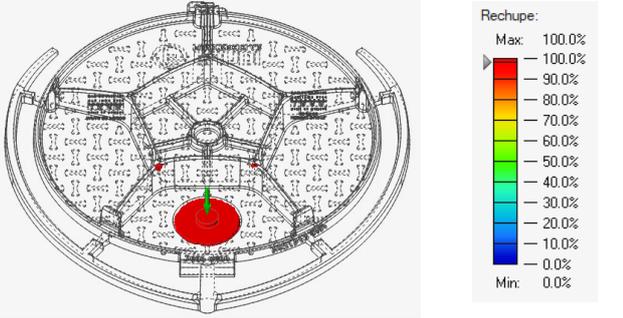
## 2. SOLIDIFICACIÓN

e. Temperatura [K]	Observaciones
	<p>Se evidencia que tanto la copa, como el bebedero y distribuidor serán las última zona en solidificar debido a su mayor temperatura respecto a la pieza.</p>
f. Tiempo de solidificación [s]	Observaciones
	<p>Se observa que, durante la solidificación, la presencia de defectos tendran lugar dentro del sistema de alimentación y con una baja probabilidad de aparecer dentro de la pieza</p>
g. Porosidad [%]	Observaciones
	<p>La presencia de porosidades en la base de los nervios es demasiado pequeña para ser considerada.</p>
h. Rechupe [%]	Observaciones
	<p>Se revela que existe un único rechupe en la parte superior de la copa de vertido.</p>
<p><b>Conclusiones:</b> El sistema de alimentación Op.4 para la tapa D600C muestra que no producirá rechupes, ni porosidades considerables. Sin embargo, la presencia de aire atrapado continúa poniendo en juego la funcionalidad de la pieza. Por otra parte, el bebedero trabaja semilleno, permitiendo a los operarios conseguir un colado constante desde la cuchara al molde, durante el llenado.</p>	

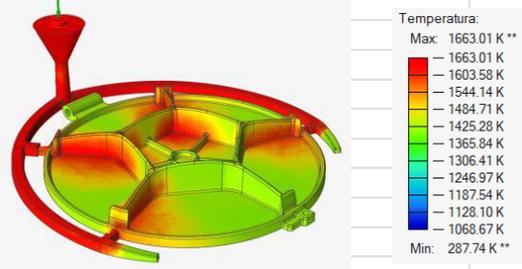
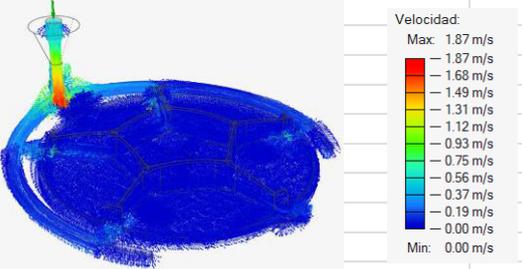
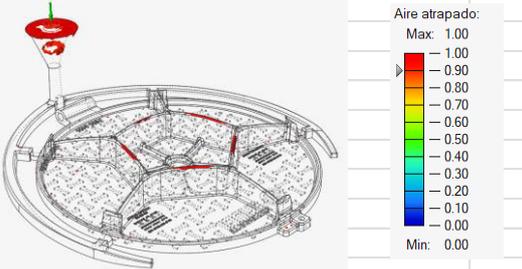
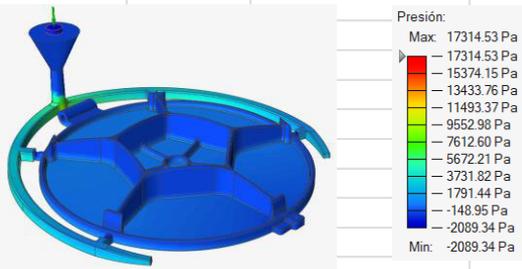
## ANEXO IV

