



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN MECATRÓNICA**

TEMA:

“MOLDE PERMANENTE PARA FUNDICIÓN DE BOLAS DE 5 PULGADAS PARA MOLINOS HORIZONTALES”

AUTOR: EDISON DAVID MALDONADO CAÑAMAR

DIRECTOR: ING. FERNANDO VINICIO VALENCIA AGUIRRE

IBARRA - ECUADOR

2022



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004847248		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Edison David Maldonado Cañamar		
DIRECCIÓN:	San Pablo, Imbabura		
EMAIL:	edmaldonadoc@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0992170346

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Molde Permanente para Fundición de Bolas de 5 pulgadas para Molinos Horizontales
AUTOR (ES):	Edison David Maldonado Cañamar
FECHA: DD/MM/AAAA	07/07/2022
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	Pregrado
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería en Mecatrónica
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Fernando Vinicio Valencia Aguirre

1. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 07 días del mes de julio de 2022

EL AUTOR:

(Firma) 

Nombre: 



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica, con el tema MOLDE PERMANENTE PARA FUNDICIÓN DE BOLAS DE 5 PULGADAS PARA MOLINOS HORIZONTALES, fue desarrollado por el Sr. Edison David Maldonado Cañamar, bajo mi dirección.

.....
DIRECTOR

AGRADECIMIENTO

A Dios por la fortaleza para llegar hasta el final de este largo camino.

Quiero agradecer a la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, al personal docente y administrativo por aportar su conocimiento y experiencia en mi formación profesional, de manera especial a mis directores Ing. Fernando, Marco y Xavier, quiénes me guiaron para la culminación exitosa de este proyecto.

A quienes conforman la empresa SMO (Servicios Mecánicos Otavalo), por abrirme sus puertas y aportar con su experiencia y conocimientos.

A mis padres y hermanas por el esfuerzo e incondicional apoyo para que logre alcanzar mis objetivos.

Finalmente quiero agradecer también a mis amigos y compañeros, quienes me acompañaron en la etapa estudiantil y que de una u otra forma contribuyeron en la culminación de mi carrera.

Edison

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a:

Mis padres Hilario Maldonado y Elena Cañamar quienes con su amor, esfuerzo y paciencia me han permitido llegar a cumplir un sueño más, inculcándome valores y enseñándome con ejemplos a afrontar las adversidades de la vida.

Mis hermanas Diana, Erika, Samia, Lisbeth y Sindy por su cariño, siempre serán mi inspiración y ejemplo.

Finalmente, a toda mi familia y amigos por sus consejos, palabras de aliento y oraciones que de una u otra forma me hacen una mejor persona y me conducen en todas mis metas.

Edison

RESUMEN

El objetivo de este trabajo se centra en el diseño y construcción de una matriz o molde permanente para la obtención de bolas de hierro blanco de 5 pulgadas, muy utilizadas en las plantas industriales para la molienda y procesamiento de minerales.

El proyecto comprende del diseño de un modelo de fundición para bolas, a partir del cual se realiza los análisis de fundición empleando software de simulación, así pues, en un rango de temperaturas se determina posibles fallas de porosidad por contracción, llenado incompleto, solidificación prematura, aire atrapado, así como la fluidez del material dentro de un molde supuesto y la solidificación. De esta manera se obtiene una fundición ideal.

A continuación, se realiza el diseño del molde en SolidWorks a partir del modelo de fundición simulado, para esto se tiene en cuenta el proceso de desmoldeo de las bolas, siendo conveniente el uso de arena en el centro del modelo, así también se considera la contracción del material por lo que se sobredimensiona las cavidades del molde y se separa los núcleos de cavidad para que puedan ser reemplazados una vez cumplida su vida útil. Teniendo el diseño, y conociendo las herramientas se procede a usar el software SolidCAM, con el cuál se simula el proceso de mecanizado de cada una de las piezas.

El siguiente punto es la construcción del molde haciendo uso de una máquina CNC (Control Numérico Computarizado), específicamente la fresadora ROMI D800 que se encuentra en el centro de mecanizado de la Universidad Técnica del Norte. Este proceso por arranque de viruta permite fabricar el molde con la precisión requerida. Las pruebas de funcionamiento se llevan a cabo en las instalaciones de la empresa SMO, los resultados obtenidos demuestran la fiabilidad del molde en la implementación real. Finalmente se puede concluir que el molde es completamente funcional.

SUMMARY

The objective of this work is focused on the design and construction of a permanent matrix or mold to obtain 5-inch white iron balls, widely used in industrial plants for the grinding and processing of minerals.

The project includes the design of a casting model for balls, from which casting analysis is carried out using simulation software, thus, in a range of temperatures possible porosity failures are determined by shrinkage, incomplete filling, premature solidification, trapped air, as well as the fluidity of the material within a supposed mold and solidification. In this way an ideal casting is obtained.

