

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

“Sustitución de partes y piezas mediante proceso de fundición:

Industria Automotriz - caso de estudio de un cigüeñal”

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN**

Materia Integradora

Previo la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentado por:

Leónidas Isaac Mora Pazán

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2017

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Jehová por la fortaleza y perseverancia que me ha otorgado, a mis padres, esposa e hija porque han sido un pilar fundamental en toda mi carrera, y me han acompañado durante esta etapa de logros de mi vida.

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Leónidas Isaac Mora Pazán

Jorge Luis Amaya Rivas, PhD.

y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.



Leónidas Isaac Mora Pazán

Autor



PhD. Jorge Luis Amaya Rivas

Tutor

## RESUMEN

El aumento de la matriz productiva ha generado oportunidades en el mercado nacional, permitiendo buscar ideas para ayudar al sector industrial. La presente tesis tiene como objetivo estudiar el rediseño de un elemento mecánico como el cigüeñal; el cual será elaborado mediante un proceso de fundición por gravedad utilizando molde de arena verde, con hierro dúctil como material base. La posibilidad de fabricación nacional abriría un mercado de autopartes que presentará alternativas de calidad estandarizadas a los consumidores, con la intención de disminuir el volumen de importaciones de estos elementos mecánicos.

Para elaborar una pieza, como el cigüeñal por medio de fundición se necesitó de un modelo patrón, del cual se obtuvieron las medidas necesarias mediante un análisis de ingeniería inversa, para diseñar el molde del elemento mecánico y lograr la simulación de la solidificación total del material fundido. Con un análisis químico realizado al modelo patrón, se identificó el porcentaje de los elementos aleantes que sirvieron de base para la posterior optimización del cigüeñal. Hecho este análisis y con la ayuda del diagrama hierro-carbono, se estableció la clase de hierro dúctil, dando como resultado una fundición de tipo hipo-eutéctica.

Al conocer los patrones iniciales se procedió a simular bajo estas condiciones el proceso de fundición con la ayuda del software MAGMA, del cual se obtuvo un cigüeñal con ciertas deficiencias, dando la oportunidad de optimizar su composición y obtener un mínimo de defectos pero con mejores propiedades mecánicas. Una vez obtenido estos resultados, se analizaron las curvas de solidificación pertenecientes a las simulaciones hechas y se verificó en qué medida variaron los resultados totales.

De todo lo expuesto, se pudo constatar que el incremento del porcentaje de carbono equivalente, presentó mejores propiedades mecánicas y eliminó los defectos de porosidades así como los puntos calientes en la pieza fundida.

Palabras Clave: simulación, carbono equivalente, fundición. Hierro dúctil, importación, software MAGMA, cigüeñal, porosidades, puntos calientes.

## **ABSTRACT**

*The increase of the productive matrix has generated opportunities in the national market, allowing to look for ideas to help the industrial sector. The present thesis aims to study the redesign of a mechanical element such as the crankshaft; which will be made by a gravity casting process using green sand mold, with ductile iron as the base material. The possibility of national manufacture would open a market for auto parts that will present standardized quality alternatives to consumers, with the intention of reducing the volume of imports of these mechanical elements.*

*To produce a part such as the crankshaft by means of casting, a standard model was needed, from which the necessary measurements were obtained by reverse engineering analysis, to design the mold of the mechanical element and to achieve the simulation of the total solidification of the material molten. With a chemical analysis performed on the standard model, the percentage of the alloying elements served as the basis for the subsequent optimization of the crankshaft identified. With this analysis and with the help of the iron-carbon diagram, the ductile iron class was established, resulting in a hypo-eutectic type cast iron.*

*Known the initial patterns, we proceeded to simulate under these conditions the casting process with the help of MAGMA software, from which a crankshaft was obtained with certain deficiencies, giving the opportunity to optimize its composition and obtain a minimum of defects but with better mechanical properties. Once these results were obtained, the solidification curves belonging to the simulations were analyzed and verified to what extent the total results varied.*

*From all of the foregoing, it was found that increasing the percentage of equivalent carbon, obtained better mechanical properties and they were eliminated defects of porosities as well as hot spots in the casting.*

*Keywords: simulation, carbon equivalent, casting, ductile iron, import, MAGMA software, crankshaft, porosities, hot spots.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	I
ABSTRACT .....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS .....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	X
ÍNDICE DE PLANOS .....	XII
CAPÍTULO 1 .....	1
1. Introducción.....	1
1.1 Descripción del problema.....	2
1.2 Objetivos .....	3
1.2.1 Objetivo General .....	3
1.2.2 Objetivos Específicos.....	3
1.3 Marco teórico .....	3
1.3.1 Mercado de piezas y partes automotrices en el Ecuador.....	3
1.3.2 Niveles de importación de piezas automotrices .....	4
1.3.3 Procesos de manufactura .....	5
1.3.4 Características del cigüeñal .....	21
1.3.5 Descripción del software de fundición.....	22
CAPÍTULO 2 .....	23
2. Metodología del Diseño .....	23
2.1 Selección del elemento mecánico.....	23
2.2 Selección del material .....	23

2.3 Análisis del material seleccionado .....	25
2.4 Características del material seleccionado.....	30
2.5 Selección del molde de fundición.....	33
2.6 Metodología de diseño .....	36
2.6.1 Representación gráfica de la metodología de diseño .....	36
2.7 Diseño de forma.....	37
CAPÍTULO 3 .....	38
3. Condiciones de diseño.....	38
3.1 Diseño del molde .....	38
3.2 Diseño de la mazarota .....	42
3.3 Diseño del sistema de vertido .....	44
3.3.1 Potencia requerida en la fundición .....	44
3.3.2 Composición de la colada .....	46
3.3.3 Diseño del Bebedero.....	47
3.3.4 Tiempo de llenado.....	49
3.3.5 Simulación del proceso de fundición.....	51
3.3.6 Análisis de costos .....	57
3.3.7 Cronograma de diseño del cigüeñal.....	59
CAPÍTULO 4 .....	61
4. Discusión y Conclusiones .....	61
4.1 Conclusiones.....	62
4.2 Recomendaciones .....	63
BIBLIOGRAFÍA .....	64
5. Bibliografía .....	64
ANEXOS .....	66

## **ABREVIATURAS**

ASTM	American Society for Testing and Materials
ASM	Handbook of Materials
AFS	American Foundries Society
BCE	Banco Nacional del Ecuador
CIF	Cost, Insurance and Freight
COMEX	Ministerio de Comercio Exterior
FOB	Free on board
INEC	Instituto Nacional de Censo Económico
RUC	Registro Único Contribuyente



## SIMBOLOGÍA

m	Metro
mm	Milímetro
mm <sup>2</sup>	Milímetro Cuadrado
mm <sup>3</sup>	Milímetro Cúbico
cm	Centímetro
cm <sup>2</sup>	Centímetro cuadrado
cm <sup>3</sup>	Centímetro cúbico
cm/s	Velocidad
cm <sup>3</sup> /s	Caudal
Cu	Cobre
Ni	Níquel
C	Carbono
Mg	Magnesio
Mn	Manganeso
P	Fósforo
S	Azufre
SiO <sub>2</sub>	Óxido de silicio
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de hierro
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Silicato de sodio
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
d	Diámetro
h	Altura
Cal	Calorías
J	Joule
MJ	Mega Joule

W	Watt
KW	Kilowatt
°C	Grado Centígrado
°F	Grado Fahrenheit
°K	Grado Kelvin
KPa	Kilo Pascal
MPa	Mega Pascal
min	minuto
s	segundo

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Distribución de actividades relacionadas al sector automotriz .....	4
Figura 1.2. Distribución provincial del sector automotriz en el Ecuador .....	5
Figura 1.3. Diagrama hierro-carbono .....	8
Figura 1.4. Diferente formas del grafito en los tipos de fundiciones.....	10
Figura 1.5. Caja de moldeo .....	15
Figura 1.6. Proceso de fundición por gravedad en moldes a) abierto .....	16
Figura 1.7. Tipos comunes de cuencos: a) cuenco grúa y b) cuenco para dos hombres .....	17
Figura 1.8. Partes del cigüeñal.....	21
Figura 1.9. Simulación de la presión del líquido vaciado con ayuda del software MAGMA .....	22
Figura 2.1. Microestructura de las fundiciones, fundición dúctil .....	25
Figura 2.2. Esfuerzo de tensión y límite de fluencia bajo la norma ASTM A536 para los distintos grados de fundición de hierro dúctil, con su respectivo pos-tratamientos térmico .....	29
Figura 2.3. Muestra de hierro dúctil con un aumento de 500x .....	32
Figura 2.4. Diagrama de flujo de la metodología del diseño .....	36
Figura 2.5. Diseño de forma propuesto para obtener el cigüeñal .....	37
Figura 3.1. Diseño de forma de la caja de moldeo en arena verde.....	38
Figura 3.2. Tipos de grano de arena .....	40
Figura 3.3. Diseño forma de la mazarota .....	44
Figura 3.4. Diseño de forma del bebedero .....	48
Figura 3.5. Resultado de la simulación optimizada (puntos calientes).....	52
Figura 3.6. Resultado de la simulación inicial (puntos calientes) .....	52
Figura 3.7. Resultado de la simulación optimizada (porosidad) .....	53
Figura 3.8. Resultado de la simulación inicial (porosidad) .....	53

Figura 3.9. Resultado de la simulación optimizada (Curva de solidificación total)	54
Figura 3.10. Resultado de la simulación inicial (Curva de solidificación total) .....	55
Figura 3.11. Cronograma para fabricación del cigüeñal.....	60

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Tipos de fundiciones comerciales .....	7
Tabla 1.2. Tipos de moldes usados en la fundición .....	13
Tabla 2.1. Propiedades mecánicas entre fundiciones y acero fundido para justificar la elección correcta del material.....	24
Tabla 2.2. Composición de las fundiciones de hierro .....	26
Tabla 2.3. Porcentaje de encogimiento de las principales fundiciones .....	27
Tabla 2.4. Uso general de los distintos tipos de fundición nodular.....	28
Tabla 2.5. Análisis químico de la muestra de cigüeñal .....	30
Tabla 2.6. Matriz de ponderación.....	34
Tabla 2.7. Matriz de decisión para las alternativas propuestas.....	35
Tabla 3.1. Clasificación de la arena de acuerdo a su finura según AFS .....	40
Tabla 3.2. Propiedades de la arena para fundición.....	41
Tabla 3.3. Conductancia de los elementos en contacto.....	41
Tabla 3.4. Características recomendadas de arena de molde para fundición piezas de hierro de tamaño medio .....	42
Tabla 3.5. Resultado del volumen requerido para la mazarota.....	43
Tabla 3.6. Resultado del calor total que se requiere para subir la temperatura del metal a la temperatura que se vacía.....	45
Tabla 3.7. Resultado del porcentaje de carbono equivalente para la muestra analizada de cigüeñal .....	46
Tabla 3.8. Resultados de las dimensiones del bebedero.....	47
Tabla 3.9. Datos de operación del bebedero .....	48
Tabla 3.10.Resultado de la velocidad de llenado.....	49
Tabla 3.11.Resultado del caudal del metal fundido.....	49
Tabla 3.12.Resultado del tiempo de llenado .....	50
Tabla 3.13. Elementos de la colada que se incrementaron para la fundición .....	51

Tabla 3.14. Costos directos.....	57
Tabla 3.15. Costos indirectos.....	58
Tabla 3.16. Costo total de fabricación.....	58

## ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1 Esquema del conjunto
- PLANO 2 Dimensiones del molde de fundición
- PLANO 3 Dimensiones de la mazarota
- PLANO 4 Dimensiones del bebedero
- PLANO 5 Dimensiones del cigüeñal

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

Este documento se basa en una alternativa de rediseño usando la fundición como parámetro de fabricación, con un enfoque a la re-ingeniería de un elemento mecánico conocido como cigüeñal, el cual es una pieza automotriz fundamental en todo tipo de maquinaria tanto industrial como comercial.

El capítulo uno define el problema, siendo la mejora y fabricación nacional de un elemento mecánico conocido como cigüeñal, la solución propuesta en contraste a la reducción de importaciones de dicho elemento, colaborando con el sector nacional de autopartes y generando un mercado, enfocado al aumento de la matriz productiva. El marco teórico describe los niveles de importación del cigüeñal en los años 2015 y 2016, mientras que los términos relacionados a la fabricación se detallan en el proceso de manufactura, el cual describe a la fundición por gravedad con molde de arena verde, y a los factores requeridos para llevar a cabo este método. El cigüeñal como pieza de importancia se explica en este contexto, como también la descripción del software de fundición MAGMA a utilizarse.

El capítulo dos describe el material de fabricación para la pieza mecánica, la selección del hierro dúctil presentó las mejores características mecánicas en comparación al hierro gris y al acero fundido. Usando el grado 80-55-06 como material de elaboración con referencia del libro de materiales ASM, se compara las bondades de este material versus los grados de fundición con tratamientos térmicos. Se elabora la matriz de decisión para la selección del molde de fundición y se define la metodología de diseño, con el respectivo diseño de forma.

Mientras que el capítulo tres, detalla cálculos para el diseño del molde removible, tipo de colada, bebedero y mazarota asociados a la fundición de hierro dúctil. A su vez se describe los resultados en función de las mejoras realizadas al metal en su composición, de los cuales se obtienen datos de la simulación como porosidades, puntos calientes, tiempos de solidificación, microestructura y propiedades mecánicas del cigüeñal, usando el software de fundición MAGMA. Los costos asociados a la



fabricación del cigüeñal, mencionados en esta sección se especifican en un valor de \$562 por unidad. Por último, conclusiones y recomendaciones se detallan en el capítulo cuatro.

### **1.1 Descripción del problema**

El gobierno nacional ha establecido resoluciones que han afectado directamente al sector automotriz empezando por los cupos de importación de los vehículos, autopartes o repuestos, normas técnicas e incremento de aranceles pertenecientes a los vehículos lo que ha generado en el Ecuador una grave problemática para la adquisición de productos exclusivamente fabricados en el exterior.

La resolución 049-2014 del Ministerio de Comercio Exterior (Comex), del año 2015 establece la reducción cuantitativa anual de importación por partes y piezas de vehículos y automotores por unidades y por valor, representando casi el 53%, lo que afecta tanto al consumo como al dinamismo de la industria ecuatoriana; pero a su vez, genera oportunidades para los emprendedores nacionales por medio de innovación de ideas que contrarresten el uso de productos de fabricación exterior buscando maneras de disminuir dichas importaciones y colaborar con el sector automotriz, ofreciendo alternativas de calidad que cumplan con los estándares internacionales de diseño y manufactura colaborando a su vez con la matriz productiva.

Por lo tanto, siguiendo un esquema de ingeniería inversa, aplicada al diseño mecánico por fundición, se desea mejorar las características mecánicas de un cigüeñal al ser una pieza de alta comercialización en el país. Y a su vez, se describirá el proceso de manufactura adecuado, al desarrollo de esta pieza mecánica, con el objetivo de competir en el mercado nacional con una marca propia, de buena calidad y asequible en precio logrando un acceso a la industria de fabricación de repuestos automotrices.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Determinar el proceso y las características de manufactura de un cigüeñal optimizado enfocado en la sustitución de partes y piezas para reducción de importaciones.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Rediseñar la composición del material, en la manufactura del cigüeñal con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas.
- Describir el proceso de fundición con molde de arena verde para la fabricación del cigüeñal.
- Verificar las características metalográficas del modelo patrón.

## **1.3 Marco teórico**

En la presente sección se detallarán aspectos teóricos para entender los factores y procesos involucrados en la elaboración de cigüeñales.

### **1.3.1 Mercado de piezas y partes automotrices en el Ecuador**

Las actividades relacionadas con el sector automotriz son comercio, manufactura y servicios, representados en la Figura 1.1.

De acuerdo a la información del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos del año 2012 (INEC) existen 29.068 establecimientos económicos dedicados a actividades de comercio automotriz, de los que el 70% corresponde a establecimientos que realizan mantenimiento y reparación de vehículos automotores, mientras que el 30 % restante se dedica al comercio de partes, piezas y accesorios para vehículos, venta al por menor de combustible y venta de vehículos. (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2012)



**Figura 1.1. Distribución de actividades relacionadas al sector automotriz**

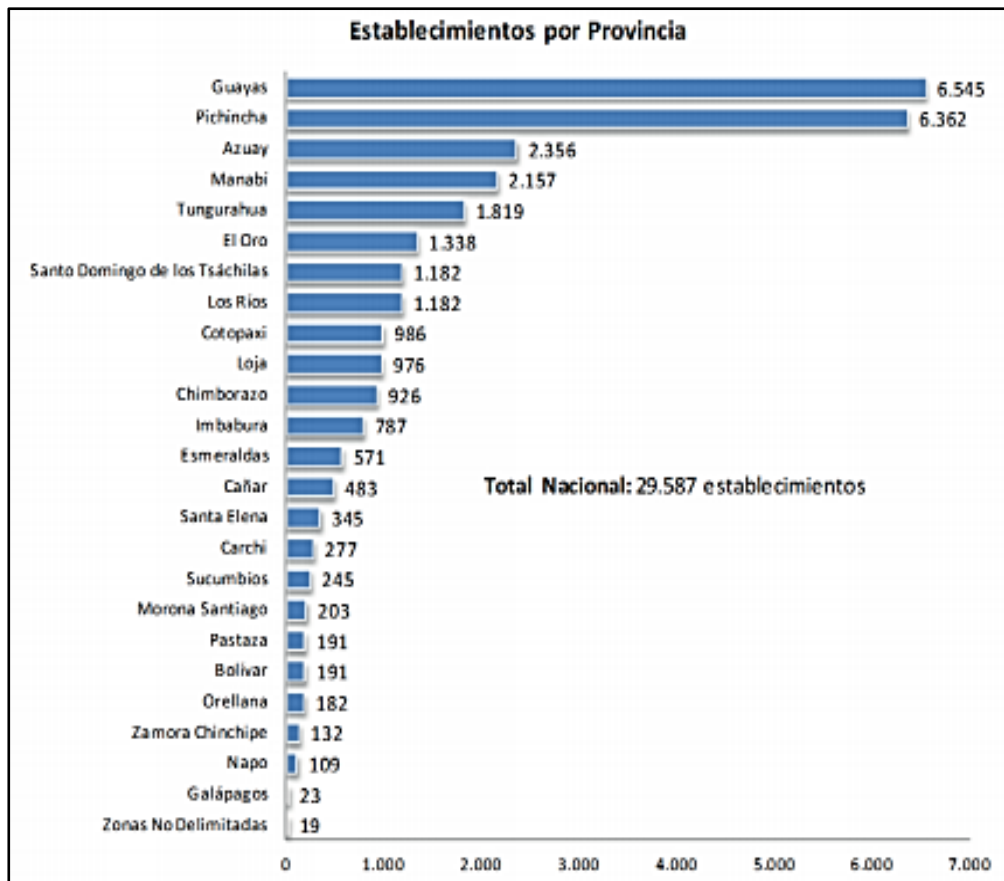
Fuente: Censo Nacional Económico 2012, INEC

### 1.3.2 Niveles de importación de piezas automotrices

Según el Análisis Sectorial Automotriz y Autopartes (2011), el mayor número de establecimientos de repuestos automotrices se encuentra en Guayas 27%, seguido de Pichincha 17%, Azuay 8.1%, Manabí 7.5% y Tungurahua 4.5%, tal como se muestra en la Figura 1.2.

Las importaciones de productos no petroleros bajo el código de subpartida 8483109100, correspondiente a cigüeñales, en el periodo de enero a septiembre del presente año, se contabilizaron alrededor de 150 empresas o Registro Único de Contribuyente (RUC), que realizaron el pedido de dicho elemento mecánico (Banco Cental del Ecuador-BCE, 2010).

En el Anexo A se encuentra la información de los principales países exportadores de cigüeñales para los periodos anuales 2015 y 2016 del BCE, el peso neto de importaciones, los valores en miles de dólares del Libre a bordo (FOB) y Costo, seguro y flete (CIF), dichos términos se utilizan en comercio internacional, en las operaciones de compra y venta en transacciones vía marítima.



**Figura 1.2. Distribución provincial del sector automotriz en el Ecuador**

Fuente: Censo Nacional Económico 2010, INEC

### 1.3.3 Procesos de manufactura

Los procesos de manufactura tienen como objetivo modificar o transformar la materia prima en productos finales con un valor agregado; por tanto, para la elaboración de cigüeñales, se deben considerar aspectos importantes como la selección del material, la manufactura adecuada y posterior tratamiento. Las alternativas para la fabricación de cigüeñales más conocidos son la fundición, el maquinado y el forjado. Si la pieza se realizara por procesos tales como el forjado y la fundición, se necesitará un maquinado posterior para darle un acabado final superior. (Groover, 2007).

#### 1.3.3.1 Fundición

Proceso de fabricación de piezas metálicas o plásticas, en donde el material de trabajo se funde y vierte en cavidades o moldes para obtener una pieza definida después de solidificarse. (Gardey, 2010). La fundición

en arena de moldeo es uno de los procesos más comunes, ya que la propiedad refractaria que posee la arena más la adición de arcilla sirve de elemento permeable y posibilita la evacuación de los gases que se forman cuando se vierte la colada en el molde.

Los tipos de fundición más usados (Groover, 2007), son:

- Fundición gris
- Fundición dúctil o nodular
- Fundición blanca
- Fundición maleable

Dichos tipos de fundiciones surgen de factores tales como el porcentaje de carbono y elementos aleantes, velocidad de enfriamiento y tratamientos post-fundición así como del tipo de forma que adquiere el grafito en su microestructura. Sus principales características y usos se presentan en la Tabla 1.1.

**Tabla 1.1. Tipos de fundiciones comerciales**

<b>Criterio</b>	<b>Fundición Gris</b>	<b>Fundición dúctil</b>	<b>Fundición blanca</b>	<b>Fundición maleable</b>
<b>Forma del grafito</b>	Carbono adquiere forma de escamas o láminas de grafito	El carbono se transforma en grafito en forma esferoidal	Todo el carbono se encuentra formando cementita, microestructura de color blanco	Se forma a partir del tratamiento térmico de la fundición blanca por descomposición de la cementita en grafito
<b>Porcentaje de carbono</b>	Mayor porcentaje de carbono en su composición, de 2 % hasta 4%	Porcentaje de carbono varía entre 3.5%-3.8%	Menor fluidez que las fundiciones gris y dúctil respectivamente. Posee entre 1.8 %-3.5% de carbono	Posee un menor porcentaje de carbono, menor al 3%
<b>Características y propiedades mecánicas</b>	Facilidad de maquinabilidad y buena fluidez para el colado	Elevada ductilidad, buena maquinabilidad y fluidez para la colada	Presentan gran dureza y fragilidad, además poseen gran resistencia al desgaste y la abrasión	Alta resistencia al desgaste
	Estructura quebradiza y de baja resistencia a la tracción	Excelente resistencia y tenacidad	Limitaciones en el campo de la ingeniería debido a su fragilidad y falta de maquinabilidad	Estructura perlítica o ferrítica dependiendo de la velocidad de enfriamiento desde el punto crítico
<b>Aplicaciones</b>	Se usa en bastidores, bloques de motor y discos de frenos, etc.	Se usa en cigüeñales, arboles de leva y válvulas	Se emplean en casos en donde la ductilidad no es requisito indispensable, principal uso como base de la fundición maleable	Su uso se presenta en la producción de maquinaria industrial

Fuente: Fundiciones, G. Castro, (2009)

### 1.3.3.2 Clasificación de las fundiciones

Las fundiciones son aleaciones de hierro (Fe) y Carbono (C), en donde el contenido de carbono varía entre 2-6 % (Diagrama hierro-carbono), también contienen elementos aleantes como el magnesio (Mg), Silicio (Si), Azufre (S) y Fosforo (P).

Pero las fundiciones al estar constituidas por una extensa familia de materiales férreos, tienen como característica común la solidificación siguiendo la reacción eutéctica (transformación de solidificación completa del líquido a 1147 °C) y se interpretan de mejor manera mediante el diagrama hierro-carbono, tal como se muestra en la Figura 1.3, el cual representa dos diagramas tanto el meta estable hierro-carbono así como el estable hierro-grafito. En donde el porcentaje de carbono del 2% representa el inicio de las fundiciones, los puntos E-F describen la línea eutéctica y el punto C indica la transformación eutéctica es decir la transformación de hierro ( $\gamma$ ) en ledeburita. (Educativa Catedu, 2010).

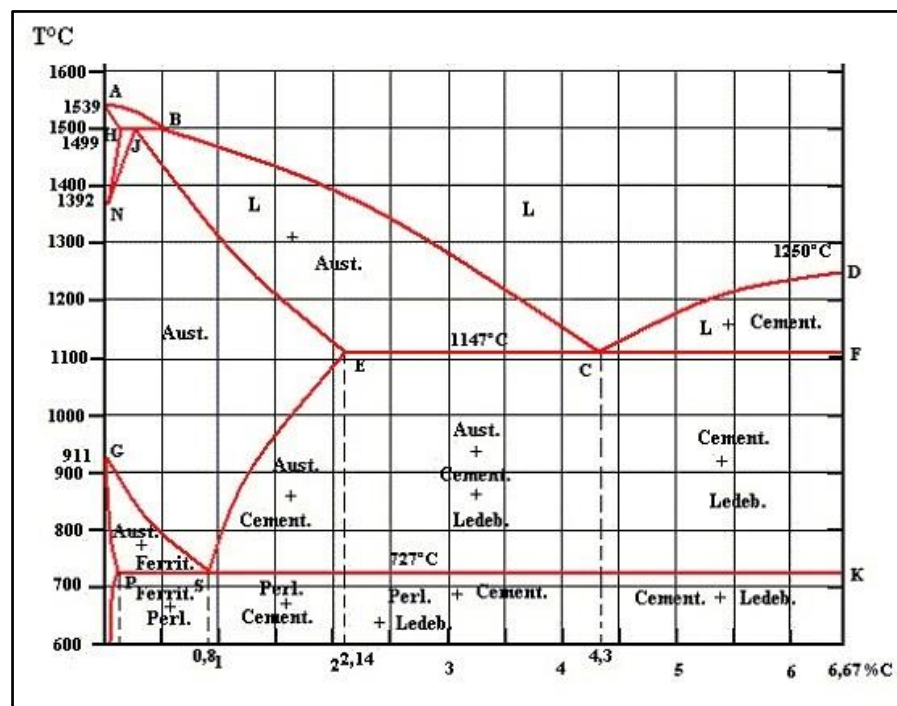


Figura 1.3. Diagrama hierro-carbono

Fuente: Ingemecánica, Clasificación de las fundiciones, (2012)

La familia de las fundiciones se dividen en diferentes tipos que dependen de factores como: composición química, velocidad de enfriamiento y solidificación así como del posterior tratamiento térmico siendo estas: fundición gris, fundición blanca, fundición maleable y fundición nodular (Tabla 1.1).

El contenido de carbono en cualquiera de estos tipos de fundición permitirá mejorar tanto la fluidez como la concentración del grafito, el silicio promoverá la ferrita y mejorará la elongación con un buena resistencia al impacto, mientras que el fósforo al ser grafitizante mejorará la dureza. (GIETECH, 2008)

De forma experimental, se ha identificado el rol que cumple cada uno de estos elementos aleantes sobre la fundición dúctil en particular. Para esto es necesario calcular el porcentaje de carbono equivalente (%CE). (Facultad Regional Rosario, 2015). El cual se presenta en la ecuación (1).

$$\%CE = \%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{3} \quad \text{Ec. ( 1 )}$$

En donde:

%C= Porcentaje de carbono por peso total del material

%Si= Porcentaje de Silicio por peso total del material

%P= Porcentaje de Fósforo por peso total del material

Este valor permite evaluar el efecto que tiene el porcentaje de Si y en menor medida el P sobre el punto eutéctico como referencia en las fundiciones nodulares.

