

3. Diseño y cálculo del proceso de fundición manual en arena.

La pieza de la cual se realizará el estudio de fundición descrito en el capítulo 1 es una bomba de freno de un automóvil. Se ha optado por ella debido a su geometría pues presenta zonas delgadas en las que estudiar el comportamiento del metal fundido, además de zonas gruesas en las que se concentre la máxima energía calorífica y puedan aparecer los posibles rechupes u otros defectos. En la figura 3.1 se pueden ver vistas de la pieza en estudio.



Figura 3.1 Pieza modelo bomba de freno

La geometría, dimensiones y características de la pieza en estudio se adjuntan en el Anexo A. La pieza se dimensionó a partir de un ejemplar y del modelo con que se contaba previamente y que se muestra en la figura 3.2.



Figura 3.2 Moldeo bipartido

Se trata de una reproducción de la pieza en dos partes dividido longitudinalmente en su eje mayor y fabricado en madera con la ventaja de una pequeña capa de pintura azul que le confiere la textura perfecta para prevenir la adhesión con las paredes del molde. Este tipo de modelo según su construcción resulta el más apropiado para las características de fundición de arena en verde pues se opta por un modelo en dos cajas de fundición.

Fue necesario para diferentes etapas del proyecto contar con sólidos virtuales que se generaron con el programa de diseño gráfico, Catia V5, puesto que aunque existen simuladores de fundición con módulos de diseño, estos no son lo suficientemente potentes o son complejos para generar modelos de geometría complicada. Estas aplicaciones gráficas permiten calcular de forma eficiente las propiedades de la pieza

asignando las características del material de trabajo. Así pues, para el metal seleccionado y el modelo generado es posible calcular áreas radiantes y volúmenes de cada uno de los módulos de fundición. La base del todo el estudio será las dimensiones y propiedades de la pieza, ya que marcan las dimensiones de todos los sistemas auxiliares necesarios. En la figura 3.3 se puede ver la implementación gráfica de la pieza realizada con el programa de diseño.

De la implementación de la pieza como modelo se puede obtener fácilmente de modo más exacto las características dimensionales.

- Volumen: $V_p = 152,2 \text{ m}^3$
- Superficie: $S_p = 22,998 \text{ m}^2$
- Módulo: $M_p = 6,6174 \text{ mm}$
- Espesor mínimo de la piza: $\delta = 8 \text{ mm}$

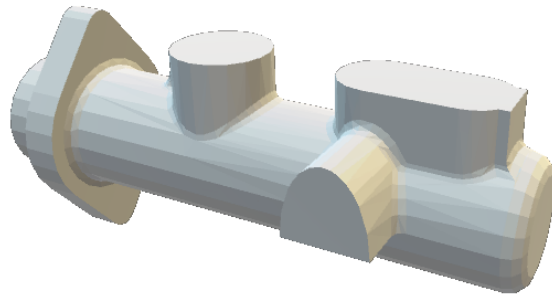


Figura 3.3 Modelo Catia V5

De la propia geometría de la pieza y modelo a reproducir se pueden obtener tanto zonas calientes de la misma como las superficies más favorables para alimentar y disponer la mazarota.

Es importante disponer los elementos de alimentación y de compensación de forma que los puntos calientes que presente el modelo se vean alimentados en todo momento para evitar la formación de rechupes. En la figura 3.4 se muestran puntos calientes de la pieza, estos resultan ser las partes de concentración de mayor masa.

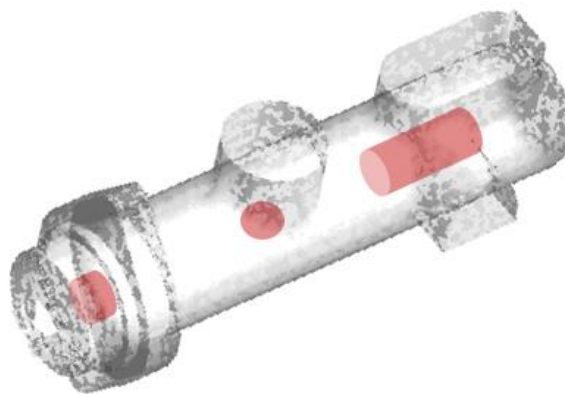


Figura 3.4 Zonas calientes de la pieza.

Se puede observar que la zona de mayor concentración de masa es la zona posterior de la pieza. Esta zona es la más crítica de la pieza en cuanto que será la última que solidifique y por tanto donde será más previsible a primera vista que aparezcan rechupes. Debe ser alimentada por la mazarota o por el sistema de alimentación para contrarrestar las contracciones.

En la zona anterior o zona donde se encuentra la brida aparece un punto caliente de menor medida que podría ser contrarrestado si la pieza es alimentada por dicha zona o, en caso de alimentación por la parte posterior, deberá localizarse la mazarota.

En la parte media de la pieza podría aparecer otro punto caliente, de menor medida que los anteriores y que a priori se puede considerar que no afectaría tanto la aparición de defectos.

3.1 Material de la pieza

Para la realización del estudio se ha optado por estaño como material de fundición pues, aunque no es uno de los materiales que destaque por su bajo coste, presenta un punto de fusión bastante bajo ($T^a = 232\text{ }^\circ\text{C}$) lo cual conlleva bajos puntos de energía para el horno del que se dispone con el consecuente bajo consumo eléctrico del mismo. En la tabla 3.1 se presentan las propiedades más destacables en cuanto a las que intervienen en la fundición ser refiere.

Tabla 3.1 Propiedades del estaño (Sn).

Características generales		Características específicas	
Densidad [g/cm^3]	7,265	Calor específico [$\text{J}/(\text{K}\cdot\text{kg})$]	228
T^a fusión [K]	504,89	Conductividad térmica [$\text{W}/(\text{K}\cdot\text{m})$]	32,6
T^a ebullición [K]	2 875,15	Coefficiente de contracción [%]	2,51
Entalpía de fusión [kJ/mol]	7,029	Capacidad calorífica [$\text{J}/\text{g}\cdot^\circ\text{C}$]	0,256
Viscosidad [mPa/s]	2,71		

A parte de su principal propiedad, la baja temperatura de fusión, el estaño se caracteriza por su ductilidad y maleabilidad a baja temperatura. Es un metal de color blanco plateado muy utilizado en centenares de procesos industriales siendo comúnmente utilizado para recubrimientos de cobre o con aleaciones de cobre, soldaduras y en metal de imprenta. En la industria aeroespacial se utiliza en aleaciones de titanio.

Tiene una densidad muy similar a la del acero, con una estructura cristalina Beta-Sn estable entre $13,2$ y $232\text{ }^\circ\text{C}$, temperaturas en las que se trabajarán. Se trata de un metal duro, por ejemplo, mayor que el zinc pero menor que el plomo.

En la tabla 3.2 se expresan para los metales más comunes en la fundición, los valores de sus propiedades frente a las del estaño.

Tabla 3.2 Comparativa entre metales de fundición.

Propiedad	Estaño	Acero	Aluminio	Bronce	Hierro gris	Plomo
T^a fusión (K)	504,89	1 648,15	933,47	1 103,15	1 812	600,61
T^a ebullición (K)	2 875,15	3 273,15	2 792,15	2 505,15	3 023	2 022,15
Densidad (g/cm^3)	7,265	7,845	2,7	8,9	7,86	11,3
Viscosidad (mPa/s)	2,71	2,25	4,5	3,36	2,2	2,47
Difusividad térmica ($\text{m}^2/\text{s}\cdot 10^5$)	3,446	1,301	8,516	4,028	1,934	2,379
Coefficiente de contracción (%)	2,51	2	1,2	1,5	1	2,6
Capacidad calorífica ($\text{J}/\text{g}\cdot^\circ\text{C}$)	0,256	0,46	0,897	0,52	0,47	0,129
Conductividad térmica ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	32,6	46,4	94	49,4	75,4	35,729
Densidad líquido (g/cm^3)	6,45	7,13	2,39	7,96	7,15	10,7

3.2 Diseño de sistemas auxiliares

3.2.1 Mazarota

Durante la solidificación y enfriamiento de la fundición aparece una contracción volumétrica del material metálico. Esta reducción de tamaño puede generar defectos internos en la pieza provocando su inutilidad para el objeto de su diseño. Aunque son evidentes las desventajas de la utilización de mazarotas por los

propios costos que supone su implementación y extracción, la zona que es alimentada por ella aparece como una región de presión reducida contrarrestando así la generación de poros y microsegregaciones.

Con el fin de salvar este problema, el sistema de alimentación debe diseñarse de forma que se aporte el suficiente metal líquido en el molde asegurando su aporte a las zonas calientes en todo momento, esto quiere decir que la alimentación o reservorios de alimentación deben solidificar o enfriarse después del modelo.

La mazarota es un reservorio de metal fundido con el suficiente volumen que tiene como objetivo alimentar en todo momento al modelo para salvar las contracciones volumétricas.

Existen varios tipos de sistemas de compensación o mazarotas según su disposición en el modelo, así pues, se tienen mazarota superior para ubicaciones sobre la pieza, y mazarotas laterales para mazarotas dispuestas en el contorno. En la figura 3.5 se pueden ver las dos tipos más comunes de mazarotas.

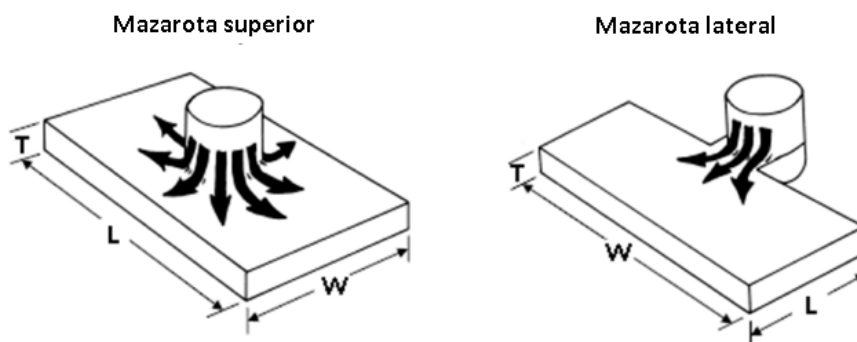


Figura 3.5 Disposición de mazarotas. [7]

Además, se pueden clasificar como mazarota abierta aquella que tiene su parte superior libre en contacto con la atmósfera o mazarota cerrada aquella que se encuentra tapada por el molde en todas sus superficies.

Por lo general, las mazarotas deben situarse en los puntos calientes o en zonas de difícil alimentación. En las fundiciones compactas normalmente se puede utilizar solo una mazarota para obtener el resultado óptimo. Sin embargo, para fundiciones complejas o conjunto de fundiciones se hace imprescindible la utilización de un mayor número. La distancia de alimentación será el factor que delimite el número de mazarotas necesarias para solventar los problemas de contracción del metal fundido. Esta distancia es la máxima que puede alimentar una mazarota para que la pieza resulte libre de porosidad.

La distancia de alimentación puede variar según las características generales de la pieza, así pues, para placas la zona de acción de la alimentación es circular, y para barras la zona de acción viene expresada por la dirección longitudinal a ambos lados de la mazarota.

Existen bastantes referencias en la literatura técnica para el cálculo de la distancia de alimentación y las dimensiones de la mazarota. Entre otras, se encuentran tablas y gráficas experimentales para aceros, generadas por investigadores como Caine (1949) o Pellini (1953). No es así para otro tipo de metales de fundición y moldes, aunque existen estudios como el modelo de Kubo & Pehlke (1985) para aleaciones de aluminio en las que las distancias de alimentación son considerablemente mayores que las aplicables al acero. Esta distancia de alimentación, según se deriva del estudio de Romero (1991) para Al-bronce, depende en gran medida de la calidad del metal de trabajo pues aumenta para metales que contengan valores bajos de gas y óxidos.