Next, the mold design is made in SolidWorks from the simulated casting model, for this the demolding process is taken into account of the balls, being convenient the use of sand in the center of the model, so also the contraction of the material is considered so that the cavities of the mold are oversized and the cavity cores are separated so that they can be replaced once their useful life has been completed. Having the design, and knowing the tools proceeds to use the SolidCAM software, with which the process is simulated machining of each of the pieces.

The next point is the construction of the mold using a CNC (Computer Numerical Control) machine, specifically the ROMI D800 milling machine which is located in the machining center of the Technical University of the North. This process by chip removal allows the mold to be manufactured with the required precision. The performance tests are carried out in the facilities of the company SMO, the results obtained demonstrate the reliability of the mold. Finally, it can be concluded that the mold is fully functional.

Índice de Contenidos

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Alcance	2
1.4. Justificación	3
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	5
2.1. Antecedentes	5
2.2. Estado del arte	6
2.2.1. Fundición	6
2.2.2. Partes de un molde	7
2.2.3. Moldes desechables	8
2.2.4. Moldes permanentes	8
2.2.5. Moldes compósitos	10
2.3. Fundición con moldes permanentes	10
2.3.1. Fundición a baja presión	10
2.3.2. Proceso de fundición por gravedad	11
2.3.3. Proceso de fundición a alta presión	12
2.4. Defectos en el proceso de fundición	13
2.4.1. Proyecciones metálicas	13
2.4.2. Cavidades	14
2.4.3. Discontinuidades	14
2.4.4. Superficies defectuosas	14
2.4.5. Fundición incompleta	15
2.5. Consideraciones para el diseño de moldes permanentes	15
2.5.1. Ángulos de salida	16
2.5.2. Tolerancias dimensionales a la contracción	17
2.5.3. Tiempo Solidificación TTS(min)	18
2.5.4. Tiempo de llenado MTF(s)	18
2.5.5. Conductividad térmica k(Wm °C)	19
2.6. Procesos de remoción de material	19
2.6.1. El maquinado	19
2.6.2. Herramientas de corte	20
2.7. Parámetros de desbaste	21

2.7.1.	Potencia de corte $P_c(kW)$	21
2.7.2.	Velocidad de corte $V_c(mmin)$	21
2.7.3.	Velocidad del husillo $N(rpm)$	22
2.7.4.	Avance por diente $F_z(mmin)$	22
2.7.5.	Velocidad de avance $V_f(inmin$ o $mmmin)$	22
2.7.6.	Profundidad de corte $ap(mm)$	23
2.7.7.	Software CAD-CAM.....	24
2.8.	Funciones código G y código M	24
CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO		25
3.1.	Requerimientos del diseño	25
3.2.	Selección de materiales	27
3.3.	Uso de herramientas CAD para el diseño	28
3.4.	Método de fundición	28
3.4.1.	Análisis del método constructivo	29
3.4.2.	Método manual para piezas externas	29
3.5.	Uso de herramientas CAM para el mecanizado.....	30
3.6.	Mecanizado CNC.....	30
CAPÍTULO IV IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS.....		31
4.1.	Modelo de fundición en SolidWorks.....	31
4.2.	Simulación del proceso de fundición.....	31
4.2.1.	Ensayo a 1300 °C en la fundición y 300 °C – 400 °C en el molde	32
4.2.2.	Ensayo a 1350 °C en la fundición y 300 °C - 400 °C en el molde.....	33
4.2.3.	Ensayo a 1400 °C en la fundición y 300 °C - 400 °C en el molde.....	34
4.2.4.	Ensayo a 1550 °C en la fundición y 400 °C en el molde	35
4.3.	Diseño del molde en SolidWorks	37
4.3.1.	Simulaciones del mecanizado.....	38
4.4.	Cálculos de mecanizado	39
4.4.1.	Cálculos para el fresado	39
4.4.2.	Cálculos para el taladrado	44
4.5.	Hojas de proceso	49
4.6.	Fabricación del molde	50
4.6.1.	Núcleo de cavidades.....	50
4.6.2.	Tapa superior e inferior del molde	51
4.6.3.	Patrón de bolas	52
CAPÍTULO V PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		55
5.1.	Análisis de porosidad de fundición en la simulación.....	55
5.1.1.	Análisis de porosidad con criterio Niyama.....	56