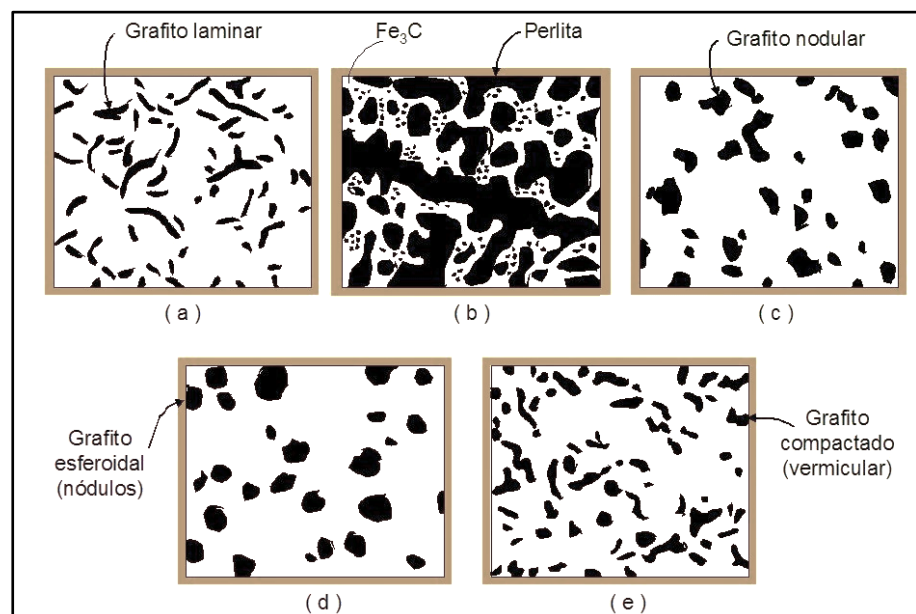
Una vez obtenido este valor, se conocerá a qué tipo de fundición, usando el diagrama hierro-carbono pertenece. Entre estos tipos existen



composición hipo-eutéctica (%CE<4.3), eutéctica (%CE=4.3) e hiper-eutéctica (%CE>4.3).

Las características primordiales según los tipos de composición mencionados, se basan en la matriz que se forma, pudiendo ser estos constituyentes perlita, ferrita y cementita. Además, existen ciertos elementos químicos que favorecen en la aparición de estos constituyentes tales como son: Silicio, Cobre, Aluminio, Estaño o Fósforo. (E-educativa Catedu, 2010).

Por lo tanto, enfriamientos lentos favorecen a la formación de carbono como grafitos, mientras un enfriamiento rápido incrementa el número de carburos. Tal como se muestra en la Figura 1.4, en donde la forma de grafito laminar forma la fundición gris, la disolución del hierro o carburos indica el origen de la cementita y la perlita en la fundición blanca, mientras que la forma del grafito en nódulos atruchados representa a la fundición maleable, siendo el grafito esferoidal la fundición nodular y el grafito compactado la fundición vermicular. (Facultad Regional Rosario, 2015).



**Figura 1.4. Diferente formas del grafito en los tipos de fundiciones**

Fuente: UPV, materiales, (2013)

Los términos usados en el diagrama hierro-carbono para cada cambio de estructura (E-ducativa Catedu, 2010), son:

- Cementita o carburo de hierro, es un compuesto duro y a su vez frágil, con mínima resistencia tensil pero alta resistencia a la compresión siendo la estructura más dura en el diagrama contiene 6.67% de carbono en peso y su fórmula química es  $\text{Fe}_3\text{C}$ .
- Austenita ( $\gamma$ ), nombre de la solución que generalmente no es estable a temperatura ambiente, es una solución sólida intersticial de carbono disuelto en hierro, siendo su solubilidad máxima en 2% de C.
- Ledeburita, es una mezcla de austenita y cementita que se forma a temperatura eutéctica con un contenido de 4.3% de C.
- Ferrita ( $\alpha$ ), solución sólida intersticial de una pequeña porción de carbón disuelto en hierro, tiene solubilidad máxima a 0.025% de C en temperatura eutectoide, disolviéndose a temperatura ambiente a 0.008% de C.
- Perlita, es la mezcla eutectoide que contiene 0.8% de C y se forma a temperatura lenta de enfriamiento, siendo una mezcla fina de tipo laminar de ferrita y cementita.

Mientras que los términos usados para definir las transformaciones por enfriamiento o solidificación (Mondelo, 2013), son:

- Fundición hipo-eutéctica, con un porcentaje de carbono equivalente menor al 4.33%, se destaca por estar formada de grandes cristales de perlita derivados en austenita primaria rodeados de cementita.
- Fundición eutéctica, con porcentaje de carbono equivalente al 4.33%, su matriz está formada por granos de cementita y perlita debido al enfriamiento lento de la ledeburita.
- Fundición hiper-eutéctica, con porcentaje de carbono equivalente mayor al 4.33%, con una matriz de cementita y

perlita en donde, se ha segregado mayores cantidades del constituyente, cementita.

### **1.3.3.3 Parámetros en el proceso de fundición**

Para llevar a cabo la fundición en arena se pueden usar dos métodos diferentes. Estos se clasifican en función del tipo de molde a usar, siendo molde removible o desechable, y molde permanente.

En el método empleando molde removible, la arena se comprime alrededor del modelo, el cual se extrae más tarde de la arena. La cavidad producida se alimenta con metal colado para crear la fundición. Mientras que el método usando moldes permanentes, está destinado a materiales de bajo punto de fusión, entre estos materiales están estaño, aluminio, zinc, plomo, cobre y aleaciones ferrosas pero con recubrimiento refractario en la cara interna del molde.

Para entender el proceso de fundición, se deben conocer los factores que son importantes para producir un buen modelo de fundición. (Academia de Manufactura, 2015)

Los principales factores son:

- Procedimiento de moldeo
- Tipos de arena (molde)
- Corazón
- Mazarota
- Caja de moldeo
- Colada
- Vertido y limpieza

#### **Procedimiento de moldeo**

El procedimiento de moldeo dependerá del material de molde a usar, el método más común consiste en usar arena para la fabricación del molde.

Los moldes para la fabricación de piezas fundidas se detallan a continuación en la Tabla 1.2.

**Tabla 1.2. Tipos de moldes usados en la fundición**

<b>Moldes de arena verde</b>	Consiste en fabricar moldes con arena húmeda la cual posee este color debido a que no se ha curado es decir, que no se ha endurecido por horno
<b>Moldes de arena seca</b>	Se fabrican con arena de moldeo común mezclada con algún tipo de aditivo. Estos moldes al ser vaciado mantienen su forma original y están libres de turbulencia del gas debido a su arena libre de humedad.
<b>Moldes de arcilla</b>	Su fabricación consiste en el uso de ladrillos o porciones de hierro que se compactan dándole la forma deseada, luego se dejan secar para que puedan resistir la presión del material al ser vertido.
<b>Moldes de CO<sub>2</sub></b>	Se usan con arena mezclada con silicato de sodio compacta alrededor del modelo. Cuando el gas de CO <sub>2</sub> es añadido al molde a presión, la mezcla se endurece.
<b>Moldes de metal</b>	Estos moldes se utilizan principalmente en la fabricación de fundiciones con bajo punto de fusión, estas piezas se obtienen de formas lisas lo que elimina el posterior maquinado.

Fuente: Fundiciones, (Castro, 2009)

Después de seleccionar el tipo de molde se debe conocer qué tipo de arena se usará para la fabricación del modelo, entre los tipos de arena existentes. (Castro, 2009)

**Arena sílice (SiO<sub>2</sub>):** Se encuentra de manera natural y es adecuada para propósitos de moldeo debido a su resistencia a altas temperaturas sin descomponerse, es una arena de bajo costo y se puede encontrar en variedad de tamaños y formas de grano. Pero carece de propiedades aglomerantes por lo tanto, se le adiciona del 7% al 16% de arcilla para su uso.

**Arenas naturales (semi-sintéticas):** Estas se forman por erosión de las rocas ígneas al mezclarse con arcilla adecuadamente, solo se necesita agregar agua para obtener una arena de moldeo para piezas fundidas de hierro y materiales no ferrosos. Pero la gran cantidad de materia orgánica impide que este material sea suficientemente refractario para su uso a elevadas temperaturas en metales y aleaciones con alto punto de fusión.

**Arenas de moldeo sintéticas:** Se componen de sílice de granos agudos para luego añadirle de 3% a 5% de arcilla, con este tipo de arenas se genera menor gas y requieren menos del 5 % de humedad para desarrollar una adecuada resistencia.

### **Mazarota**

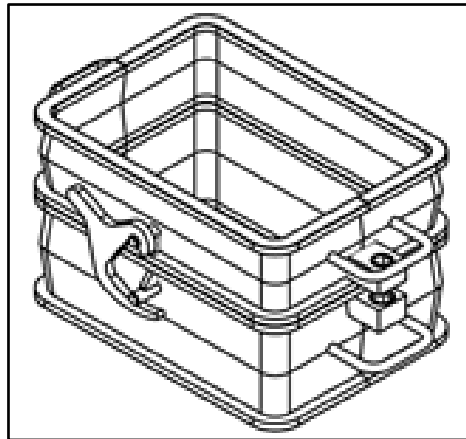
Se conoce como mazarota a los depósitos de metal fundido que alojan material para compensar la contracción y evitar la solidificación acelerada. La colada del metal se distribuye por toda la pieza alimentándose por medio de ésta durante la solidificación, evitando la formación de cavidades huecas. (Serrano, 2011)

### **Corazón**

En fundición, para logra piezas que tienen cavidades o huecos interiores se requiere del uso de corazones, los cuales se definen como proyecciones interiores que pueden ser hechas del mismo molde o de manera exterior y luego ser colocadas en el modelo. Se pueden formar tanto formas interiores como exteriores con el uso de los corazones pero existen dos tipos de arenas para la fabricación de los mismos: la arena verde, que se utiliza para dar forma en el mismo modelo y con la propia arena del molde mientras que la arena seca se fabrica exteriormente para ser colocada antes de cerrar el molde. (Groover, 2007)

### **Caja de moldeo**

Se conoce como caja de moldeo al marco con forma, ya sea rectangular o circular, del modelo a fundir y que contiene a todos los elementos citados anteriormente. Se pueden fabricar modelos en cajas de moldeo superior, en donde se colocan los respiraderos, mazarotas, vertederos y rebosaderos; así como cajas inferiores, las cuales sirven de base y se pueden colocar los canales de llenado o bebederos. La Figura 1.5 muestra un esquema de diseño de una caja de moldeo. (Aprendemos Tecnología, 2009)



**Figura 1.5. Caja de moldeo**

Fuente: *Fabricación de cajas de moldeo*, Remo Speroni, (2014)

### **Colada**

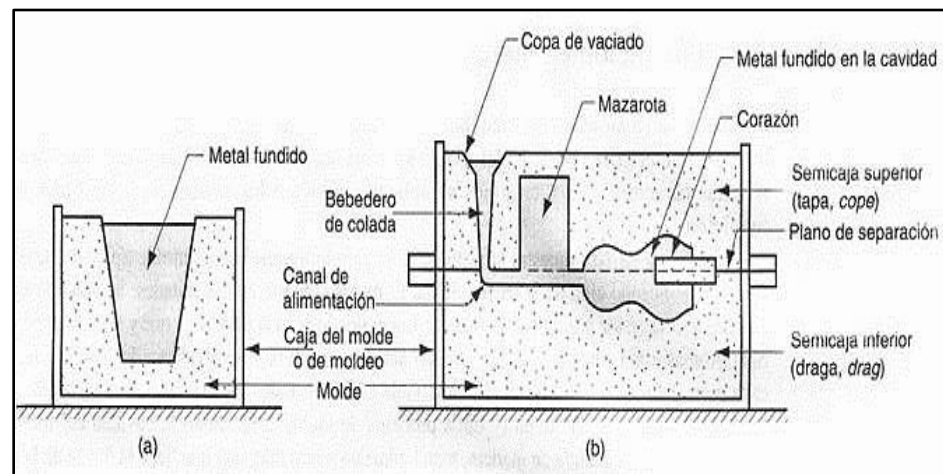
Para lograr una operación de fundido, el metal debe calentarse a una temperatura más elevada que su punto de fusión para luego verterse en la cavidad del molde para que se solidifique.

La porosidad se convierte en un factor crítico entre las fallas más comunes en los procesos de fundición debido a esto se buscan maneras para introducir el material colado dentro de los diversos tipos de moldes, la fundición por gravedad es la técnica usada comúnmente, gracias a la facilidad que brinda el método, sin la utilización de equipo especializado que encarezca el proceso. (Groover, 2007)

## Fundición por gravedad

Este tipo de fundición consiste en introducir el metal líquido a través de una cavidad, que contiene la forma del modelo de la pieza que se desea fabricar, utilizando el peso del metal fundido; de tal manera que al solidificarse, se obtenga como resultado una pieza con baja porosidad, buen acabado y dimensiones exactas.

En la Figura 1.6, se describe las partes utilizadas durante el proceso de fundición en molde abierto y cerrado, correspondientemente.

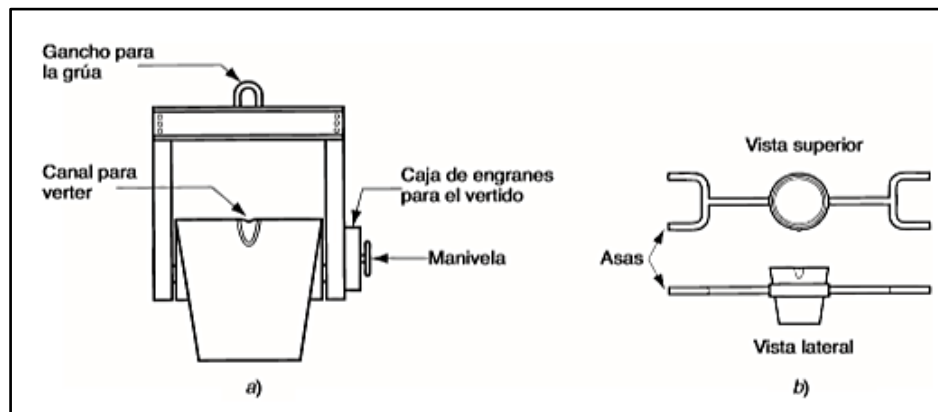


**Figura 1.6. Proceso de fundición por gravedad en moldes a) abierto  
Y b) cerrado o de dos partes**

Fuente: *Fundamentos de manufactura moderna, fundición*, M.P Groover, (1997)

## Vertido y Limpieza

Para llevar el metal derretido desde el horno de inducción al molde, se usan crisoles y cuencos, que varían según su tamaño. Entre los cuales existen; cuencos para manejar grandes volúmenes de material fundido con la ayuda de una grúa elevada y cuencos manuales para verter cantidades pequeñas, por medio de operarios, tal como se muestra en la Figura 1.7. (Groover, 2007).



**Figura 1.7. Tipos comunes de cuencos: a) cuenco grúa y b) cuenco para dos hombres**

Fuente: *Fundamentos de manufactura moderna, fundición*, M.P Groover, (1997)

Entre los problemas de vertido es común encontrar metal fundido oxidado, el cual reduce la calidad del producto y la pieza resulta defectuosa. Para eliminar la entrada de estos óxidos durante el vertido, se debe emplear filtros para capturar impurezas y adicionar fundentes que retrasen el proceso de oxidación sobre el metal.

Después que el material se ha solidificado y retirado el molde, se procede con el recorte, retiro del núcleo, limpieza y verificación de superficie, maquinado (si es requerido) y tratamiento térmico como alternativa adicional.

El recorte se refiere a la remoción de bebederos, mazarotas, vaciaderos, rebabas y cualquier exceso de material fundido de la pieza. Cuando se usan núcleos en la fundición, hay que retirarlos y puede que estén unidos de manera química, con arena o aceite y si el aglutinante se deteriora, es posible que caigan del fundido, en otros casos se retiran por medios mecánicos o manuales.

La limpieza de superficie brinda la apariencia final de la pieza resultante. Por lo tanto, los métodos de limpieza existentes son agitación, soplo de aire con granos de arena gruesa o balines de metal, uso de cepillos de alambre, pulido y limpieza con baño químico. (Groover M. P., 2007)



#### 1.3.3.4 Ecuaciones características del proceso de fundición

Se detallaron las etapas del proceso de fundición, a continuación se describirán las principales ecuaciones a utilizar para obtener los dimensionamientos, cálculos y llevar a cabo los factores antes mencionados.

##### **Energía necesaria para fundir el metal desde la temperatura inicial**

La cantidad de energía requerida para llevar del estado sólido al líquido a un material durante el proceso de fundición, se representa por medio de la ecuación (2).

$$H = \rho V [C_s(T_m - T_o) + H_f + C_t(T_p - T_m)]; [J] \quad \text{Ec.( 2 )}$$

Donde:

H: Calor total que se requiere para subir la temperatura del metal a la temperatura que se vierte; [J]

T<sub>m</sub>: Temperatura de fusión; [°C]

T<sub>o</sub>: Temperatura inicial; [°C]

T<sub>p</sub> Temperatura de vertido; [°C]

H<sub>f</sub>: Calor de fusión; [J/g]

C<sub>t</sub>: Calor específico por peso del metal líquido; [J/g.°C]

C<sub>s</sub>: Calor específico por peso del metal sólido; [J/g.°C]

V: Volumen de metal que se calienta; [cm<sup>3</sup>]

ρ= Densidad del material; [Kg/ cm<sup>3</sup>]

##### **Cálculo de Mazarota**

Para calcular el tiempo de solidificación total de material se utilizara la regla de Chvorinov, la cual relaciona el tiempo de solidificación de una pieza con su volumen y superficie, ecuación (3).

$$T_{TS} = C_m \left( \frac{V_p}{A_p} \right)^n; [min] \quad \text{Ec.( 3 )}$$

Donde:

$T_{TS}$ = Tiempo total de solidificación; [min]

$C_m$ = Constante de molde, esta constante depende de las propiedades del metal (densidad, capacidad calorífica, calor de fusión) y del molde, como temperatura inicial, densidad, conductividad térmica, capacidad calorífica y grosor de pared; [min/cm<sup>2</sup>]

$V_p$ = Volumen fundido de la pieza (cilindro); [cm<sup>3</sup>]

$A_p$ = Área superficial fundido de la pieza (cilindro); [cm<sup>2</sup>]

Por lo tanto, el volumen y área de la mazarota vienen dados por las ecuaciones (4) y (5) respectivamente.

$$V_m = \frac{\pi d^2 h}{4}; [cm^3] \quad \text{Ec.( 4 )}$$

$$A_m = 2\pi r^2 + 2\pi r h; [cm^2] \quad \text{Ec.( 5 )}$$

Donde:

d= diámetro; [cm]

r= radio; [cm]

h=altura; [cm]

La regla de Chvorinov también permite conocer el tiempo de solidificación de la pieza en función de la mazarota, la mazarota debe solidificarse en mayor tiempo que el molde, para alimentar de material cavidades faltantes o incompletas. Esto se representa por medio de la ecuación (6).

$$T_{TSM} > 20\%T_{TSP} \quad \text{Ec.( 6 )}$$

Donde:

$T_{TSM}$  = Tiempo de solidificación total de la mazarota; [min]

$T_{TSP}$  = Tiempo de solidificación total de la pieza; [min]

### Tiempo de llenado

El tiempo requerido para llenar la cavidad del molde con el material fundido, se representa usando la ecuación (7).

$$T_{MF} = \frac{V_T}{Q}; \quad [s] \quad \text{Ec.( 7 )}$$

Donde:

$V_T$  = volumen total de la cavidad de molde [cm<sup>3</sup>]

$Q$  = Gasto volumétrico [cm<sup>3</sup>/s]

El volumen total del molde, se representa como la suma de los volúmenes de cada sección que componen el molde, ecuación (8)

$$V_T = V_P + V_m + V_b; \quad [cm^3] \quad \text{Ec.( 8 )}$$

Donde:

$V_P$  = Volumen de la pieza

$V_m$  = Volumen de la mazarota

$V_b$  = Volumen del bebedero

El caudal requerido para llenar el molde, se puede calcular con la ecuación (9).

$$Q = v_b A_b; \quad [cm^3/s] \quad \text{Ec.( 9 )}$$

Donde:

$v_b$  = Velocidad de vertido [cm/s]

$A_b$  = Área de sección transversal al líquido [cm<sup>2</sup>]

### Velocidad del vertido

Para calcular la velocidad de vertido se utilizará la ecuación (6), la cual se obtiene de la ecuación de Bernoulli.

$$v_b = \sqrt{2gh_b}; \quad [cm/s] \quad \text{Ec.( 10 )}$$

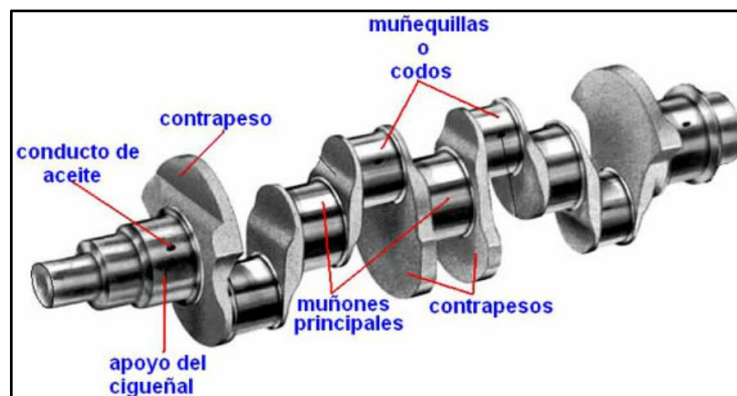
Donde:

$$g= 9.81 [m/s^2]$$

$$h_b=\text{altura del bebedero [cm]}$$

### 1.3.4 Características del cigüeñal

La función principal del cigüeñal es la de transformar el movimiento rectilíneo del pistón en un movimiento circular o viceversa, que a su vez se transmite hacia las ruedas del vehículo. Las partes que constituyen un cigüeñal son cojinetes de bancada y de biela, brazo o codo, contrapesos, y volante de inercia así como los conductos de aceite, los cuales mantienen en lubricación todas las partes mencionadas, tal como se representa en la Figura 1.8. La mayoría de los cigüeñales tienen usos y aplicaciones distintas, de acuerdo al tipo de especificaciones de diseño; pero su uso más común se presenta en los motores de combustión interna, en donde el movimiento lineal de los pistones se transmite hacia las bielas y se transforma en un movimiento rotatorio del cigüeñal que a su vez se transmite a las partes giratorias del vehículo, así como al volante de inercia. (Mecánica fácil, 2010).



**Figura 1.8. Partes del cigüeñal**

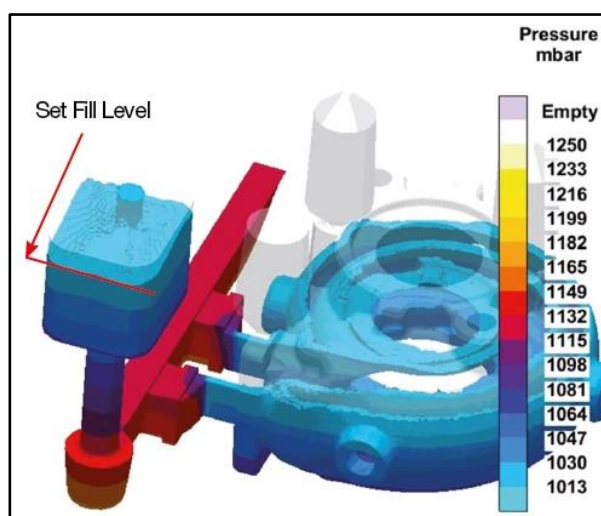
Fuente: *Fierros clásicos, Rectificación de motores*, (2015)

### 1.3.5 Descripción del software de fundición

MAGMA es un software de simulación de procesos de fundición con base en análisis ingenieril, muy usado en la industria de manufactura y metal mecánica. Este software evalúa mediante análisis computacional, el proceso de fundición usando el método de volumen finito (elementos cúbicos o en forma de ladrillo), aplicado a metales ferrosos y no ferrosos con sus respectivas aleaciones. (Magmasoft, 2012).

Posee una interfaz sencilla que permite importar modelos CAD por medio de un modelador de sólidos y a su vez brinda soporte para análisis de llenado, solidificación, propiedades mecánicas, esfuerzos térmicos; durante el proceso de fundición. Permite evitar problemas de colada, predecir problemas de vaciado y de diseño de molde, mejorando los procesos y disminuyendo los costos de éstos.

La Figura 1.9, muestra un ejemplo de análisis del flujo del material colado, que se produce en las cavidades del molde e indica las secciones con posibilidad de presentar problemas de porosidades o aprisionamiento de gases, propias del metal fundido.



**Figura 1.9. Simulación de la presión del líquido vaciado con ayuda del software MAGMA**

Fuente: 3D CADPortal, MAGMASOFT, (2012)

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA DEL DISEÑO

En esta sección se describirá el tipo de pieza mecánica que se va a fabricar por medio de la selección justificada de materiales y procedimientos, así como el tipo de proceso de manufactura involucrado. También se definirá que tipo y clase de material de trabajo corresponde al cigüeñal, bajo la norma de la American Society for Testing and Materials (ASTM), con su respectivo análisis de composición química y dureza. En último lugar, se definirá la metodología de diseño según el flujo de procesos que intervienen en la producción de piezas como cigüeñales por medio de la fundición.

### 2.1 Selección del elemento mecánico

La pieza mecánica seleccionada para el caso de estudio fue el cigüeñal de un motor de cilindraje 1600 centímetros cúbicos (cc) de cuatro cilindros en línea, el cual presenta características mecánicas y dimensiones similares en una amplia gama de vehículos Chevrolet, siendo un elemento comúnmente comercializado en los locales de venta de repuestos a nivel nacional. Específicamente en Guayaquil, se encuentran alrededor de 20 locales autorizados para la venta de repuestos Chevrolet según el directorio automotriz (Edina, 2010).

### 2.2 Selección del material

Los materiales más utilizados en la elaboración de cigüeñales son el acero, la fundición gris y la fundición dúctil, los cuales poseen características mecánicas específicas y similares para distintos tipos de entorno de trabajo, o para los requerimientos de diseño establecidos.

Por lo tanto, para conocer las ventajas y desventajas del material seleccionado para el rediseño del cigüeñal se elaboró la siguiente tabla comparativa que justificara la selección correcta.

**Tabla 2.1. Propiedades mecánicas entre fundiciones y acero fundido para justificar la elección correcta del material**

<b>Material</b>	<b>Fundición Dúctil</b>	<b>Fundición Gris</b>	<b>Acero Fundido</b>
<b>Propiedades Mecánicas</b>			
<b>Resistencia a la tensión (MPa)</b>	551	250	570
<b>Límite de fluencia (MPa)</b>	380	105	310
<b>Módulo elástico (GPa)</b>	160	105	170
<b>Elongación (%)</b>	6	0	16
<b>Conductividad térmica (W/mk)</b>	28	46	52
<b>Capacidad de amortiguamiento relativo</b>	50-20	20-100	4
<b>Dureza HB</b>	180-250	156-174	163-179

Fuente: ASM, Volumen I de materiales, Fundición nodular, 2005

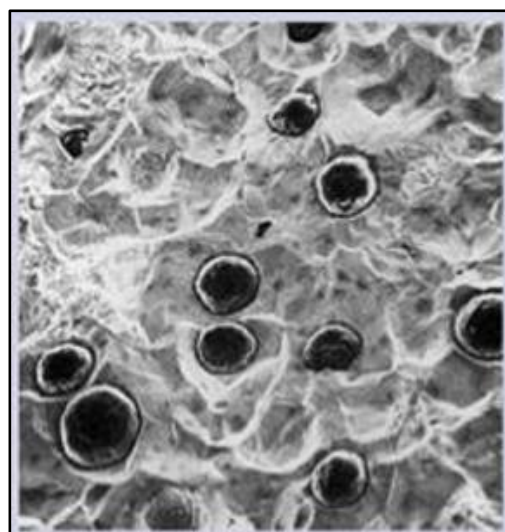
La Tabla 2.1 muestra que el material que presenta mejores propiedades y que cumple con las necesidades de una pieza mecánica como el cigüeñal es la fundición dúctil, al ser un material capaz de competir con el acero y la fundición gris, con respecto a sus propiedades mecánicas. Entre las características más importantes de la fundición dúctil, resalta su resistencia a la tensión que es elevada en comparación a la fundición gris y al acero fundido, sin la utilización

de tratamientos térmicos para incrementarla. La capacidad de amortiguamiento relativo también es superior al acero, lo que brinda al material de trabajo, que pueda soportar cargas cíclicas y disipe las vibraciones por medio de energía, como calor. Y en el caso de la dureza brinell, esta fundición presenta mejores cualidades con respecto al acero, debido a su estructura compacta y microestructura de grafito en forma esferoidal, que otorga dureza y alta maquinabilidad.