Con el fin de tomar la distancia de alimentación más restrictiva para así asegurar la conformidad del diseño en la disposición de la mazarota, se toma como referencia el estudio de Pellini (1953) [1], en el que la

distancia de alimentación DA , se calcula según la ecuación 3.1.

$$DA = 6\sqrt{\bar{T}} \quad (3.1)$$

Siendo \bar{T} el espesor medio de la pieza, que en el caso de una barra o geometría similar, sería el diámetro medio de ella.

Para el dimensionado de la mazarota se parte del estudio del tiempo de solidificación de la pieza pues se ha de cumplir que la pieza solidifique en un tiempo posterior a la mazarota. Para ello, la mazarota debe tener mayor o igual módulo de enfriamiento que la parte de la pieza que alimenta. Además, el volumen mínimo que debe tener una mazarota está determinado por la cantidad de metal requerido para compensar la contracción del metal solidificado.

En la figura 3.6 se muestran los resultados de Rao (1975) en el que se plasma el tamaño de la mazarota frente al tamaño de la pieza para una placa de Al-12Si mostrando el porcentaje de porosidad obtenido. Para el valor de 1,2 en la relación de módulos entre mazarota y pieza, esta se encuentra en su menor porcentaje de porosidad, es decir, se reduce al mínimo la posibilidad de aparición de porosidad y microsegregación. A medida que el tamaño del alimentador aumenta no aparece una excesiva desventaja respecto al mejor caso, concluyendo así que para una mazarota de menor tamaño que el ideal se produce porosidad grave en la pieza, mientras que una mazarota de gran tamaño genera poca porosidad adicional al caso ideal.

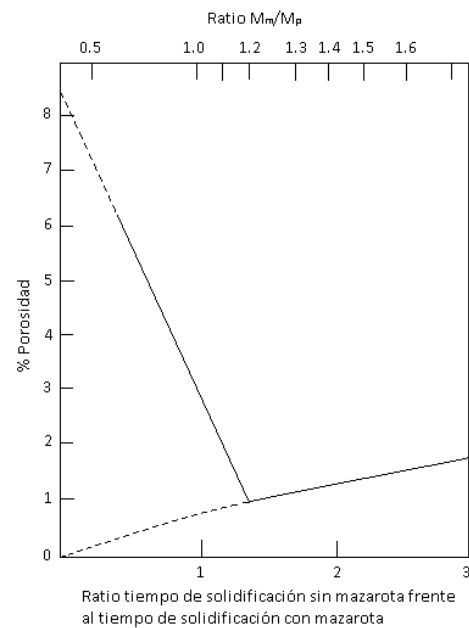


Figura 3.6 Efecto del aumento del tiempo de solidificación en función de la relación de módulos ente la mazarota y una placa de Al2Si. Rao (1975). [3]

Partiendo de las dos consideraciones se tiene que la mazarota debe cumplir tanto la ecuación 3.2 como la 3.3.

- Regla del módulo: $M_m \geq k \cdot \text{Máx}\{M_{p_i}\}_{i=1}^{N_p}$ (3.2)

- Regla de la contracción: $V_m \geq n \cdot C_v \cdot \sum_{i=1}^{N_p} V_{p_i}$ (3.3)

Siendo:

k una constante que depende del tipo de mazarota

$k=1,2$ para mazarota normal

$k=0,8$ para mazarota exotérmica

n el coeficiente de mayoración

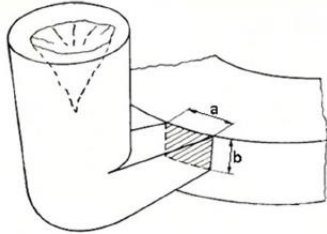
N_p número de piezas

C_v el coeficiente de contracción volumétrica del material

La unión entre mazarota y pieza debe ser suficientemente amplia para permitir la transmisión de material

fundido entre ambas pero suficientemente pequeña para permitir una mejor retirada o separación posterior entre ambas. Además, no se debe colocar extremadamente separados pues provocaría una solidificación prematura del canal de unión.

Se puede tomar como recomendación distancia entre mazarota y pieza de $Dm/6$ junto con los datos de la figura 3.7.



$$\begin{array}{lll} b = D/1 & b = D/2 & b = D/3 \\ a = D/5 & a = D/4 & a = D/3 \end{array}$$

Figura 3.7 Zona de unión mazarota y pieza. [6]

3.2.2 Sistemas de colada

Se denomina sistemas de colada al conjunto de conductos y canales que conducen al metal líquido hasta la cavidad del molde para el llenado del mismo. Existen varias formas de llenado del molde dependiendo de la disposición de los canales. Así pues, se suele tomar como manera más usual el llenado por la línea de partición del molde por ser un sistema sencillo de implementar.

El sistema de colada está compuesto de bebedero, cono o taza de colada, pozo de colada, canal de colada y canal de ataque o entrada según se puede distinguir en la figura 3.8.

El diseño del sistema de colada debe realizarse de acuerdo a varias consideraciones.

- Del modelo.
Se debe alimentar por la parte más gruesa del modelo para garantizar la solidificación dirigida. Además, para modelos pequeños, puede alimentarse por un solo punto siempre que sea posible. Por ello, dada la geometría de la pieza (véase Anexo A) se puede considerar un sistema de alimentación con un solo ataque con tres posibilidades de localización de acuerdo a tres zonas de geometría planas encontradas en la vertical de la pieza.
- De morfología.
Debe diseñarse de forma que el material de fundición no sea en ningún caso perpendicular a partes del molde. Esto se salva diseñando un sistema de alimentación cuyos ataques se dispongan en los extremos de la pieza.
- De dimensionado.
Los canales deben ser los más cortos posibles para evitar enfriamientos prematuros. En este sentido se tomará la consideración de distancia mínima del canal de colada y ataque de 30 mm con una sobre longitud del canal de colada tras el ataque de 50 mm para evitar turbulencias extremas por el cambio de dirección entre canal de colada y ataque, además de servir para acumular los posibles residuos.
- De posicionamiento.
Los canales de colada deben alejarse de las zonas calientes y de las paredes de la caja de moldeo. En el posicionado se ven involucradas, por tanto, las dimensiones de la caja de moldeo y las distancias mínimas entre los sistemas y las paredes de la caja, así como la facilidad de moldeo y desmoldeo. Para fundiciones pequeñas se recomienda que la distancia mínima entre la pieza y sistemas de alimentación

con las paredes del molde supere en cualquier caso los 30 mm.

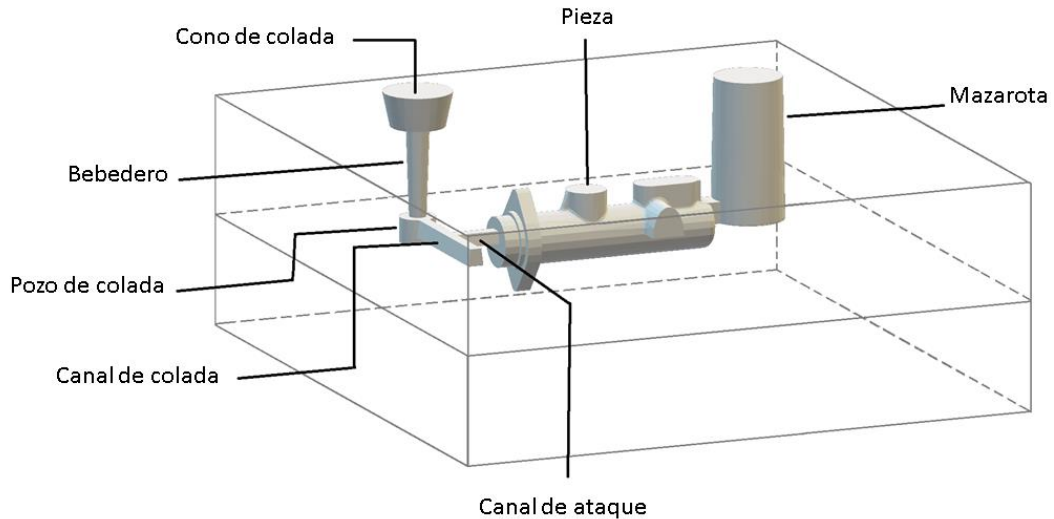


Figura 3.8 Elementos del sistema de colada.

El primer problema que presenta es el posicionado y forma del sistema de alimentación. Influyen varios factores que determinan este factor, así como experiencia propia de fundición.

En el dimensionado es fundamental el cálculo del tiempo de llenado del molde. En este aspecto, Mikhailov propuso el cálculo de este factor mediante la Ecuación de Mikhailov, que se muestra en la ecuación 3.4.

$$T_{ll} = A\delta^m M^n \quad (3.4)$$

En la cual:

A , m y n son constantes que dependen del metal de trabajo (tabla 3.3)

δ el espesor mínimo de la pieza en mm

M el peso total de la pieza en kg.

Tabla 3.3 Valores de las constantes A , m y n de la Ecuación de Mikhailov.

Metal	A	m	n
Acero	1,5	0,21	0,34
Hierro gris	0,76	0,23	0,5
Fe maleable	1,89	0,43	0,5
Fe nodular	0,97	0	0,5
Aluminio	1,42	0,18	0,5
Aluminio 2	1,7	0,334	0,334
Bronce	0,47	0,2	0,5
Aleac. Mg	2,3	0,334	0,334

Existe una expresión alternativa a la Ecuación de Mikhailov para el cálculo del tiempo de llenado (ecuación 3.5) que expresa de forma genérica los valores de las constantes para cualquiera que sea el metal de fundición.

$$T_{ll} = A\sqrt[3]{\delta M} \quad (3.5)$$

A priori, el peso del sistema de alimentación se supone como el 15 % del peso de la mazarota y la pieza juntos. Esta aproximación se expresa en las ecuaciones 3.6 y 3.7.

$$P_{Total} = n \cdot (P_{mazarota}) + n \cdot (P_{Pieza}) + P_{sd} \quad (3.6)$$

$$P_{Total} = 15\% \cdot [n \cdot (P_{mazarota}) + n \cdot (P_{Pieza})] \quad (3.7)$$

Siendo n el número de mazarotas y de piezas, en este caso $n = 1$.

Existen varios tipos de sistemas de alimentación dependiendo de las áreas de los canales o relación de

colada. Así pues, se habla de sistemas a presión cuando el área final del bebedero es mayor que el área del canal de colada, y esta a su vez mayor que el área del canal de ataque. Con esto se consigue que el metal fundido aumente de velocidad, pues la reducción de las áreas de paso para mantener el caudal de metal hace aumentar la presión. La presentación del tipo de sistema se expresa según la ecuación 3.8.

$$S_{\text{bebedero}} : S_{\text{canal de colada}} : S_{\text{ataque}} \quad (3.8)$$

El dimensionado de las diferentes partes de los conductos de llenado lo rige la ecuación de Bernoulli en una línea de corriente desde la taza de colada hasta el final del canal de ataque según la ecuación 3.9.

$$P = \sqrt{2gHS_A} \rho t 10^3 \quad (3.9)$$

Siendo:

P el peso del metal

ρ la densidad del metal

$\sqrt{2gH}$ la velocidad

t el tiempo

S_A la sección de paso

A través de la ecuación 3.9 es posible calcular la sección de cada subsistema de alimentación sabiendo la altura de cada una de las secciones dentro del conjunto.

Como se ha comentado, cada subsistema debe diseñarse según unas características que aseguren la continuidad del flujo de metal fluido.

- Bebedero

El bebedero es la zona vertical del sistema de alimentación, el cual dota al metal fluido de la energía potencial y cinética necesaria para ocupar la cavidad del molde. Por tanto, es una de las partes más importantes en el estudio del sistema de alimentación pues debe ser meticulosamente diseñada para que esté ocupada en su totalidad por metal fluido y no se introduzca así gas en el interior del molde. Suele estar acompañado en su base superior a una taza de colada la cual facilita la correcta corriente del fluido, dotando de un caudal uniforme al bebedero de modo que no se produzcan turbulencias en la trayectoria del metal a través de su volumen.