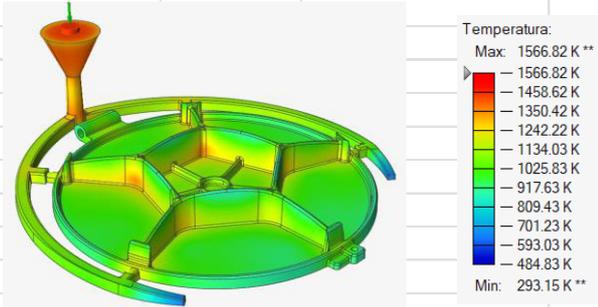
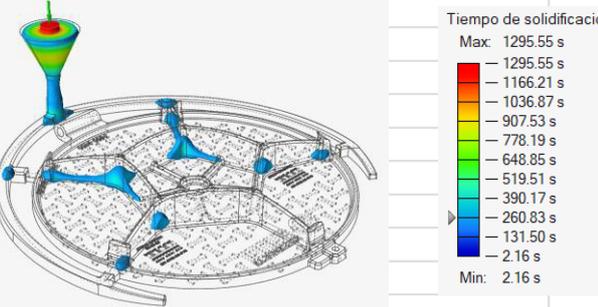
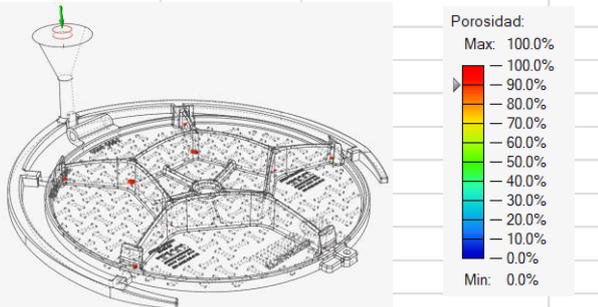
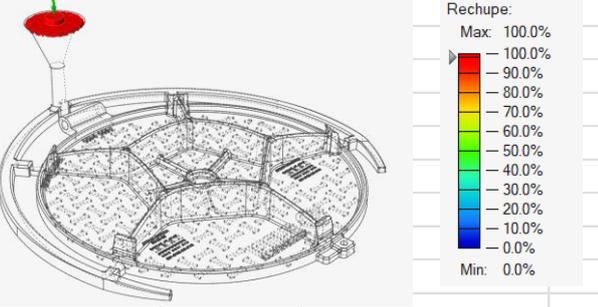
<b>Secciones transversales del sistema de alimentación</b>	
Bebedero [mm]: D= 38,47    Distribuidor [mm2]: 18,9x22,9    Alim. [mm2]: 17,6x10,63	
<b>1. LLENADO</b>	
a. Temperatura [K]	<b>Observaciones</b>
	<p>El llenado se da de forma simétrica. El gradiente de temperaturas mostrado podría sugerir la generación de juntas frías.</p>
b. Velocidad [m/s]	<b>Observaciones</b>
	<p>La velocidad máxima dentro del molde es de 0.3 m/s, lo que indica la ausencia de un régimen turbulento.</p>
c. Aire atrapado [-]	<b>Observaciones</b>
	<p>Se evidencia que existe una disminución del volumen de aire atrapado en los nervios de la tapa, sin embargo este se ha desplazado hacia el extremo de la tapa.</p>
d. Presión [Pa]	<b>Observaciones</b>
	<p>La presión metalostática máxima se produce en la sección inicial del distribuidor.</p>

## 2. SOLIDIFICACIÓN

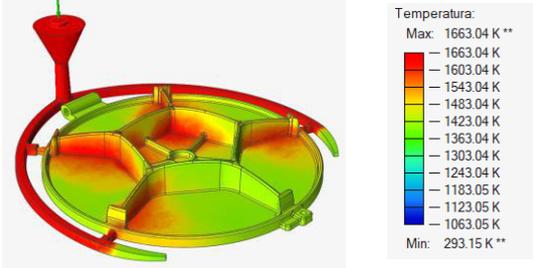
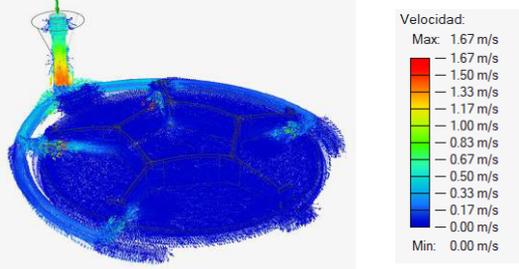
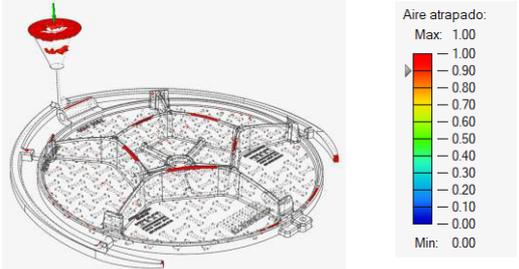
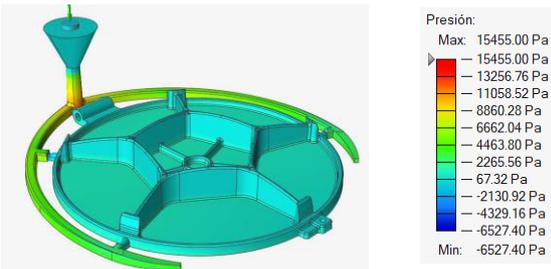
e. Temperatura [K]	Observaciones
	<p style="text-align: center;">Se evidencia que la última zona en solidificar correspondiera al interior de la tapa</p>
f. Tiempo de solidificación [s]	Observaciones
	<p style="text-align: center;">Se observa que, durante la solidificación, la presencia de defectos se localizarán dentro de la pieza, puesto a que es la ultima zona en solidificar</p>
g. Porosidad [%]	Observaciones
	<p style="text-align: center;">Existe la presencia de considerables porosidades en la base de los nervios, además de en la entrada de los alimentadores.</p>
h. Rechupe [%]	Observaciones
	<p style="text-align: center;">Se revela que además de la presencia del rechupe esperado en la copa de vertido, se han generado dos más sobre la zona de intersección de los nervios.</p>
<p><b>Conclusiones:</b> El sistema de alimentación Exp.1 para la tapa D600C muestra que producirá rechupes, además de porosidades considerables. Por otra parte, la presencia del aire atrapado en el interior de la pieza resulta es inadmisibles, debido a su volumen. Aunque se demuestra un incremento del rendimiento metálico, el impacto respecto la aparición de defectos compromete la funcionalidad de la pieza.</p>	