5.2.	Fundición de las bolas	59
5.2.1.	Parámetros óptimos para la fundición	59
5.2.2.	Procedimiento para la fabricación de bolas de molienda	59
5.2.3.	Preparación del molde	60
5.2.4.	Colado del material	61
5.2.5.	Desmoldeo de las bolas	62
5.2.6.	Separación y obtención de las bolas	62
5.3.	Análisis de la contracción real de las bolas	63
5.4.	Análisis superficial de la bola de fundición	64
5.5.	Análisis de costos	65
5.6.	Justificación del costo de fabricación del molde permanente	65
CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		69
6.1.	CONCLUSIONES	69
6.2.	RECOMENDACIONES	70
REFERENCIAS		71
ANEXOS		73
	ANEXO 1. <i>Funciones código G más utilizados</i> [23].	74
	ANEXO 2. <i>Funciones código M</i> [23].	75
	ANEXO 3. <i>Plano del modelo de fundición</i>	76
	ANEXO 4. <i>Plano de conjunto</i>	77
	ANEXO 5. <i>Plano de la tapa superior</i>	78
	ANEXO 6. <i>Plano de la tapa inferior</i>	79
	ANEXO 7. <i>Plano del núcleo de cavidad</i>	80
	ANEXO 8. <i>Plano del patrón de bolas</i>	81
	ANEXO 9. <i>Hoja de procesos para la tapa superior del molde</i>	82
	ANEXO 10. <i>Hoja de proceso para la tapa inferior del molde</i>	83
	ANEXO 11. <i>Hoja de procesos para las cavidades del molde</i>	84

Índice de Figuras

Figura 2.1. Partes de un molde [4].	7
Figura 2.2. Molde desechable de arena [12].	8
Figura 2.3. Fundición en molde permanente [12]	9
Figura 2.4. Molde permanente [10].	9
Figura 2.5. Medio de sujeción para moldes [10].	10
Figura 2.6. Molde a baja presión [10].	11
Figura 2.7. Fundición por gravedad [16].	11
Figura 2.8. Proceso de fundición a alta presión con máquinas de Itaipresse Gauss [16].	12
Figura 2.9. Defecto de proyección metálica [4].	13
Figura 2.10. Defecto de cavidad [4].	14
Figura 2.11. Defecto de discontinuidad [4].	14
Figura 2.12. Superficie defectuosa [4].	14
Figura 2.13. Defecto de fundición incompleta [4].	15
Figura 2.14. Operaciones de mecanizado [13].	20
Figura 3.1. Diagrama metodológico.	25
Figura 3.2. Diagrama de construcción del molde.	29
Figura 3.3. Proceso del método manual de fabricación.	30
Figura 3.4. Fresadora ROMI D800	30
Figura 4.1. Modelo de fundición teórico elaborado en SolidWorks	31
Figura 4.2. Análisis a temperatura de fundición de 1300 °C y temperatura del molde de 300 °C.	32
Figura 4.3. Análisis a temperatura de fundición de 1300 °C y temperatura del molde de 350 °C.	32
Figura 4.4. Análisis a temperatura de fundición de 1300 °C y temperatura del molde de 400 °C.	33
Figura 4.5. Análisis a temperatura de fundición de 1350 °C y temperatura del molde de 300 °C.	33
Figura 4.6. Análisis a temperatura de fundición de 1350 °C y temperatura del molde de 350 °C.	33
Figura 4.7. Análisis a temperatura de fundición de 1350 °C y temperatura del molde de 400 °C.	34
Figura 4.8. Análisis a temperatura de fundición de 1400 °C y temperatura del molde de 300 °C.	34
Figura 4.9. Análisis a temperatura de fundición de 1400 °C y temperatura del molde de 350 °C.	34
Figura 4.10. Simulación de la entrada del material de fundición al interior del molde.	35
Figura 4.11. Simulación del llenado de las cavidades del molde.	35
Figura 4.12. Simulación completa de la fundición de las bolas.	36
Figura 4.13. 36,7 % de solidificación de la fundición en 58,5 s.	36
Figura 4.14. 98,2 % de solidificación de la fundición en 198,5 s.	36
Figura 4.15. Partición del molde.	37
Figura 4.16. Modelo CAD del molde.	37

Figura 4.17. Patrón de bolas diseñado en SolidWorks.	38
Figura 4.18. Fresado de la parte superior de una pieza del molde.	38
Figura 4.19. Fresado de la cavidad del molde.	38
Figura 4.20. Corte en secciones del eje de acero 1018.	50
Figura 4.21. Resultado final del mecanizado de las cavidades de fundición.	51
Figura 4.22. Preforma del modelo CAD.	51
Figura 4.23. Tapa superior(derecha) e inferior(izquierda) del molde de fundición ensamblado con los núcleos.	52
Figura 4.24. Impresora Artillery Genius.	53
Figura 4.25. Piezas de impresión 3D listas para ser moldeadas en arena	53
Figura 4.26. Moldeo en arena para las piezas del patrón de bolas de fundición	53
Figura 4.27. Patrón de las bolas.	54
Figura 4.28. Molde para 5 bolas de 5 pulgadas.	54
Figura 5.1. Análisis de porosidad a 1300 °C: molde a 300 °C (izq.), y molde a 400 °C (Der).	55
Figura 5.2. Análisis de porosidad a 1350 °C: molde a 300 °C (izq.), y molde a 400 °C (Der).	56
Figura 5.3. Análisis de porosidad a 1400 °C: molde a 300 °C (izq.), y molde a 400 °C (Der).	56
Figura 5.4. Análisis de porosidad a 1550 °C en la fundición y 400 °C del molde.	56
Figura 5.5. Análisis de Niyama a 1300 °C en la fundición: molde a 300 °C (izq.), y molde a 400 °C.	57
Figura 5.6. Análisis de Niyama a 1350 °C en la fundición: molde a 300 °C (izq.), y molde a 400 °C.	57
Figura 5.7. Análisis de Niyama a 1400 °C en la fundición: molde a 300 °C (izq.), y molde a 400 °C.	58
Figura 5.8. Análisis de Niyama a 1550 °C en la fundición y 400 °C del molde.	58
Figura 5.9 Canales para el desplazamiento del material de fundición.	60
Figura 5.10. Preparación del molde con pintura refractaria.	61
Figura 5.11. Fundición y colado del material para las bolas.	61
Figura 5.12. Desmoldeo de las bolas de fundición.	62
Figura 5.13. Limado de la zona de contacto con el alimentador del molde.	62
Figura 5.14. Análisis superficial sobre las bolas de fundición.	64