Debe dotar al fluido de la velocidad necesaria en su punto inferior para que este sea capaz de llenar la cavidad del molde, por ello se diseñan de forma de que su área disminuya a medida que el fluido descienda. Esto genera para un caudal continuo, un aumento de la velocidad y de la presión por ende. Esta ha de ajustarse a las limitaciones de velocidades del fluido. En este sentido es muy importante el correcto dimensionado de la sección base del bebedero.

Básicamente el bebedero se diseña de forma que imite la conicidad de la caída de la corriente de forma natural como resultado de la gravedad. Esto se muestra como una hipérbola, de ello se denota la compleja interacción entre la base del bebedero y el propio bebedero. Puede verse este efecto en la figura 3.9.

Para fundiciones pequeñas, el gap entre la mitad del bebedero y la curva hiperbólica de caída del flujo se corrige simplemente haciendo la entrada del bebedero alrededor del veinte por ciento mayor en área. Estos efectos fueron estudiados para acero usando radiografía en tiempo real (Sirrell et al. 1995) para optimizar la conicidad midiendo el tiempo de llenado del bebedero y la velocidad de salida. En la figura 3.10 se puede observar como un valor del veinte por ciento del área de la entrada del bebedero da resultados óptimos en cuanto a tiempo de llenado y velocidad.

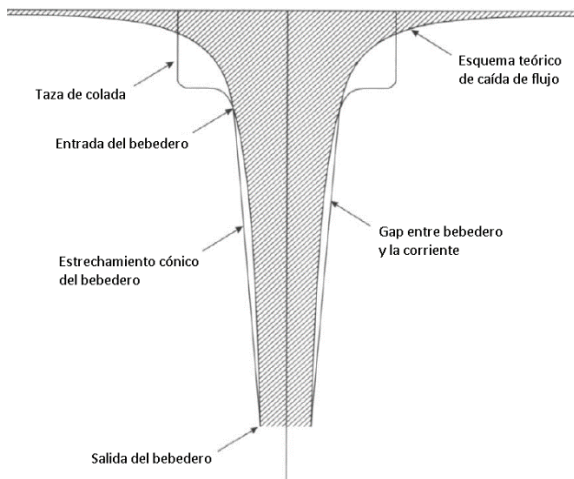


Figura 3.9 Hipérbola teórica que muestra la caída de la corriente. [3]

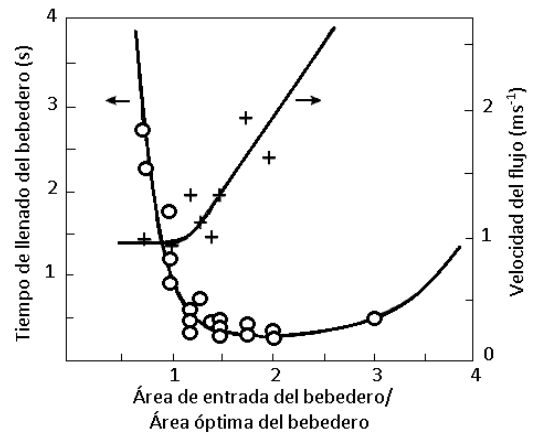


Figura 3.10 Datos de la observación experimental de radiografía en el llenado de diferentes bebederos (Sirrell 1995). [3]

El estudio dimensional del bebedero se realiza partiendo de la teoría de Bernoulli sobre los fluidos en un tubo de corriente, junto con la consideración aproximada de la nulidad de velocidad superficial en la base superior de la taza de colada.

Tirando una línea de corriente entre la base superior de la taza (punto 1) y la base inferior del bebedero (punto 3), aplicando la ecuación de Bernoulli, ecuación 3.10, se obtiene una relación entre ambos puntos.

$$P_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_1 = P_3 + \frac{\rho \cdot v_3^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_3 \quad (3.10)$$

Aplicando continuidad, ecuación 3.11, se pueden relacionar los cocientes de las áreas de cada punto con las alturas de los mismos. Siendo el punto 2 la base superior del bebedero.

$$A_2 \cdot V_2 = A_3 \cdot V_3 \rightarrow \frac{A_3}{A_2} = \frac{V_2}{V_3} = \sqrt{\frac{h_2}{h_3}} \quad (3.11)$$

Se obtiene, por tanto, que el área inferior del bebedero se calcula según la ecuación 3.12.

$$A_{bi} = \frac{P_{Total}}{\rho T_{llc} \sqrt{2gH}} \quad (3.12)$$

Siendo H el salto efectivo o altura desde la superficie hasta la altura superior del canal de ataque que depende del tipo de llenado del molde. En la figura 3.11 se representan las distintas formas de calcular el salto efectivo según el tipo de llenado.

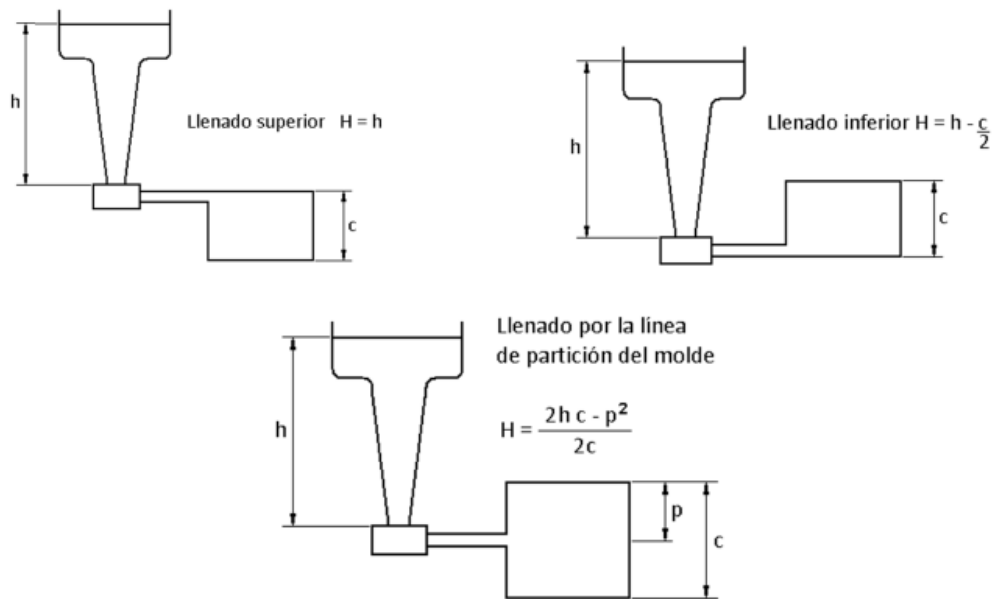


Figura 3.11 Salto efectivo según la forma de llenado del molde. [7]

▪ Taza de colada.

La taza de colada se localiza en la parte superior del bebedero para estabilizar la entrada del flujo de metal fundido en el sistema de colada.

Existen varias geometrías de diseño de la taza de colada, siendo la más común una taza cónica por su facilidad de implementación. Sin embargo, este diseño presenta la desventaja de poco control de la velocidad del flujo al ser complejo mantener un nivel constante de llenado generando esto posibilidad de turbulencias en el bebedero. Sin embargo, para fundiciones pequeñas, como es el caso en estudio, la taza cónica se comporta tolerablemente bien. Por ello, es aconsejable para estas fundiciones reducir el tiempo de fabricación por su simpleza y economía.

En el diseño de la taza de colada cónica se tiene en cuenta la altura fija de la caja de moldeo, lo que limita tanto las dimensiones del bebedero como las de la taza. Se debe realizar una relación de compromiso entre las alturas de estos dos sistemas para que su total se ajuste a la altura de la caja de moldeo.

Se ha tomado como diseño aproximado las dimensiones de la figura 3.12, siendo D_{pc} el diámetro inferior del cono de la taza de colada, D_{bs} el diámetro superior del bebedero y H la altura de la taza de colada.

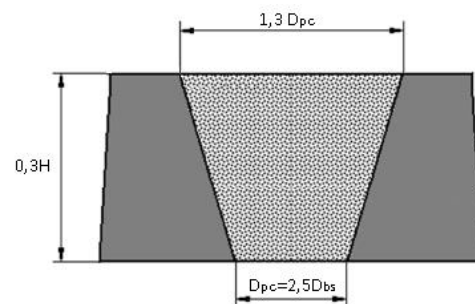


Figura 3.12 Diseño taza de colada. [7]

▪ Pozo de colada

El pozo de colada es la parte de unión entre el fondo del bebedero y el canal de colada. Este debe asegurar una transición suave del flujo de metal fundido, pues es el que recibe al metal líquido con mayor velocidad en su bajada desde el bebedero y lo debe redireccionar horizontalmente hacia los canales de colada.

Uno de los diseños más usados por su efectividad y simpleza es su diseño como cilindro de área cinco veces superior al área menor del bebedero y altura dos veces superior a la altura del canal de colada, tal y como se puede ver en la figura 3.13. Esta optimización fue confirmada por Isawa (1993) en su estudio en el que se buscaba eliminar la generación de burbujas de gas y oxidación exponencial en función del tiempo.

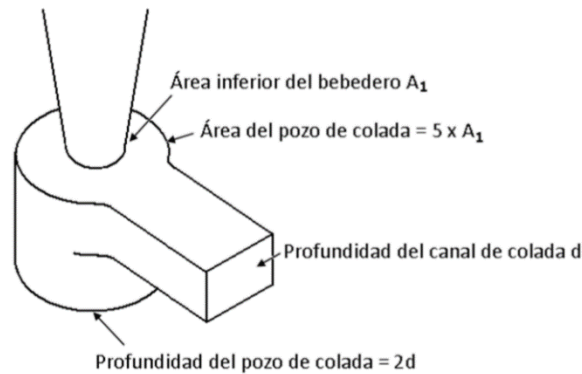


Figura 3.13 Diseño del pozo de colada. [7]

- Canales de colada y ataque.

Los canales de colada son los encargados de distribuir horizontalmente el metal fundido hasta la cavidad del molde. El canal de ataque es el conducto final del sistema de alimentación y es el que se conecta directamente con la cavidad del molde, siendo así el que sirve de alimentación directa de material fundido. El canal de colada es el canal que sirve de unión entre el pozo de colada y el canal de ataque, y tiene como función servir de enlace entre ambos, ya que debe existir una distancia mínima entre zonas calientes de gran acumulación de metal fundido como son el bebedero y la pieza o mazarota. Además, el final de este canal sirve como reserva de escorias posibles que se acumulen debido a la orientación de este con el canal de ataque.

Normalmente estos canales son horizontales por simpleza en la implementación aunque existe la posibilidad de canales verticales o con cierto ángulo de inclinación. Generalmente se localizan en la línea de partición para moldes en cajas bipartidas facilitando la generación del modelo y su extracción.

El número de canales de colada y ataques depende de las dimensiones de la fundición. Para piezas simples y de poco volumen en los que existan caras rectas y de fácil acceso, se puede alimentar con solo un canal de cada tipo. Estos canales se diseñan lo más cortos posibles para evitar enfriamientos prematuros del metal pero con la suficiente longitud para permitir una suficiente distancia a la caja de moldeo y zonas calientes.

Para el caso en estudio, al tratarse de una fundición pequeña con geometría similar a la de un cilindro horizontal, se puede alimentar en el plano de partición por ambos extremos del cilindro. Al ser un sistema de alimentación con relación de colada a presión, el canal de colada tiene mayor área que el canal de ataque, por lo que el flujo se acelera en su paso por ambos canales.

Básicamente se diseña el llenado de modo que el metal fundido llegue al fondo del bebedero con la suficiente presión y velocidad, se distribuya por el canal de colada el cual lo conduce hasta el canal de colada, cambiando de dirección para acabar finalmente ocupando la cavidad del molde. Tras la unión entre canal de colada y ataque se suele dejar una prolongación del canal de colada, con el fin de conducir a este las posibles espurias producidas a lo largo del recorrido del metal por el bebedero y canal de colada. Además, relaja el cambio de dirección del flujo evitando turbulencias.