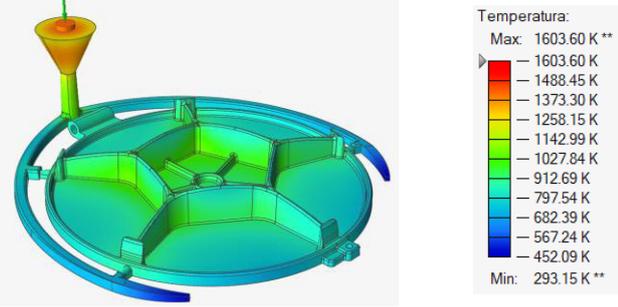
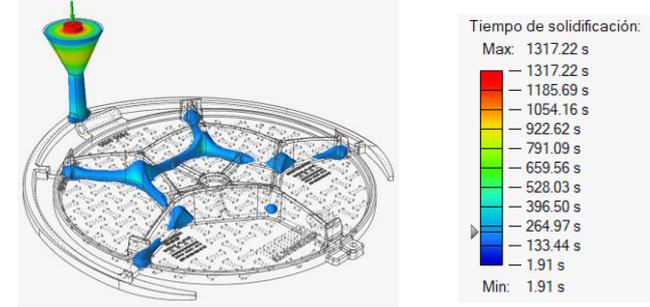
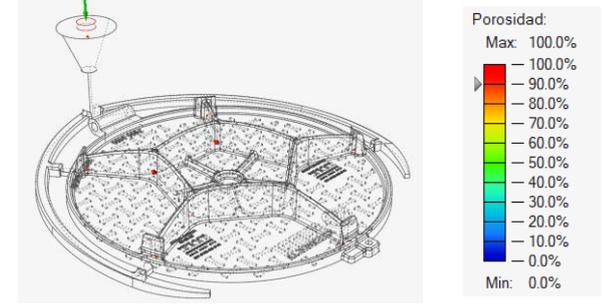
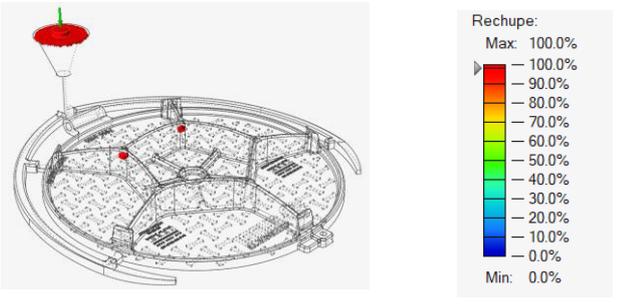
## ANEXO V

<b>RESULTADO DEL ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS</b>				
Elemento simulado: Tapa D600 Experimento 2 (Exp.2)				
Propiedades del elemento simulado				
	Tapa	Tapa + Sus. Alim	Rendimiento	
Masa [kg]:	32,018	43,564	Metálico:	73,50%
Área [mm <sup>2</sup> ]:	986.380	1.199.160,437		
Volumen [mm <sup>3</sup> ]:	4.478.032	6.092.867,018		
Secciones transversales del sistema de alimentación				
Bebedero [mm]:	D= 38,47	Distribuidor [mm <sup>2</sup> ]:	22x27	Alim. [mm <sup>2</sup> ]: 16,3x13,4
1. LLENADO				
a. Temperatura [K]			Observaciones	
			<p>El llenado se da de forma simétrica. Las zonas más calientes están cerca del sistema de alimentación.</p>	
b. Velocidad [m/s]			Observaciones	
			<p>La velocidad máxima es de 0.3 m/s dentro del molde, lo que indica que no habrá metal líquido turbulento.</p>	
c. Aire atrapado [-]			Observaciones	
			<p>Se evidencia que existe aire atrapado en los nervios de la tapa, lo cual por su volumen es un defecto inadmisibles de diseño</p>	
d. Presión [Pa]			Observaciones	
			<p>La presión metalostática máxima se produce en la sección inicial del distribuidor.</p>	