Por lo tanto, para este caso de estudio se ha definido el hierro dúctil como material de trabajo por la versatilidad que presenta, correspondiente al rediseño propuesto. Posteriormente se realizará un estudio de costos involucrados a la producción de la pieza mecánica.

### **2.3 Análisis del material seleccionado**

La microestructura del hierro es un aspecto importante de análisis, en el estudio de sus características y propiedades al ser la identidad de los metales ferrosos, tal como se muestra en la Figura 2.1, en donde se visualiza la microestructura de la fundición dúctil, la cual se presenta como hojuelas y nódulos de grafito respectivamente.



**Figura 2.1. Microestructura de las fundiciones, fundición dúctil**

Fuente: Hierro Fundido, Julio Aguilar, 2011



La fundición dúctil contiene partículas de grafito en forma de nódulos esferoidales en una matriz metálica dúctil al contrario de la fundición gris en la cual su estructura se presenta como hojuelas de grafito. De este modo la fundición dúctil gana mayor resistencia y ductilidad, dichas propiedades se pueden mejorar con el uso de tratamientos térmicos. Este material tiene la característica de poseer una excelente fluidez, lo que permite obtener piezas de reducidos espesores, siempre y cuando se asegure un flujo lineal a la hora de llenar las cavidades para evitar la formación de carburos en las secciones más delgadas y endurecimiento inadecuado en los bordes. (Metals Handbook, 2005).

La fundición dúctil se obtiene tratando el hierro líquido con bajo porcentaje de azufre con aditivo de magnesio entre 0.04-0.06% en peso, para ser inoculado usando una aleación de silicio antes del vertido, la composición química es similar a la fundición gris pero con sus diferencias tal como se muestra en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2. Composición de las fundiciones de hierro**

Tipo	Composición %										
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S	Ce	Mg
Hierro Gris	3.25	0.50	1.80	0.05	0.05	0.05	0.15	0.12 Max	0.15 Max	-	-
	-	-	-	-	-	-	-				
Hierro Dúctil	3.50	0.90	2.30	0.45	0.20	0.10	0.40	0.03 Max	0.00 2 Max	0.005- 0.20	0.03- 0.06
	3.60	0.15	1.80	0.03	0.05	0.01	0.15				
	-	-	-	-	-	-	-				
	3.80	1.00	2.80	0.07	0.20	0.10	1.00				

Fuente: ASM, Volumen I de materiales, Fundición nodular, 2005

El manganeso es el elemento que controla el tipo de matriz por lo tanto, si se desea conseguir una matriz ferrítica dicho elemento no debe de superar el 0.2

% y si se desea conseguir una matriz perlítica este elemento no debe de superar el 0.1 % en peso sin la utilización de tratamientos térmicos.

La formación de grafito durante la solidificación puede incrementar o contrarrestar el volumen debido al cambio de fase de líquido a sólido en el constituyente metálico. Las piezas fundidas en hierro dúctil requieren un uso mínimo de tubos en el molde para alimentar el metal fundido dentro de la cavidad para compensar la contracción líquida durante el enfriamiento y la solidificación. Por lo tanto, el rendimiento del molde en las fundiciones de hierro dúctil es decir la relación entre el peso de las piezas fundidas y el peso de metal vertido es mucho mayor que el de las fundiciones de acero o las fundiciones de hierro maleable pero no tan alto como el del hierro gris.

En la Tabla 2.3 se muestra los porcentajes de reducción o encogimiento del volumen en las fundiciones, que se deben tener presentes al momento de diseñar el molde. (Metals Handbook, 2005).

**Tabla 2.3. Porcentaje de encogimiento de las principales fundiciones**

<b>Tipo de fundición</b>	<b>% de Encogimiento</b>
Hierro Dúctil	0-0.7
Hierro Gris	1.0
Hierro Maleable	1.0
Acero al carbono	2.0
Acero aleado	2.5

Fuente: ASM, Volumen I de materiales, Fundición nodular, 2005

Entre los tipos de fundiciones nodulares que se fabrican con mayor frecuencia encontramos según la norma ASTM A536 cinco grados de resistencia establecidos con sus respectivas descripciones, Tabla 2.4.

**Tabla 2.4. Uso general de los distintos tipos de fundición nodular  
bajo la norma ASTM A536**

<b>Grado</b>	<b>Descripción</b>	<b>Uso General</b>
60-40-18	Ferrítica, puede ser recocida	Piezas resistentes al impacto, baja temperatura de uso
65-45-12	Mayoritariamente Ferrítica; de colada o recocida	Servicios generales
80-55-06	Ferrítica-Perlítica; puede ser normalizada	Servicios generales
100-70-03	Mayoritariamente Perlítica; puede ser normalizada	Mejor dureza y resistencia al desgaste, buena resistencia con endurecimiento superficial
120-70-02	Matriz Martensítica	La más tenaz y resistente al desgaste

Fuente: ASM, Volumen I de materiales, Fundición nodular, 2005

El libro de materiales ASM, nos indica que la fundición grado 80-55-06 con una matriz ferrítica-perlítica, y un amplio uso en servicios diversos, se utiliza para la fabricación de elementos mecánicos tales como cigüeñales, elaborados por proceso de fundición, también clasifica las propiedades mecánicas de cada grado, por tratamiento de recocido y por enfriamiento rápido. Tal como se muestra en la Figura 2.2, y a su vez se indican los valores de elongación y dureza brinell correspondientes a los grados de distintas fundiciones.

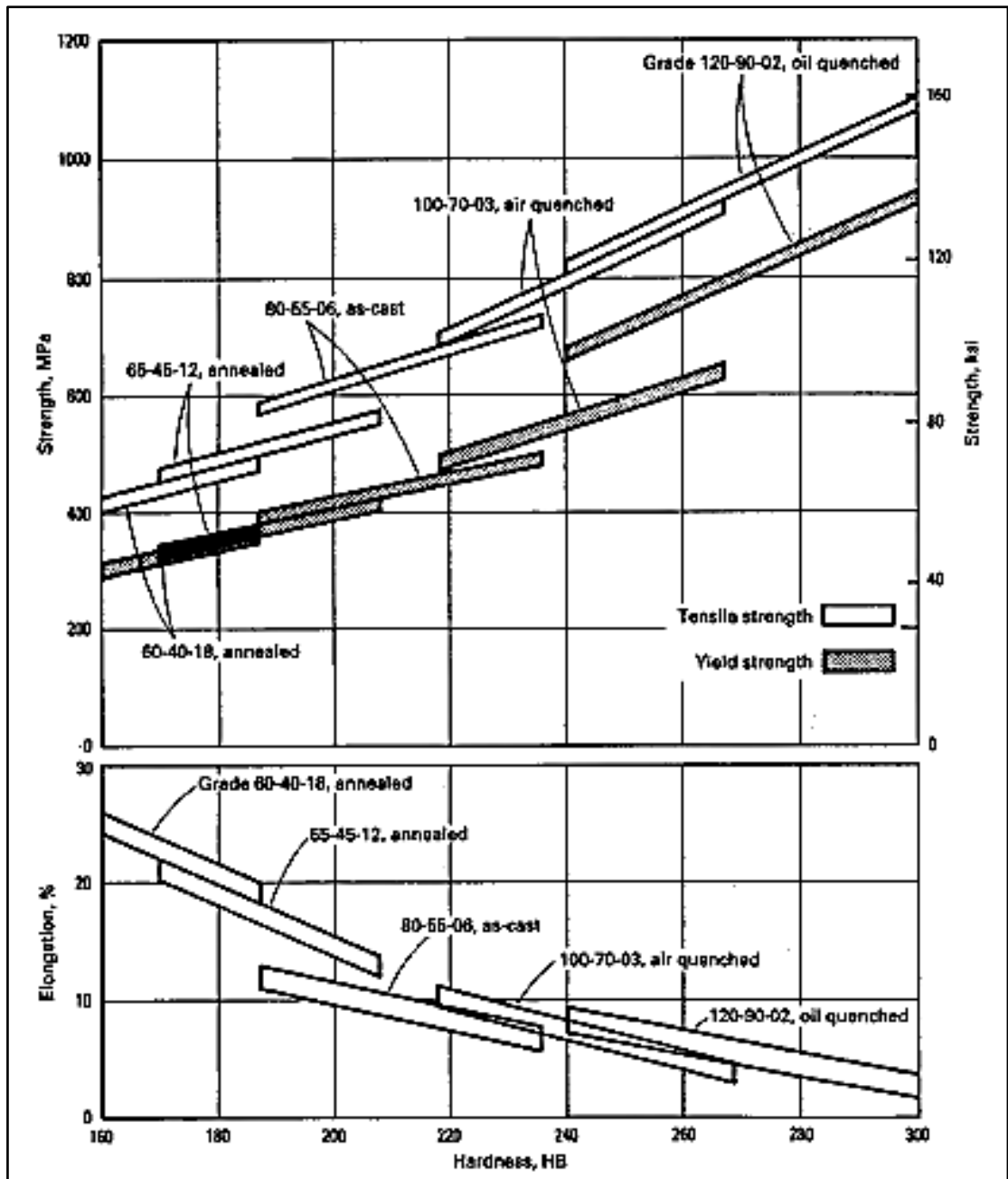


Figura 2.2. Esfuerzo de tensión y límite de fluencia bajo la norma ASTM A536 para los distintos grados de fundición de hierro dúctil, con su respectivo post-tratamientos térmico

Fuente: ASM, Volumen I de materiales, Fundición nodular, 2005

## 2.4 Características del material seleccionado

Para conocer las características físicas y mecánicas de la fundición dúctil, se realizó un análisis químico y metalográfico de una muestra del cigüeñal, de la cual se obtuvo la siguiente información indicada en la Tabla 2.5.

**Tabla 2.5. Análisis químico de la muestra de cigüeñal**

Análisis químico	
<b>%C</b>	3.33
<b>%Mn</b>	0.208
<b>%Si</b>	2.39
<b>%P</b>	0.043
<b>%S</b>	0

Fuente: Laboratorio de procesos, Lemat, Espol (2017)

Por medio de la composición química, se puede corroborar que el material de estudio corresponde a la fundición grado 80-50-06 según la norma ASTM A536, a su vez se detallan las propiedades mecánicas de mayor importancia, para posteriores análisis.

- Esfuerzo de tensión = 551 MPa
- Esfuerzo de fluencia = 380 MPa
- Elongación = 6%
- Dureza brinell = 180-250 HB

Luego de conocer la composición química de la muestra, será fácil identificar el tipo de fundición dúctil por medio del diagrama hierro-carbono, y que constituyentes conforman la matriz resultante, después de la solidificación del metal, usando el porcentaje de carbono equivalente. Por lo tanto, utilizando la ecuación (1) de la sección 1.3.3.4.

$$\%CE = 4.11$$

El porcentaje de carbono equivalente refleja que la fundición se encuentra en el rango hipo-eutético, es decir con un porcentaje menor al 4.33 % de C formando en su solidificación y posterior enfriamiento una matriz con constituyentes como: Ledeburita, cementita y perlita, con referencia al diagrama hierro-carbono.

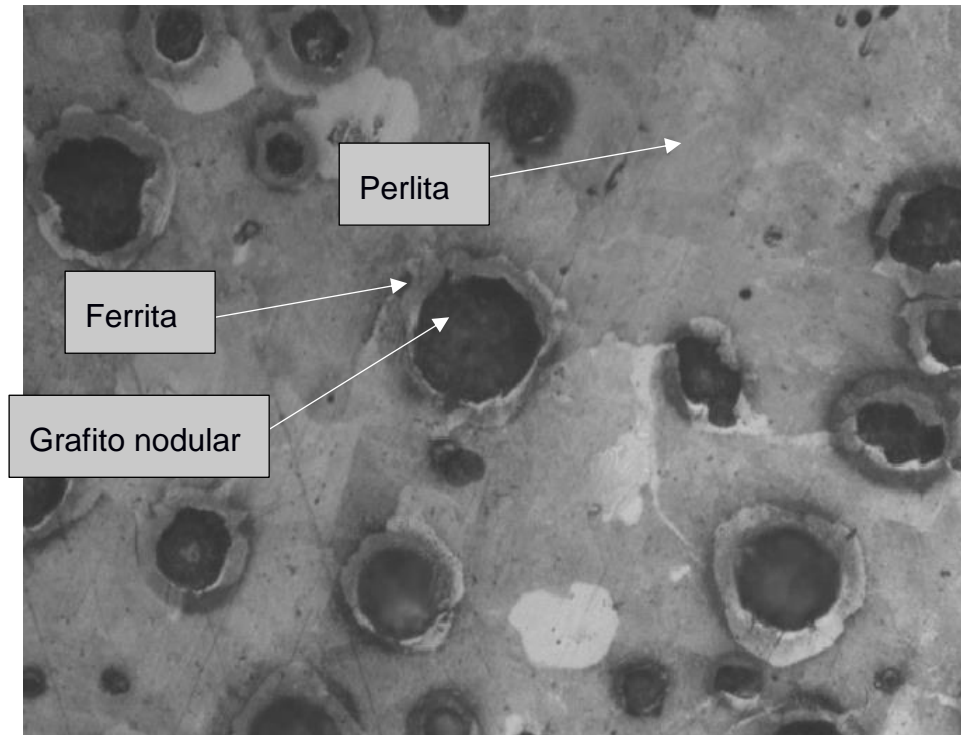
### **Dureza Brinell**

Es una medida obtenida por indentación, la cual mide la penetración de un objeto en el material de estudio. Para la muestra del cigüeñal, se obtuvo el siguiente valor de micro dureza, (225-229) HBW 10/3000, utilizando un indentador de 10 mm de diámetro y una carga de 300 kgf.

Mediante el uso de microscopio, se analizó las características del material por metalografía en donde se utilizaron aumentos de lente de 500x.

### **Metalografía**

El contenido de carbono es fundamental en la composición química de la estructura molecular del hierro, en particular para el caso del hierro dúctil, en el cual las partículas esferoidales de grafito se forman debido a la solidificación del material con la presencia de ciertas cantidades de cerio o magnesio. Por lo tanto, la estructura ferrítica o perlítica de la fundición dependerá de la cantidad de elementos aleantes añadidos así como de la velocidad de enfriamiento. Debido a los resultados obtenidos con el microscopio podemos verificar el tipo de microestructura, tal como se muestra en la Figura 2.3.



**Figura 2.3. Muestra de hierro dúctil con un aumento de 500x**

Fuente: Elaboración propia

El grado de hierro dúctil 80-55-06 mostrado en el análisis metalográfico muestra nódulos de grafito que se encuentran en una matriz ferrítica-perlítica con aproximadamente 11.28% de ferrita, 75 % de perlita y un máximo de 11.63% de carburos dispersos. Este tipo de matriz de forma I y II, tiene un tamaño de 5-8 de clase con un porcentaje medio de grafitación del 40% bajo la norma ASTM A247 mostrada en el Anexo B, dicha norma evalúa el hierro dúctil en composición de su matriz pudiendo ser perlítica, ferrítica o ferrítica-perlítica además muestra el porcentaje de nodularidad, siendo este último término la capacidad del material de formar grafito esferoidal.

A su vez en esta misma muestra se observa que debido a la concentración de carbono en los nódulos existe descarburación alrededor de estos, debido en gran parte por las condiciones de trabajo del material. Este tipo de fundición nodular puede someterse a un proceso de normalizado y revenido el cual consiste en calentar el material a la temperatura crítica entre (900-930°C) en un tiempo aproximado de 2 horas y luego con un revenido a una temperatura de (530-600°C) para alivio de tensiones, proceder a un

enfriamiento al aire de manera forzada. Logrando una excelente resistencia a la tracción y al desgaste con una buena maquinabilidad. Ciertos tipos de clases de fundición nodular se pueden tratar térmicamente para mejorar sus propiedades mecánicas, estas fundiciones consideradas las más comerciales se muestran en el Anexo C.

## 2.5 Selección del molde de fundición

Para la selección correcta del molde de fundición se describen siete criterios evaluados del 1 al 10. En donde 1 significa menor importancia mientras que 10 es alta importancia, luego se divide el valor total de los criterios para tener un porcentaje de evaluación que a su vez se ponderará en la matriz de decisión. Los criterios de evaluación se definen como:

- **Costo de fabricación**, involucra costos de diseño, manufactura y materiales. (10/10)
- **Limitaciones en la fabricación del molde**, dificultades para fabricar el molde debido a las dimensiones y el diseño del modelo patrón.(8/10)
- **Tiempo de enfriamiento**, parámetro necesario para obtener una pieza resultante con propiedades óptimas después de la solidificación.(8/10)
- **Necesidad de maquinado**, factibilidad de maquinar una pieza post-fundición. (7/10)
- **Resistencia a altas temperaturas**, capacidad del molde de disipar el calor del metal vertido sin sufrir daños. (7/10)
- **Reposición del molde**, capacidad de reutilizar el molde después de la fundición para la fabricación de nuevas piezas. (5/10)
- **Libre de tensiones residuales**, capacidad de eliminar esfuerzos internos en la pieza para evitar posibles fisuras o agrietamientos bajo la acción de cargas. (8/10)



**Tabla 2.6. Matriz de ponderación**

<b>Criterios de evaluación</b>	<b>Valor (1-10)</b>	<b>Valor (%)</b>
Costos de fabricación	10	19
Limitaciones en la fabricación del molde	8	15
Tiempo de enfriamiento	8	15
Necesidad de maquinado	7	13
Resistencia a altas temperaturas	7	13
Reposición del molde	5	10
Libre de tensiones residuales	8	15
Total	53	100

Fuente: Elaboración propia

La tabla 2.6 muestra los valores porcentuales de cada criterio analizado, cada uno de estos criterios será evaluado en la matriz de decisión para la selección correcta del molde para la fabricación del cigüeñal. Las alternativas a evaluar son molde removible y molde permanente.

La tabla 2.7, presenta las alternativas de diseño, que serán evaluados en cuanto a los criterios expuestos. El valor porcentual total, de una de las alternativas justificará la selección correcta, para proseguir con el proceso de fundición.

**Tabla 2.7. Matriz de decisión para las alternativas propuestas**

<b>Alternativas</b> <b>Criterios</b>	<b>Molde Removible</b>	<b>Molde Permanente</b>
<b>Costo fabricación (19%)</b>	19	10
<b>Limitaciones en la fabricación del molde (15%)</b>	15	8
<b>Tiempo de enfriamiento (15%)</b>	15	8
<b>Libre de tensiones residuales (15%)</b>	6	12
<b>Necesidad de maquinado (13%)</b>	6	10
<b>Resistencia a altas temperaturas (13%)</b>	13	9
<b>Reposición del molde (10%)</b>	10	5
<b>Total (100%)</b>	84	62

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, la mejor selección del molde para la fundición será la opción de molde desechable o removible, el cual presenta mejores ventajas, tales como costos de fabricación bajos, sin restricciones al momento de obtener un modelo, un tiempo de enfriamiento excelente debido a las características físicas de la arena, capacidad para resistir altas temperaturas y el aprovechamiento de la arena del molde como elemento reciclado para posteriores fundiciones.

## 2.6 Metodología de diseño

Se estableció un plan para obtener el diseño final del cigüeñal optimizado, el cual deberá cumplir con todas las etapas y procesos descritos, así como con las especificaciones necesarias para su uso. Se definió un diagrama de flujo con todas las etapas del proceso de fundición mostrado en la Figura 2.5.

### 2.6.1 Representación gráfica de la metodología de diseño

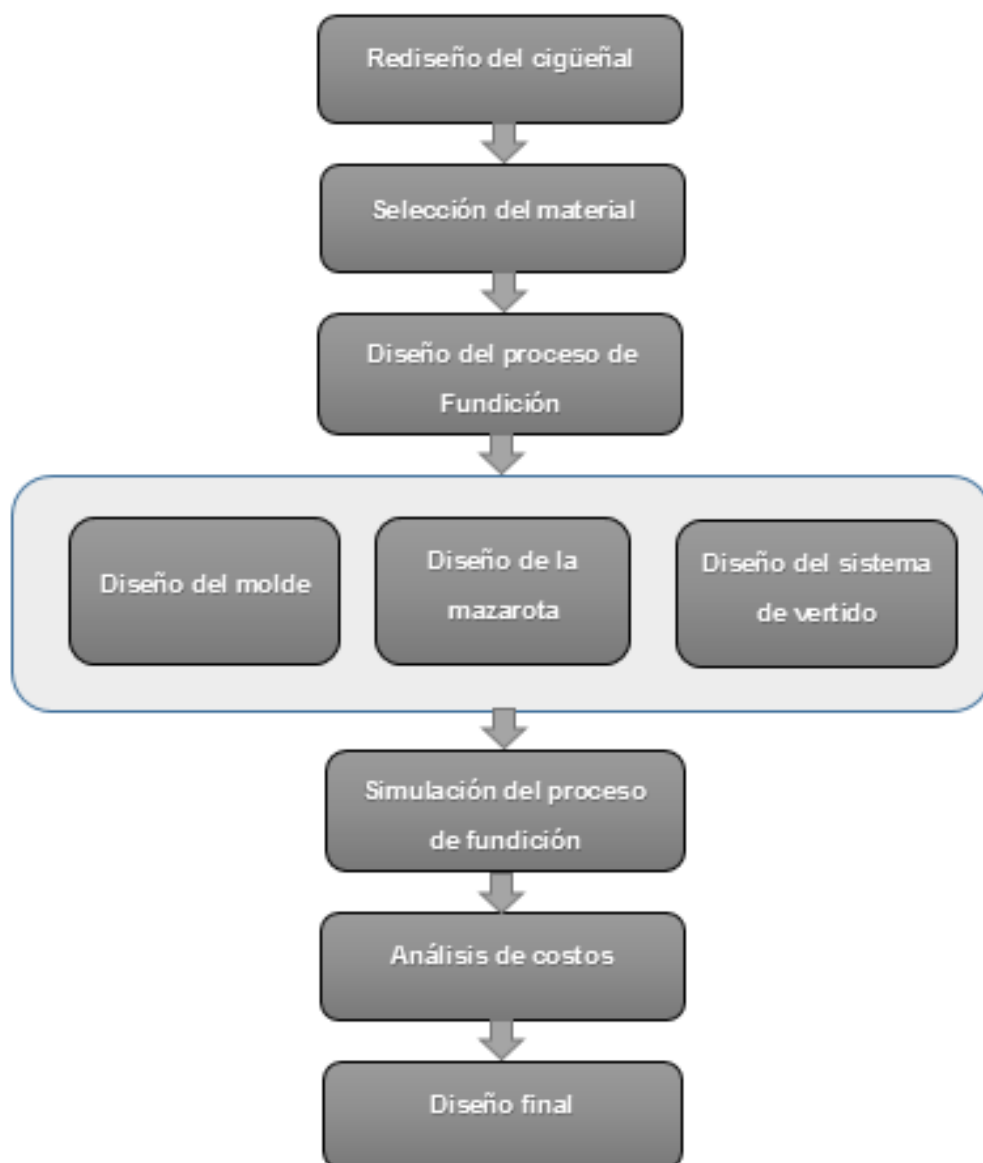
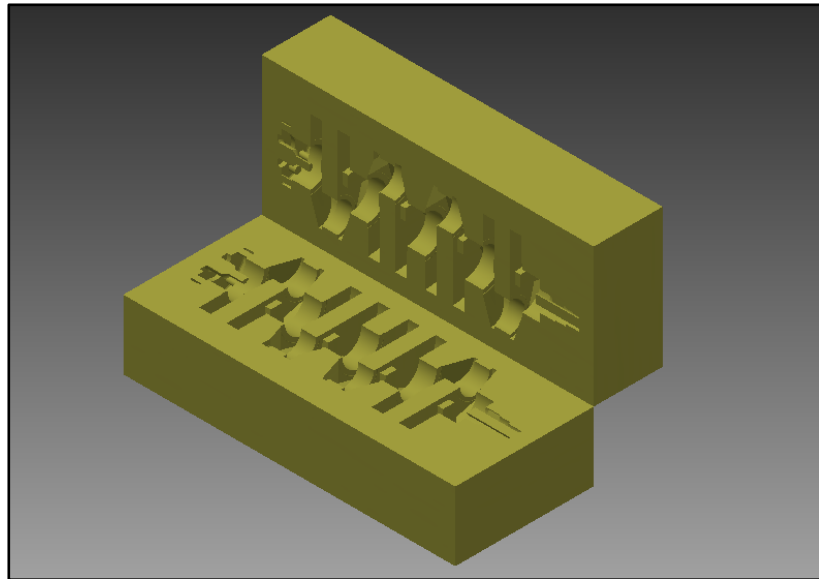


Figura 2.4. Diagrama de flujo de la metodología del diseño

Fuente: Elaboración propia

## 2.7 Diseño de forma

Diseño de la composición completa a la cual se desea llegar por medio de los procesos definidos, para obtener un cigüeñal. El esquema gráfico con sus respectivas dimensiones, se encuentra en la sección de planos (ver plano 2).



**Figura 2.5. Diseño de forma propuesto para obtener el cigüeñal**

Fuente: Elaboración propia

# CAPÍTULO 3

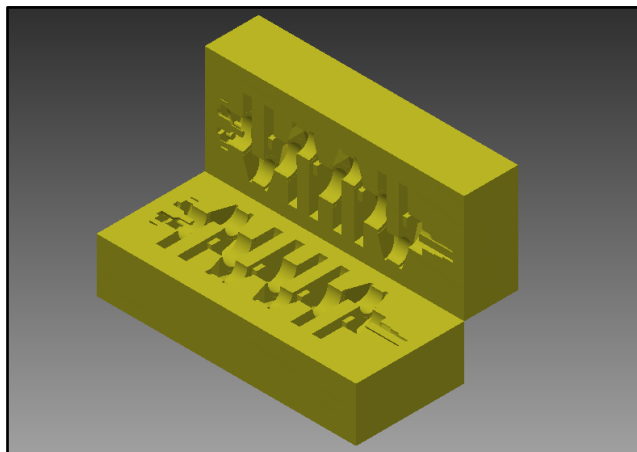
## 3. CONDICIONES DE DISEÑO

En esta sección se desarrollaran los cálculos, esquemas y simulaciones con los parámetros necesarios, que proporcionaran los resultados concernientes al desarrollo de la fundición dúctil usando un molde de arena removible.

### 3.1 Diseño del molde

El primer paso para diseñar el molde de fundición consistirá en el tipo de arena usado, se ha optado por fundición en arena verde la cual servirá de patrón para el modelo seleccionado. Dentro de las propiedades que posee la arena y que son de interés para el proceso de fundición, está la capacidad refractaria o la capacidad para disipar el calor del metal vertido al tiempo en que se solidifica el mismo, la cohesión o resistencia que adquiere debido al tipo de aglutinante que posee, así como el porcentaje de humedad que contenido y la permeabilidad, la cual se refiere a la facilidad de evacuar los gases mientras se realiza la colada.