La normalización de los valores se efectúa por medio de tabulación según varias recomendaciones de áreas: los ataques deben presentar una sección aplanada para su mejor eliminación; para los canales de colada se toma la altura superior aproximadamente igual al ancho para facilitar la ascensión de la escoria, que por su menor peso específico tiende a ubicarse en la parte superior de la corriente. Estas consideraciones se muestran gráficamente en la figura 3.14.

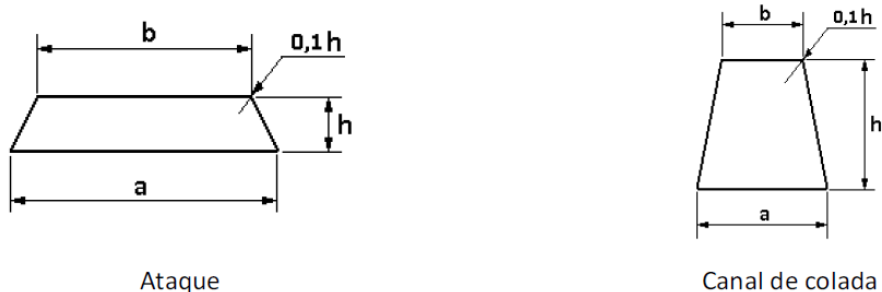


Figura 3.14 Secciones de los canales de colada y ataque. [7]

La normalización de las dimensiones de los canales de colada es necesario redondear garantizando que no se altere la relación de colada. Para el caso de fundiciones pequeñas en las que las áreas de los canales no se muestran en la tabla 3.4 y tabla 3.5, se normaliza según escala dimensional.

El conjunto total de fundición ha de diseñarse de modo que cada subconjunto esté bajo ciertas recomendaciones en cuanto a distancias mínimas entre ellos. Estas distancias mínimas responden a requerimientos de refractariedad del molde de arena y zonas calientes del modelo. Para conductos y cavidades muy cercanas, se alcanzan grandes valores de temperaturas, lo que puede deducir en pérdidas de humedad.

Tabla 3.4 Dimensiones normalizadas de los canales de colada. [7]

Aa [cm ²]	h = a			h = 1,25 a			h = 1,5 a		
	Dimensiones [mm]								
	a	b	h	a	B	h	a	b	h
1	11	8	11						
1,3	12	10	12	11	8	14			
1,6	14	10	14	12	9	15	11	7	17
2	15	12	15	14	10	17	12	8	20
2,5	16	13	17	15	11	19	14	10	21
3,15	18	14	19	16	12	21	15	11	23
4	22	18	21	18	13	25	18	13	26
5	24	19	24	22	16	27	20	14	30
6,3	26	20	27	24	18	30	23	16	34
8	30	24	30	26	19	35	24	17	38
10	34	28	33	30	22	38	28	20	42
12,5	38	30	37	34	26	43	30	22	47
16	42	34	42	38	29	48	36	25	54
20	48	38	47	42	32	53	40	28	60
25	52	42	53	48	36	60	44	32	66
31,5	60	48	59	52	40	66	50	35	75
40	66	52	67	60	45	77	56	39	84

Tabla 3.5 Dimensiones normalizadas de los canales de ataque. [7]

Aa [cm ²]	Altura del ataque h [mm]															
	2		3		4		5		6		8		12		16	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
0,3	16	14	11	9	9	6	7	5	6	4						
0,4	21	19	15	12	11	9	9	7	8	6	6	4				
0,5	26	24	18	16	13	11	11	9	9	7	7	5				
0,6	31	29	21	19	16	14	13	11	11	9	9	6				
0,7	36	34	25	22	18	15	15	13	13	10	10	7				
0,8	41	39	28	25	21	19	17	15	15	12	11	9				
0,9	46	44	31	29	24	21	19	17	16	14	12	10	9	6		
1,0			35	32	26	23	21	19	18	15	14	11	10	7		
1,1			38	35	29	26	23	21	20	17	15	12	10	8		
1,2			41	39	31	29	25	23	22	19	16	14	11	9		
1,4			48	45	36	33	29	26	24	21	18	15	12	9		
1,6			55	52	41	39	33	30	27	24	20	17	14	11		
1,8			61	59	46	43	37	34	30	27	22	19	15	12	12	9
2,0			68	65	51	49	41	39	33	30	25	22	17	14	14	11
2,2			75	72	56	53	45	42	36	33	28	25	19	16	15	12
2,5			85	82	64	61	51	49	42	39	31	28	21	18	16	13
2,8			95	92	71	69	57	54	46	43	35	32	24	21	18	15
3,0									50	47	39	36	25	22	19	16

La dimensión de la caja de moldeo no es una variable en el caso en estudio pues vienen prefijadas por la disponibilidad de ellas en el taller. Por ello, se hace necesario un posicionamiento correcto de los sistemas con el fin de la mejor colocación de los mismos.

Las dimensiones de las variables de posicionamiento se regulan mediante tablas (Tabla 3.6), en las que se definen las distancias que se relacionan y que se representan en la figura 3.15.

- Distancia mínima entre pieza y borde de la caja de moldeo.
- Distancia entre canales de colada y pieza.
- Distancia entre piezas.

Tabla 3.6 Distancias admisibles entre elementos. [7]

Distancia pieza –pieza y pieza -molde									
Tipo de pieza		Dimensiones							
		a	b	B		s		d	
Pequeñas		20÷30	35÷60	50÷75		0,3 de la altura del modelo		0,5 de la altura del modelo	
Medianas		50÷75	75÷100	100÷125					
Grandes		125÷175	150÷200	175÷200		-		-	
Distancia pieza – conductos de alimentación									
Base del conducto c [mm]	Tipo de molde	Masa de la pieza [kg]							
		≤50	51÷250	251÷500	>501	≤50	51÷250	251÷500	>501
		k1				k			
≤25	Seco	30	35	-	-	30	35	-	-
	Verde	50	60	-	-	30	35	-	-
26÷50	Seco	40	40	45	50	40	40	45	50
	Verde	50	55	60	70	45	50	55	60
>51	Seco	50	55	60	50	50	50	55	60
	Verde	60	65	70	80	60	60	65	70

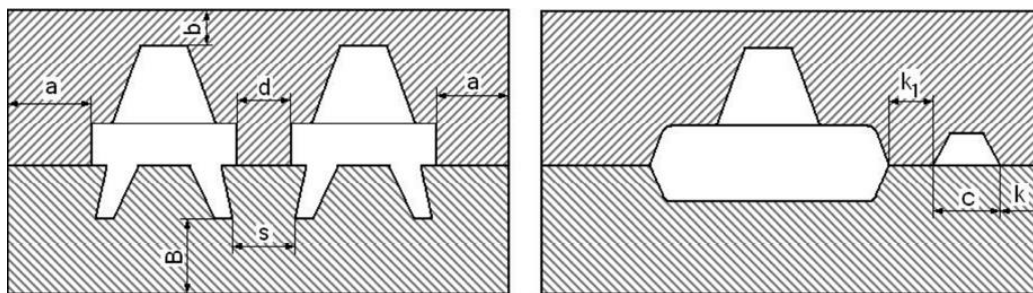


Figura 3.15 Distancias admisibles entre elementos. [7]

3.3 Cálculo del sistema de compensación.

Partiendo de la teoría expuesta para el diseño del sistema de compensación aplicado al modelo en estudio, se calcula el dimensionado del mismo y su posicionamiento dentro de la caja de moldeo.

3.3.1 Dimensionado de la mazarota.

Se propone un modelo de fundición con mazarota lateral abierta por sus ventajas a la hora de eliminación de la misma. El dimensionado de la misma en primera instancia se realiza de acuerdo a la situación más desfavorable para que se obtengan las dimensiones mínimas que ha de tener la mazarota para cumplir su cometido correctamente.

Aplicando conjuntamente la regla de la contracción y del módulo se obtiene la dimensión mínima óptima del diámetro de la mazarota según se expresa en la ecuación 3.13.

$$D_{\min} = \text{Máx} \left\{ 2 \frac{2\lambda+1}{\lambda} k \cdot M_p ; \left[\frac{8n}{\pi \cdot \lambda} c_v \cdot V_p \right]^{\frac{1}{3}} \right\} \quad (3.13)$$

En el caso considerado, las constantes involucradas en la anterior ecuación son:

- Coeficiente de contracción del material: $c_v = 2,51\%$ (Sn)
- Mazarota normal: $k = 1,2$
- Constante de mayoración: $n = 1$
- Elección de mazarota lateral: $\lambda = 1,5$

Introduciendo los valores de todas las incógnitas se tiene lo siguiente:

$$D_{\min} = \text{Máx} \{ 42,35 ; 18,6238 \} \text{ mm}$$

Dados los resultados se toma un diámetro mínimo de la mazarota de 45 mm.

Ya que una de las consideraciones iniciales es la elección de mazarota abierta, la altura de ésta está supeditada a la altura de la caja de moldeo que se utilice. Así pues, la altura de la mazarota es de 91,5 mm (véase apartado 4.1).

Con todo ello, se tiene las siguientes características de mazarota:

- Mazarota abierta, lateral.
- Diámetro mínimo: $D_m = 45 \text{ mm}$
- Altura: $H_m = 91,5 \text{ mm}$
- Volumen mazarota: $V_m = 147,8 \text{ cm}^3$
- Distancia de alimentación: $DA = 35,5 \text{ mm}$

La unión entre mazarota y pieza se realiza mediante un canal de dimensiones 15x15x4 mm.

Adicionalmente se diseñan varios tipos de mazarotas laterales cerradas con el fin del estudio del comportamiento de estas en el diseño de la modelo. La aplicación de la teoría del cálculo de mazarotas muestra cierta libertad en el diseño de las mismas siempre que se cumplan los requisitos especificados. Por ello, se diseñan tres tipos de mazarotas cerradas:

- Mazarota cilíndrica vertical.

Para el valor del diámetro de la mazarota obtenido de la teoría, se puede optar por el cambio a mazarota lateral cerrada en la que la altura de la mazarota sea la óptima indicada en la teoría.

$$D_m = 45 \text{ mm}$$

$$H_m = 68 \text{ mm}$$

- Mazarota cilíndrica vertical sobredimensionada.

Con el fin de no limitar el dimensionado a la mínima expresión óptima, se pueden tomar valores sobredimensionados con un factor de seguridad de 110 %.

$$D_m = 50 \text{ mm}$$

$$H_m = 75 \text{ mm}$$

- Mazarota cilíndrica horizontal.

Se puede optar por otro tipo de mazarota interior bipartida de geometría cilíndrica de eje horizontal, la cual mantenga mayor módulo que la pieza.

$$D_m = 69 \text{ mm}$$

$$H_m = 45 \text{ mm}$$

3.3.2 Ubicación de la mazarota.

Una vez definidos todos los componentes que conforman el sistema de fundición, es importante realizar un estudio previo a su implementación experimental para disponer espacialmente el mismo.

Dada la cantidad de posibilidades que la fundición en molde de arena ofrece en cuestión de disposición de la mazarota en el molde, se puede estudiar distintas configuraciones obteniendo un glosario de resultados óptimos con el que se puede realizar un estudio más profundo de la teoría.

En la figura 3.16 se muestran las posibles zonas de ubicación de la mazarota teniendo en cuenta las características de la pieza. Estas son:

- Zona de posicionamiento 1. Parte anterior de la pieza o zona de la brida.
- Zona de posicionamiento 2. Parte posterior donde aparece la mayor zona caliente que presenta la pieza.
- Zona de posicionamiento 3. Zona de localización según la distancia de alimentación.
- Zona de posicionamiento 4. Zona de la brida.

Las localizaciones laterales 3 y 4 de la mazarota conllevan mayor dificultad en la extracción de la misma conforme a la pieza, acarreado mayor trabajo para generar una superficie conforme. Además, se ha de añadir la posibilidad de posicionamiento de la mazarota conjunto a los canales de alimentación, es decir, mazarota superpuesta al canal de alimentación.