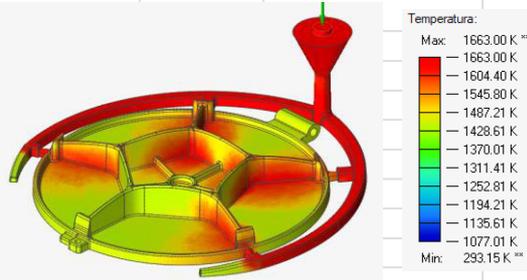
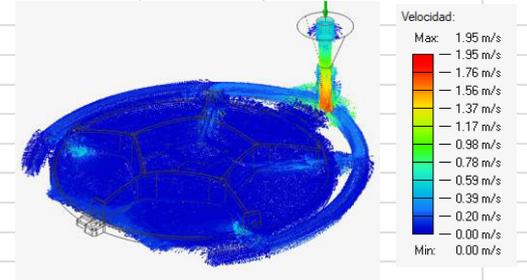
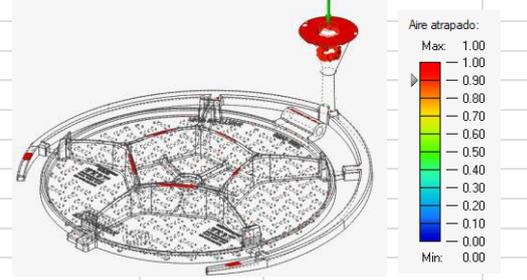
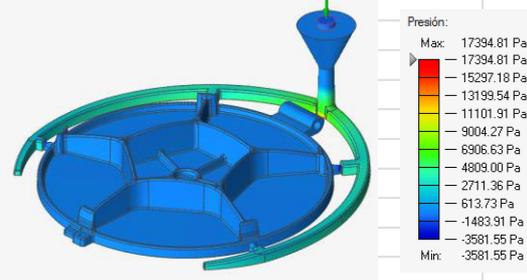
<b>2. SOLIDIFICACIÓN</b>	
<b>e. Temperatura [K]</b>	<b>Observaciones</b>
	<p>Se evidencia que la última zona en solidificar se produce dentro de la pieza.</p>
<b>f. Tiempo de solidificación [s]</b>	<b>Observaciones</b>
	<p>Se observa que, durante la solidificación, la presencia de defectos estos se localizarán dentro de la pieza.</p>
<b>g. Porosidad [%]</b>	<b>Observaciones</b>
	<p>Existe la presencia de porosidades en la base de los nervios.</p>
<b>h. Rechupe [%]</b>	<b>Observaciones</b>
	<p>Se revela que existe un único rechupe en la parte superior del tazón de vertido.</p>
<p><b>Conclusiones:</b> El sistema de alimentación Exp.2 para la tapa D600C muestra que producirá porosidades considerables, mas no de rechupez. Por otra parte, la presencia del aire atrapado en el interior de la pieza se mantiene inadmisibile, debido a su volumen. Aunque se demuestra un incremento del rendimiento metálico, el impacto respecto la aparición de defectos compromete la funcionalidad de la pieza.</p>	

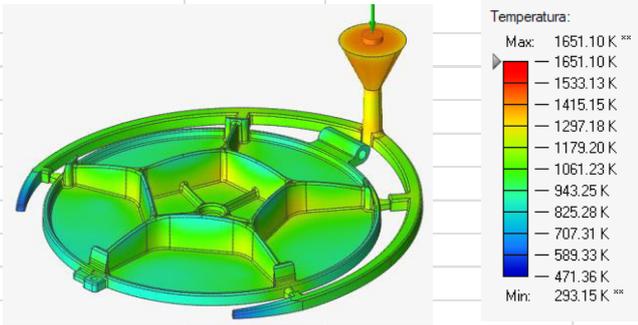
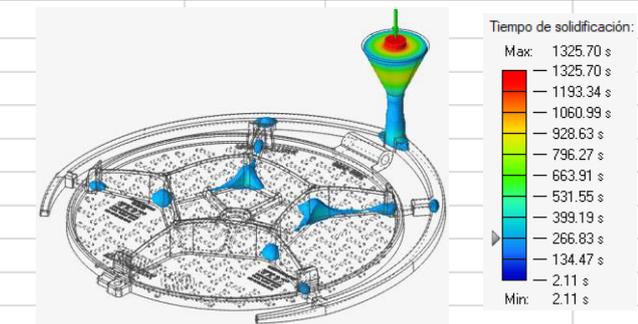
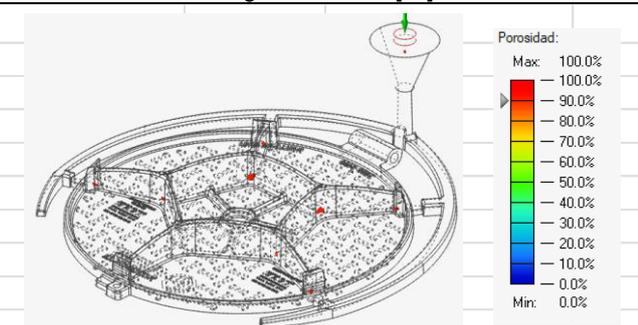
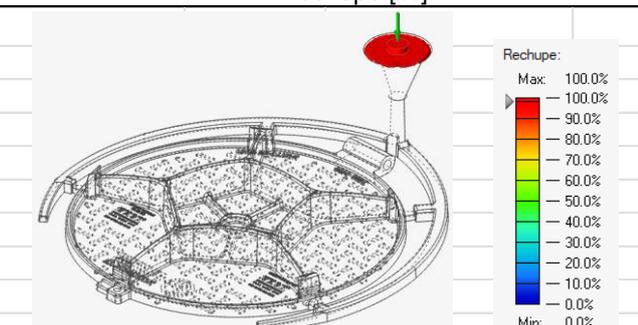
## ANEXO VI