El dimensionamiento de la caja de moldeo se obtiene por las dimensiones del cigüeñal y de la cantidad de capas de arena que se utilicen, tal como se representa en la Figura 3.1.



**Figura 3.1. Diseño de forma de la caja de moldeo en arena verde**

Fuente: Elaboración propia

Este molde de arena se compone de dos secciones que contienen el modelo patrón, las dimensiones del molde de arena verde son 482 mm \* 200 mm y 200 mm correspondientes a longitud, ancho y altura total respectivamente. Los materiales que conforman cada capa son arena sílice húmeda, arena seca, y otros elementos como silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) y Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ). Dentro las propiedades químicas de la arena sílice tenemos:

- $\text{SiO}_2$  al 79%
- $\text{Fe}_2\text{O}_3$  al 5.20%
- Humedad = 0.03%
- Densidad = 1.60 gr/cm<sup>3</sup>

Todos estos valores están representados en porcentaje para un saco de 50 kg de arena sílice. (Arena Silica, 2016)

El tipo de grano y finura de la arena también es un parámetro muy importante en la fabricación del molde, el tipo de grano viene dado por la norma de la Sociedad Americana de Fundidores (AFS), que indica según pruebas de laboratorio el tipo específico del tamaño de grano y la compactación adecuada con su respectivo propósito de fundición. (Paula Andrea Ramirez P, 2014)

Por otro lado la Tabla 3.1 muestra un rango de índices de finura según los tipos de granos de arena, lo cual es una referencia que describe el tamaño medio de una partícula de una muestra de arena.

**Tabla 3.1. Clasificación de la arena de acuerdo a su finura según AFS**

<b>Finura Arena</b>	<b>Índice de Finura AFS</b>	<b>Tamaño de Grano (mm)</b>
Muy Fina	110-140	<0.10
Fina	70-110	0.12-0.25
Media	55-70	0.25-0.50
Gruesa	45-55	0.50-1
Muy Gruesa	25-45	1-2

Fuente: Propiedades de las arenas de molde, (Barajas, 2016)

Para lograr una fundición adecuada se trata de mantener un tipo de finura en la arena recomendado por la AFS como fina, además el tipo de forma de grano angular es recomendable para procesos de fundición con hierro para piezas de tamaño medio. Las diferentes formas de grano se muestran en la Figura 3.2.



**Figura 3.2. Tipos de grano de arena**

Fuente: Propiedades de los clastos, W. Griem, (2016)

Las propiedades físicas de la arena, que inciden directamente en el proceso de fundición, se muestran en la Tabla 3.2. Estos datos fueron obtenidos de ensayos de laboratorio para fundición del hierro dúctil. (Alberto Cardona, 2006)

**Tabla 3.2. Propiedades de la arena para fundición**

<b>Temperatura</b> [°C]	<b>Conductividad</b> [W/m. °C]	<b>Densidad</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>Calor específico</b> [KJ/Kg°K]
<b>100</b>	0.478	1561	1045
<b>200</b>	0.505	1557	1071
<b>500</b>	0.511	1542	1143
<b>700</b>	0.507	1530	1191
<b>1300</b>	0.973	1503	1333
<b>1400</b>	1.194	1498	1356

Fuente: Análisis de la solidificación del hierro nodular, (Alberto Cardona, 2006)

La conductividad de calor entre el material fundido y la arena se conoce como conductancia y se muestra estos valores en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3. Conductancia de los elementos en contacto**

<b>Temperatura</b> [°C]	<b>Conductancia</b> [W/m <sup>2</sup> . °C]
20	500
1170	1000
1400	1000

Fuente: Análisis de la solidificación del hierro nodular, (Alberto Cardona, 2006)

Por lo tanto, para fundir una pieza de tamaño medio, como es el caso del cigüeñal con arena de moldeo con base SiO<sub>2</sub>, amerita un amplio estudio de las características y la preparación del molde antes de verter el material colado. Las consideraciones más importantes en cuanto a las características de la arena de moldeo se resumen en la Tabla 3.4.



**Tabla 3.4. Características recomendadas de arena de molde para fundición piezas de hierro de tamaño medio**

<b>Humedad</b> [%]	<b>Permeabilidad</b> [%]	<b>Compresión</b> [KPa]	<b>Arcilla</b> [%]	<b>Índice de Finura</b>
5.5-7	40-60	49-54	14	90-70

Fuente: Propiedades de las arenas de moldeo, (Barajas, 2016)

### 3.2 Diseño de la mazarota

En la producción, se recomienda que las mazarotas mantengan dimensiones en porcentaje menor con respecto al volumen de la pieza a fundir para evitar el desperdicio de material. A su vez se debe considerar el tiempo de solidificación de la mazarota mayor que el de la pieza de trabajo, para asegurar una alimentación adecuada de material.

Por lo tanto, utilizando la condición para tiempo de solidificación, ecuación (6), sección 1.3.3.4.

$$T_{TSM} > 20\%T_{TSP}$$

El tiempo de solidificación de la mazarota deberá ser mayor en un 20% al tiempo de solidificación de la pieza, para poder asegurar que la pieza tendrá la necesaria alimentación durante el colado y esta será la última en solidificarse evitando así contracciones volumétricas no deseables.

Otra condición necesaria para una efectiva fundición será la posición de la mazarota con respecto al elemento o pieza a producir, es decir mientras más cerca se sitúe a la entrada del metal colado, mejor será la alimentación del metal hacia el molde. Si el modelo a fundir presentara formas irregulares o con cambios bruscos de área relevantes a su diseño, será necesario examinar la posibilidad del uso de más mazarotas.

Por lo tanto, resolviendo la desigualdad, se tiene que el tiempo de solidificación de la mazarota es:

$$T_{TSM} = 1.2T_{TSP}$$

Usando la ecuación (3), sección 1.3.3.4, se expresa la igualdad:

$$C_m \left( \frac{V_M}{A_M} \right)^n = C_m \left( \frac{V_P}{A_P} \right)^n$$

Los valores de volumen y área se obtienen de la pieza, para dejar todo en términos de las dimensiones de la mazarota. Usando la ecuación (4) y la ecuación (5), de la sección 1.3.3.4, respectivamente.

$$V_m = \frac{\pi d^2 h}{4}$$

$$A_m = 2\pi r^2 + 2\pi r h$$

Se usará los valores de área y volumen del software de diseño Autodesk Inventor, el cual contiene los valores de las propiedades físicas del diseño del cigüeñal y se muestra en el Anexo D.

$$Area = 2394,21 \text{ cm}^2$$

$$Volumen = 1685,96 \text{ cm}^3$$

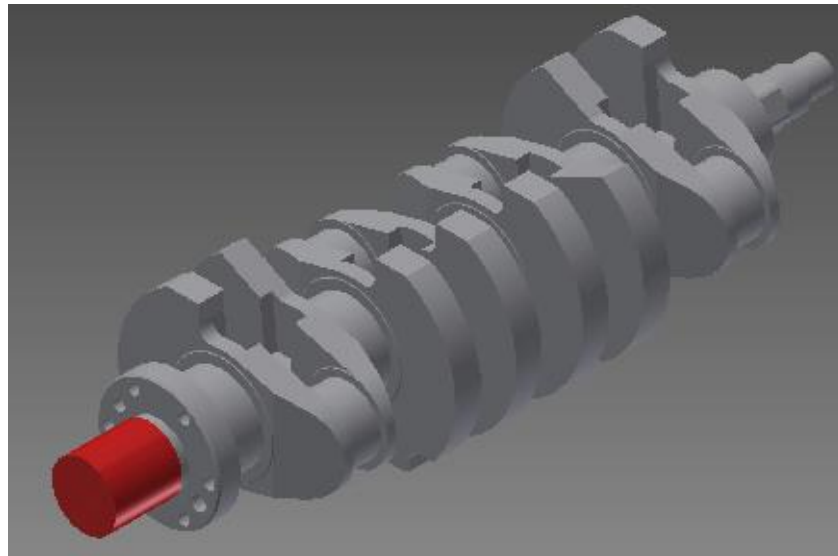
La constante de moldeo ( $C_m$ ), se simplifica al ser igual tanto para la mazarota como para la pieza, la constante n tiene un valor de 2 para propósitos de estudio, el diámetro de la mazarota se considera igual a la altura ( $d=h$ ), siendo un cilindro simétrico (Serrano, 2011) . Por lo tanto, del desarrollo de la regla de chvorinov, se obtienen las dimensiones mostradas en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5. Resultado del volumen requerido para la mazarota**

<b>Diámetro</b> [cm]	4.2
<b>Altura</b> [cm]	4.2
<b>Volumen</b> [cm <sup>3</sup> ]	59

Fuente: Elaboración propia

Con los valores de las dimensiones, usando la ecuación (3) se obtuvo el volumen mostrado. Este es el volumen necesario que deberá ocupar la mazarota sobre la pieza, el volumen de la mazarota representa el 4% del volumen total de la pieza, lo que confirma que el desperdicio de material será el mínimo requerido. El esquema de diseño de la mazarota se presenta en la Figura 3.3.



**Figura 3.3. Diseño forma de la mazarota**

Fuente: Elaboración propia

El diseño de la mazarota cumple con las dimensiones establecidas para proceder con el proceso de fundición del cigüeñal, el número de mazarotas a usar dependerá de los problemas de contracción o rechupe que se puedan presentar sin exceder en el desperdicio de material.

### **3.3 Diseño del sistema de vertido**

#### **3.3.1 Potencia requerida en la fundición**

Para conocer la energía requerida para desarrollar el proceso de fundición, es decir llevar el material de trabajo hasta su punto de fusión, se deben realizar cálculos en función de la masa y las propiedades físicas del metal, entonces utilizando la ecuación (2), sección 1.3.3.4, se obtiene.

**Tabla 3.6. Resultado del calor total que se requiere para subir la temperatura del metal a la temperatura que se vacía**

<b>M</b> [Kg]	20
<b>T<sub>m</sub></b> [°C]	1160
<b>T<sub>o</sub></b> [°C]	25
<b>T<sub>p</sub></b> [°C]	1400
<b>H<sub>f</sub></b> [KJ/Kg]	220
<b>C<sub>t</sub></b> [J/g.°C]	840
<b>C<sub>s</sub></b> [J/g.°C]	603
<b>H</b> [MJ]	22.1

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3.6 se consideró una masa de 20 kg para la fundición, siendo lo necesario para la pieza solo 12 kg pero durante la combustión del metal se tienen ciertas pérdidas, debido a la oxidación de elementos aleantes y desperdicios en el vaciado. Los valores de temperatura de fusión, calores específicos tanto para estado sólido y líquido, así como calor latente fueron tomados de las condiciones iniciales del hierro dúctil según el libro ASM.

Con este valor de energía obtenido se puede calcular la potencia requerida por el horno a usar durante el tiempo de fundición del material. Para poder realizar una fundición de menos de 1 ton de hierro, es decir para producción en menor escala, se utilizan hornos de inducción a 60 Hz. Este tipo de hornos se usan en muchas aplicaciones, siendo desde el punto de vista

ambiental bastante limpios. El principio de trabajo de los mismos es emitir calor usando el efecto de Joule convirtiendo así la corriente inducida en corriente alterna aplicada al material a derretir. (EcuRed, 2016).

Por lo tanto si se necesitan fundir 20 kg de chatarra de hierro durante 1 hora, se necesitará una potencia de:

$$P = 6.1 \text{ KW}$$

Conociendo la potencia que se requiere para fundir el material, se procederá a realizar el análisis de la composición química de la colada.

### 3.3.2 Composición de la colada

El hierro para fundición proviene de desechos y chatarras obtenidos en base al mismo material, una vez obtenida la base de hierro se necesita incorporar los elementos aleantes que especificarán la microestructura y la forma del grafito final, siendo el caso de estudio la forma esferoidal con sus respectivas propiedades mecánicas.

En el capítulo dos, en la sección 2.4, se analizó en detalle las características químicas y metalográficas de una muestra del cigüeñal. Los valores de composición química obtenidos fueron: 3.33 %C, 2.5% Si y 0.043% P, dichos valores pueden ser reemplazados en la ecuación (1) de la sección 1.3.3.4, para obtener el contenido de carbono equivalente y verificar los constituyentes de la matriz debido a su rango de solidificación.

**Tabla 3.7. Resultado del porcentaje de carbono equivalente para la muestra analizada de cigüeñal**

<b>Análisis químico</b>	
<b>%C</b>	3.33
<b>%Si</b>	2.39
<b>%P</b>	0.043
<b>% CE</b>	4.14

Fuente: Elaboración propia

El resultado del porcentaje de carbono equivalente obtenido de la Tabla 3.7, indica que la fundición dúctil es de tipo hipo-eutéctica la cual en su microestructura tiene (Perlita + Cementita + Ledeburita), dando como resultado final una matriz ferrítica con presencia de perlita. La simulación de la fundición hipo-eutéctica confirmará si los elementos aleantes están en un rango correspondiente para obtener una pieza óptima.

### 3.3.3 Diseño del Bebedero

El diseño del sistema de vertido o canales de entrada en la fundición es un factor crítico, debido a que dimensiones incorrectas pueden ocasionar falta de llenado, pre-solidificación y flujo turbulento que presentará acumulación de aire en cavidades, así como porosidades. Por lo tanto, se diseña el bebedero considerando un flujo sin obstrucciones, de secciones cortas debido al tamaño de la pieza a fundir y con diámetros correspondientes a los canales de alimentación de mayor a menor sección.

Dichas secciones varían siguiendo las condiciones de áreas para bebederos en sistemas de alimentación, siguiendo la regla  $1 > 0.75 > 0.5$  estipulada de forma experimental por el Ing. Ignacio Wiesner (Taller de fundición Wiesner).

En donde 1 representa la sección (1), 0.75 la sección (2) y 0.5 la sección (3). Tal como se muestra en la Tabla 3.8, la cual contiene los diámetros y longitudes de cada sección del bebedero.

**Tabla 3.8. Resultados de las dimensiones del bebedero**

	<b>Sección (1)</b>	<b>Sección (2)</b>	<b>Sección (3)</b>
<b>Diámetro (mm)</b>	25	18	9
<b>Largo(mm)</b>	150	306	38

Fuente: Elaboración propia

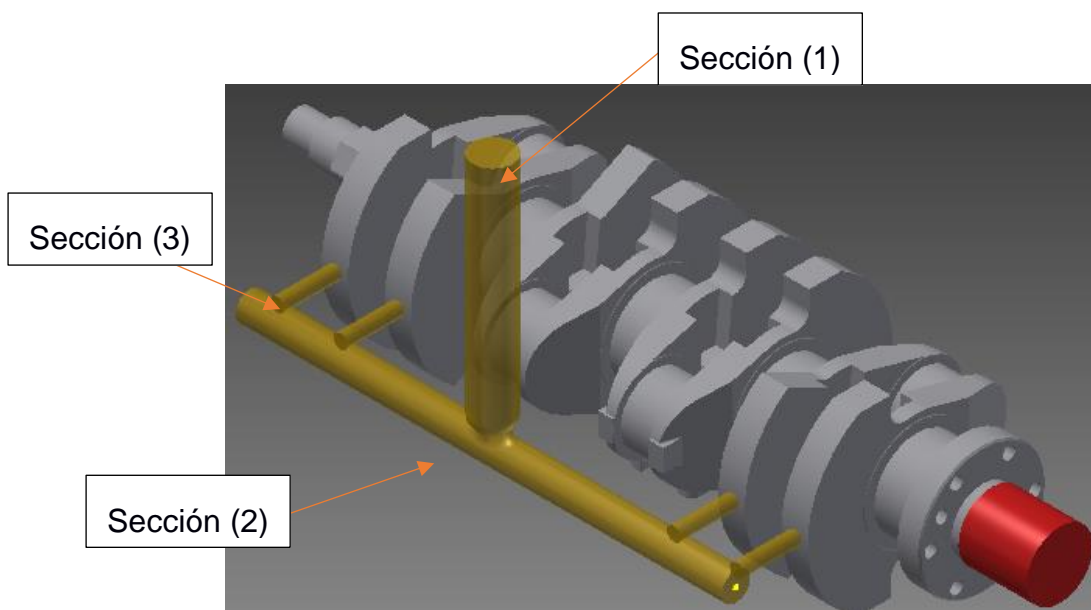
A su vez se consideran los datos de operación para el bebedero en cuanto al material fundido en la Tabla 3.9.

**Tabla 3.9. Datos de operación del bebedero**

<b>Material Metálico</b>	Hierro Dúctil
<b>Temperatura de Fusión (°C)</b>	1160
<b>Temperatura Máxima de Operación (°C)</b>	1400

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, el bebedero tendrá el siguiente diseño de forma de acuerdo a las condiciones y especificaciones desarrolladas, tal como se muestra en la Figura 3.4.



**Figura 3.4. Diseño de forma del bebedero**

Fuente: Elaboración propia

Esta figura representa el esquema del bebedero, en donde la sección (1) corresponde a la entrada vertical, la sección (2) es el canal horizontal que distribuye el metal fundido a las cavidades del molde por medio de las 4 entradas, las cuales corresponden a la sección (3).

### 3.3.4 Tiempo de llenado

El tiempo necesario para llenar la cavidad del molde es un parámetro determinante para el proceso de fundición, su importancia radica en la falta o exceso de material que se pueda producir en el momento de verter la colada. Permite un flujo uniforme y continuo hacia todas las cavidades del molde y se representa matemáticamente por medio del volumen total de la cavidad a llenar sobre el caudal de material fundido.

Entonces, primero se calcula la velocidad necesaria por medio del principio de Bernoulli, usando la ecuación (7) de la sección 1.3.3.4, con los valores de gravedad y altura del bebedero.

**Tabla 3.10. Resultado de la velocidad de llenado**

<b>G</b> [cm/s <sup>2</sup> ]	981
<b>h<sub>b</sub></b> [cm]	15
<b>v<sub>b</sub></b> [cm/s]	171

Fuente: Elaboración propia

Con el valor de velocidad obtenido de la Tabla 3.10, se procede a calcular el caudal requerido usando la ecuación (9) de la sección 1.3.3.4.

**Tabla 3.11. Resultado del caudal del metal fundido**

<b>v<sub>b</sub></b> [cm/s]	171
<b>A<sub>b</sub></b> [cm <sup>2</sup> ]	4.9
<b>Q</b> [cm <sup>3</sup> /s]	840

Fuente: Elaboración propia



De la Tabla 3.11 se obtuvo el caudal total requerido para verter el metal fundido en el bebedero, el cual por condiciones de diseño tiene un diámetro de 25 mm correspondiente a la sección (1) de la Tabla 3.8 citada anteriormente.

Con los datos obtenidos del software Inventor, del volumen del cigüeñal y bebedero, ubicados en el Anexo D y E respectivamente; más el volumen de la mazarota, se calculó el volumen total de la cavidad del molde usando la ecuación (8) de la sección 1.3.3.4.

$$V_{total} = 1904 \text{ cm}^3$$

Reemplazando el volumen total y el caudal hallados en la ecuación (7) de la sección 1.3.3.4, se tiene:

**Tabla 3.12. Resultado del tiempo de llenado**

$V_P$ [cm <sup>3</sup> ]	1685
$V_m$ [cm <sup>3</sup> ]	59
$V_b$ [cm <sup>3</sup> ]	160
$V_{total}$ [cm <sup>3</sup> ]	1904
$Q$ [cm <sup>3</sup> /s]	840
$T_{MF}$ [s]	2.27

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, 2.27 segundos es el tiempo requerido para llenar el molde de arena, como se muestra en la Tabla 3.12. Concluido los cálculos se procederá a realizar la simulación del proceso de fundición.

En la siguiente sección se mostrarán los resultados de la simulación con la ayuda del software MAGMA, para la fundición de hierro dúctil.

### 3.3.5 Simulación del proceso de fundición

La primera simulación se efectuó con los parámetros y condiciones iniciales del modelo patrón. En los que la temperatura de fusión fue de 1400 °C, el tiempo de llenado 2.27 segundos y el porcentaje de carbono equivalente 4.11%. Dando como resultado, tiempo de solidificación total de 56 minutos, tiempo de solidificación local de 9 minutos y fallas tales como porosidades y puntos calientes.

Por lo tanto, se realizó una nueva simulación, en la que se optó por el incremento de la composición química del material, ya que al variar el punto de solidificación de hipo-eutéctico (%CE<4.33) a eutéctico (%CE=4.33) por medio de los elementos aleantes, se consiguió disminuir el porcentaje de contracción volumétrica y así corregir deficiencias de fluidez. Los porcentajes que se incrementaron fueron

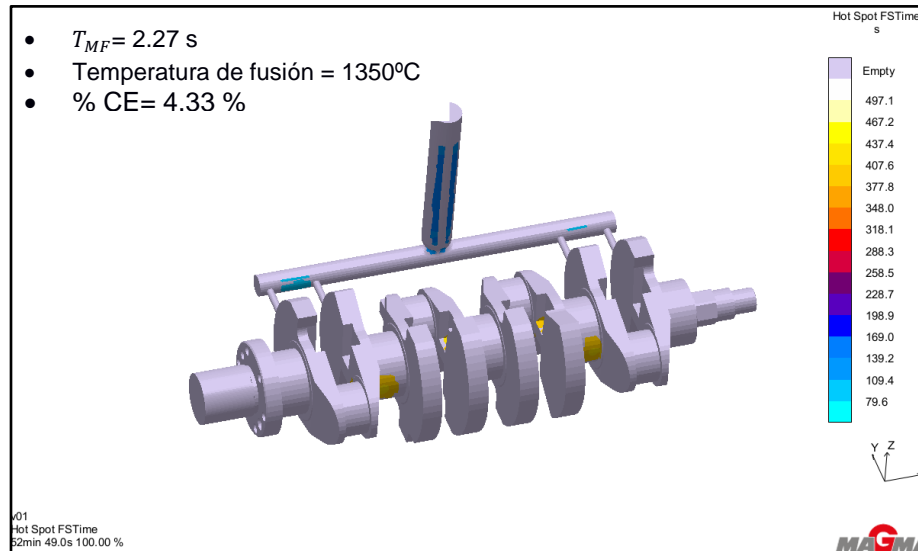
**Tabla 3.13. Elementos de la colada que se incrementaron para la fundición**

	Condición Inicial	Condición optimizada
<b>Carbono (C)</b>	3.33%	3.5 %
<b>Silicio (Si)</b>	2.39%	2.5 %
<b>Manganeso (Mn)</b>	0.208%	0.6 %

Fuente: Elaboración propia

Con los elementos de la Tabla 3.13 que se incrementaron se obtuvieron los siguientes resultados.

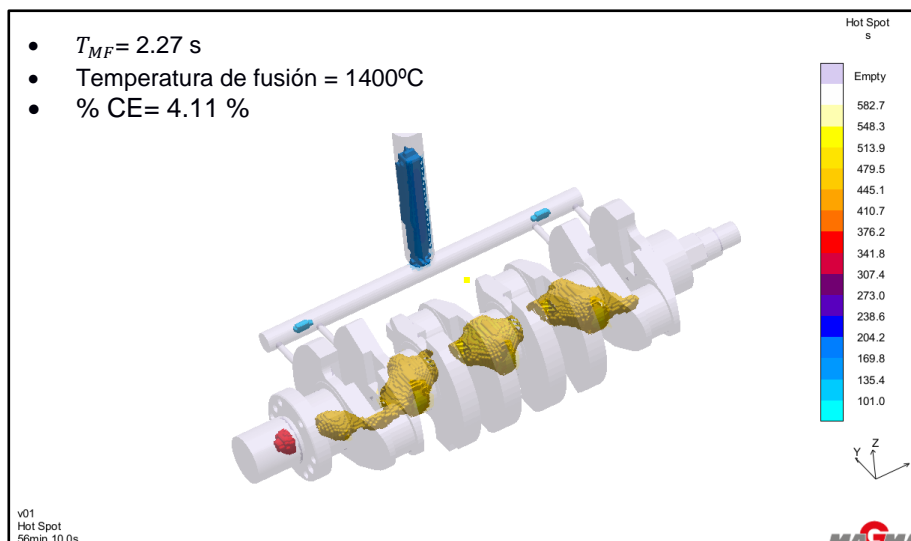
La zona de los puntos calientes mejoró con respecto a la primera simulación y nos indica que a medida que se enfría el cigüeñal va disipando el calor remanente en las secciones del eje, en un tiempo aproximado de 6 minutos. Tal como se muestra en la Figura 3.5.



**Figura 3.5. Resultado de la simulación optimizada (puntos calientes)**

Fuente: Software de fundición MAGMA

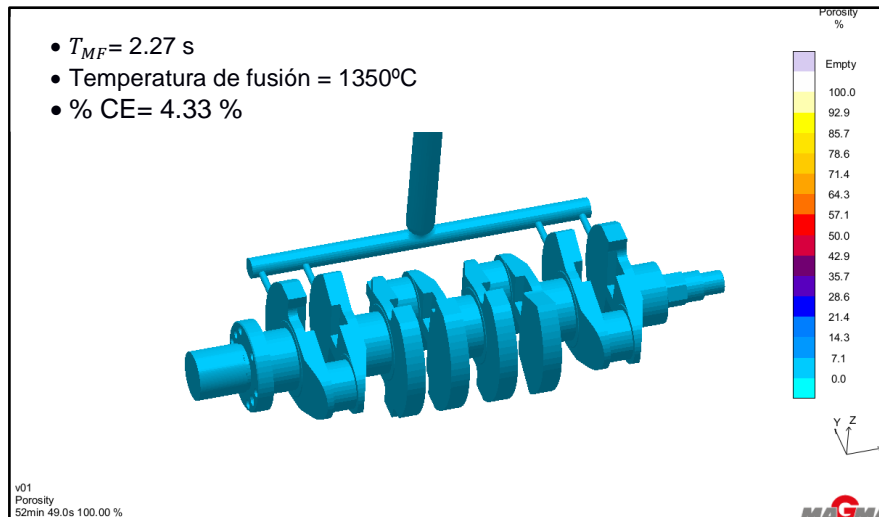
Mientras que la Figura 3.6, presentó puntos calientes en la simulación inicial, los cuales se formaron en las secciones del eje y se mantuvieron presentes durante un tiempo de 8 minutos.



**Figura 3.6. Resultado de la simulación inicial (puntos calientes)**

Fuente: Software de fundición MAGMA

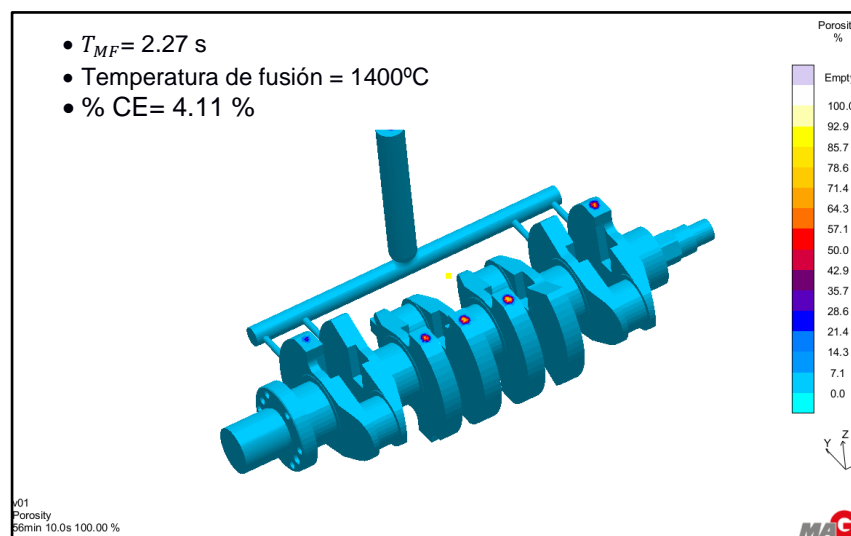
La Figura 3.7, indica que el nivel de porosidades en la simulación optimizada mejoró notablemente con respecto a la simulación inicial. La cantidad de gases atrapados en el molde de fundición son los causantes de las imperfecciones en la microestructura dando origen a las micro porosidades.