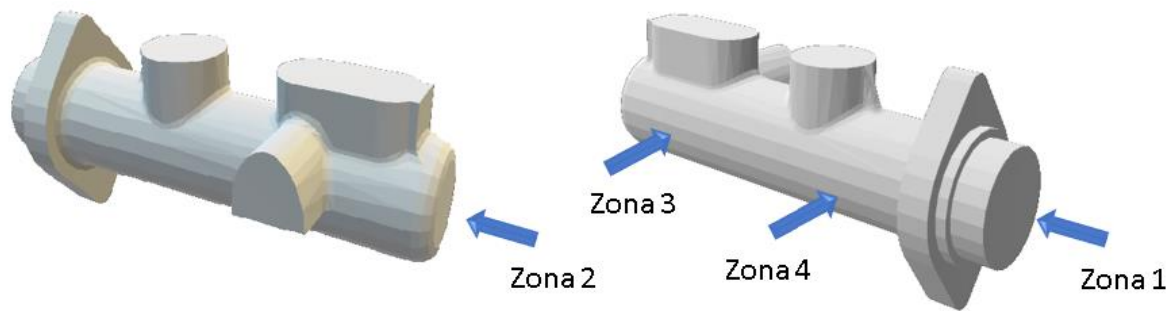


Figura 3.16 Zonas de colocación de la mazarota.

3.4 Cálculo del sistema de alimentación.

Dada la teoría para el perfecto diseño del sistema de alimentación de la pieza, se procede a su cálculo y posicionamiento según las propiedades del metal.

3.4.1 Dimensionado del sistema de alimentación.

De la teoría descrita en el apartado 3.2 se deduce que no existen constantes de la ecuación Mikhailov (ecuación 3.3) para el cálculo del tiempo de llenado para el metal en estudio. Por ello, se toma como primera aproximación para su cálculo las constantes derivadas para el acero como metal más común en fundición en pro de obtener un primer análisis del sistema de alimentación.

Se puede obtener una aproximación del peso total del sistema mediante la ecuación 3.7.

$$P_{Total} = 2,506 \text{ kg}$$

Siendo el espesor mínimo localizado en la zona de la brida de la bomba del freno:

$$\delta = 8 \text{ mm}$$

Se obtiene un tiempo de llenado:

$$T_{ll} = 3,615 \text{ s}$$

El tiempo de llenado obtenido sirve como llave para el diseño y obtención del sistema de alimentación.

Debido a la utilización de un modelo bipartido en el cual se generará el molde mediante dos cajas de moldeo, inferior y superior, se puede diseñar el canal de alimentación de la cavidad de la pieza por cualquiera de las partes. Se ha considerado más efectivo implantar tanto canal de colada como de ataque en la caja superior, de forma que sea más cómoda la fabricación artesanal del modelo en arena y se reduzcan los posibles desprendimientos. Esto significa el llenado por la parte inferior de la mitad superior del modelo.

En el diseño de conjunto del sistema de alimentación se ha optado por un sistema con presión, pues su comportamiento hidrodinámico conduce a un aumento de la velocidad del flujo con la correspondiente influencia en la fluidez. Este sistema tiene como desventaja la generación de una mayor turbulencia y oxidación, aunque debido al reducido tamaño de la fundición en estudio estos factores no tienen gran influencia en el sistema. Para el caso en cuestión y con las conjeturas realizadas se toma una relación de colada como sistema con presión 1,2:1,1:1.

Se puede obtener las velocidades en el interior del bebedero sabiendo que la altura del punto más bajo del bebedero, $h_3 = 91,5 \text{ mm}$, la altura de la taza de colada se puede aproximar por $h_2 = 30 \text{ mm}$. Mediante

la expresión de la energía potencial se tiene que:

$$V_3 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_3} = 136,165 \text{ cm/s}$$

$$V_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_2} = 76,72 \text{ cm/s}$$

Por lo que se deduce que el área inferior del bebedero aproximando para un salto efectivo $H = 80,494 \text{ mm}$.

$$\left. \begin{array}{l} A_{bi} = 86,273 \text{ mm}^2 \\ D_{bi} = 10,481 \text{ mm} \end{array} \right\} \rightarrow \begin{array}{l} A_{bi} = 95,033 \text{ mm}^2 \\ D_{bi} = 11 \text{ mm} \end{array}$$

Con esto se tiene el área superior del bebedero ya que según la teoría expuesta por Campbell (2004), ésta tiene un 20 % más de área que la inferior del bebedero.

$$D_{bs} = 12 \text{ mm}$$

Aunque aplicando continuidad y la ecuación de Bernoulli se puede obtener de forma alternativa el área superior del bebedero y con ello su diámetro según la ecuación 3.14.

$$A_{bs} = A_{bi} \sqrt{\frac{h_{bi}}{h_s}} \quad (3.14)$$

$$A_{bs} = 173,006 \text{ mm}^2 \rightarrow D_{bs} = 15 \text{ mm}$$

Se toma este último valor del bebedero como óptimo debido a que presenta mayor conicidad y por tanto una mejor adaptación del flujo.

De la relación de colada se pueden obtener las áreas de los canales de colada y ataque fácilmente y mediante las tablas 3.4 y 3.5 se obtienen sus dimensiones óptimas.

- Canal de colada:
 - $A_{cc} = 87,114 \text{ mm}^2$
 - $h = 11 \text{ mm}$
 - $a = 10 \text{ mm}$
 - $b = 7 \text{ mm}$
- Canal de ataque:
 - $A_{ca} = 79,194 \text{ mm}^2$
 - $h = 8 \text{ mm}$
 - $a = 11 \text{ mm}$
 - $b = 8 \text{ mm}$

El canal de colada se diseña con una prolongación de 50 mm desde la unión con el canal de ataque hasta su final.

Para la taza de colada, se opta por una geometría troncocónica por su facilidad de implementación y moldeo de dimensiones:

- Base superior: $\varnothing 45 \text{ mm}$
- Base inferior: $\varnothing 35 \text{ mm}$
- Altura: 25,5 mm

La implementación del pozo de colada se realiza bipartida. Esto es necesario debido a la forma de llenado elegida pues al localizarse los canales de colada en la caja de moldeo superior, parte del pozo de colada

sobrepasa el plano de separación. Por ello, se genera un pozo de colada subdividido.

- Diámetro cilindro: $\varnothing 24$ mm
- Altura en caja superior: 11 mm
- Altura en caja inferior: 11 mm

3.4.2 Ubicación del sistema de alimentación.

La pieza presenta varias zonas planas verticales que hacen factible su alimentación. Además, estas zonas planas facilitan la extracción del sistema de alimentación de la pieza en sí, proporcionando un mejor acabado final de la superficie.

Con las anteriores consideraciones y teniendo en cuenta las zonas calientes que presenta la pieza, se deduce que se tienen varias posibles zonas de alimentación enumeradas y mostradas en la figura 3.17.

- Zona de llenado 1. Parte anterior de la pieza o zona de la brida.
- Zona de llenado 2. Parte posterior donde aparece la mayor zona caliente que presenta la pieza.
- Zona de llenado 3. Zona intermedia de la pieza.

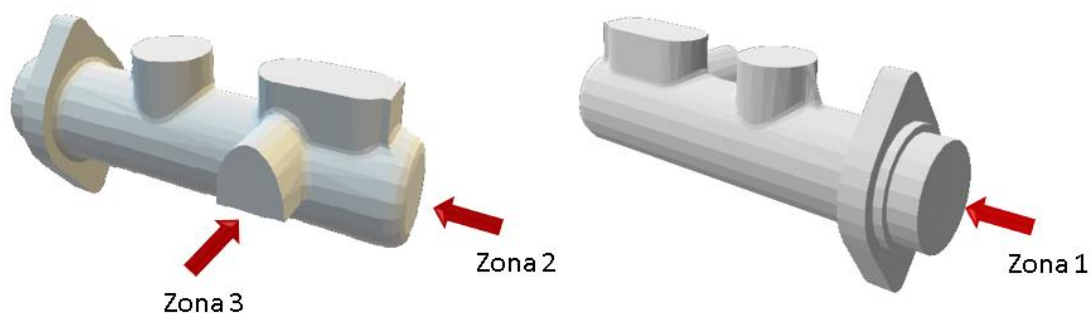


Figura 3.17 Zonas de alimentación.

3.5 Casos en estudio.

Una vez analizada la pieza y como resultado de los cálculos realizados, se proponen diferentes casos de estudio en función de las posibilidades de llenado comentadas antes, de tipo y dimensiones de mazarotas así como de ubicación de las mismas.

Diseño 1. Alimentación por la parte de la brida (figuras de la 3.18 a la 3.27).

- A Sin mazarota.
- B Mazarota abierta según distancia de alimentación calculada.
- C Mazarota cerrada $\varnothing 45$ mm según distancia de alimentación calculada.
- D Mazarota cerrada $\varnothing 50$ mm según distancia de alimentación calculada.
- E Mazarota abierta en la parte posterior opuesta a la alimentación.
- F Mazarota cerrada $\varnothing 50$ mm en la parte posterior opuesta a la alimentación.
- G Mazarota cerrada cilíndrica horizontal en la parte posterior opuesta a la alimentación.
- H Mazarota abierta en canal de colada.
- I Mazarota cerrada cilíndrica horizontal en el canal de colada.
- J Mazarota abierta en la zona de la brida.

Diseño 2. Alimentación por la parte posterior (figuras de la 3.28 a la 3.34).

- A Sin mazarota.
- B Mazarota abierta según distancia de alimentación calculada.
- C Mazarota cerrada \varnothing 45 mm en la zona de la brida.
- D Mazarota abierta en la parte anterior opuesta a la alimentación.
- E Mazarota cerrada cilíndrica horizontal en la parte anterior opuesta a la alimentación.
- F Mazarota abierta en canal de colada.
- G Mazarota cerrada cilíndrica horizontal en el canal de colada.

Diseño 3. Alimentación por saliente lateral (figuras de la 3.35 a la 3.38).

- A Sin mazarota.
- B Mazarota abierta en canal de colada.
- C Mazarota cerrada \varnothing 45 mm en la zona de la brida.
- D Mazarota cerrada \varnothing 50 mm en la zona de la brida

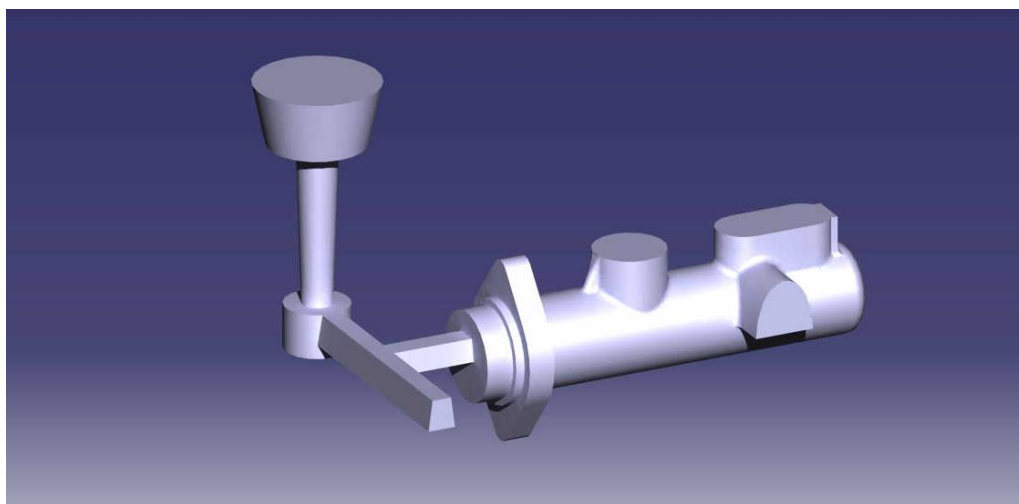


Figura 3.18 Diseño 1 A (sin mazarota).