<b>RESULTADO DEL ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS</b>			
<b>Elemento simulado: Tapa D600 Experimento 3 (Exp.3)</b>			
<b>Propiedades del elemento simulado</b>			
	<b>Tapa</b>	<b>Tapa + Sis. Alim</b>	<b>Rendimiento</b>
Masa [kg]:	32,018	41,850	Metálico: 76,51%
Área [mm <sup>2</sup> ]:	986.380	1.176.385,035	
Volumen [mm <sup>3</sup> ]:	4.478.032	5.853.132,785	
<b>Secciones transversales del sistema de alimentación</b>			
Bebedero [mm]: D= 40      Distribuidor [mm <sup>2</sup> ]: 18,8x22,9    Alim. [mm <sup>2</sup> ]: 17,7x10,6			
<b>1. LLENADO</b>			
<b>a. Temperatura [K]</b>		<b>Observaciones</b>	
		<p>El llenado se da de forma simétrica. Las zonas más calientes están cerca del sistema de alimentación.</p>	
<b>b. Velocidad [m/s]</b>		<b>Observaciones</b>	
		<p>La velocidad máxima es de 0.3 m/s dentro del molde, lo que indica que no habrá metal líquido turbulento.</p>	
<b>c. Aire atrapado [-]</b>		<b>Observaciones</b>	
		<p>Se evidencia que existe aire atrapado en los nervios de la tapa, además de en los distribuidores, mostrando su mejor capacidad para evitar el ingreso de contaminantes al interior de la cavidad.</p>	
<b>d. Presión [Pa]</b>		<b>Observaciones</b>	
		<p>La presión metalostática máxima se produce en la sección inicial del distribuidor. Por su parte dentro del molde se alcanza una presión promedio de 1,5kPa</p>	

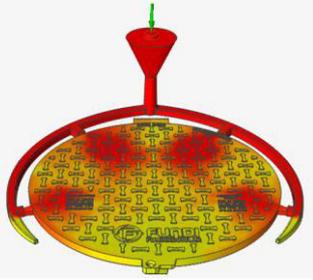
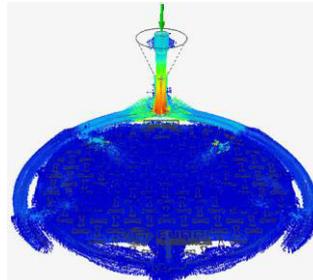
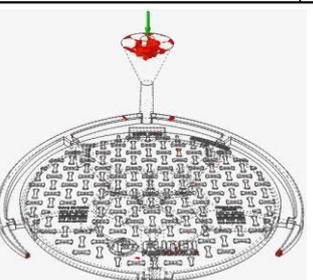
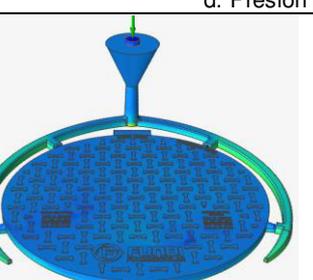
<b>2. SOLIDIFICACIÓN</b>	
e. Temperatura [K]	Observaciones
 <p style="text-align: center;">Temperatura: Max: 1603.60 K ** 1603.60 K 1488.45 K 1373.30 K 1258.15 K 1142.99 K 1027.84 K 912.69 K 797.54 K 682.39 K 567.24 K 452.09 K Min: 293.15 K **</p>	<p>Se evidencia que la última zona en solidificar se produce en el interior de la pieza</p>
f. Tiempo de solidificación [s]	Observaciones
 <p style="text-align: center;">Tiempo de solidificación: Max: 1317.22 s 1317.22 s 1185.69 s 1054.16 s 922.62 s 791.09 s 659.56 s 528.03 s 396.50 s 264.97 s 133.44 s 1.91 s Min: 1.91 s</p>	<p>Se observa que, durante la solidificación, la presencia de defectos se localizarán dentro del sistema de alimentación.</p>
g. Porosidad [%]	Observaciones
 <p style="text-align: center;">Porosidad: Max: 100.0% 100.0% 90.0% 80.0% 70.0% 60.0% 50.0% 40.0% 30.0% 20.0% 10.0% 0.0% Min: 0.0%</p>	<p>Existe la presencia de porosidades en el interior de los nervios.</p>
h. Rechupe [%]	Observaciones
 <p style="text-align: center;">Rechupe: Max: 100.0% 100.0% 90.0% 80.0% 70.0% 60.0% 50.0% 40.0% 30.0% 20.0% 10.0% 0.0% Min: 0.0%</p>	<p>Se revela que existen dos rechupes considerables</p>
<p><b>Conclusiones:</b> El sistema de alimentación Exp.3 para la tapa D600C evidencia ser una de las peores opciones debido a la presencia de rechupes y porosidades considerables. La presencia del aire atrapado en el interior de la pieza se mantiene inadmisibles, debido a su volumen. Aunque se demuestra un incremento del rendimiento metálico, el impacto respecto a la aparición de defectos compromete la funcionalidad de la pieza.</p>	

## ANEXO VII

<b>RESULTADO DEL ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS</b>				
<b>Elemento simulado:</b> Tapa D600 Experimento 4 (Exp.4)				
<b>Propiedades del elemento simulado</b>				
	Tapa	Tapa + Sis. Alim.	<b>Rendimiento</b>	
Masa [kg]:	32,018	43,724	Metálico:	73,23%
Área [mm <sup>2</sup> ]:	986.380	1.201.398,475		
Volumen [mm <sup>3</sup> ]:	4.478.032	6.115.181,656		
<b>Secciones transversales del sistema de alimentación</b>				
Bebedero [mm]:	D = 40	Distribuidor [mm <sup>2</sup> ]:	22,1x26,8	Alim. [mm <sup>2</sup> ]: 17,7x10,6
<b>1. LLENADO</b>				
a. Temperatura [K]			<b>Observaciones</b>	
			<p>El llenado se da de forma simétrica. Sin lograr una distribución del calor uniforme.</p>	
b. Velocidad [m/s]			<b>Observaciones</b>	
			<p>La velocidad máxima es de 0.3 m/s dentro del molde, lo que indica que no habrá metal líquido turbulento.</p>	
c. Aire atrapado [-]			<b>Observaciones</b>	
			<p>Se evidencia que existe aire atrapado en los nervios de la tapa y en los distribuidores.</p>	
d. Presión [Pa]			<b>Observaciones</b>	
			<p>La presión metalostática máxima se produce en la sección inicial del distribuidor.</p>	