Índice de tablas

Tabla 2.1. Tipos básicos de aceros para fundición [17].....	16
Tabla 2.2. Contracción lineal de piezas fundidas mediante inyección [4].	17
Tabla 2.3. Tolerancias de contracción normal [4].	17
Tabla 2.4. Tipos de herramienta [4].	20
Tabla 3.1. Dimensiones de bolas según la norma DSTU 8538-2015 [20].	26
Tabla 3.2. Elementos del material de fundición del molde y las bolas	27
Tabla 3.3. Composición química AISI 1018.	27
Tabla 4.4. Propiedades mecánicas AISI 1018.	27
Tabla 4.5. Conductividad térmica para hierro fundido gris [21].	29
Tabla 4.1. Velocidades de corte recomendadas para herramientas de carburo [19].	40
Tabla 4.2. Avance recomendado para herramientas de carburo [19].	40
Tabla 4.3. Velocidades de corte recomendadas para herramientas de HSS [20].	44
Tabla 3.4. Avance por revolución recomendado para el taladrado [20].	45
Tabla 5.1. Parámetros óptimos para el colado de las bolas de molienda en molde permanente.	59
Tabla 5.2. Análisis dimensional de las bolas de fundición con error porcentual.	63
Tabla 5.3. Hoja de costos.	65
Tabla 5.4. Datos referenciales para la fabricación de moldes de arena.	66
Tabla 5.5. Costos de producción extrapolados.	66
Tabla 5.6. Comparativa de costos de molde para la fabricación de bolas de molienda	67
Tabla 5.7. Costo mano de obra.....	67
Tabla 5.8. porte del costo del material y de mano de obra.	68
Tabla 5.9. Costo teórico de venta de las bolas de molienda.	68

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

En una planta industrial de procesamiento de minerales, las bolas de molienda son parte fundamental para la operación. De acuerdo con un análisis de mercado realizado por la Comisión Chilena del Cobre en el año 2015, el consumo de bolas de molienda pasaría de aproximadamente 450 a 950 mil toneladas en el periodo 2014 - 2025 y que el 11 % de los costos de operación de una planta concentradora corresponden al consumo de bolas de molienda [1].

La producción de bolas de molienda por el método de fundición presenta un buen comportamiento para trabajar en las condiciones necesarias en la minería y para su fabricación se hace uso de moldes. La empresa China Ningguo Zhicheng Machine Manufacturing Co., Ltda fabrica estos moldes en metal de acero gris o también llamado hierro negro, muy eficiente para producir bolas de molienda de pulido a mano. El molde es distribuido en su país y en todo el mundo, pero estos tienen un elevado costo de importación, ya que es necesario realizar importaciones a partir de 30 piezas o bien 10 toneladas en peso, lo que conlleva a las empresas manufactureras invertir grandes cantidades de dinero para poder adquirirlos [2].

En Ecuador existen empresas metalúrgicas que anteriormente producían piezas de acero y de hierro fundido aleado, así como bolas de acero para la industria minera. Pero por motivos de los altos costes de importación de los moldes tuvieron que detener sus actividades de producción de bolas de molienda. La empresa Servicios Mecánicos Otavalo (SMO), se encuentra ubicada en Ecuador en el cantón Otavalo de la provincia de Imbabura, es una empresa que ofrece servicios metalúrgicos y fundición de algunos metales como son hierro aluminio, acero y cobre y es un ejemplo de empresas que tuvieron que cesar sus actividades de producción de bolas de molienda debido a los antecedentes antes mencionados.

En consecuencia, el presente proyecto de investigación tiene como propósito el diseño y construcción de un molde permanente para la elaboración de bolas, poniendo a disposición una alternativa de solución para las empresas a fin de reemplazar a futuro las importaciones con producción local, contribuyendo así al cambio de la matriz productiva del país.

El molde permanente puede usarse muchas veces para producir una gran cantidad de fundiciones, es decir, tienen ciertas ventajas económicas en operaciones de alta producción, a diferencia de los desechables, normalmente contruidos en arena, yeso o materiales similares que después de que el metal se endurece, se sacrifica el molde, con el fin de recuperar la pieza [3]. En este trabajo el molde combina las ventajas de cada uno, teniendo una parte permanente que es de metal y otra desechable de arena [4].