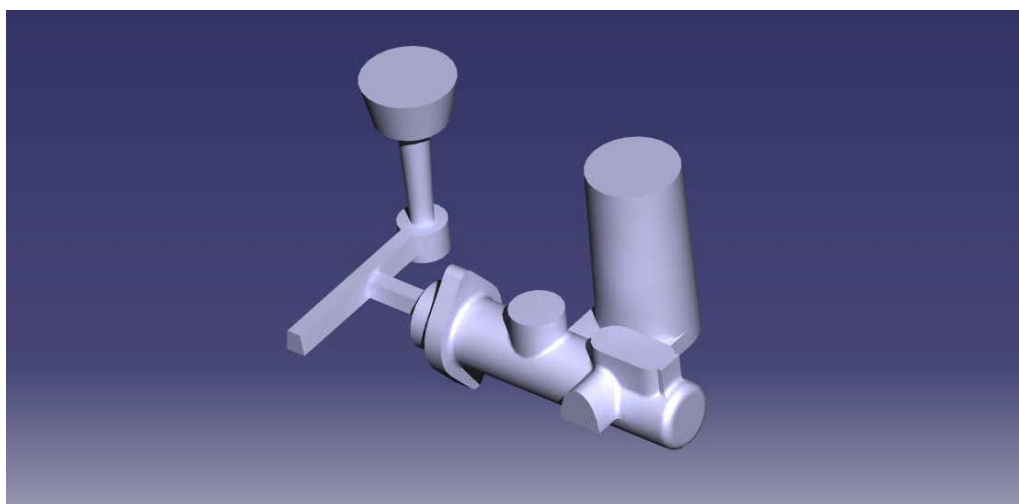


Figura 3.19 Diseño 1 B (según DA).

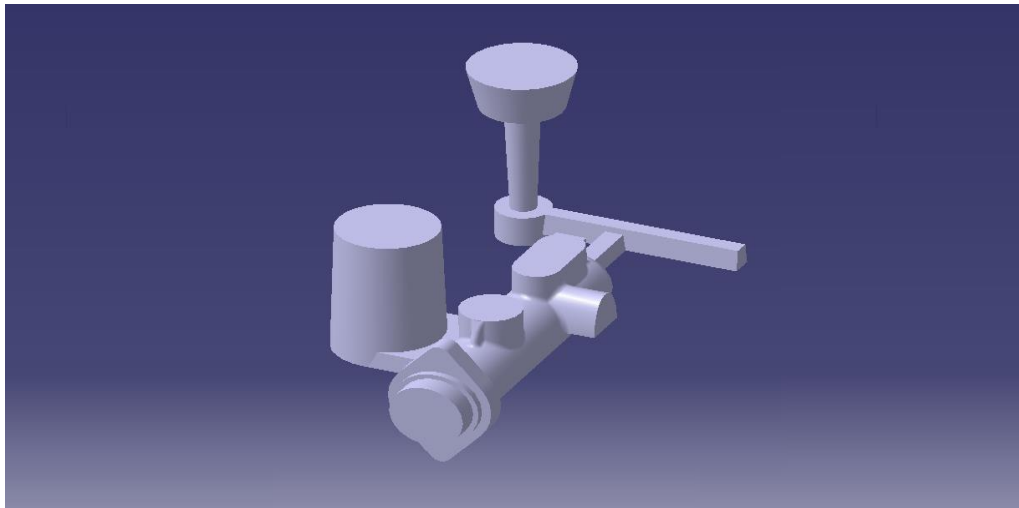


Figura 3.20 Diseño 1 C (mazarota cerrada \varnothing 45 mm en DA).

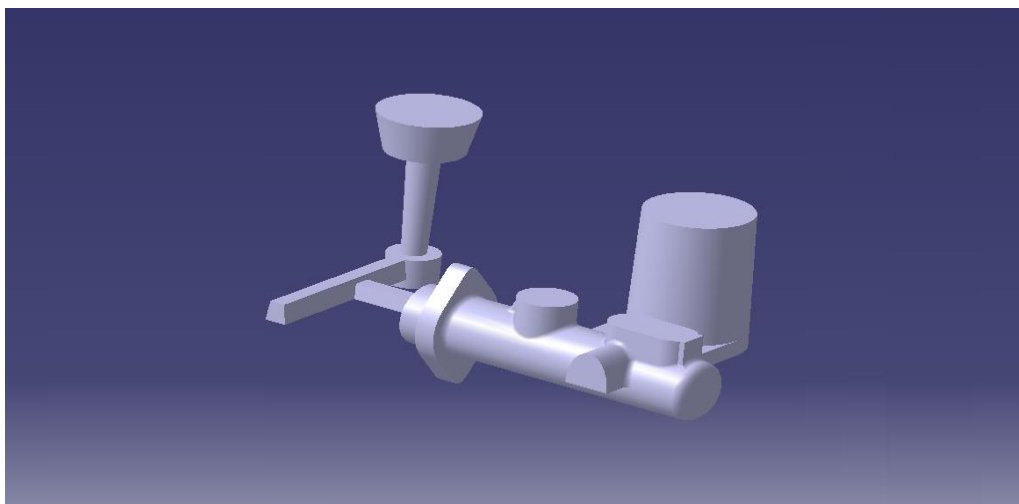


Figura 3.21 Diseño 1 D (mazarota cerrada \varnothing 50 mm en DA).

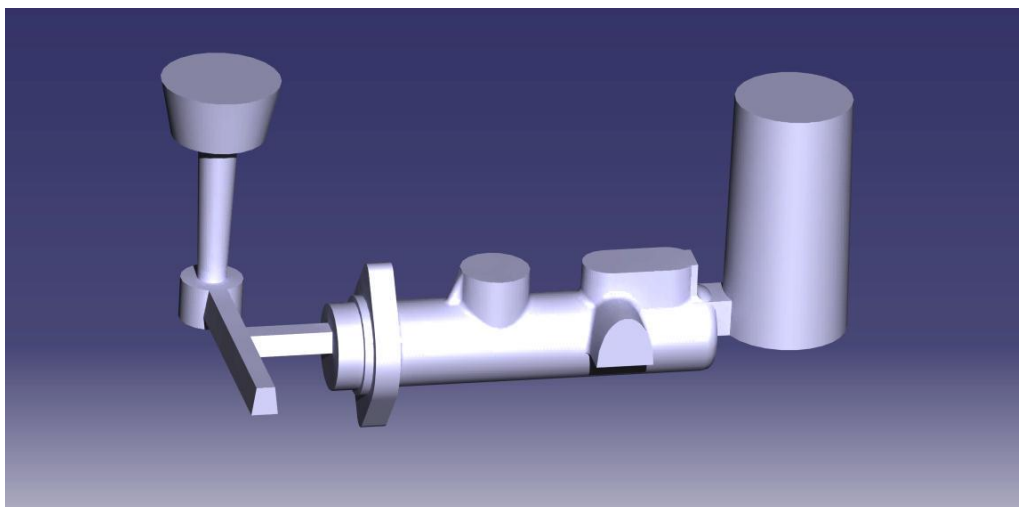


Figura 3.22 Diseño 1 E (mazarota abierta posterior).

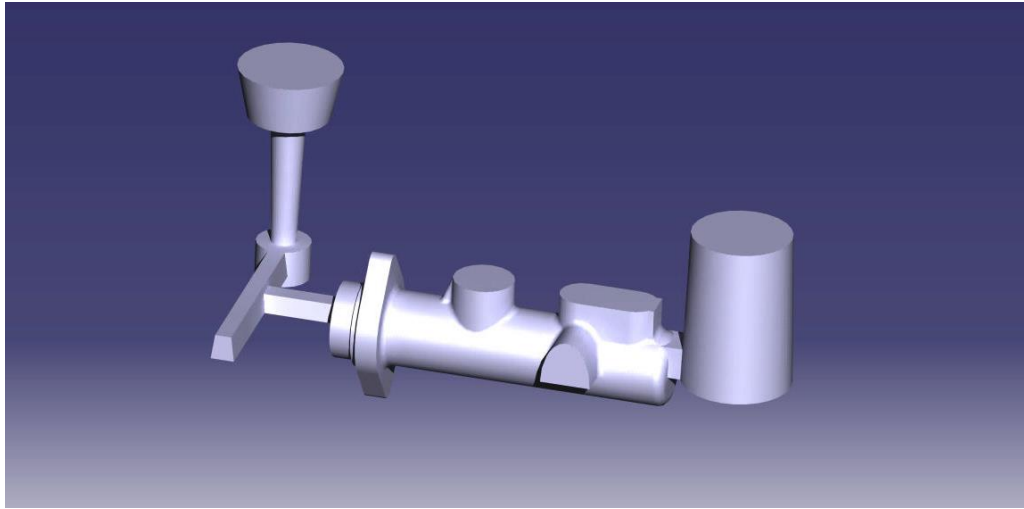


Figura 3.23 Diseño 1 F (mazarota cerrada posterior).

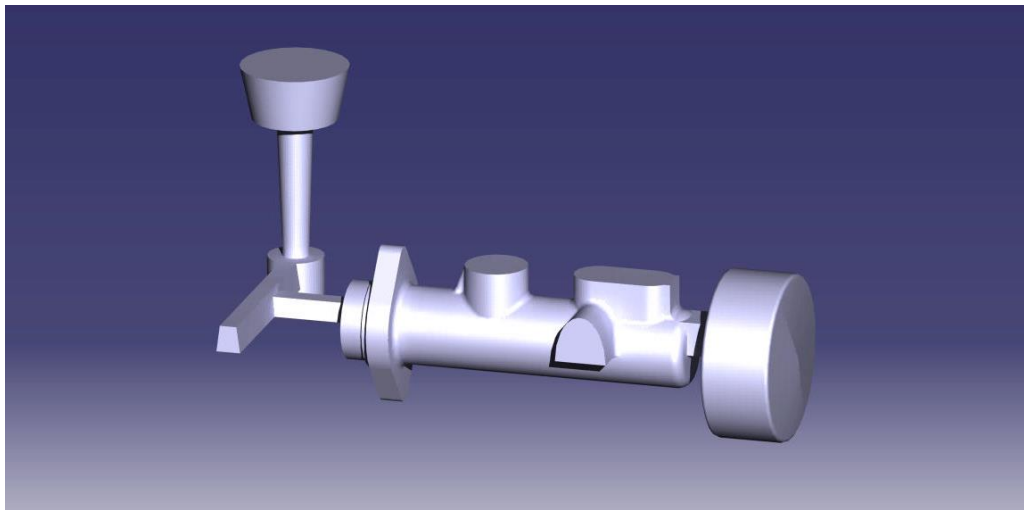


Figura 3.24 Diseño 1 G (mazarota cerrada horizontal).

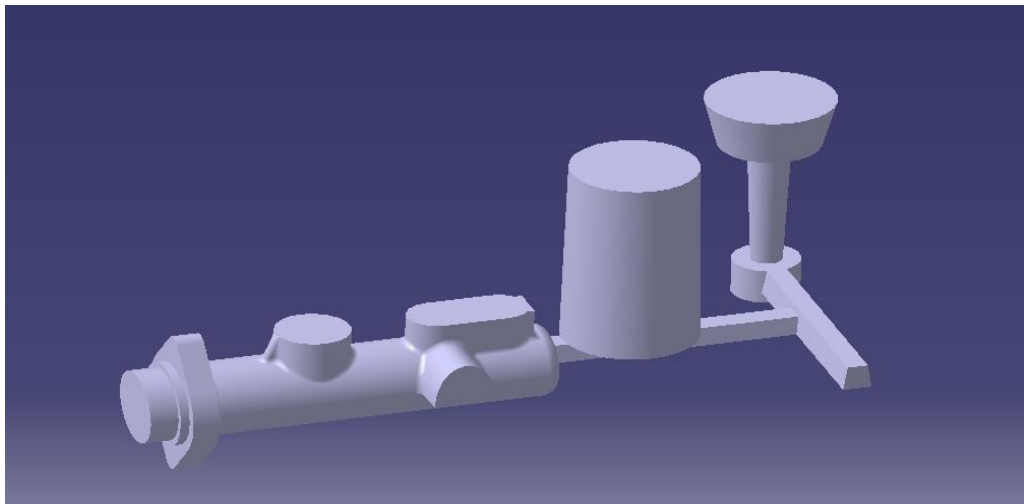


Figura 3.25 Diseño 1 H (mazarota cerrada horizontal).