<b>2. SOLIDIFICACIÓN</b>	
<b>e. Temperatura [K]</b>	<b>Observaciones</b>
 <p style="text-align: center;">Temperatura:</p> <p style="text-align: center;">Max: 1651.10 K **</p> <p style="text-align: center;">1651.10 K</p> <p style="text-align: center;">1533.13 K</p> <p style="text-align: center;">1415.15 K</p> <p style="text-align: center;">1297.18 K</p> <p style="text-align: center;">1179.20 K</p> <p style="text-align: center;">1061.23 K</p> <p style="text-align: center;">943.25 K</p> <p style="text-align: center;">825.28 K</p> <p style="text-align: center;">707.31 K</p> <p style="text-align: center;">589.33 K</p> <p style="text-align: center;">471.36 K</p> <p style="text-align: center;">Min: 293.15 K **</p>	<p>Se evidencia que la última zona en solidificar se produce dentro de la pieza</p>
<b>f. Tiempo de solidificación [s]</b>	<b>Observaciones</b>
 <p style="text-align: center;">Tiempo de solidificación:</p> <p style="text-align: center;">Max: 1325.70 s</p> <p style="text-align: center;">1325.70 s</p> <p style="text-align: center;">1193.34 s</p> <p style="text-align: center;">1060.99 s</p> <p style="text-align: center;">928.63 s</p> <p style="text-align: center;">796.27 s</p> <p style="text-align: center;">663.91 s</p> <p style="text-align: center;">531.55 s</p> <p style="text-align: center;">399.19 s</p> <p style="text-align: center;">266.83 s</p> <p style="text-align: center;">134.47 s</p> <p style="text-align: center;">2.11 s</p> <p style="text-align: center;">Min: 2.11 s</p>	<p>Se observa que, durante la solidificación, la presencia de defectos se localizará dentro del sistema de alimentación y con una alta probabilidad de aparecer dentro de la pieza</p>
<b>g. Porosidad [%]</b>	<b>Observaciones</b>
 <p style="text-align: center;">Porosidad:</p> <p style="text-align: center;">Max: 100.0%</p> <p style="text-align: center;">100.0%</p> <p style="text-align: center;">90.0%</p> <p style="text-align: center;">80.0%</p> <p style="text-align: center;">70.0%</p> <p style="text-align: center;">60.0%</p> <p style="text-align: center;">50.0%</p> <p style="text-align: center;">40.0%</p> <p style="text-align: center;">30.0%</p> <p style="text-align: center;">20.0%</p> <p style="text-align: center;">10.0%</p> <p style="text-align: center;">0.0%</p> <p style="text-align: center;">Min: 0.0%</p>	<p>Existe la presencia de porosidades en la base de los nervios.</p>
<b>h. Rechupe [%]</b>	<b>Observaciones</b>
 <p style="text-align: center;">Rechupe:</p> <p style="text-align: center;">Max: 100.0%</p> <p style="text-align: center;">100.0%</p> <p style="text-align: center;">90.0%</p> <p style="text-align: center;">80.0%</p> <p style="text-align: center;">70.0%</p> <p style="text-align: center;">60.0%</p> <p style="text-align: center;">50.0%</p> <p style="text-align: center;">40.0%</p> <p style="text-align: center;">30.0%</p> <p style="text-align: center;">20.0%</p> <p style="text-align: center;">10.0%</p> <p style="text-align: center;">0.0%</p> <p style="text-align: center;">Min: 0.0%</p>	<p>Se revela que existe un único rechupe en la parte superior del tazón de vertido.</p>
<p><b>Conclusiones:</b> El sistema de alimentación Exp.4 para la tapa D600C muestra que no producirá rechupes, pero si porosidades considerables. Por otra parte, el defecto de falta de llenado debido a la presencia de aire atrapado resulta ser contraproducente al momento de garantizar la una correcta funcionalidad de la pieza.</p>	