**Figura 3.7. Resultado de la simulación optimizada (porosidad)**

Fuente: Software de fundición MAGMA

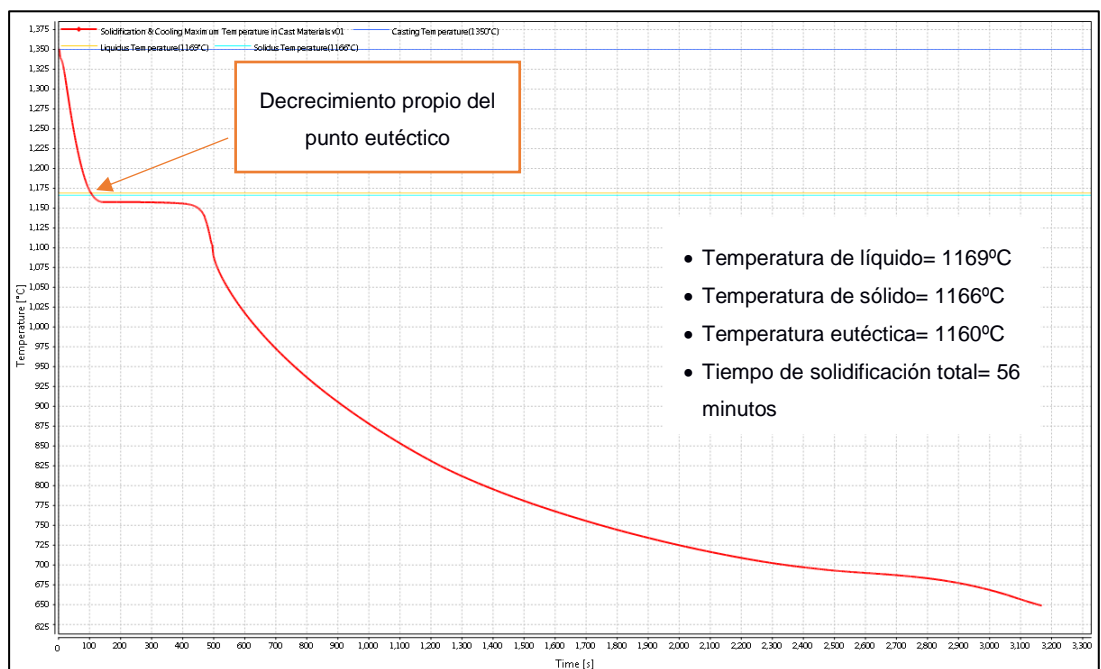
La simulación inicial, Figura 3.8, presentó fallas perceptibles como puntos rojos, que se presentan como micro porosidades, las cuales son perjudiciales al momento de pulir o maquinar el cigüeñal.



**Figura 3.8. Resultado de la simulación inicial (porosidad)**

Fuente: Software de fundición MAGMA

La curva de solidificación de la simulación final, presentó un decrecimiento adecuado, el cual representa la velocidad de enfriamiento desde el punto eutéctico del material. Esta curva tiene una sección continua justo después de la línea de sólido, lo que indica que el material tuvo el tiempo necesario para que todo el carburo perteneciente a la solución de austenita líquida se transforme en grafito nodular, tiempo aproximado de 6 minutos, formando así la microestructura de la fundición dúctil. Luego de este tiempo, comenzó un descenso gradual de la temperatura hasta los 56 minutos, en donde el material alcanza la temperatura ambiente. Tal como se muestra en la Figura 3.9.

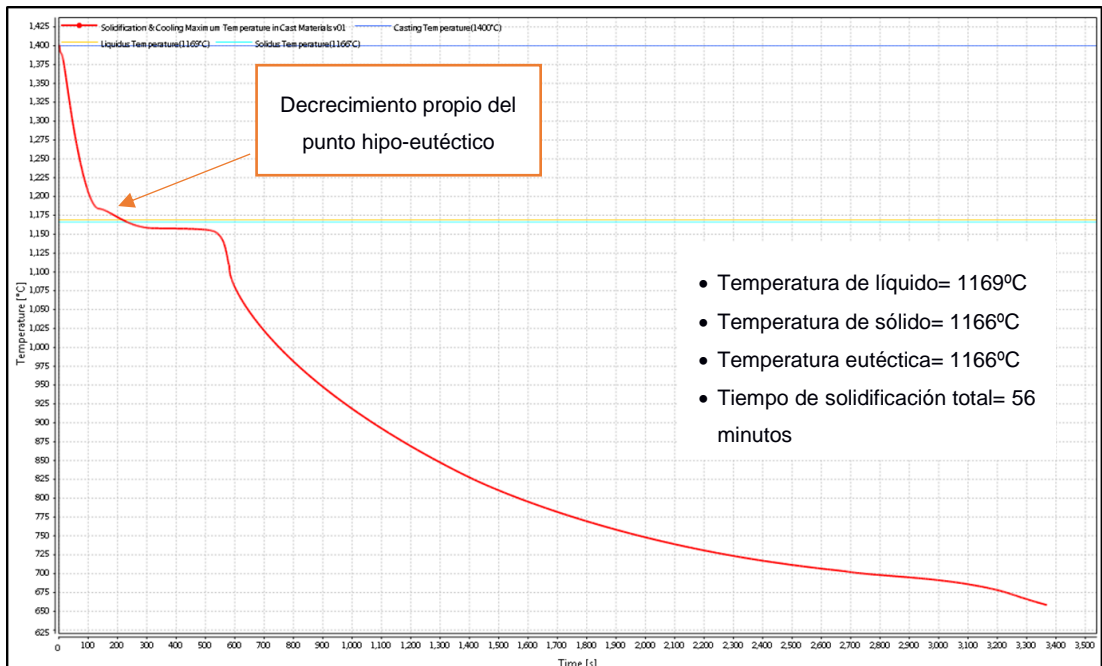


**Figura 3.9. Resultado de la simulación optimizada (Curva de solidificación total)**

Fuente: Software de fundición MAGMA

Mientras que la simulación inicial presentó una curva de solidificación, propia del punto hipoeutéctico más acelerada, en la zona de transformación de líquido a sólido, con un tiempo de 5 minutos aproximadamente, en los cuales los carburos pertenecientes a la solución de austenita no alcanzaron en su totalidad a segregarse en grafito nodular, obteniendo un menor conteo de nódulos por área, lo que representa una disminución de ciertas

características y propiedades mecánicas que podría alcanzar el material; correspondiente a una curva de enfriamiento lento. Tal como se muestra en la Figura 3.10, que también nos indica que el material alcanza una temperatura ambiente en un tiempo de 56 minutos.



**Figura 3.10. Resultado de la simulación inicial (Curva de solidificación total)**

Fuente: Software de fundición MAGMA

Otras propiedades mecánicas que mejoraron con el incremento del porcentaje de carbono equivalente fueron, máximo esfuerzo de fluencia, esfuerzo de tensión, elongación y dureza brinell.

- El esfuerzo de fluencia se incrementó entre 509-597 MPa con relación a los valores iniciales del cigüeñal de fundición dúctil clase 80-50-06, que eran de 380 MPa.
- El esfuerzo de tensión máximo en el cigüeñal, se incrementó en un rango entre 894-958 MPa en comparación a los 550 MPa que presenta el hierro dúctil grado 80-55-06.
- La elongación máxima en el cigüeñal se mantiene similar a las propiedades mecánicas del modelo patrón, entre 6-7%.

- En cuanto a la dureza también mejoro en un rango de 275-297 HB, para los 250 HB de dureza en la pieza inicial.

Esta simulación también presentó mejores valores en los porcentajes de constituyentes que componen la matriz metálica, del material colado:

- El porcentaje de ferrita que adquiere la pieza se encuentra en una rango de 7.70-15.40 %. El incrementar la cantidad de ferrita produce mejores propiedades anti desgaste.
- El porcentaje de perlita en la pieza esta entre 84.60-89.73 %, lo que brinda características de tenacidad y resistencia al impacto.
- El resultado de la fracción de fase eutéctica, indica que el material pasó de líquido a sólido (ledeburita), solidificando en función de la velocidad de enfriamiento. Por lo tanto, verificando los datos obtenidos, con un análisis paralelo del diagrama hierro-carbono; el material se ha solidificado estable (grafito como forma final) por debajo de la línea eutéctica, en un rango de solidificación eutéctico de 98.79-99.44 %.

**Nota:** Todos los gráficos referentes a los resultados expuestos se encuentran en la sección del Anexo F.

Por lo tanto, las propiedades mejoraron notablemente variando los parámetros de composición química y disminuyendo la temperatura de vaciado, pero en posteriores simulaciones con ausencia de la mazarota en el diseño, se obtuvieron los mismos resultados del proceso de fundición optimizado.

Lo que resalta como punto de interés es que el material bajo el proceso de fundición de tipo eutéctico no tiende a sufrir deformaciones volumétricas que afecten al molde y al modelo cuando este termina de solidificarse, ya que las fases que constituyen al material se mantienen homogéneas bajo la temperatura de solidificación, dejando la posibilidad de omitir la mazarota e

inclusive el sobredimensionamiento, para casos de estudio bajo la metodología de simulación. En el Anexo G se muestran los resultados de esta simulación.

### 3.3.6 Análisis de costos

En esta sección se describirá los costos involucrados para la correcta fabricación del cigüeñal. Los valores a considerar serán, costos directos, indirectos y totales.

**Tabla 3.14. Costos directos**

<b>Materiales</b>	<b>Kg</b>	<b>Costo por unidad (USD)</b>	<b>Costo total (USD)</b>
Arena Sílice (SiO <sub>2</sub> )	10	10	100
CO <sub>2</sub>	1	15	15
Silicato de Sodio Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	1	10	10
Inoculante y Nodulizante (Ferro -Magnesio)	1	17	17
Chatarra de hierro	20	1.5	30
Total (USD)			172

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 3.14 muestra el costo total de los materiales a requerir, no obstante la capacidad de producción queda delimitada para un cigüeñal en este caso de estudio pero con la posibilidad de disminuir costos en producciones de mayor volumen.

Los siguientes valores serán por concepto de servicios adicionales que se requieren para fundir la pieza y rectificarla dando el acabado superficial



necesario para que el cigüeñal quede funcional, así como también el valor por el respectivo diseño del modelo, que puede ser fabricado en madera para luego acoplarse de mejor manera al molde de arena. Tal como se muestra en Tabla 3.15.

**Tabla 3.15. Costos indirectos**

<b>Servicios Prestados</b>	<b>Tiempo Requerido (Días)</b>	<b>Costo (USD)</b>
Fabricación del modelo patrón	2	60
Fabricación de la caja de moldeo y fundición	1	200
Rectificado del cigüeñal	1	30
Total (USD)		290

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.16. Costo total de fabricación**

Costos directos (USD)	172
Costos indirectos (USD)	290
Subtotal (USD)	462
Imprevistos (USD)	23
Total (USD)	485

Fuente: Elaboración propia

Entonces el costo total para la fabricación del cigüeñal se estima en \$ 485, el cual incluye un valor por imprevistos del 5% del subtotal, costos directos asociados a materiales y costos indirectos relacionados a servicios prestados, tal como se muestra en la Tabla 3.16.

Cabe recalcar que la fabricación en unidades tiene un costo más elevado que por volúmenes. En producciones de mayor volumen, el costo de la mano de obra tiende a disminuir junto con el material, para al final poder obtener un costo competitivo presentado a los consumidores. Costos relativos a cigüeñales en el mercado nacional, se muestran en el Anexo H.

### **3.3.7 Cronograma de diseño del cigüeñal**

El presente cronograma se desarrolló en función de la fabricación por unidad del cigüeñal, en un tiempo establecido de 5 días incluyendo el hecho de contar con el modelo patrón y en base a esto conseguir los suministros, materiales, mano de obra, así como los equipos o servicios contratados pertinentes, Figura 3.11.

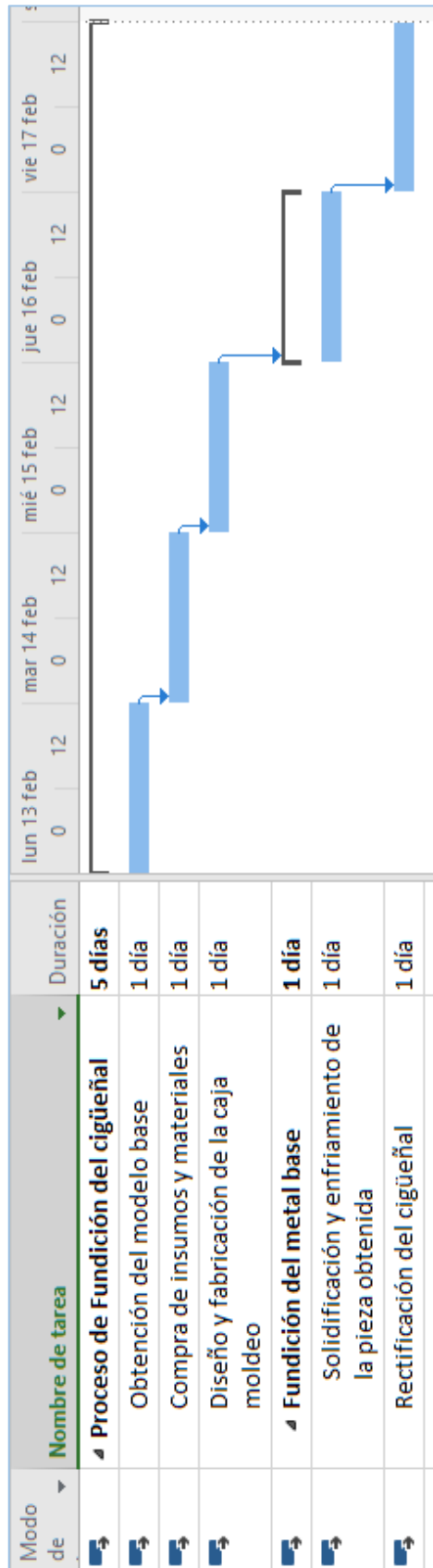


Figura 3.11. Cronograma para fabricación del cigüeñal

Fuente: Elaboración propia

# CAPÍTULO 4

## 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las dificultades se presentaron en el capítulo tres con la utilización del software MAGMA para la simulación de proceso de fundición del hierro dúctil. El hecho de manejar el programa fue todo un reto por la falta de conocimiento y el poco entrenamiento de parte de los encargados del programa, a su vez la interpretación de resultados también generó ciertos inconvenientes que al final se lograron superar.

Las condiciones necesarias para realizar una correcta simulación se basaron en el mallado, el cual consistía en generar un parámetro de lectura de los volúmenes del sólido, usando el método de elementos finitos cúbicos en las secciones malladas, para que el software pueda interpretar los gradientes de temperatura y otros datos requeridos por este.

Pero si el mallado era muy pequeño en las secciones de mayor diámetro en la pieza, el programa caía en un retardo por la poca asimilación de la información, lo cual sirvió de mucha ayuda para que en posteriores simulaciones, se escojan las dimensiones necesarias del mallado, siempre analizando una medida referente al menor diámetro o sección del modelo.

Luego de superar la etapa del mallado, siguió la consideración de la composición química de la colada, la cual tenía alta importancia debido a que hay elementos que promueven una estructura homogénea y dan la forma nodular del grafito, que a su vez forma la matriz de la fundición dúctil, siendo sustancial para el estudio del comportamiento del hierro. Al variar los elementos claves, se logró llegar a la composición que brinde la mejor solidificación y menores deficiencias en la pieza.

Por otro lado, la temperatura juega un papel importante en la disolución de los carburos de hierro y por ende en la solidificación que resulte posterior. Pero para el caso del hierro dúctil con incremento de sus componentes químicos, no requirió de

un sobrecalentamiento del metal para poder obtener las formas esferoidales del grafito.

Al llegar a la etapa final del proceso de simulación, se requirió de la experiencia por parte del taller de fundición Wiesner, el cual sirvió de mucha ayuda para poder comprender los resultados y concluir acerca de estos.

#### **4.1 Conclusiones**

- El análisis, químico, de dureza y la metalografía del hierro permitieron conocer el grado de la fundición nodular, la cual se estableció como 80-55-06 sin tratamiento térmico, para en función de estos datos, proceder con las simulaciones.
- La fundición por gravedad en arena verde, se definió como el proceso adecuado para obtener un cigüeñal en fundición dúctil, con un uso mínimo de materiales para su fabricación.
- En cuanto a la optimización de las propiedades mecánicas de cigüeñal, el hierro dúctil presenta la mejor colabilidad, cuando el porcentaje de carbono (C) se mantiene entre 3.2-3.6 %.
- El incremento, del silicio (Si) a 2.5 %, manganeso (Mg) a 0.6 % y la disminución de fósforo (P) a 0.017 %, permitieron obtener un mínimo de defectos en el cigüeñal tales como puntos calientes y porosidades.
- El costo de fabricación de este elemento mecánico por unidad es de \$ 485, en el cual se incluye costos por materiales, servicios adicionales e imprevistos. Este valor fue competitivo para los precios del mercado automotriz nacional
- La curva total de solidificación del material fue de 56 minutos aproximadamente tanto para la simulación inicial y final. Pero las curvas de enfriamiento después la región líquida y que permiten la segregación final del grafito en la forma esferoidal, variaron de 6 a 8 minutos para cada simulación.

## 4.2 Recomendaciones

- La fabricación del cigüeñal validará los resultados obtenidos por el software de fundición (MAGMA)
- El punto eutéctico en la fundición del hierro dúctil permite obtener una pieza omitiendo la mazarota.
- Las mejores propiedades mecánicas se adquieren con un incremento controlado del Silicio (Si) en la composición de la colada.
- Porcentajes de manganeso (Mn) entre 0.5–1% permiten tener una matriz perlítica controlada.
- Mejores propiedades mecánicas se adquieren en base a un incremento controlado de silicio en la colada.
- Porcentajes entre 0.5-1% de Mn permiten obtener una matriz perlítica controlada.
- Al final el proceso de fundición se requiere de servicios adicionales los cuales por medio de un trabajo de rectificado, se le dé el acabado final a la pieza. Ciertas consideraciones de tolerancias en el maquinado para fundiciones se muestran en el Anexo I.
- Otra alternativa de optimización de la pieza en base al modelo patrón sería el tratamiento térmico superficial para mejorar las características anti desgaste que son primordiales en el funcionamiento del cigüeñal. Para el caso de fundición dúctil se utiliza el proceso de endurecimiento por llama o temple a llama el cual consiste en calentar la superficie de la pieza a una temperatura por encima del rango crítico por medio de un calentador oxiacetilénico u oxigas localmente aplicado, templando la superficie para promover formación de martensita obteniendo una capa resistente al desgaste y a la fatiga pero con propiedades similares a las originales.
- A las fundiciones de hierro dúctil se las podría tratar solo con un proceso de recocido, con el cual adquiere propiedades mecánicas adecuadas a su diseño, tal como se muestra en el Anexo J.

# BIBLIOGRAFÍA

## 5. BIBLIOGRAFÍA

1. Academia de Manufactura. (Marzo de 2015). *Técnicas de Moldeo*.
2. Alberto Cardona. (2006). *Análisis de la solidificación de la fundición nodular: Simulación y validación experimental*. Santa Fe.
3. Aprendemos Tecnología. (16 de Marzo de 2009). *Método de moldeo por arena*. Obtenido de <https://aprendemostecnologia.org/2009/03/16/metodo-de-moldeo-por-arena/>
4. *Arena Silica*. (Septiembre de 2016). Obtenido de Carbotecnia: <https://www.carbotecnia.info/producto/medio-arena-silica-para-filtros-de-agua/>
5. Banco Central del Ecuador-BCE. (2010). *Estadísticas Económicas*. Obtenido de <https://www.bce.fin.ec/index.php/component/k2/item/757>
6. Barajas, Y. N. (2016). *Propiedades de las arenas de moldeo*. Valparaíso.
7. Castro, G. (2009). *www.castro.com*.
8. EcuRed. (Marzo de 2016). *Horno de inducción*. Obtenido de [https://www.ecured.cu/Horno\\_de\\_inducci%C3%B3n](https://www.ecured.cu/Horno_de_inducci%C3%B3n)
9. Edina. (2010). *Repuestos y partes automotrices*. Obtenido de [https://www.edina.com.ec/guia-telefonica/guia\\_telefonica.aspx?fpr=9&fci=238&fse=-1&fcl=-1&f=1&b=Autom%C3%B3viles+Repuestos+y+Accesorios&c=](https://www.edina.com.ec/guia-telefonica/guia_telefonica.aspx?fpr=9&fci=238&fse=-1&fcl=-1&f=1&b=Autom%C3%B3viles+Repuestos+y+Accesorios&c=)
10. E-educativa Catedu. (2010). *Archivos repositorio*. Obtenido de [http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4910/html/6\\_diagrama\\_fec.html](http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4910/html/6_diagrama_fec.html)
11. Facultad Regional Rosario. (2015). *Tratamientos de las fundiciones de hierro*. Obtenido de [https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5\\_anio/metalografia/15-TT\\_Fundiciones\\_v2.pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/15-TT_Fundiciones_v2.pdf)
12. Gardey, J. P. (2010). *Definición de Fundición*. Obtenido de <http://definicion.de/fundicion/>

13. GIETECH. (Abril de 2008). *Solidification Mechanism*. Obtenido de Ductile Iron: [https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:JpGSsvfeX\\_cJ:https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html%3Fid%3D57ed7d1adc332dfe8628b7c4%26assetKey%3DAS%253A411756678664192%25401475181850343+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=ec](https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:JpGSsvfeX_cJ:https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html%3Fid%3D57ed7d1adc332dfe8628b7c4%26assetKey%3DAS%253A411756678664192%25401475181850343+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=ec)
14. Groover. (2007). *Fundamentos de Manufactura Moderna*. Estados Unidos: Mc Graw Hill Editores S.A.
15. Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de Manufactura Moderna*. En M. P. Groover, *Procesos de Solidificación* (págs. 198-238). México: Mc Graw Hill Editores S.A.
16. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (1 de Noviembre de 2012). *Ecuador en cifras*. Obtenido de Infoeconomía: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Infoeconomia/info7.pdf>
17. Magmasoft. (2012). *Magma*. Obtenido de <http://www.magmasoft.com/en/index.html>
18. Mecánica fácil. (2010). *Cigüeñal*. Obtenido de <http://www.mecanicafacil.info/mecanica.php?id=ciguenal>
19. Metals Handbook. (2005). *Properties and Selection: Irons, steels and high performance alloys*. Estados Unidos: ASM International.
20. Mondelo, F. V. (31 de Marzo de 2013). *Aleaciones*. Obtenido de Diagramas de equilibrio: <https://es.slideshare.net/recursosabalar/aleaciones-diagramas>
21. Paula Andrea Ramirez P. (2014). CÁLCULO DEL ÍNDICE DE FINURA A.F.S. Y EXAMEN DE LA FORMA DE LOS GRANOS DE LAS ARENAS. Bucaramanga, Santander, Colombia.
22. Serrano, R. (2011). *Procesos de fundición*. Obtenido de Diseño de las mazarotas: <http://www.raquelserrano.com/apuntes-2/segundo/procesos-industriales/>



# **ANEXOS**

# **ANEXO A**

**DATOS DEL BANCO CENTAL DEL ECUADOR DE NIVELES DE  
IMPORTACION DE PIEZAS AUTOMOTRICES**

**Periodos 2015-2016**



Banco Central del Ecuador

ESTADÍSTICAS DE COMERCIO EXTERIOR DE BIENES

IMPORTACIONES / por Subpartida y País Origen

Período: Anual - Años: 2015 | (TM y valores en miles de USD)

Código Subpartida	Subpartida	Código País Origen	País Origen	2015		
				TM (Peso Neto)	FOB	CIF
<b>TOTALES:</b>				<b>254,7</b>	<b>3.860,3</b>	<b>4.144,0</b>
8483109100	Cigüeñales	AUS	AUSTRALIA	0,2	2,3	2,5
8483109100	Cigüeñales	AUT	AUSTRIA	0,0	4,3	4,7
8483109100	Cigüeñales	BEL	BÉLGICA	0,0	1,1	1,2
8483109100	Cigüeñales	BRA	BRASIL	21,7	332,3	339,4
8483109100	Cigüeñales	CAN	CANADÁ	0,1	1,8	1,7
8483109100	Cigüeñales	CHN	CHINA	113,8	630,2	649,6
8483109100	Cigüeñales	CZE	REPÚBLICA CHECA	0,0	0,4	0,5
8483109100	Cigüeñales	DEU	ALEMANIA	3,8	211,8	224,3
8483109100	Cigüeñales	ESP	ESPAÑA	9,4	198,6	270,5
8483109100	Cigüeñales	FIN	FINLANDIA	0,0	1,7	1,8
8483109100	Cigüeñales	FRA	FRANCIA	0,1	8,5	9,4
8483109100	Cigüeñales	GBR	REINO UNIDO	0,9	41,1	46,7
8483109100	Cigüeñales	HKG	HONG KONG	1,3	8,4	8,7
8483109100	Cigüeñales	IND	INDIA	4,3	96,5	99,2
8483109100	Cigüeñales	ITA	ITALIA	2,2	34,1	36,3
8483109100	Cigüeñales	JPN	JAPÓN	9,7	467,3	493,0
8483109100	Cigüeñales	KOR	COREA (SUR), REPÚBLICA DE	50,5	813,8	917,2
8483109100	Cigüeñales	MEX	MÉXICO	0,3	7,1	7,3
8483109100	Cigüeñales	NLD	PAÍSES BAJOS (HOLANDA)	0,2	45,2	46,1
8483109100	Cigüeñales	NOR	NORUEGA	0,1	10,7	11,1

Figura A1. Estadística de importación de cigüeñales 2015, parte 1

Fuente: Elaboración propia



Banco Central del Ecuador

ESTADÍSTICAS DE COMERCIO EXTERIOR DE BIENES

IMPORTACIONES / por Subpartida y País Origen

Período: Anual - Años: 2015 | (TM y valores en miles de USD)

Código Subpartida	Subpartida	Código País Origen	País Origen	2015		
				TM (Peso Neto)	FOB	CIF
<b>TOTALES:</b>				<b>254,7</b>	<b>3.860,3</b>	<b>4.144,0</b>
8483109100	Cigüeñales	PAN	PANAMÁ	0,2	0,6	0,6
8483109100	Cigüeñales	PER	PERÚ	0,0	0,8	0,8
8483109100	Cigüeñales	POL	POLONIA	0,1	4,1	4,3
8483109100	Cigüeñales	PRK	COREA (NORTE), REP.POP.DEMOCRATICA DE	0,0	11,1	11,1
8483109100	Cigüeñales	ROU	RUMANIA	0,1	0,7	0,8
8483109100	Cigüeñales	RUS	RUSIA	0,1	0,7	0,8
8483109100	Cigüeñales	SGP	SINGAPUR	0,0	1,1	1,2
8483109100	Cigüeñales	SWE	SUECIA	1,3	41,9	43,0
8483109100	Cigüeñales	THA	TAILANDIA	0,1	5,6	5,9
8483109100	Cigüeñales	TKL	TOKELAU	0,0	1,8	2,1
8483109100	Cigüeñales	TUR	TURQUÍA	5,6	58,7	61,3
8483109100	Cigüeñales	TWN	TAIWÁN	0,5	8,5	8,8
8483109100	Cigüeñales	URY	URUGUAY	0,1	1,4	1,5
8483109100	Cigüeñales	USA	ESTADOS UNIDOS	28,2	806,4	830,8

Figura A2. Estadística de importación de cigüeñales 2015, parte 2

Fuente: Elaboración propia



Banco Central del Ecuador

ESTADÍSTICAS DE COMERCIO EXTERIOR DE BIENES

IMPORTACIONES / por Subpartida y País Origen

Período: Anual - Años: 2015 | (TM y valores en miles de USD)