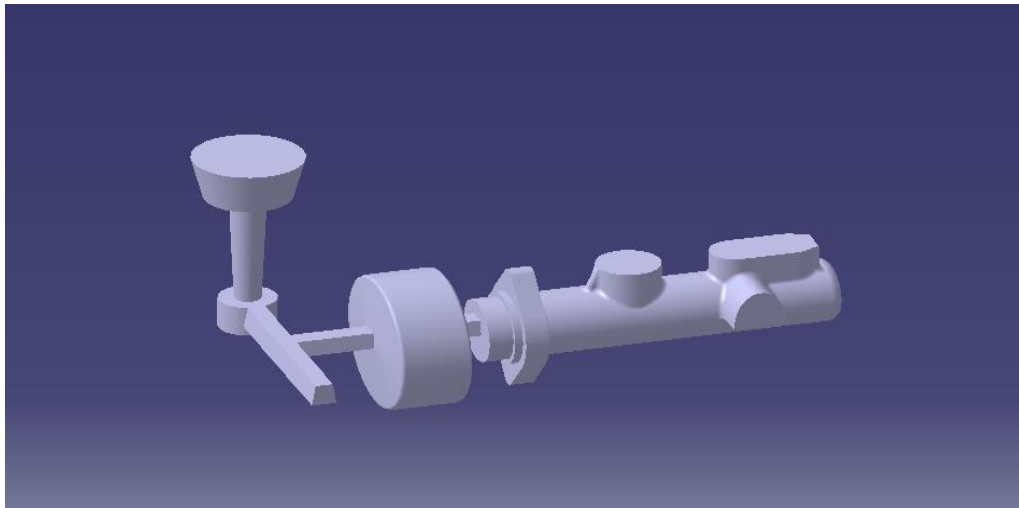


Figura 3.26 Diseño 1 I (mazarota cerrada horizontal).

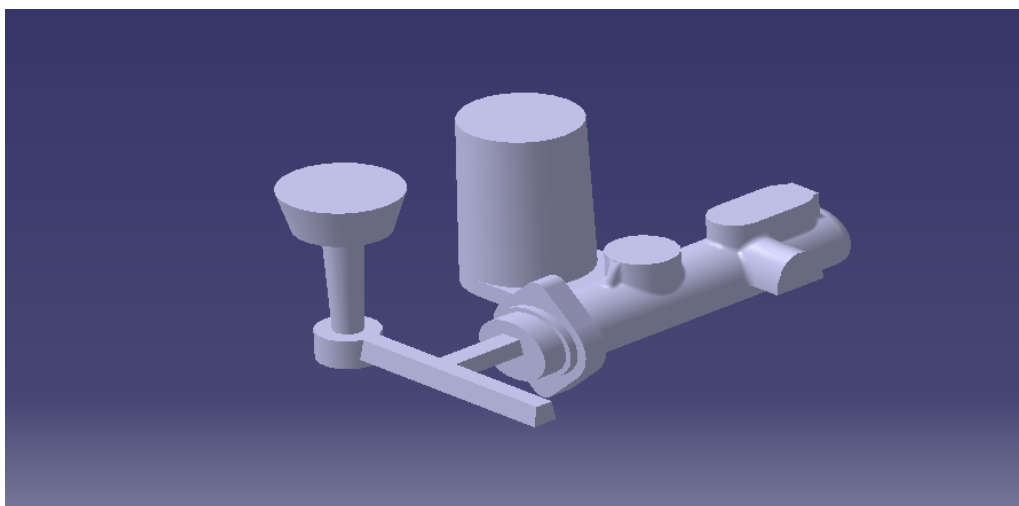


Figura 3.27 Diseño 1 J (mazarota abierta en brida).

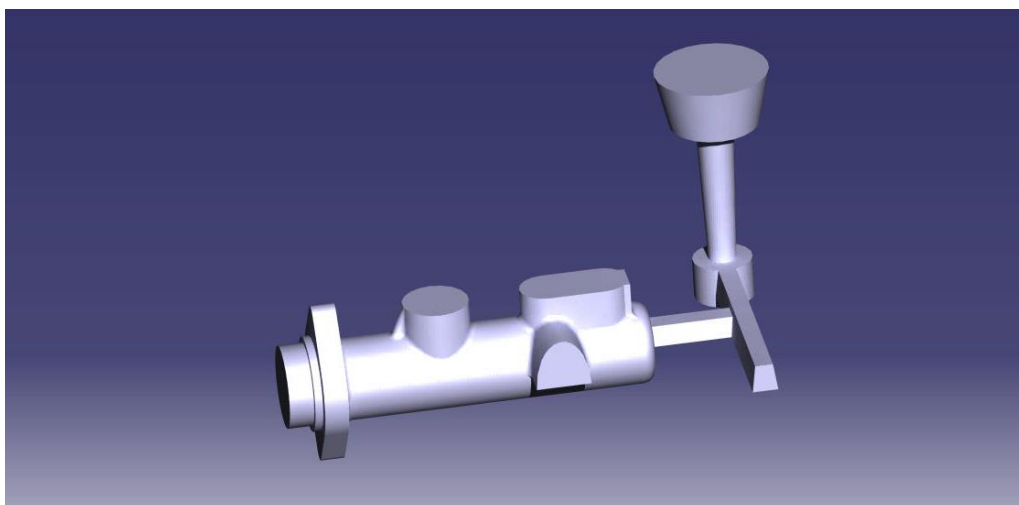


Figura 3.28 Diseño 2 A (sin mazarota).

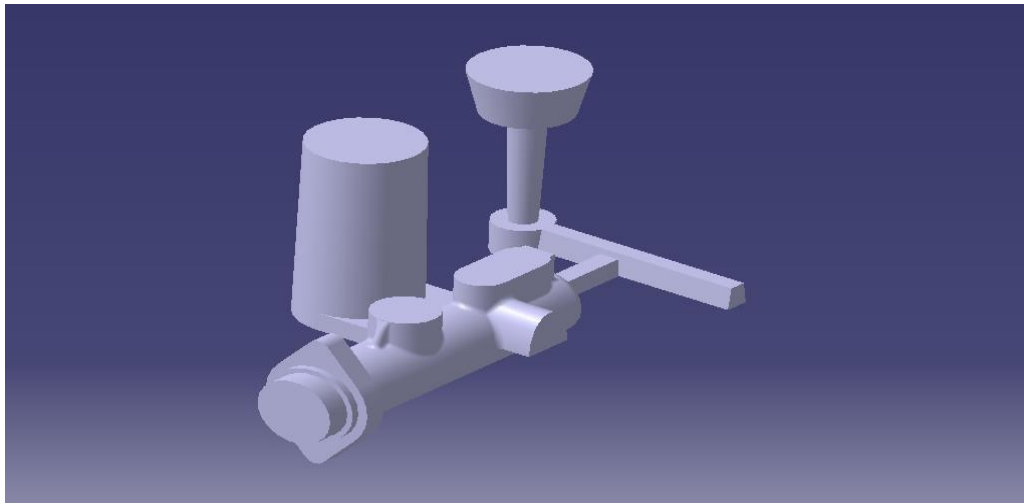


Figura 3.29 Diseño 2 B (mazarota abierta en DA).

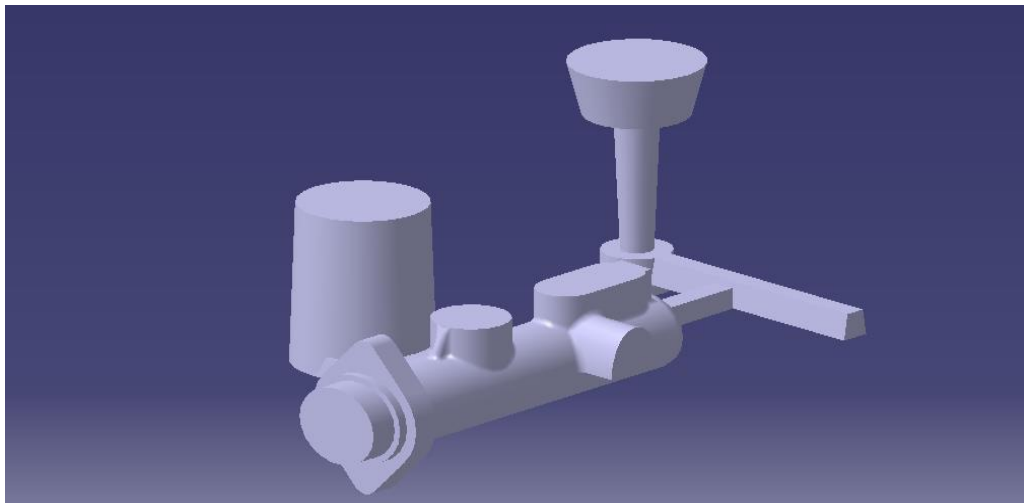


Figura 3.30 Diseño 2 C (mazarota abierta en brida).

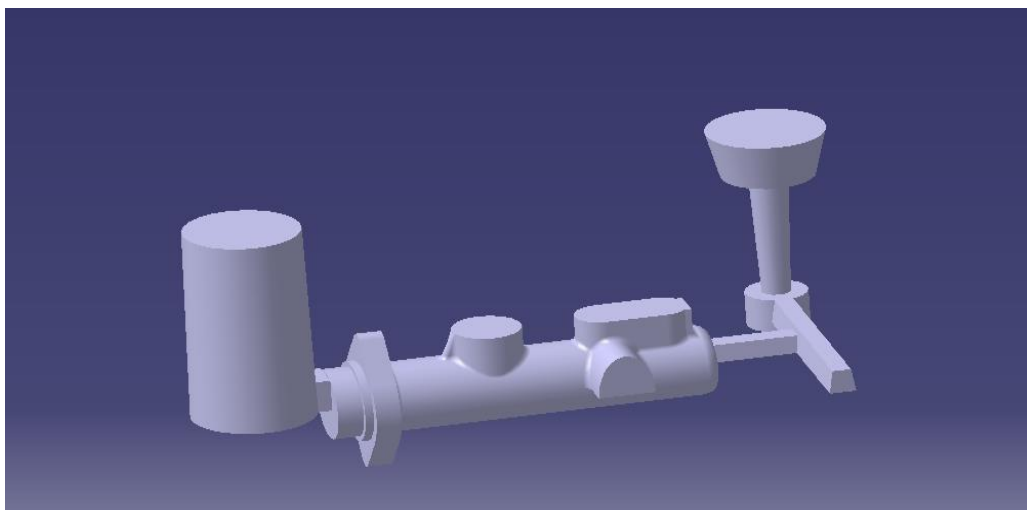


Figura 3.31 Diseño 2 D (mazarota abierta opuesta al llenado).

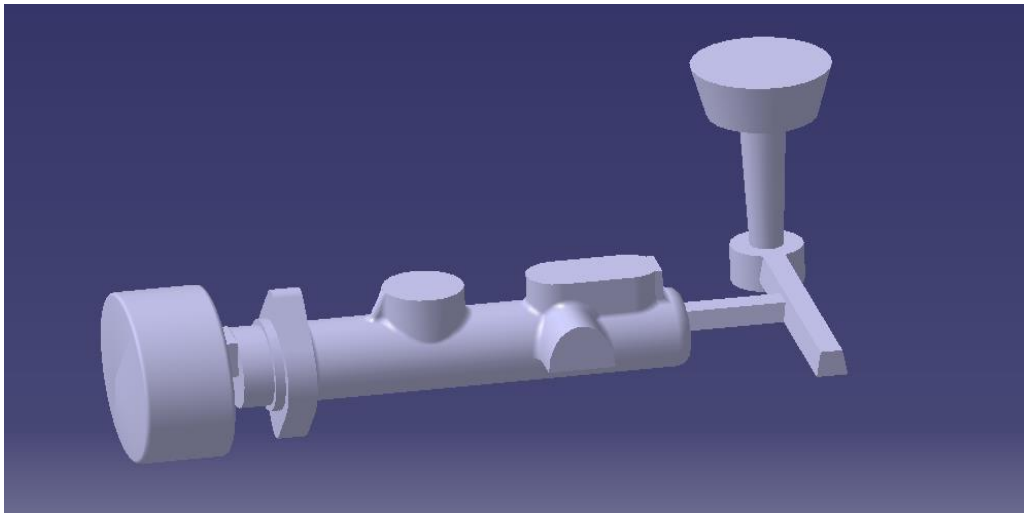


Figura 3.32 Diseño 2 E (mazarota cerrada horizontal opuesta al llenado).