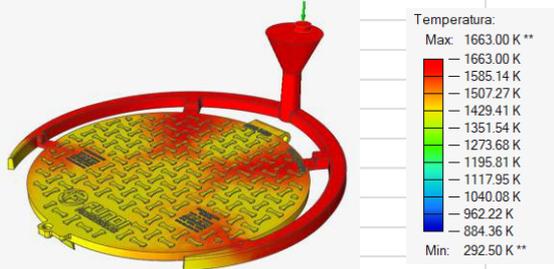
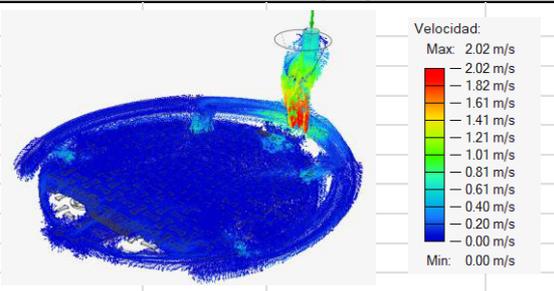
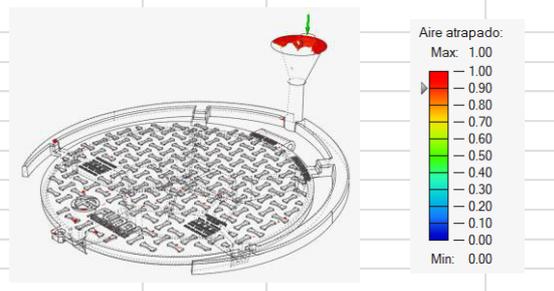
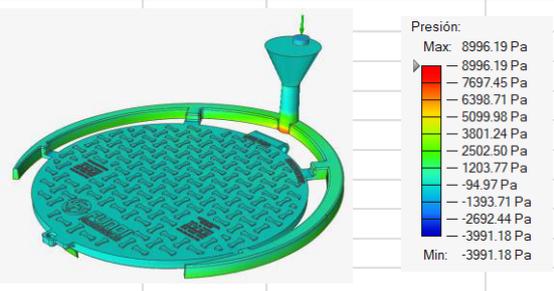
## ANEXO VIII

<b>RESULTADO DEL ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS</b>			
Elemento simulado: Tapa D600C - Optimización			
Propiedades del elemento simulado			
	Tapa	Tapa + Sus. Alim	Rendimiento
Masa [kg]:	32,018	44,775	Metálico: 71,51%
Área [mm <sup>2</sup> ]:	986.380	1.204.231,316	
Volumen [mm <sup>3</sup> ]:	4.478.032	6.262.297,338	
Secciones transversales del sistema de alimentación			
Bebedero [mm]: D= 38,47    Distribuidor [mm <sup>2</sup> ]: 18,9x22,9    Alim. [mm <sup>2</sup> ]: 16,3x13,4			
1. LLENADO			
a. Temperatura [K]		Observaciones	
 <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;">Temperatura:</div> <div style="font-size: small;">             Max: 1663.01 K **              — 1663.01 K              — 1588.22 K              — 1513.44 K              — 1438.65 K              — 1363.87 K              — 1289.08 K              — 1214.30 K              — 1139.51 K              — 1064.73 K              — 989.94 K              — 915.16 K              Min: 293.15 K **           </div> </div>		<p>El llenado se da de forma simétrica. Las zonas más calientes están cerca del sistema de alimentación.</p>	
b. Velocidad [m/s]		Observaciones	
 <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;">Velocidad:</div> <div style="font-size: small;">             Max: 1.99 m/s              — 1.99 m/s              — 1.79 m/s              — 1.59 m/s              — 1.39 m/s              — 1.20 m/s              — 1.00 m/s              — 0.80 m/s              — 0.60 m/s              — 0.40 m/s              — 0.20 m/s              — 0.00 m/s              Min: 0.00 m/s           </div> </div>		<p>La velocidad máxima es de 0.3 m/s dentro del molde, lo que indica que no habrá metal líquido turbulento.</p>	
c. Aire atrapado [-]		Observaciones	
 <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;">Aire atrapado:</div> <div style="font-size: small;">             Max: 1.00              — 1.00              — 0.90              — 0.80              — 0.70              — 0.60              — 0.50              — 0.40              — 0.30              — 0.20              — 0.10              — 0.00              Min: 0.00           </div> </div>		<p>Se evidencia que la cantidad de aire atrapado es mínima, de tal suerte que con un respiradero, el problema quedará solucionado.</p>	
d. Presión [Pa]		Observaciones	
 <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;">Presión:</div> <div style="font-size: small;">             Max: 7293.51 Pa              — 7293.51 Pa              — 6405.62 Pa              — 5517.74 Pa              — 4629.85 Pa              — 3741.96 Pa              — 2854.08 Pa              — 1966.19 Pa              — 1078.30 Pa              — 190.42 Pa              — -697.47 Pa              — -1585.36 Pa              Min: -1585.36 Pa           </div> </div>		<p>La presión metalostática máxima se produce en la sección inicial del distribuidor.</p>	