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Diseñar un molde permanente para fundición por gravedad de bolas de molienda de 5 pulgadas.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar las principales características de un molde permanente para una producción por lotes.
- Desarrollar el molde permanente mediante herramientas computacionales CAD/CAM.
- Simular el proceso de fundición para obtener los parámetros principales del molde.
- Construir el molde mediante equipo CNC.
- Validar el funcionamiento del molde.

1.3. Alcance

El propósito de este trabajo de investigación es diseñar, simular y realizar el proceso de fabricación de un molde permanente para bolas de molienda de 5 pulgadas, de acuerdo con los requerimientos y estándares de la empresa SMO (Servicios Mecánicos Otavalo), siendo uno de los primeros trabajos relacionados con la construcción de moldes permanentes para bolas de medios de molienda en el Ecuador.

El molde se utilizará para fundir metales con contenido de 1,5 a 2 % de carbono, tomando como base el diagrama metaestable hierro-carbono, el cual denominan aceros a las aleaciones binarias con contenidos en carbono menor que 2,11 %; por lo tanto, su punto de fundición es de 1516 °C [5]. Para este proceso se necesita formar una ligera capa de arena para la puerta de vertido. Las pruebas de validación del molde se realizarán en las instalaciones de la empresa SMO en base a las condiciones antes mencionadas.

1.4. Justificación

La minería a gran escala en Ecuador ha empezado. En 2016, en todo el país había 790 mil hectáreas concesionadas a empresas mineras, en 2018 fueron 3 millones. En esta área se practica la extracción de minerales como oro, cobre y plata [1]. Las empresas cementeras que vienen operando desde los años 80's, hoy en día deben abastecer el consumo que mantiene un ritmo de crecimiento sostenido en el Ecuador. Entre el 2007 y el 2012, el movimiento fue del 7 % anual, y en el 2013, llegó a 10 %, con 6,6 millones de toneladas anuales [6].

Se practica la minería artesanal en todo el país, generalmente en lecho de ríos (aluviales), a cielo abierto o a través de túneles. La minería es relativamente generosa en el Ecuador, debido a que una persona que trabaja en el río obtiene como mínimo tres gramos de metales preciosos al día. Sin embargo, este tipo de minería contamina debido el uso de cianuro y el mercurio. Las principales consecuencias son para los mismos mineros, quienes manipulan el mercurio sin ninguna protección ni cuidado, debido fundamentalmente a la falta de conocimiento, a la desvalorización del saber científico y el apego a métodos tradicionales de trabajo [6].

En ese marco y debido a la apertura comercial, existe mayor demanda de insumos en las empresas de minería, por lo tanto, la necesidad de que las empresas manufactureras cuenten con equipos es indispensable para abastecer de elementos como son las bolas para molinos. Con el desarrollo de este proyecto se pretende brindar una alternativa a la producción de bolas para medios de molienda y proporcionar un modelo de producción eficiente para las empresas que producen este tipo de productos. El desarrollar un modelo con recursos de la región permite en gran parte mejorar la matriz productiva. Además, en 2015, Gloria Consuelo Tonato Toapanta, en el trabajo de tesis concluye que el gobierno de Ecuador tomó medidas comerciales para equilibrar la balanza comercial y reducir las importaciones, pero que no fueron las más eficientes ya que impone altos tributos a las importaciones, en este aspecto económico se

intenta proporcionar una opción que disminuya el coste de importación que afectan directamente a las empresas [7].

En definitiva, este tipo de proyectos cumple con la misión de la carrera de Ingeniería en Mecatrónica valiéndose de la aplicación de conocimientos científicos, tecnológicos e innovación complementando los métodos de diseño y construcción adquiridos en la academia que puedan ayudar a la sociedad y contribuir con la producción a gran escala.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Las técnicas de fundición y labrado de metales empezaron a usarse mucho antes de la conquista de los españoles. En la región, los incas y nuestros aborígenes usaban estas técnicas principalmente para la elaboración de herramientas de trabajo que serían usadas en la agricultura, pesca y caza. En especial la fundición de metales como cobre, estaño, plata, oro y bronce, fueron sin duda grandes aportes hacia nuestros antepasados, quienes obtenían los minerales preciosos de los lavaderos y abriendo galerías con cincel y martillo. Para fundir, utilizaban crisoles de tierra cocida y el fuego lo creaban entre 7 u 8 personas soplando a través de tubos. Además, para la fundición de otros metales utilizaban hornos denominados *huairas* puesto en montes donde había suficiente viento para elevar el fuego, así se han encontrado objetos de oro hecho por el proceso de fundición en Ecuador, específicamente en las provincias de Esmeraldas y Loja [8].