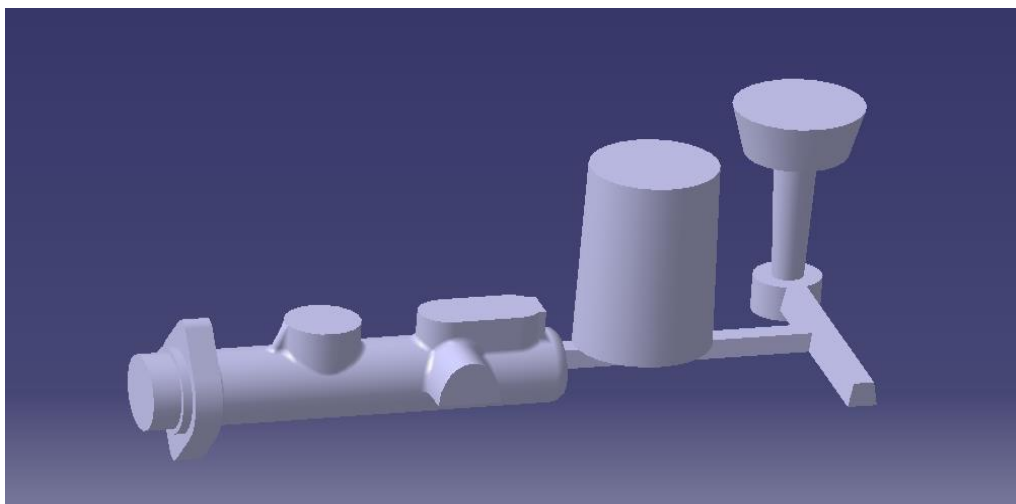


Figura 3.33 Diseño 2 F (mazarota abierta en canal de colada).

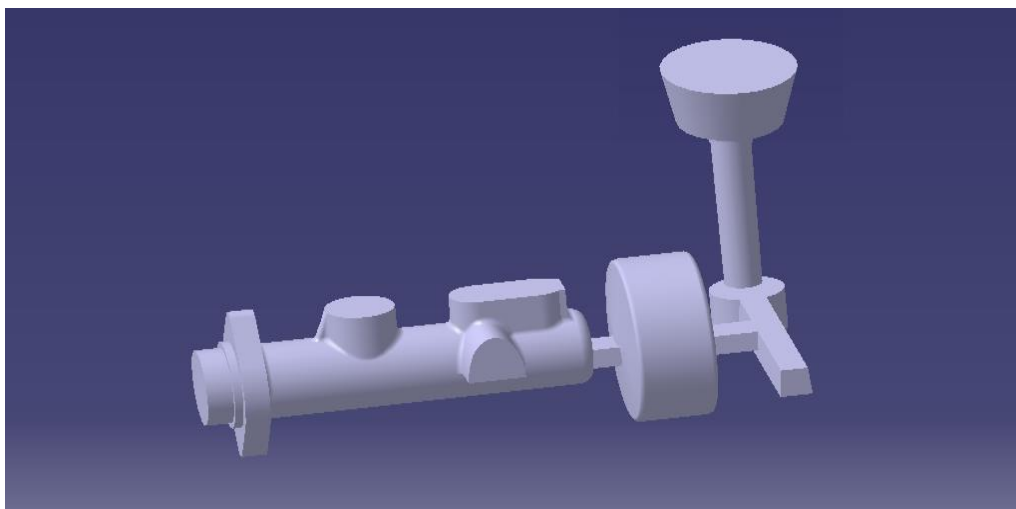


Figura 3.34 Diseño 2 G (mazarota cerrada en canal de colada).

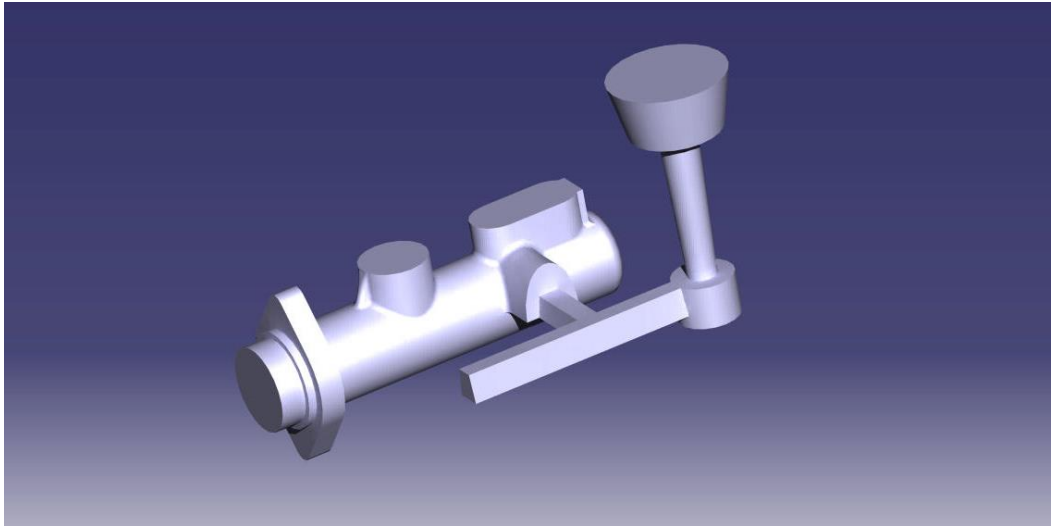


Figura 3.35 Diseño 3 A (sin mazarota).

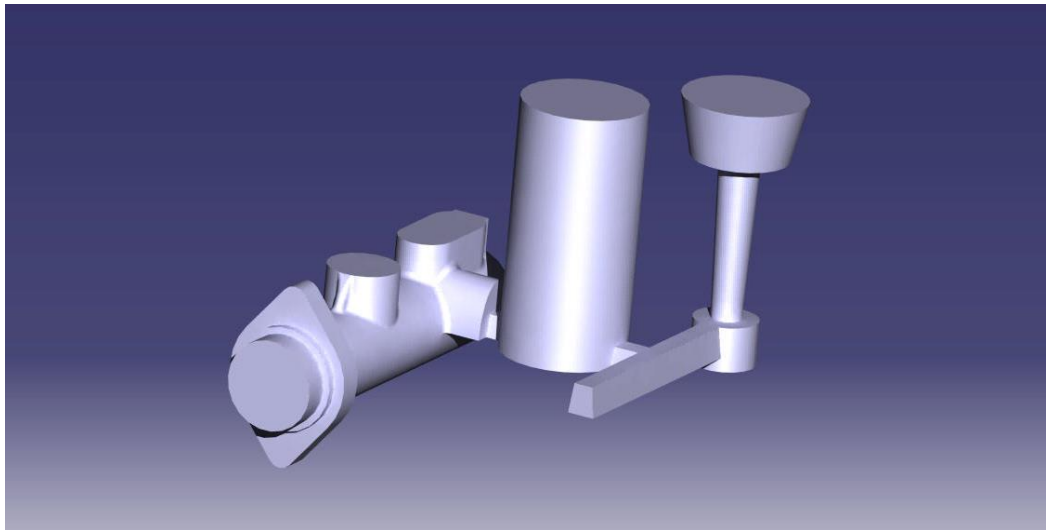


Figura 3.36 Diseño 3 B (mazarota abierta en canal de alimentación).

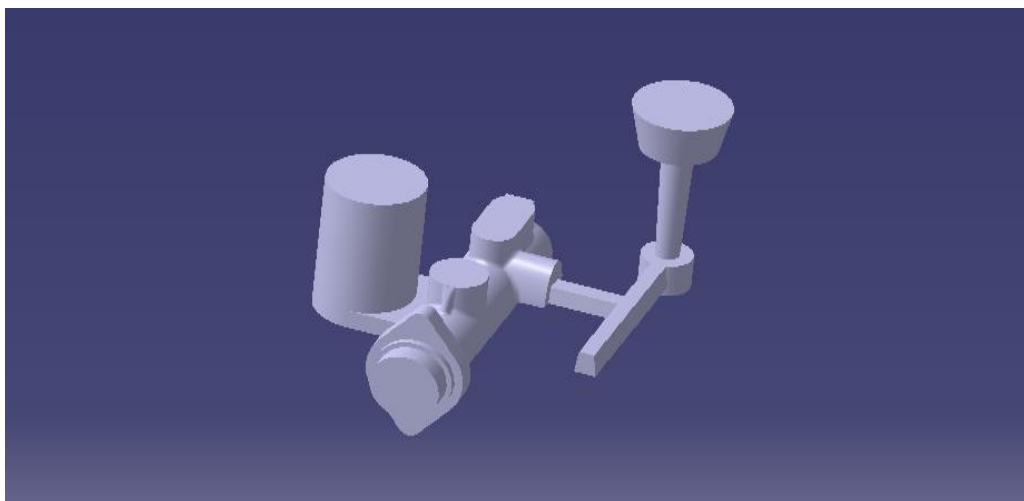


Figura 3.37 Diseño 3 C (mazarota abierta en DA).

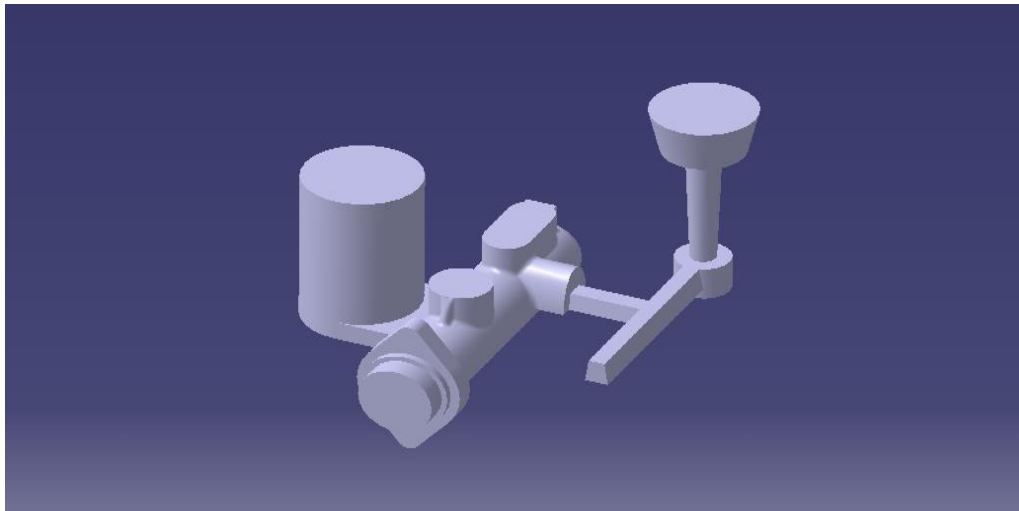


Figura 3.38 Diseño 3 C (mazarota abierta en DA).

En la tabla 3.6 se muestra un breve resumen de los casos anteriormente descritos marcando para cada uno si se ha realizado implementación experimental y/o simulación.

Tabla 3.7 Casos en estudio.

Caso	EXPERIMENTAL	SIMULACIÓN
1A	X	X
1B	X	X
1C	X	X
1D	X	X
1E	X	X
1F	X	X
1G	X	X
1H		X
1I		X
1J		X
2A	X	X
2B		X
2C		X
2D		X
2E		X
2F		X
2G		X
3A	X	X
3B	X	X
3C		X
3D		X