Período	Código Subpartida	Subpartida	Código País Origen	País Origen	TM (Peso Neto)	FOB	CIF
2015	8483109100	Cigüeñales	POL	POLONIA	0,1	4,1	4,3
2015	8483109100	Cigüeñales	PRK	COREA (NORTE), REP.POP.DEMOCRATICA DE	0,0	11,1	11,1
2015	8483109100	Cigüeñales	ROU	RUMANIA	0,1	0,7	0,8
2015	8483109100	Cigüeñales	RUS	RUSIA	0,1	0,7	0,8
2015	8483109100	Cigüeñales	SGP	SINGAPUR	0,0	1,1	1,2
2015	8483109100	Cigüeñales	SWE	SUECIA	1,3	41,9	43,0
2015	8483109100	Cigüeñales	THA	TAILANDIA	0,1	5,6	5,9
2015	8483109100	Cigüeñales	TKL	TOKELAU	0,0	1,8	2,1
2015	8483109100	Cigüeñales	TUR	TURQUÍA	5,6	58,7	61,3
2015	8483109100	Cigüeñales	TWN	TAIWÁN	0,5	8,5	8,8
2015	8483109100	Cigüeñales	URY	URUGUAY	0,1	1,4	1,5
2015	8483109100	Cigüeñales	USA	ESTADOS UNIDOS	28,2	806,4	830,8

Figura A3. Estadística de importación de cigüeñales 2015, parte 3

Fuente: Elaboración propia



Banco Central del Ecuador

ESTADÍSTICAS DE COMERCIO EXTERIOR DE BIENES

IMPORTACIONES / por Subpartida y País Origen

Período: Anual - Años: 2015 | (TM y valores en miles de USD)

Periodo	Código Subpartida	Subpartida	Código País Origen	País Origen	TM (Peso Neto)	FOB	CIF
2015	8483109100	Cigüetales	AUS	AUSTRALIA	0,2	2,3	2,5
2015	8483109100	Cigüetales	AUT	AUSTRIA	0,0	4,3	4,7
2015	8483109100	Cigüetales	BEL	BÉLGICA	0,0	1,1	1,2
2015	8483109100	Cigüetales	BRA	BRASIL	21,7	332,3	339,4
2015	8483109100	Cigüetales	CAN	CANADÁ	0,1	1,6	1,7
2015	8483109100	Cigüetales	CHN	CHINA	113,8	630,2	649,6
2015	8483109100	Cigüetales	CZE	REPÚBLICA CHECA	0,0	0,4	0,5
2015	8483109100	Cigüetales	DEU	ALEMANIA	3,8	211,8	224,3
2015	8483109100	Cigüetales	ESP	ESPAÑA	9,4	198,6	270,5
2015	8483109100	Cigüetales	FIN	FINLANDIA	0,0	1,7	1,8
2015	8483109100	Cigüetales	FRA	FRANCIA	0,1	8,5	9,4
2015	8483109100	Cigüetales	GBR	REINO UNIDO	0,9	41,1	46,7
2015	8483109100	Cigüetales	HKG	HONG KONG	1,3	8,4	8,7
2015	8483109100	Cigüetales	IND	INDIA	4,3	96,5	99,2
2015	8483109100	Cigüetales	ITA	ITALIA	2,2	34,1	36,3
2015	8483109100	Cigüetales	JPN	JAPÓN	9,7	467,3	493,0
2015	8483109100	Cigüetales	KOR	COREA (SUR), REPÚBLICA DE	50,5	813,8	917,2
2015	8483109100	Cigüetales	MEX	MÉXICO	0,3	7,1	7,3
2015	8483109100	Cigüetales	NLD	PAÍSES BAJOS (HOLANDA)	0,2	45,2	46,1
2015	8483109100	Cigüetales	NOR	NORUEGA	0,1	10,7	11,1
2015	8483109100	Cigüetales	PAN	PANAMÁ	0,2	0,6	0,6
2015	8483109100	Cigüetales	PER	PERÚ	0,0	0,8	0,8

Figura A4. Estadística de importación de cigüetales 2015, parte 4

Fuente: Elaboración propia



Banco Central del Ecuador

ESTADÍSTICAS DE COMERCIO EXTERIOR DE BIENES

IMPORTACIONES / por Subpartida y País Procedencia

Período: Anual - Años: 2016 | (TM y valores en miles de USD)

Código Subpartida	Subpartida	Código País Procedencia	País Procedencia	2016		
				TM (Peso Neto)	FOB	CIF
<b>TOTALES:</b>				<b>140,3</b>	<b>1.712,6</b>	<b>1.769,5</b>
8483109100	Cigüeñales	ARE	EMIRATOS ÁRABES UNIDOS	0,0	7,6	7,7
8483109100	Cigüeñales	ARG	ARGENTINA	0,0	4,0	4,0
8483109100	Cigüeñales	AUT	AUSTRIA	0,0	2,0	2,5
8483109100	Cigüeñales	BEL	BÉLGICA	0,1	1,6	1,7
8483109100	Cigüeñales	BRA	BRASIL	12,9	130,3	132,4
8483109100	Cigüeñales	CAN	CANADÁ	0,0	1,5	1,5
8483109100	Cigüeñales	CHN	CHINA	69,5	364,7	376,9
8483109100	Cigüeñales	COL	COLOMBIA	0,3	7,9	8,0
8483109100	Cigüeñales	DEU	ALEMANIA	3,7	140,5	146,8
8483109100	Cigüeñales	ESP	ESPAÑA	2,5	18,5	19,6
8483109100	Cigüeñales	FRA	FRANCIA	0,0	0,3	0,3
8483109100	Cigüeñales	GBR	REINO UNIDO	0,3	13,9	15,6
8483109100	Cigüeñales	HKG	HONG KONG	5,6	37,4	38,0
8483109100	Cigüeñales	IND	INDIA	4,1	35,9	38,5
8483109100	Cigüeñales	ITA	ITALIA	1,0	14,3	15,0
8483109100	Cigüeñales	JPN	JAPÓN	3,4	119,6	122,9
8483109100	Cigüeñales	KOR	COREA (SUR). REPÚBLICA DE	8,5	199,5	204,1

Figura A5. Estadística de importación de cigüeñales 2016, parte 1

Fuente: Elaboración propia

**Banco Central del Ecuador****ESTADÍSTICAS DE COMERCIO EXTERIOR DE BIENES****IMPORTACIONES / por Subpartida y País Procedencia**

Período: Anual - Años: 2016 | (TM y valores en miles de USD)

Código Subpartida	Subpartida	Código País Procedencia	País Procedencia	2016		
				TM (Peso Neto)	FOB	CIF
<b>TOTALES:</b>				<b>140,3</b>	<b>1.712,6</b>	<b>1.769,5</b>
8483109100	Cigüetales	MEX	MÉXICO	0,8	27,8	28,4
8483109100	Cigüetales	NLD	PAÍSES BAJOS (HOLANDA)	0,2	59,6	60,4
8483109100	Cigüetales	PAN	PANAMÁ	0,5	3,9	4,1
8483109100	Cigüetales	PER	PERÚ	0,0	3,5	3,5
8483109100	Cigüetales	POL	POLONIA	1,1	4,1	4,2
8483109100	Cigüetales	ROU	RUMANIA	0,0	0,5	0,5
8483109100	Cigüetales	RUS	RUSIA	0,0	0,3	0,3
8483109100	Cigüetales	SWE	SUECIA	0,8	17,8	18,0
8483109100	Cigüetales	THA	TAILANDIA	0,1	2,3	2,5
8483109100	Cigüetales	TUR	TURQUÍA	7,5	73,0	75,0
8483109100	Cigüetales	TWN	TAIWÁN	1,1	11,2	11,3
8483109100	Cigüetales	USA	ESTADOS UNIDOS	16,1	409,7	425,9

**Figura A6. Estadística de importación de cigüetales 2016, parte 2**

Fuente: Elaboración propia



# ANEXO B

## NORMA ASTM A274 PARA FUNDICIÓN NODULAR

### Nodularity and Ferrite Pearlite Evaluation of Nodular Cast Iron as per ASTM A247 V1.5

Date:	28/04/06	Analyzed Area(mm2):	11.51	Mag:	50x
User:	Benjamin	Calibration (mic/px):	1.2642 $\mu\text{m}/\text{pixel}$	Fields Step 1:	9
		Units:	microns	Fields Step 2:	9
Sample ID:	control	Density (1/mm2):	108.91	Graphite %:	13.69
Graphine Type(s):	1	Nodularity by Count:	75.10	Pearlite %:	75.03
Graphite Distribution:	n/a	Nodularity by Area:	62.06	Ferrite %:	11.26
Graphite Size Class:	5	JIS G 5502:	84.40	Pores %:	0.00

	Count	%
Over	0	0.00
1	0	0.00
2	0	0.00
3	1	0.08
4	77	6.51
5	513	43.36
6	350	29.59
7	145	12.34
8	96	8.11

Mean: 42.37  $\mu\text{m}$   
 Corresponding Size Class: 5  
 Count: 1183

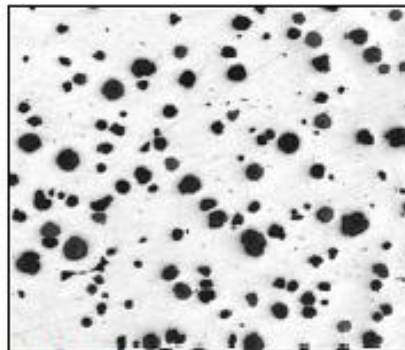
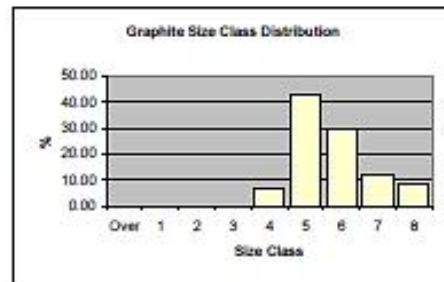


Figure 1: Nodules

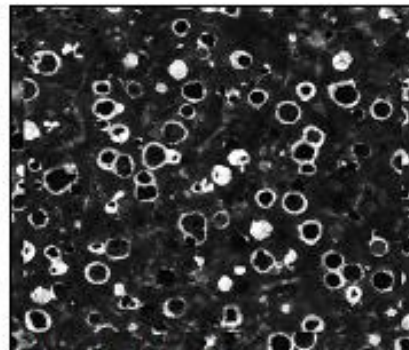


Figure 2: Ferrite and pearlite.

Fuente: Test Methods, ASTM A247, (2016)

# ANEXO C

## PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS FUNDICIONES DÚCTILES

Aleación de hierro fundido	Estado	Límite elástico a la tensión (convencional al 2%)		Resistencia máxima a la tensión		Resistencia a la compresión		Dureza Brinell
		kpsi	MPa	kpsi	MPa	kpsi	MPa	-HB
Fundición de hierro gris—clase 20	tal y como se fundió	—	—	22	152	83	572	156
Fundición de hierro gris—clase 30	tal y como se fundió	—	—	32	221	109	752	210
Fundición de hierro gris—clase 40	tal y como se fundió	—	—	42	290	140	965	230
Fundición de hierro gris—clase 50	tal y como se fundió	—	—	52	359	164	1 131	262
Fundición de hierro gris—clase 60	tal y como se fundió	—	—	62	427	187	1 289	302
Hierro dúctil 60-40-18	recocido	47	324	65	448	52	359	160
Hierro dúctil 65-45-12	recocido	48	331	67	462	53	365	174
Hierro dúctil 80-55-06	recocido	53	365	82	565	56	386	228
Hierro dúctil 120-90-02 24	revenido y templado	120	827	140	965	134	924	325

Fuente: Properties of some metals and alloys, International Nickel Co, Inc., N, Y; Metals Handbook, ASTM, (1989)

# ANEXO D

## DATOS FÍSICOS DEL CIGÜEÑAL UTILIZANDO SOFTWARE INVENTOR

General Summary Project Status Custom Save Physical

Solids  
The Part Update

Material  
Iron, Ductile Clipboard

Density 7,150 g/cm<sup>3</sup> Requested Accuracy Low

General Properties

Mass	12,055 kg (Relative)	X	-242,254 mm (Relative)
Area	239421,787 mm <sup>2</sup>	Y	-0,182 mm (Relative)
Volume	1685967,982 mm <sup>3</sup>	Z	0,033 mm (Relative)

Inertial Properties

Principal Global Center of Gravity

Principal Moments

I1	18512,801 kg m <sup>2</sup>	I2	142427,008 kg m <sup>2</sup>	I3	150188,580 kg m <sup>2</sup>
----	-----------------------------	----	------------------------------	----	------------------------------

Rotation to Principal

Rx	0,29 deg (Relative)	Ry	-0,01 deg (Relative)	Rz	-0,00 deg (Relative)
----	---------------------	----	----------------------	----	----------------------

Fuente: Software Inventor

# ANEXO E

## DATOS FÍSICOS DEL BEBEDERO UTILIZANDO SOFTWARE INVENTOR

General Summary Project Status Custom Save Physical

Solids  
The Part Update

Material  
Iron, Ductile Clipboard

Density  
7,150 g/cm<sup>3</sup>

Requested Accuracy  
Low

General Properties

Mass	1,149 kg (Relative I)	X	Center of Gravity 153,300 mm (Relati
Area	34833,689 mm <sup>2</sup> (	Y	-1,684 mm (Relativi
Volume	160755,837 mm <sup>3</sup>	Z	38,880 mm (Relativ

Inertial Properties

Principal Global Center of Gravity

Principal Moments

I1	3154,813 kg mr	I2	8565,816 kg mr	I3	5588,631 kg mr
----	----------------	----	----------------	----	----------------

Rotation to Principal

Rx	1,45 deg (Relat	Ry	0,00 deg (Relat	Rz	-0,00 deg (Rela
----	-----------------	----	-----------------	----	-----------------

Fuente: Software Inventor

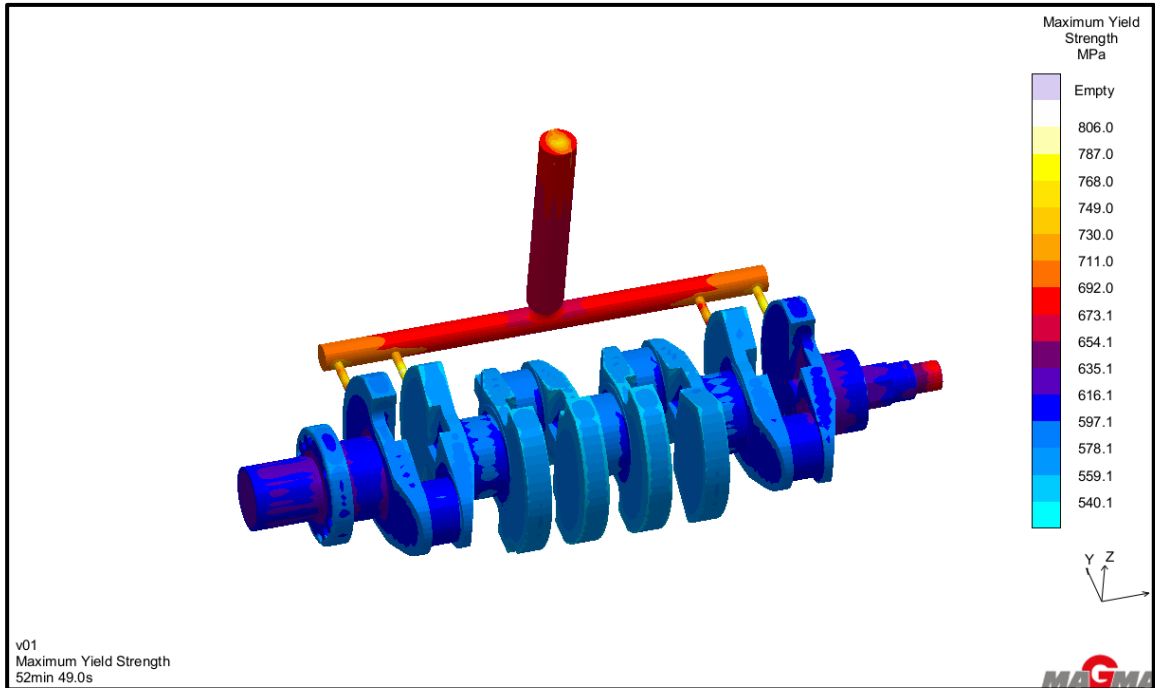
# **ANEXO F**

**RESULTADOS DE SOLIDIFICACIÓN CON PARÁMETROS DEL MODELO  
OPTIMIZADO**

Material	Mat ID	Database/File name	Initial Temperature (°C)	Iron Composition		
⊕ Cast Alloy		MAGMA/GJS-500	1350.0	C (Carbon)	3.5	%
				Ce (Cerium)	0.0	%
				Cr (Chromium)	0.0	%
				Cu (Copper)	0.5	%
				Mg (Magnesium)	0.036	%
				Mn (Manganese)	0.6	%
				Mo (Molybdenum)	0.006	%
				N (Nitrogen)	0.0	ppm
				Ni (Nickel)	0.035	%
				P (Phosphorus)	0.017	%
				S (Sulfur)	0.02	%
				Sb (Antimony)	0.0	%
Si (Silicon)	2.5	%				
Sn (Tin)	0.0	%				
Material	Mat ID	Database/File name	Initial Temperature (°C)			
⊕ Sand Mold		MAGMA/Green_sa	40.0			

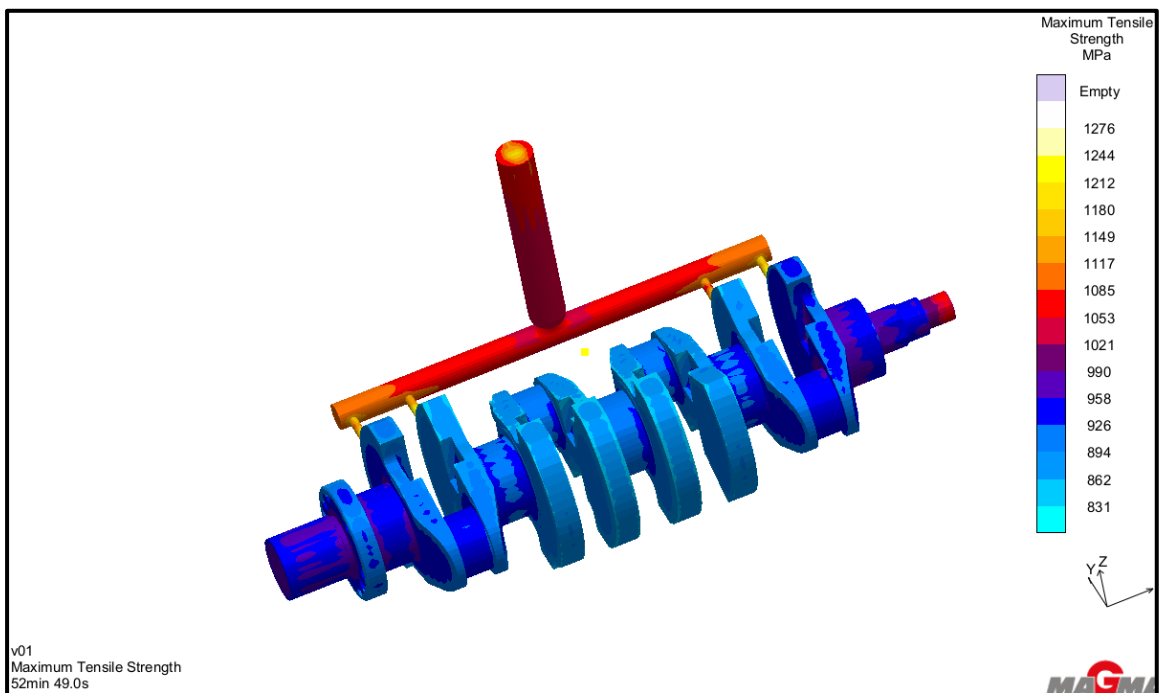
**Figura F1. Composición de la simulación optimizada**

Fuente: Software de fundición MAGMA



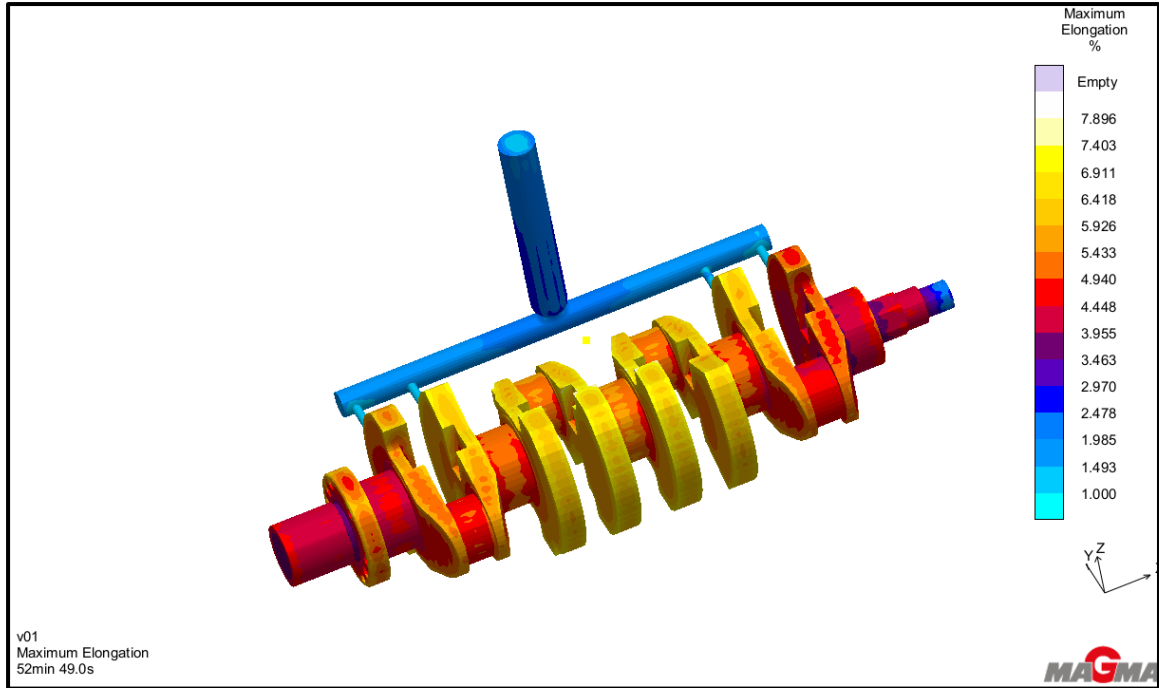
**Figura F2. Resultado de la simulación (máximo esfuerzo de fluencia)**

Fuente: Software de fundición MAGMA



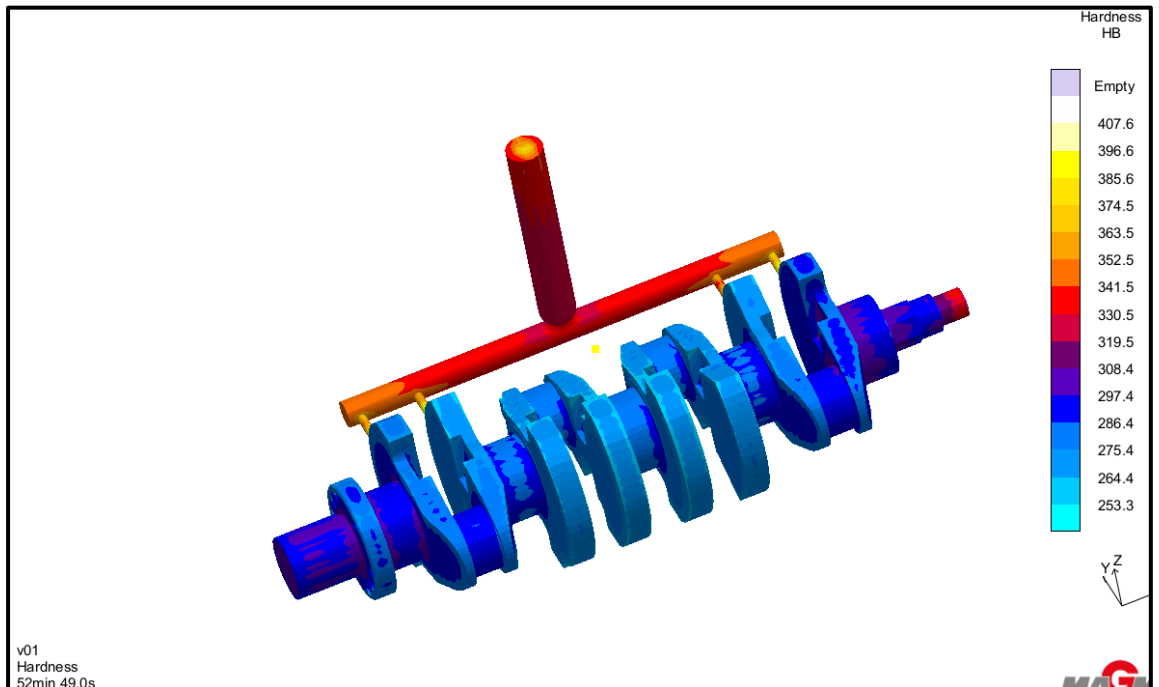
**Figura F3. Resultado de la simulación (esfuerzo de tensión máximo)**