En la Universidad Técnica del Norte se realizó un trabajo como proyecto de grado en el que se presenta la construcción de un molde permanente aplicando la norma ASTM B -108 (*Standard Specification for Aluminum-Alloy Permanent Mold Castings*) para su respectivo diseño y construcción, esta es usada en la empresa SMO, en donde realizan fundiciones de las probetas de aleaciones de aluminio. El proyecto nos muestra el uso de herramientas computacionales como SolidWorks para su respectivo diseño, con el cual también se realizan las operaciones CAD para generar el modelo de fundición, todo esto en base a las medidas establecidas por la norma ASTM B-108. La selección del material se realiza con base en materiales que se comercializan en Ecuador, además teniendo en cuenta los costos, propiedades mecánicas y termodinámicas, así optando por los más destacados entre los aceros ASTM A36, BÖHLER W-300 y W-400, entre otros, que son específicamente para trabajos en caliente, y utilizados en trabajos en los que la temperatura superficial se encuentra sobre los 200 °C [9].

Así mismo, en la Universidad Internacional SEK, Milton Danilo Jami (2018) realiza el trabajo titulado “*Diseño y construcción de un molde permanente para la fabricación de bornes de baterías automotrices*”, este modelo de molde es específicamente elaborado para fabricar bornes de batería usando aleaciones de cobre. En este proyecto se hace uso de estudios espectro métricos y metalográficos, con lo que determinan la aleación con la que está constituido los

bornes que se comercializan en Ecuador. Esto hace posible la producción de bornes con una geometría predefinida, obteniendo así aleaciones similares a las originales. Para cumplir el objetivo planteado, la investigación utilizó el software NX 10 para el análisis de geometría, y para poder optimizar el diseño se empleó los softwares de simulación CFD y ANSYS *Fluent*, con los que fue posible realizar un análisis de llenado y solidificación de materiales fundidos, y así pronosticar posibles fallas operativas. Además, con los datos obtenidos se realiza una comparación con los datos usados en el cálculo tradicional, esto con el fin de validar los resultados de cada uno en variables como velocidad de colado, caudal, tiempo de llenado y solidificación. Posteriormente fabrica el molde mediante equipos de control numérico programable CNC, usando también el software NX CAM. Y finalmente, las pruebas se realizan en el molde, obteniendo así los terminales fundidos [10].

2.2. Estado del arte

En este apartado se muestra una revisión exhaustiva sobre fundición y moldeo, conocimientos específicos que son de gran ayuda para tomar en cuenta en la realización de este trabajo.

2.2.1. Fundición

Consiste en verter metal fundido en cavidades formadas en un molde. En fundición de arena el molde está hecho de arena. Los moldes permanentes están hechos de hierro, acero o bronce. La elección final de un material para un diseño se basa en la producción más económica [11].

Entre los años 4000 y 3000 a.C. se realizaron las primeras fundiciones metálicas usando moldes de piedra y metal para la fundición de cobre y otros materiales usando en la fabricación de ornamentos, puntas para flechas entre otras cosas. Con el paso del tiempo se han desarrollado algunos procesos de fundición, todos con características y aplicaciones adecuadas a un proceso, cumpliendo así con los requerimientos de ingeniería. Entre algunos de las variedades producidas entre componentes y partes usando el método de fundición tenemos: componentes automovilísticos, monobloques para motores, trenes de potencia, cigüeñales, equipos agrícolas y de ferrocarriles, accesorios de plomería y tubos, herramental eléctrico, cañones para armas, sartenes,

equipo para la oficina además de componentes considerablemente grandes para turbinas hidráulicas [4].

Entre las principales categorías relacionadas con los materiales del molde, procesos de moldeo y métodos de alimentación del molde con metal fundido, se tiene:

2.2.2. Partes de un molde

Las partes que componen un molde se pueden observar en la *Figura 2.1.*, el cual es una representación conceptual básica que describe el sistema utilizado para la fundición. El material fundido ingresa al molde por medio de la copa de vaciado y llega al bebedero, luego se dirige a las mazarotas y a la cavidad de fundición a través de los canales de alimentación [4].

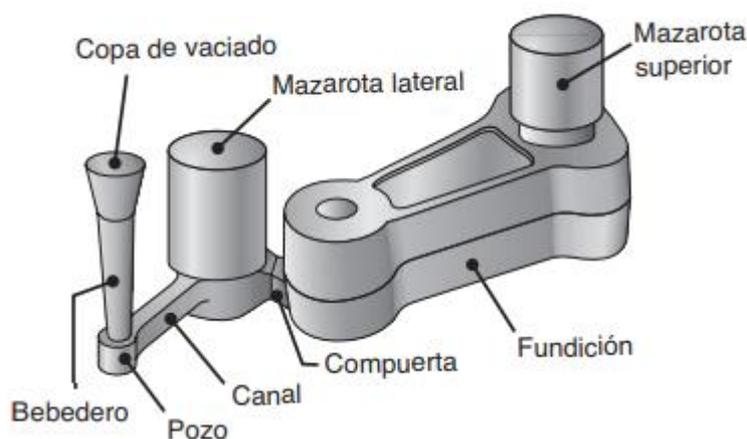


Figura 2.1. Partes de un molde [4].