## 2. SOLIDIFICACIÓN

e. Temperatura [K]	Observaciones
<p style="font-size: small;">Temperatura: Max: 1537.64 K *** 1537.64 K 1429.78 K 1321.93 K 1214.07 K 1106.21 K 998.36 K 890.50 K 782.64 K 674.78 K 566.93 K 459.07 K Min: 293.15 K ***</p>	<p>Se evidencia que la última zona en solidificar se produce dentro del distribuidor.</p>
f. Tiempo de solidificación [s]	Observaciones
<p style="font-size: small;">Tiempo de solidificación: Max: 1617.89 s 1617.89 s 1456.17 s 1294.44 s 1132.71 s 970.98 s 809.26 s 647.53 s 485.80 s 324.08 s 162.35 s 0.62 s Min: 0.62 s</p>	<p>Se observa que, durante la solidificación, la presencia de defectos se localizarán dentro de la pieza</p>
g. Porosidad [%]	Observaciones
<p style="font-size: small;">Porosidad: Max: 100.0% 100.0% 90.0% 80.0% 70.0% 60.0% 50.0% 40.0% 30.0% 20.0% 10.0% 0.0% Min: 0.0%</p>	<p>Existe la presencia de reducidas porosidades en la intersección de los nervios, debido a su mayor módulo, resultando a su vez la última zona en solidificar.</p>
h. Rechupe [%]	Observaciones
<p style="font-size: small;">Rechupe: Max: 100.0% 100.0% 90.0% 80.0% 70.0% 60.0% 50.0% 40.0% 30.0% 20.0% 10.0% 0.0% Min: 0.0%</p>	<p>Se revela que además del evidente rechupe en la parte superior de la copa de vertido surge un nuevo rechupe en el extremo de la tapa</p>
<p><b>Conclusiones:</b> El sistema de alimentación OPT para la tapa D600C muestra que producirá rechupes y porosidades. Sin embargo, la presencia de aire atrapado en el interior de la pieza resulta ser un defecto admisible, lo que evidencia la eficacia del método de Taguchi para solucionar este tipo de problema, demostrando su factibilidad de aplicación al momento de buscar un diseño robusto.</p>	

## ANEXO IX

RESULTADO DEL ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS				
		Elemento simulado: Tapa D600C - Final		
Propiedades del elemento simulado				
	Tapa	Tapa + Sus. Alim	Rendimiento	
Masa [kg]:	32,018	50,503	Metálico:	63,40%
Área [mm <sup>2</sup> ]:	986.380	1.266.223,234		
Volumen [mm <sup>3</sup> ]:	4.478.032	7.063.407,401		
Secciones transversales del sistema de alimentación				
Bebedero [mm]:	D= 45	Distribuidor [mm <sup>2</sup> ]:	31,4X28	Alim. [mm <sup>2</sup> ]: 32,8X8
1. LLENADO				
a. Temperatura [K]			<b>Observaciones</b>	
			<p>El llenado se da de forma simétrica, aportando en mayor medida los alimentadores principales.</p>	
b. Velocidad [m/s]			<b>Observaciones</b>	
			<p>La velocidad máxima es de 0.3 m/s dentro del molde, lo que indica la ausencia de un régimen turbulento.</p>	
c. Aire atrapado [-]			<b>Observaciones</b>	
			<p>Se evidencia que existe aire atrapado en una minúscula sección de la leyenda, efecto que puede ser compensado con la incorporación de un respirador</p>	
d. Presión [Pa]			<b>Observaciones</b>	
			<p>La presión metalostática máxima se produce en la sección inicial del distribuidor. Notándose que en la cavidad, esta no supera 1 kPa</p>	

<b>2. SOLIDIFICACIÓN</b>	
<b>e. Temperatura [K]</b>	<b>Observaciones</b>
<p>Temperatura: Max: 1570.46 K ** 1570.46 K 1462.87 K 1355.28 K 1247.69 K 1140.10 K 1032.51 K 924.92 K 817.33 K 709.74 K 602.15 K 494.56 K Min: 293.15 K **</p>	<p>Se evidencia que la última zona en solidificar se localiza dentro del distribuidor.</p>
<b>f. Tiempo de solidificación [s]</b>	<b>Observaciones</b>
<p>Tiempo de solidificación: Max: 1550.34 s 1550.34 s 1395.89 s 1241.45 s 1087.00 s 932.55 s 778.11 s 623.66 s 469.22 s 314.77 s 160.33 s 5.88 s Min: 5.88 s</p>	<p>Se observa que, durante la solidificación, la presencia de defectos se localizarán dentro del sistema de alimentación y con una baja probabilidad de aparecer dentro de la pieza</p>
<b>g. Porosidad [%]</b>	<b>Observaciones</b>
<p>Porosidad: Max: 100.0% 100.0% 90.0% 80.0% 70.0% 60.0% 50.0% 40.0% 30.0% 20.0% 10.0% 0.0% Min: 0.0%</p>	<p>No existe la presencia de porosidades dentro de la tapa</p>
<b>h. Rechupe [%]</b>	<b>Observaciones</b>
<p>Rechupe: Max: 100.0% 100.0% 90.0% 80.0% 70.0% 60.0% 50.0% 40.0% 30.0% 20.0% 10.0% 0.0% Min: 0.0%</p>	<p>Se revela que existe un único rechupe en la parte superior de la copa de vertido.</p>
<p><b>Conclusiones:</b> El sistema de alimentación final de la tapa D600C muestra que no generará rechupes, ni porosidades. Aun que se evidencia la presencia de aire atrapado en la leyenda de la pieza resulta ser un defecto admisible por su reducido volumen. Por otra parte, se mantiene una velocidad de flujo promedio de 0,2 m/s menor a la velocidad crítica. Finalmente se obtiene un rendimiento metálico que disminuye en 10 puntos respecto a otras opciones de diseño, pero que en contraste; no muestran presencia de defecto logia que comprometa su funcionalidad.</p>	