Fuente: Software de fundición MAGMA



**Figura F4. Resultado de la simulación (porcentaje de elongación máximo)**

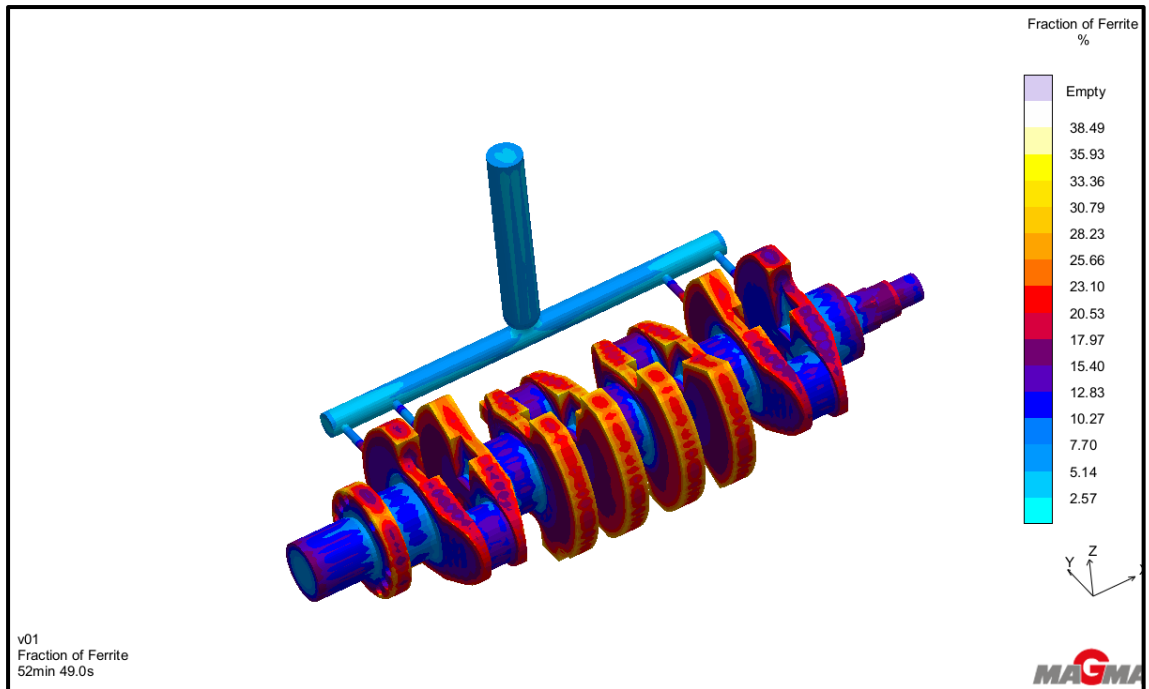
Fuente: Software de fundición MAGMA



**Figura F5. Resultado de la simulación (dureza brinell)**

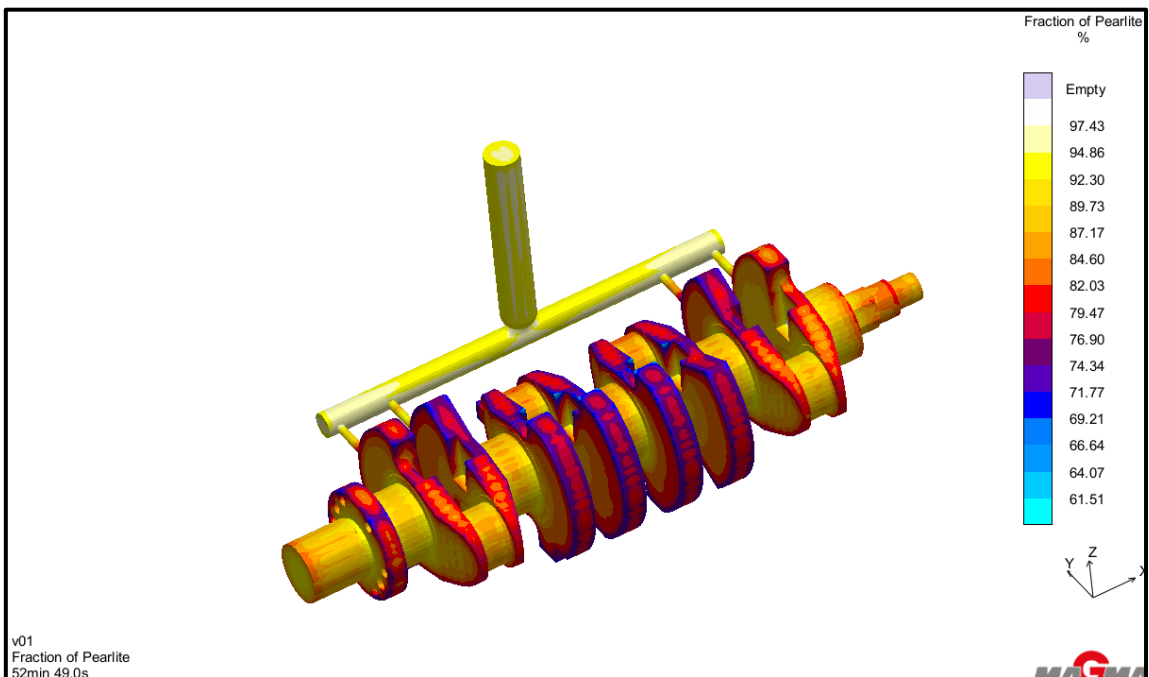
Fuente: Software de fundición MAGMA





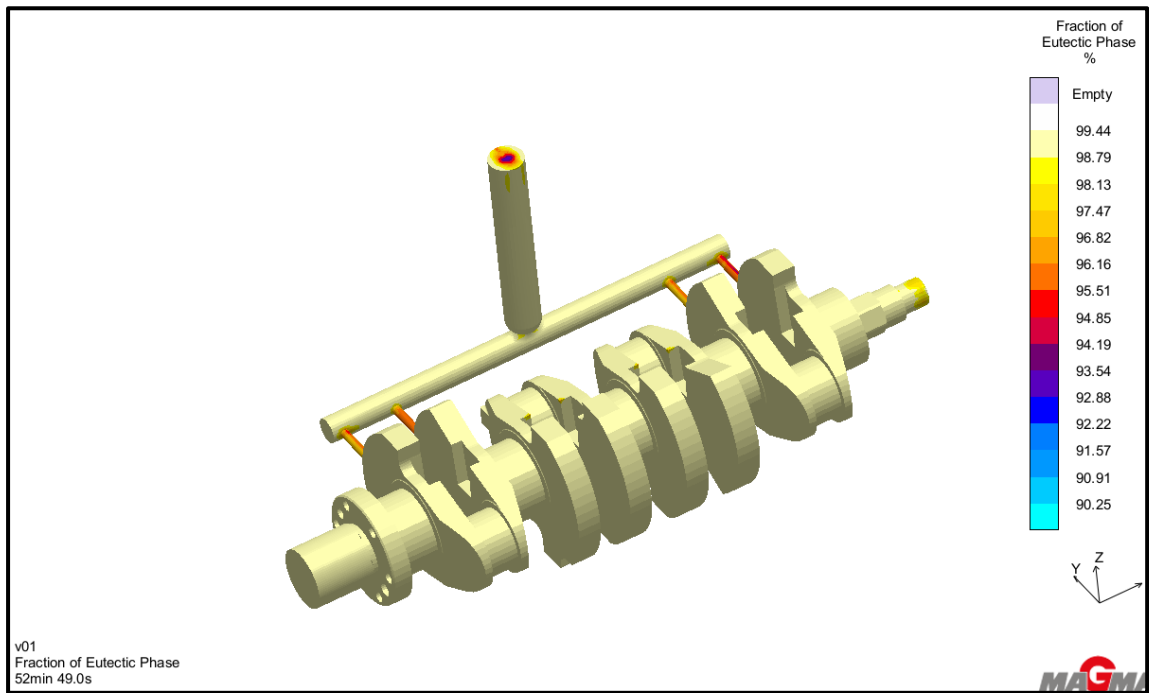
**Figura F6. Resultado de la simulación (porcentaje de ferrita)**

Fuente: Software de fundición MAGMA



**Figura F7. Resultado de la simulación (porcentaje de perlita)**

Fuente: Software de fundición MAGMA



**Figura F8. Resultado de la simulación (porcentaje en la fase de fracción eutéctica)**

Fuente: Software de fundición MAGMA

# ANEXO G

## RESULTADOS DE SOLIDIFICACIÓN CON PARÁMETROS DEL MODELO OPTIMIZADO (SIN MAZAROTA)

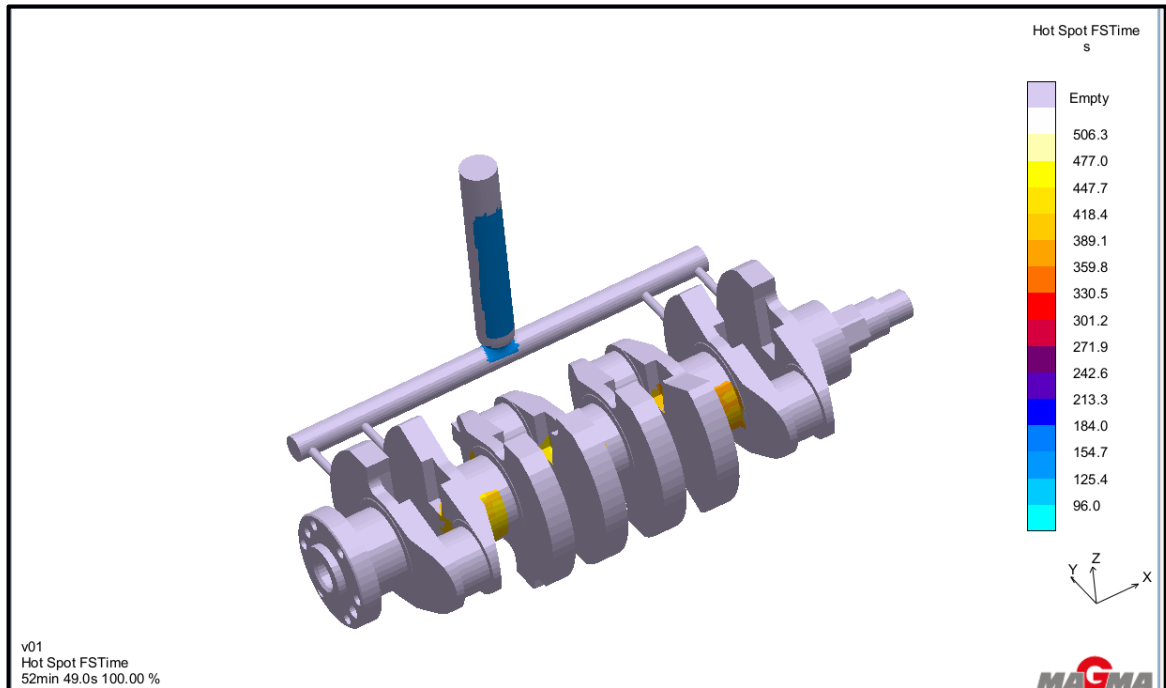


Figura G1.Resultado de la simulación (puntos calientes)

Fuente: Software de fundición MAGMA

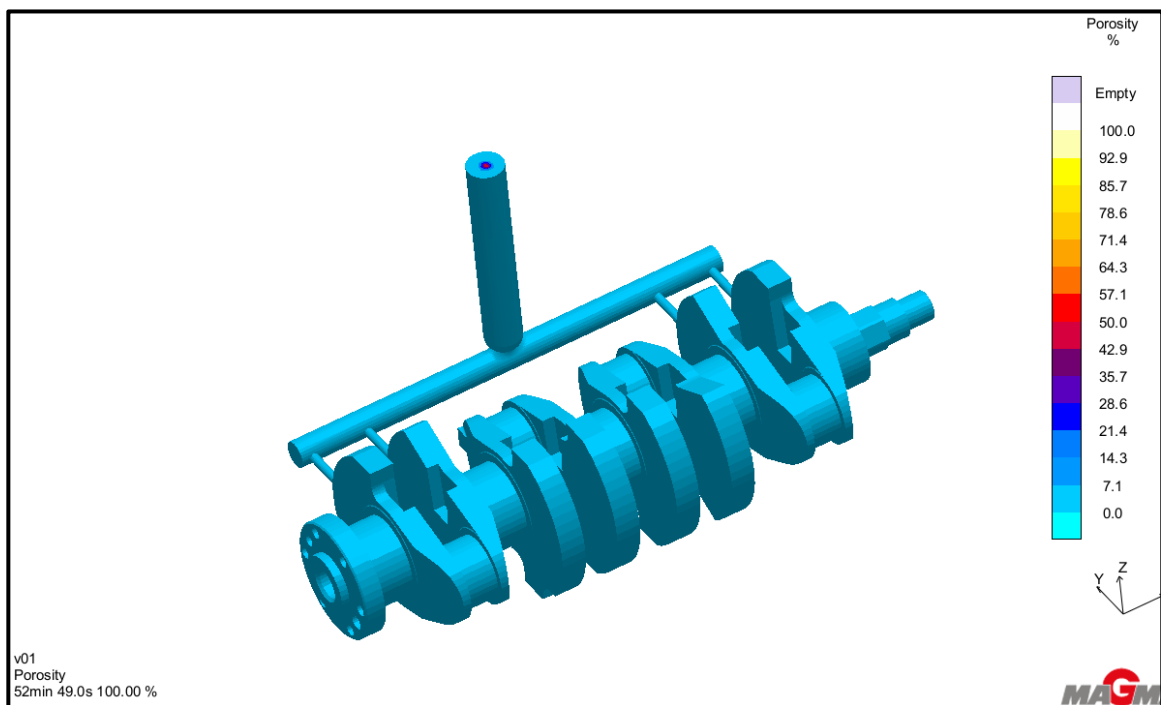


Figura G2.Resultado de la simulación (porosidad)

Fuente: Software de fundición MAGMA

# **ANEXO H**

**COSTOS DE CIGUEÑALES EN EL MERCADO NACIONAL**



QUITO MATRIZ: Av. Occidental N52-128 y Av. La Florida Teléfono: (2) 3969060  
 GUAYAQUIL SUCURSAL: Av. Carlos Jallo Arosemena Km. 1  
 MANTA SUCURSAL: Ciudadela Unita Vía de Circunvalación junto a Tecnocentro Ibraut  
 PORTOVIEJO SUCURSAL: Av. Metropolitano Km 1.6 Vía a Manta junto a Elata  
 PBE:1000 02 72 02  
 www.vallejoaraujo.com

Fecha 3/16/2017  
 Nro. 64292

## PEDIDO DE CLIENTES

Bodega: 2105 Gy1Rp

Señor (es): ESTIMADO X.

Ruc : 0906133624

Dirección : KM 1 FRENTE A LA UNIVERSIDAD CATOLICA;

Fax :

Telefonos : 09-167882

País :

Ciudad : GUYAQUIL

Vendedor : CADENA RUIZ GABRIEL GENARO

No.	Código	Descripción	Ubicación	Cant	Val Unit	Dcto.	SubTotal
1	96385403	CIGÜEÑAL	A08001C00	1	396.23	39.62	396.23

Notas

Cantidad Total: 1

Total sin Dcto : 396.23  
 Dcto : 39.62  
 Subtotal : 356.61  
 Iva 14% : 49.92  
 A facturar : 406.53

Firma y Sello del Cliente

Figura H1. Costo del cigüeñal en Vallejo Araujo

Fuente: Repuestos Vallejo Araujo

# MANSUERA

Repuestos en todo Ecuador

AGENCIA GUAYAQUIL NORTE - MANSUERA  
 CDLA.LA HERRADURA MZ.4, SOLAR16  
 GUAYAQUIL  
 Telf.: 1800MANSUERA  
 626783

R.U.C.: 1792287014001  
 MANSUERA S.A.  
 PROFORMA No 0014495  
 REPUESTOS

CLIENTE: NOMBRE: GYE GYE  
 RUC / CC: GYE  
 DIRECCION: GYE GYE GYE  
 CODIGO: 3  
 ENTREGA APROX. 17/02/17  
 VEHICULO:

FECHA: 17/02/2017 00:00  
 CIUDAD: GUAYAQUIL  
 VENDEDOR: NESTOR JAVIER ROSALE  
 TELEFONO: 052731820  
 EJEC. VEH:

DESCRIPCION	CANT	PRECIO/UNIT.	VALOR/TOTAL
DA 900000000X 45 CIGUENAL	1	402.67	US. \$ 402.67
SUMAN			US. \$ 402.67
DESCUENTO			0.00
TRANSPORTE			0.00
OTROS CARGOS			0.00
VALOR NETO			402.67
IVA 14 %			56.37
INTERESES			0.00
TOTAL			459.04
(-) Descuento Solidario 2% IVA			0.00
VALOR A PAGAR			459.04

DOCUMENTO SIN VALIDEZ TRIBUTARIA

Figura H2.Costo del cigüeñal en Mansuera

Fuente: Repuestos Mansuera

# ANEXO I

## TOLERANCIAS PARA MAQUINADO DE PIEZAS DEPUES DEL PROCESO DE FUNDICIÓN

Proceso de fundición	Tamaño de la parte	Tolerancia		Rugosidad superficial	
		Pulg	mm	μpulg	μm
Fundición en arena <sup>a</sup>				250-1000	(6-25)
Aluminio <sup>b</sup>	Pequeño	±0.020	(±0.5)		
Hierro fundido	Pequeño	±0.040	(±1.0)		
	Grande	±0.016	(±1.5)		
Aleaciones de cobre	Pequeño	±0.015	(±0.4)		
Acero	Pequeño	±0.050	(±1.3)		
	Grande	±0.080	(±2.0)		
Molde de yeso	Pequeño	±0.005	(±0.12)	30	(0.75)
	Grande	±0.015	(±0.4)		
Molde permanente				125	(3.2)
	Aluminio <sup>b</sup>	Pequeño	±0.010	(±0.25)	
	Hierro fundido	Pequeño	±0.030	(±0.8)	
	Aleaciones de cobre	Pequeño	±0.015	(±0.4)	
	Acero	Pequeño	±0.020	(±0.5)	

Fuente: Tecnología mecánica, UMSS, (2010)

# ANEXO J

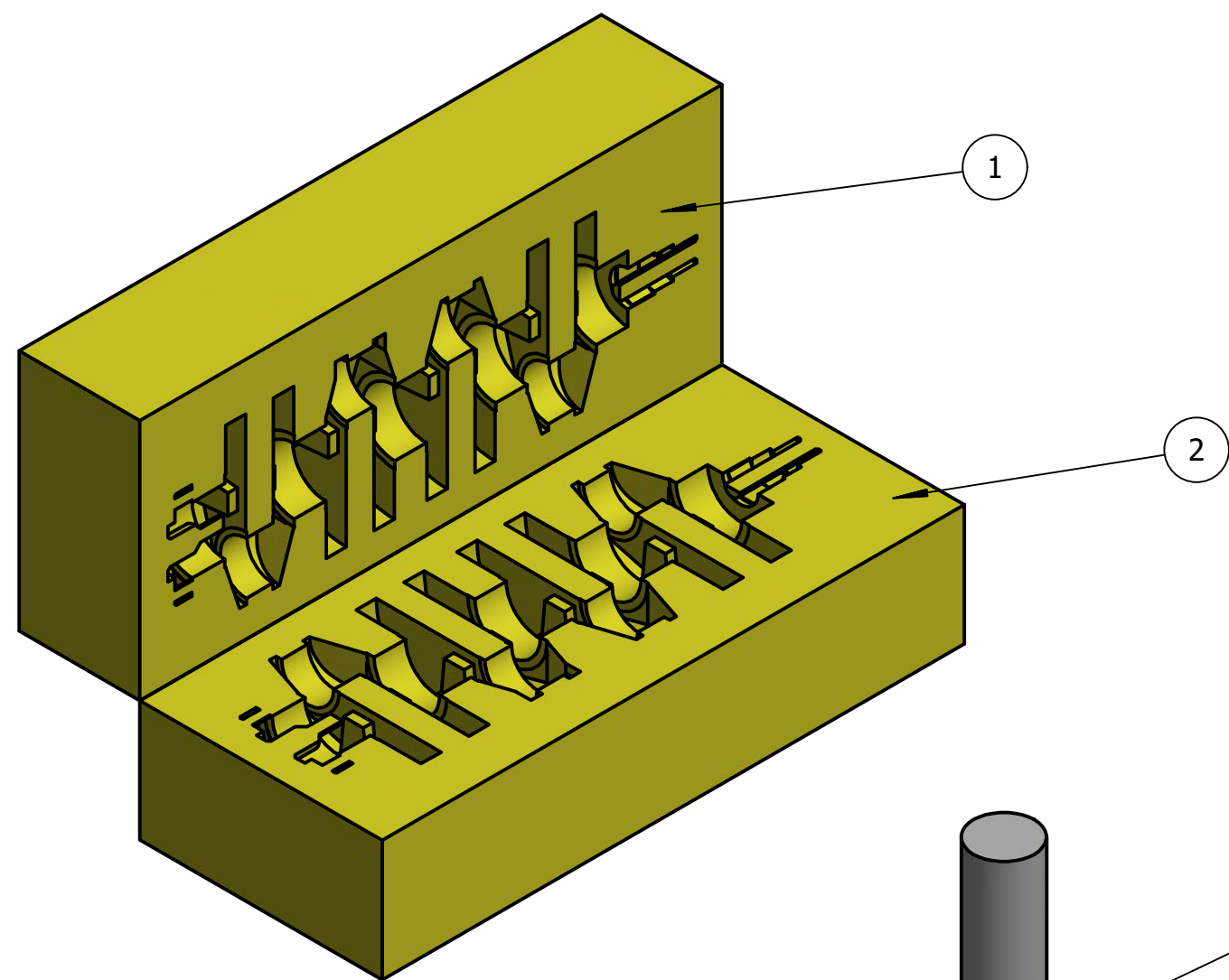
## PRACTICA RECOMENDADA PARA LOS RECOCIDOS DE FUNDICIONES NODULARES

Tipo de recocido	Propósito	Temperatura	Tiempo	Veloc de Enfriamiento
Baja temperatura (ferritizado)	En ausencia de carburos. Para obtener grados 60-45-12 y 60-40-18	720 a 732° C	1 hora por 25 mm de sección	Enfriamiento en el horno hasta 300° C aprox.
Media temperatura (para bajos % de Si)	En ausencia de carburos. Para obtener grado 60-40-18	870 a 925° C	hasta igualar la temperatura de control	Enfriamiento en horno hasta 300° C aprox.
Alta temperatura (grafitizado)	En presencia de carburos. Para obtener los grados 60-45-12 y 60-40-18	915 a 930° C	2 horas mínimo	Enfriamiento dentro del horno hasta 700° C. Mantener 2 horas a 700° C y enfriar dentro del horno
Normalizado y revenido	En presencia de carburos. Para obtener los grados 100-70-03 y 80-55-06	900 a 930° C	2 horas mínimo	Enfriamiento al aire y revenido a 530-600° C

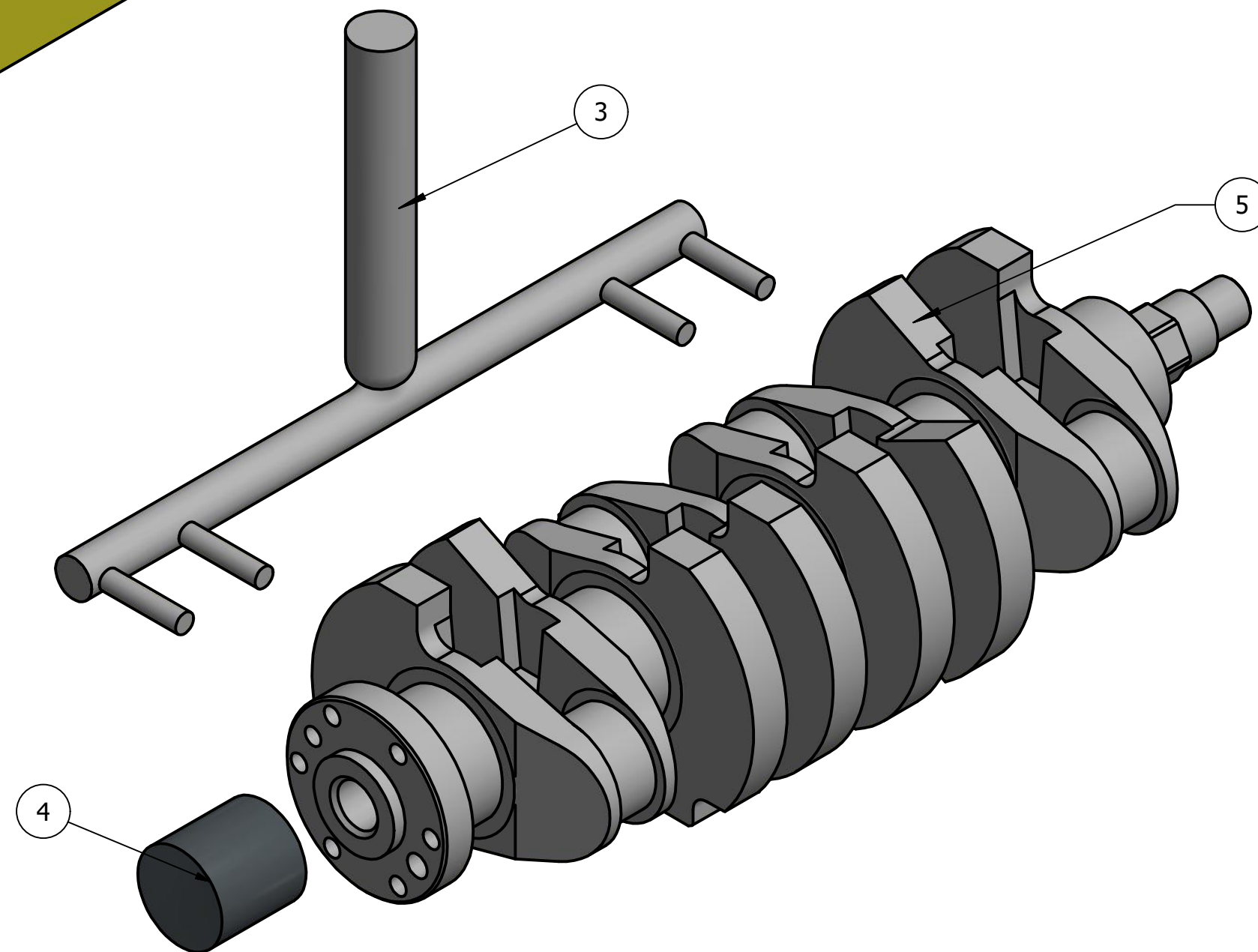
Fuente: Fundición, tecnología, metalografía, (2015)



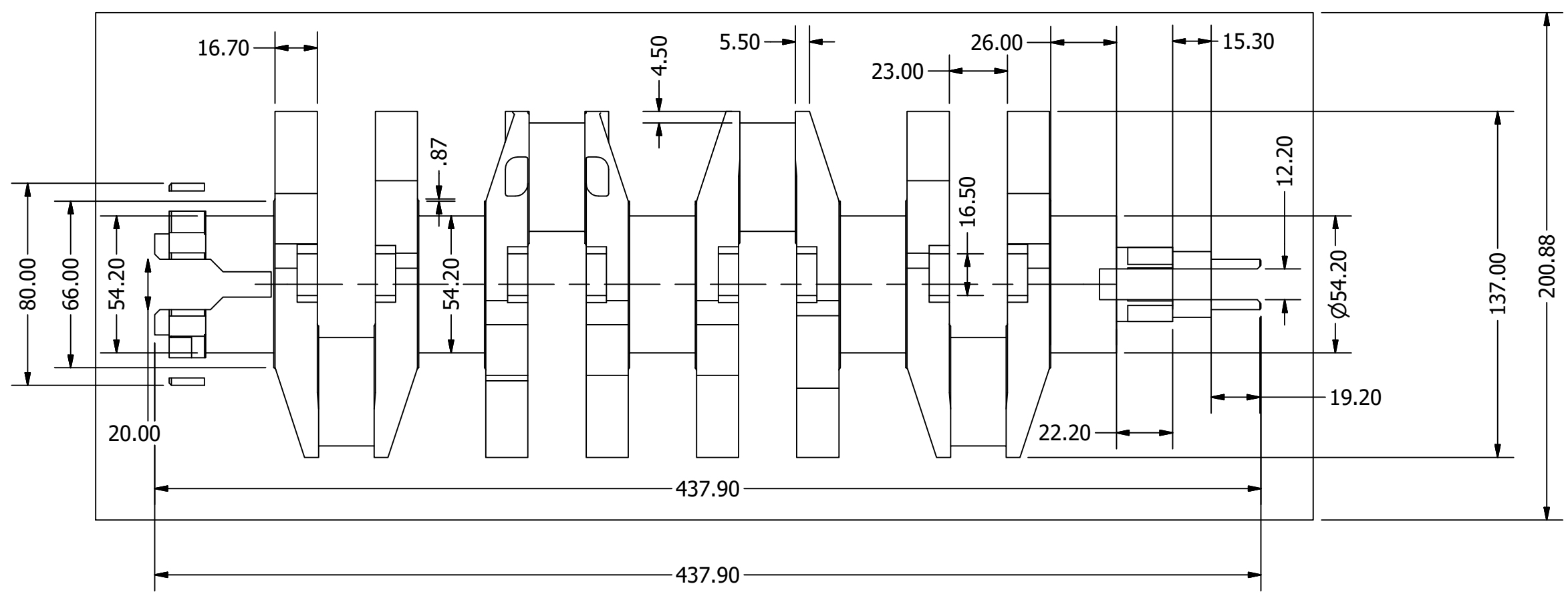
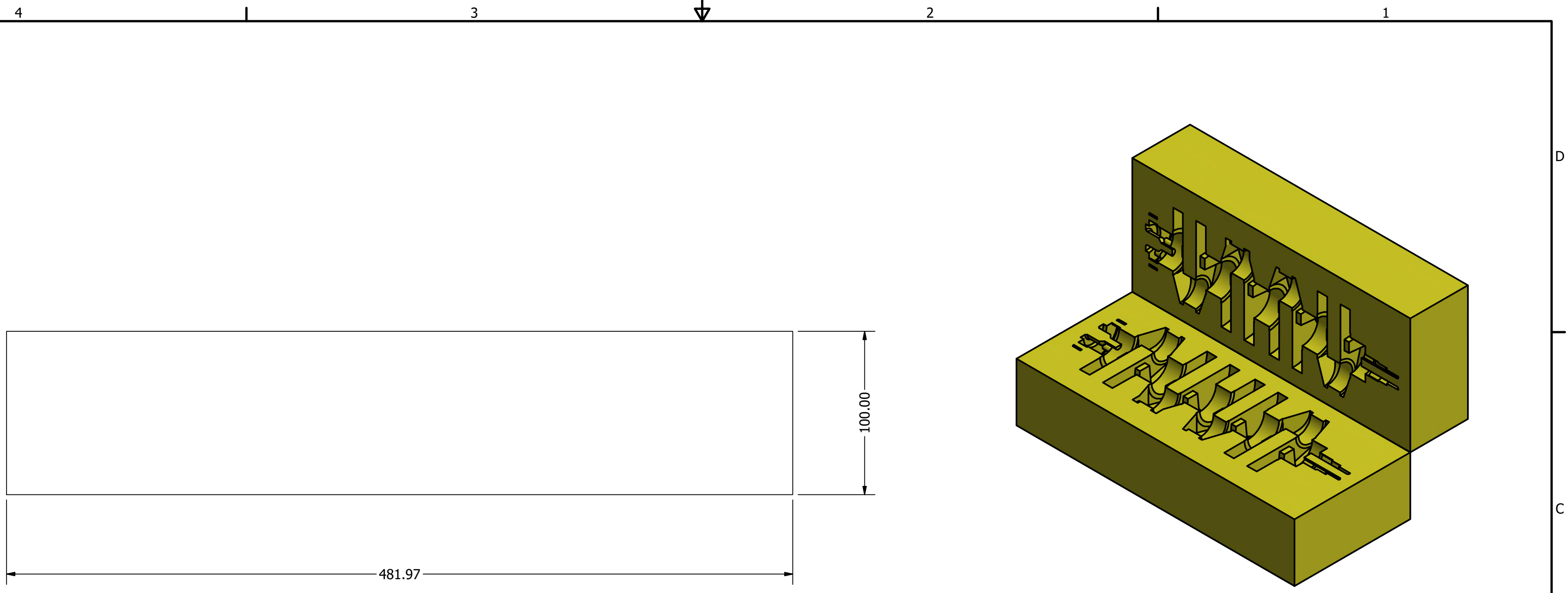
# PLANOS