Las principales partes de un molde son:

Bebedero: canal del sistema de alimentación, generalmente cónico vertical por donde el metal fundido fluye hacia abajo, dentro de la cavidad del molde [4].

Canales de alimentación: Llevan el material fundido desde el bebedero hasta la cavidad de fundición [4].

Mazarotas: Sirven como depósitos de metal fundido para proveer el metal necesario y evitar la porosidad debida a la contracción durante la solidificación [4].

Cavidad de fundición: Espacio el cual conforma la pieza de fundición que se desea fabricar [4].

2.2.3. Moldes desechables

Son moldes de un solo uso que se pueden construir en plástico, arena, madera, yeso, cerámica o materiales similares. Usualmente suelen fabricarse con aglutinantes, también llamados agentes de unión para obtener una mejora en sus propiedades. Un molde de arena típico debe tener 90 % de arena, 7 % de arcilla y 3 % de agua, estos materiales son refractarios, quiere decir que son capaces de soportar grandes temperaturas que es lo que requieren los metales fundidos. Estos moldes se destruyen para retirar la pieza solidificada [4]. En la *Figura 2.2.* se muestra un molde desechable de arena construido dentro de una caja.



Figura 2.2. Molde desechable de arena [12].

2.2.4. Moldes permanentes

Estos tipos de molde se fabrican con aleaciones que poseen una gran resistencia a elevadas temperaturas. Son diseñados con el propósito de que se pueda utilizar el molde repetidamente por lo que una de sus principales características es que las piezas de fundición pueden retirarse fácilmente. Los moldes permanentes consisten en 2 o más secciones que pueden abrirse para extraer la pieza, y debido a que son mejores conductores de calor, la fundición experimenta mayores velocidades de enfriamiento cuando se está solidificando, afectando la microestructura y el tamaño de grano de ésta [4].

El proceso de fundición en molde permanente se puede observar en la *Figura 2.3.*, la fabricación de este tipo de molde es mucho más costosa que el moldeo en arena y no son posibles formas complejas ya que el diseño está limitado debido a la capacidad de abrir el molde. Sin embargo, es una solución mucho más económica para la

producción de piezas en serie, ahorrando tiempo y con una mejor calidad en el resultado [13].



Figura 2.3. Fundición en molde permanente [12]

Durante el uso normal de un molde permanente, se suele utilizar un recubrimiento de grafito tras un cierto número de coladas por la resistencia y la barrera térmica que ofrece, lo cual permite incrementar la vida útil del molde. Así también se puede tener un enfriamiento controlado, no obstante, en algunos casos, dependiendo de la complejidad y la geometría puede ser necesario usar eyectores, ubicados en algunos puntos vitales del molde para poder extraer la pieza, sin embargo, éstas pueden dejar marcas pequeñas en la pieza [4].

En la *Figura 2.4.* se ilustra el esquema de un molde permanente y sus partes.

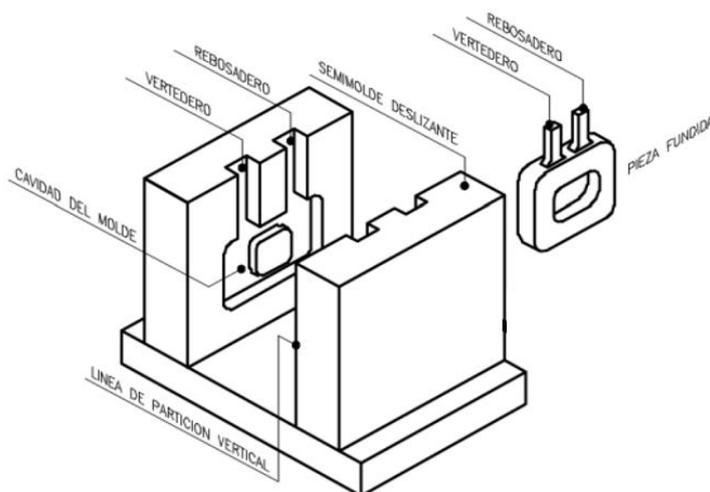


Figura 2.4. Molde permanente [10].

Los moldes se deben sujetar por medios mecánicos (*Figura 2.5.*) para evitar su apertura durante el proceso de fundición. Antes del colado se debe precalentar el molde hasta una temperatura de alrededor de 150 °C y 200 °C para reducir el salto térmico entre el molde y el metal fundido que se vierte en su interior. Esto facilita el flujo del metal y permite obtener mejores acabados superficiales, tolerancias dimensionales y propiedades mecánicas [10].