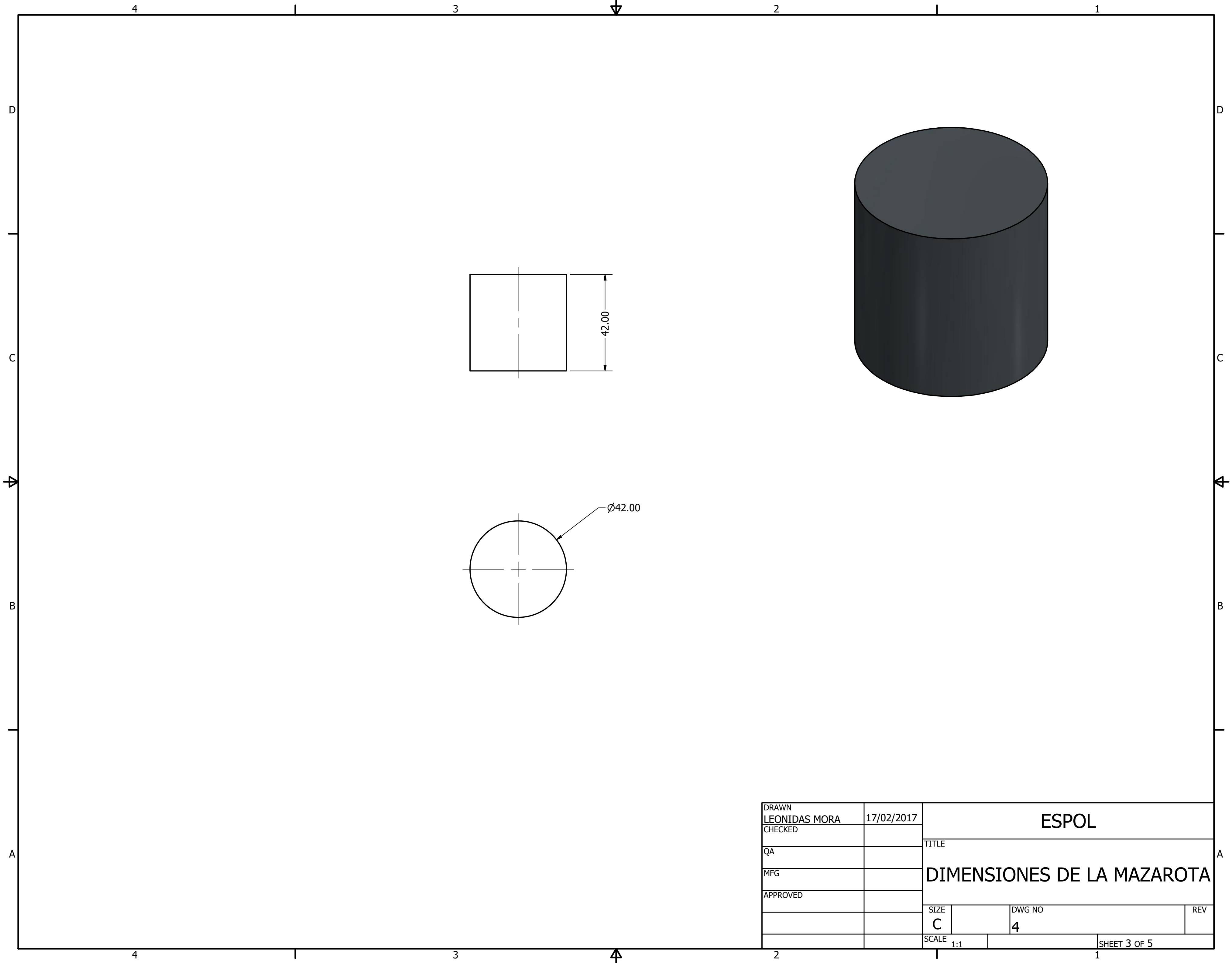
PART LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	CAJA DE MOLDEO SUPERIOR	MOLDE DE ARENA SILICE (VERDE)
2	1	CAJ DE MOLDEO INFERIOR	MOLDE DE ARENA SILICE (VERDE)
3	1	BEBEDERO	CANAL DE VERTIDO DEL LIQUIDO FUNDIDO
4	1	MAZAROTA	SECCION DE ALIMENTACIÓN DE LA PIEZA LUEGO DEL VERTIDO
5	1	CIGÜEÑAL	PIEZA DE FABRICACIÓN EN HIERRO DÚCTIL



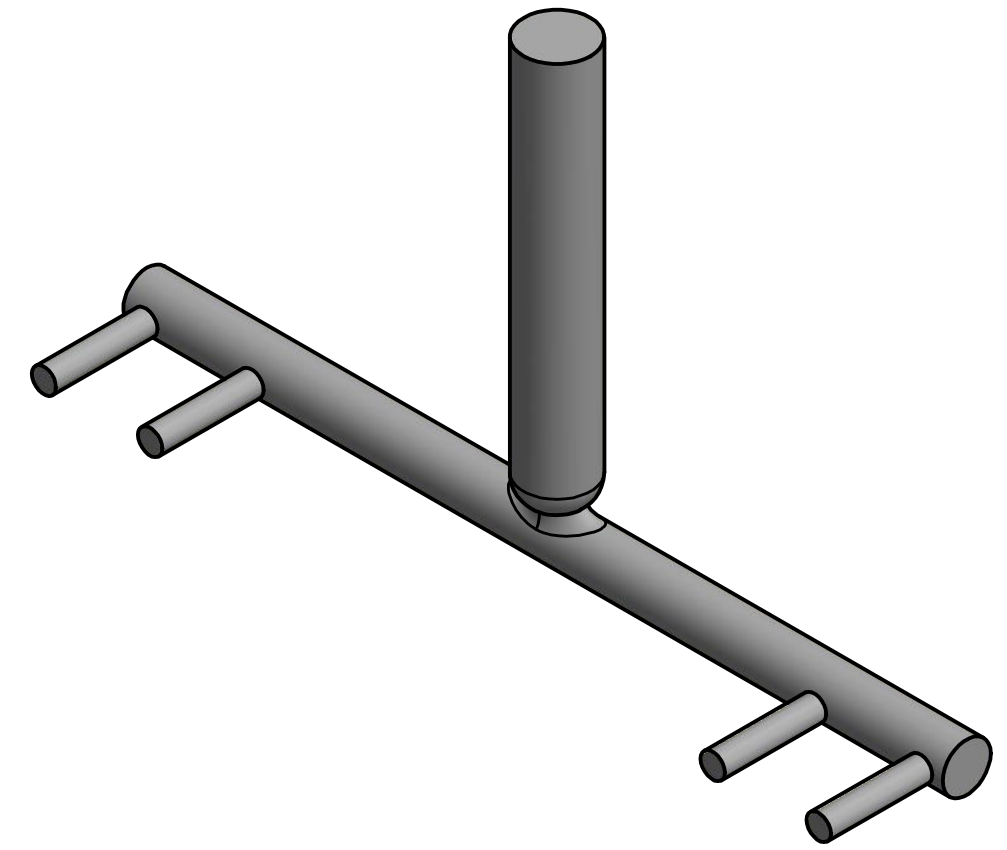
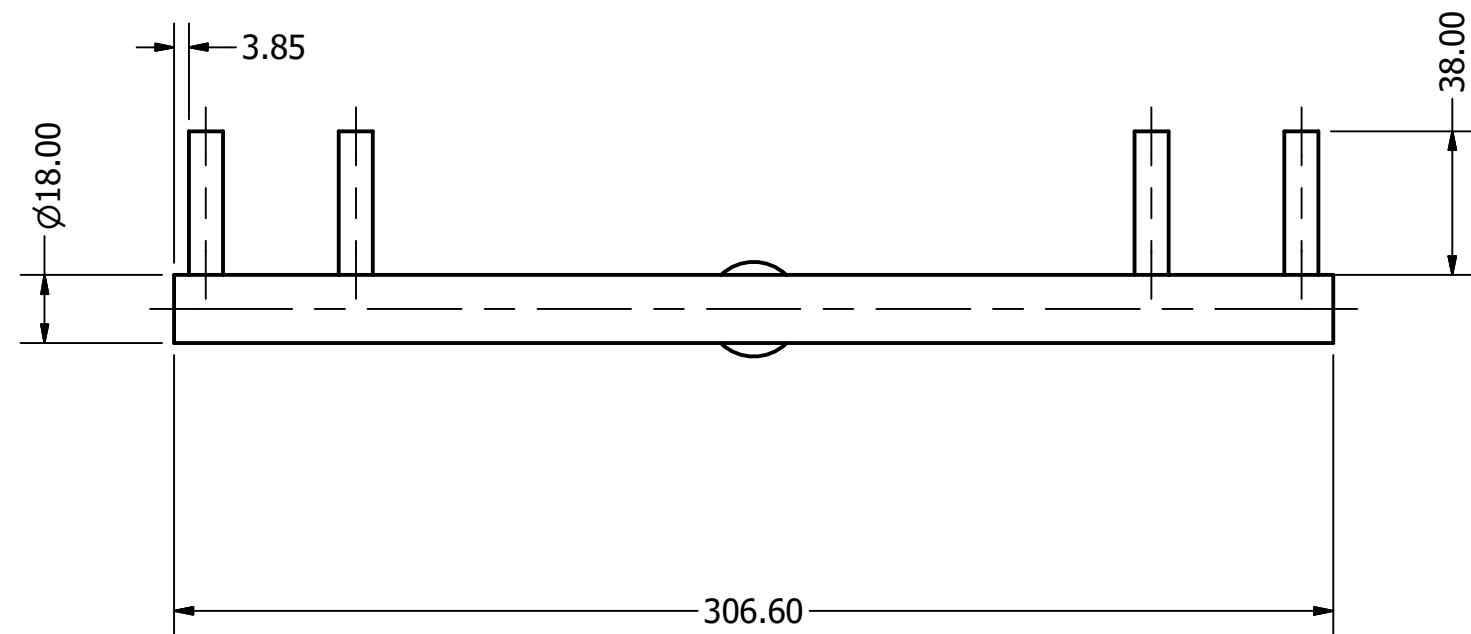
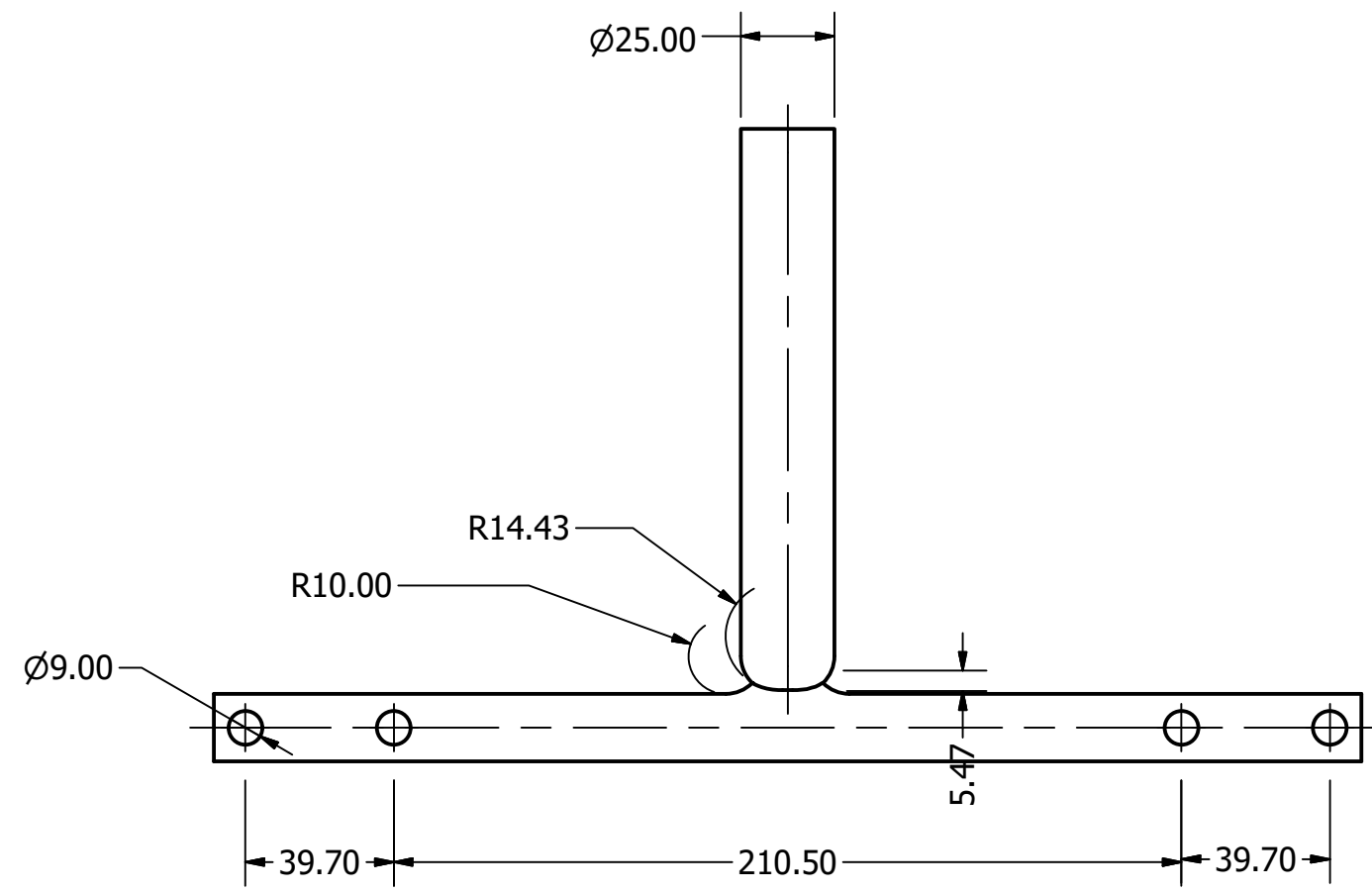
DRAWN LEONIDAS MORA	20/03/2017	ESPOL		
CHECKED				
QA		TITLE		
MFG		ESQUEMA DE CONJUNTO		
APPROVED		SIZE C	DWG NO CONJUNTO	REV 1
		SCALE	SHEET 1 OF 5	



DRAWN LEONIDAS MORA	17/02/2017	ESPOL		
CHECKED		TITLE		
QA		MOLDE DE ARENA		
MFG		SIZE	DWG NO	REV
APPROVED		C	Molde	
		SCALE 1:4	SHEET 2 OF 5	



DRAWN LEONIDAS MORA	17/02/2017	ESPOL		
CHECKED		TITLE		
QA		DIMENSIONES DE LA MAZAROTA		
MFG		SIZE	DWG NO	REV
APPROVED		C	4	
		SCALE 1:1	SHEET 3 OF 5	



DRAWN LEONIDAS MORA	17/02/2017	ESPOL		
CHECKED		TITLE		
QA		BEBEDERO		
MFG		SIZE	DWG NO	REV
APPROVED		C	3	
		SCALE 1:2	SHEET 4 OF 5	

4

3

2

1

D

D

C

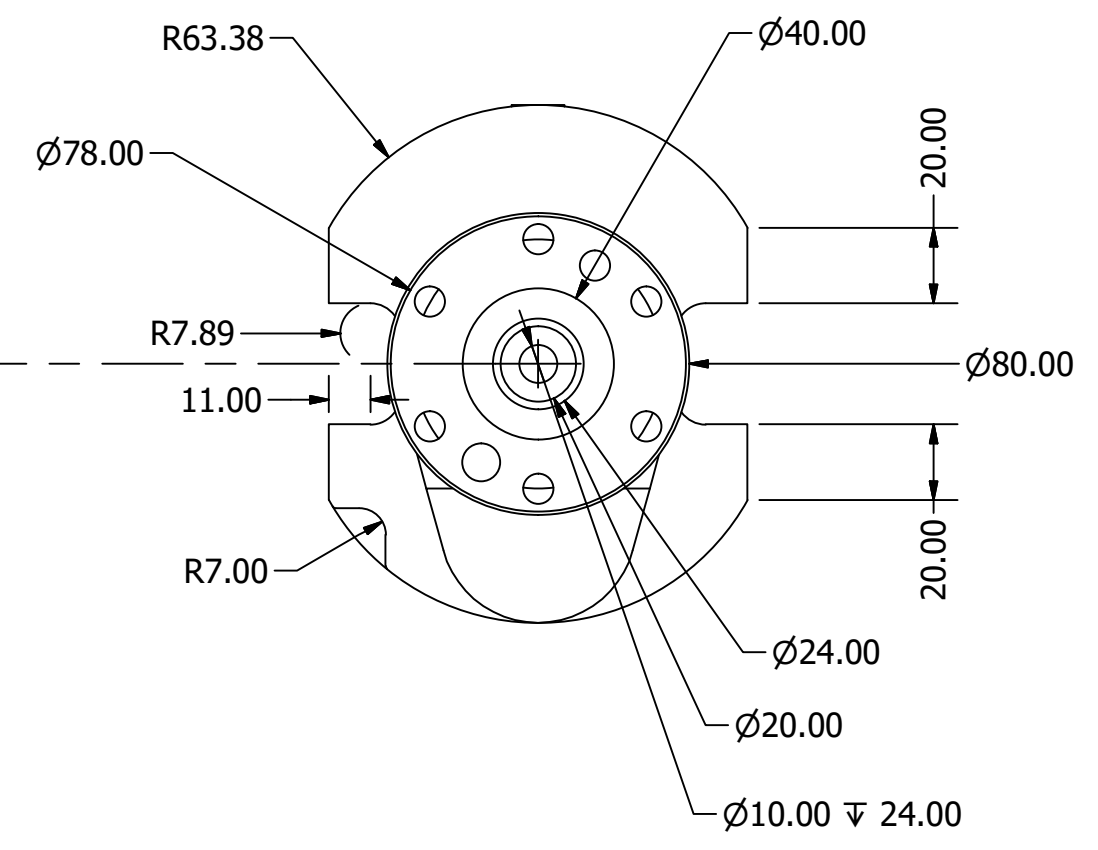
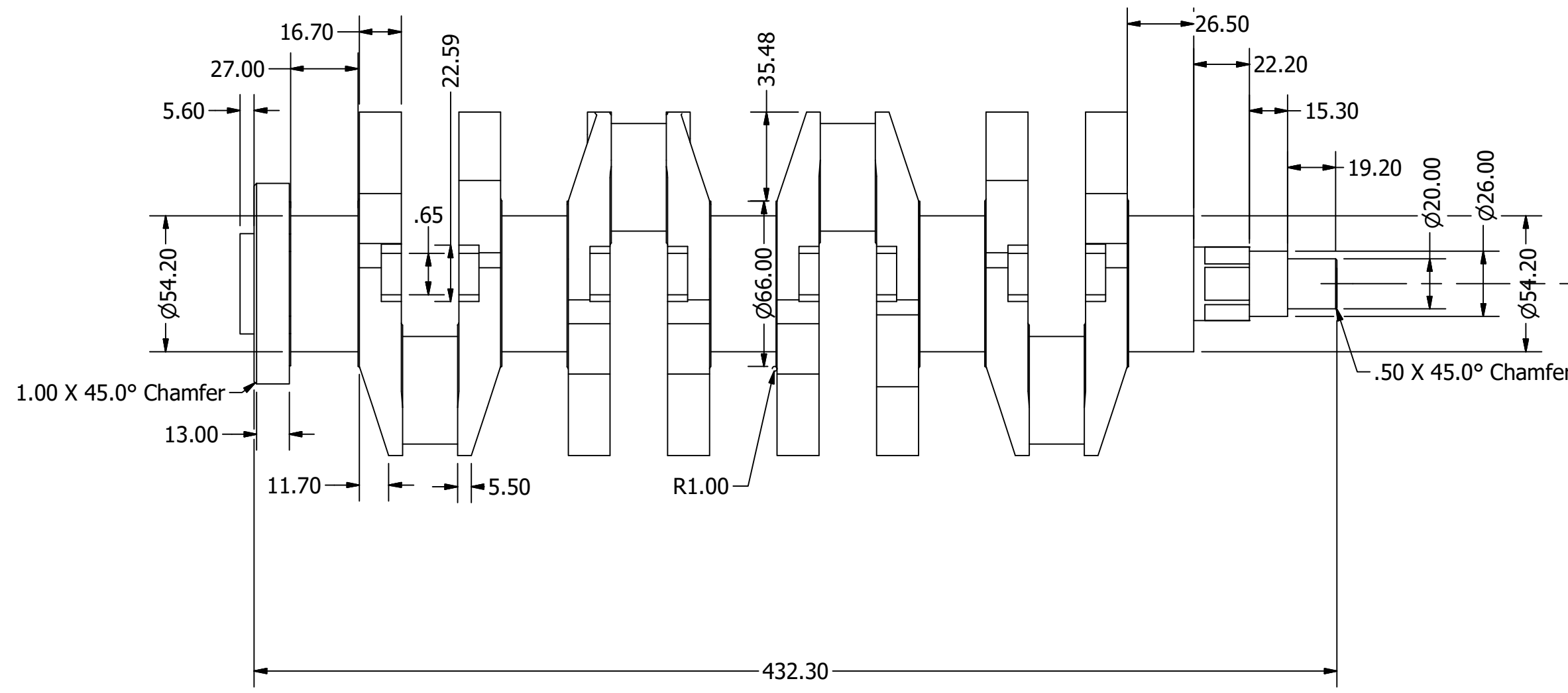
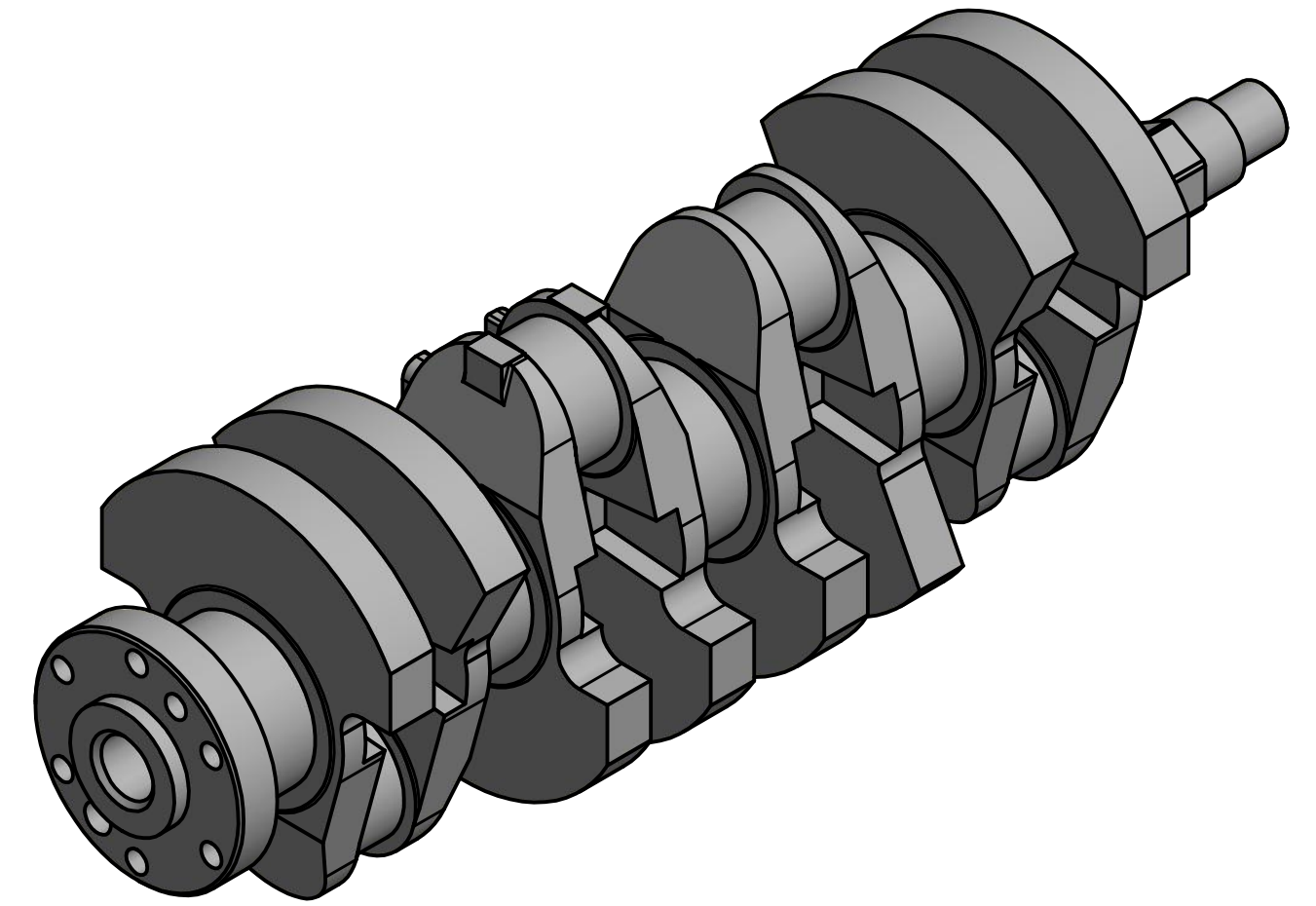
C

B

B

A

A



DRAWN LEONIDAS MORA	06/12/2016	ESPOL		
CHECKED		TITLE		
QA		CIGÜEÑAL		
MFG		SIZE	DWG NO	REV
APPROVED		C	5	
		SCALE 1:2	SHEET 5 OF 5	

4

3

2

1