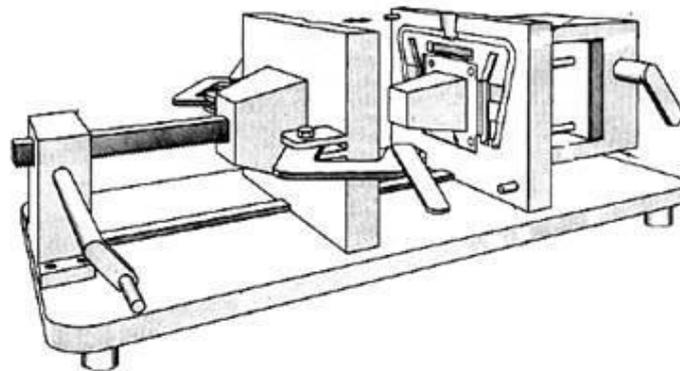


Figura 2.5. Medio de sujeción para moldes [10].

2.2.5. Moldes compósitos

Se conforman de 2 o más materiales diferentes teniendo una parte permanente y otra desechable, los cuales pueden ser de arena y metal combinado así las ventajas de cada uno. Estos moldes se utilizan especialmente en el moldeo de cáscara entre otros métodos de fundición con el fin de controlar la velocidad de enfriamiento, optimizar la resistencia, fundir formas complejas y economizar en parte el método de fundición [4].

2.3. Fundición con moldes permanentes

Existen diferentes métodos que se pueden emplear para la fundición empleando moldes permanentes. Estos métodos se pueden clasificar en función de la presión con la que el material fundido ingresa al molde.

2.3.1. Fundición a baja presión

Su cualidad esencial es poseer una cámara hermética en el que la presión interna es mayor a la atmosférica, se debe mantener el molde a presión atmosférica unido al metal líquido mediante un ducto, como el metal líquido se encuentra sujeto a una

presión mayor sube forzadamente rellenando así la vacante del molde [14]. Ver *Figura 2.6.*

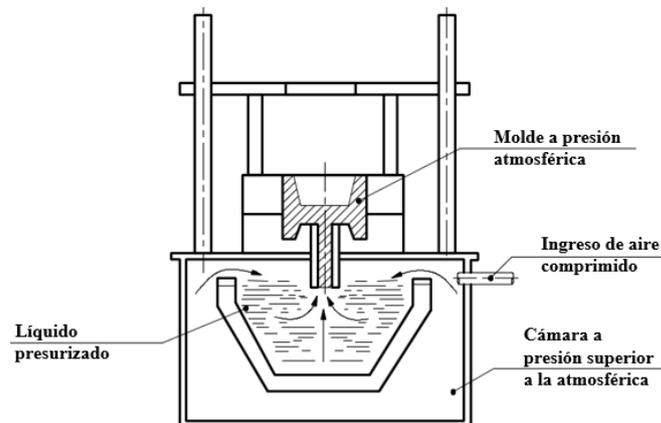


Figura 2.6. Molde a baja presión [10].

2.3.2. Proceso de fundición por gravedad.

La fundición por gravedad en matrices permanentes en general usa moldes metálicos también llamados coquillas (*Figura 2.7.*) se utilizan varias veces y están diseñados para sacar las piezas fácilmente, a menudo se usan para fundir piezas de bajo punto de fusión como zinc, aluminio y aleaciones de cobre [15].

Es de los primeros métodos inventados para fundir metales y aleaciones ligeras. En este proceso totalmente automatizado, el metal fundido se vierte directamente de la cuchara en moldes permanentes o semipermanentes. El objetivo es llenar el molde con mínima turbulencia a través de uno o más canales para reducir la oxidación y la formación de espuma. Esto minimiza la porosidad, las inclusiones y proporciona las mejores propiedades del metal en la fundición final.



Figura 2.7. Fundición por gravedad [16].

En la fundición por gravedad, el equipo puede tener aberturas de molde horizontales o verticales, o en otro caso tecnología de giro, giro a $0/90^\circ$ o $0/120^\circ$. En la fundición basculante, el flujo de metal que ingresa a la entrada del molde está controlado por el ángulo de inclinación y la velocidad del molde [16].

2.3.3. Proceso de fundición a alta presión.

En este proceso la colada es forzada hacia el molde por un pistón hidráulico a alta velocidad y presión. Esta presión se mantiene hasta que la pieza se solidifique y se pueda retirar de la cavidad, brindando un mejor acabado superficial [14].

La máquina de fundición a alta presión horizontal suele garantizar que el molde permanezca completamente cerrado. Se clasifican en función de la cantidad de fuerza de cierre que pueden aplicar y, en el caso de las máquinas de Italtipresse Gauss (Figura 2.8.), pueden ir de las 550 a las 5700 toneladas [16].

En función del metal que se utilice, la unidad de inyección que llena el molde puede ser de cámara caliente o de cámara fría. Durante la fundición a presión en cámara caliente, el metal se mantiene en el interior de la máquina de fundición a presión, luego, se extrae hacia la cámara y por último la acción del pistón de inyección hace que se introduzca en el molde. Estas partes de la máquina están siempre en contacto con el metal fundido. En el proceso en cámara frigorífica, se funde el metal en un horno separado y se traslada a un horno de conservación; a continuación, se vierte en una cámara de llenado y se introduce en el molde [16].

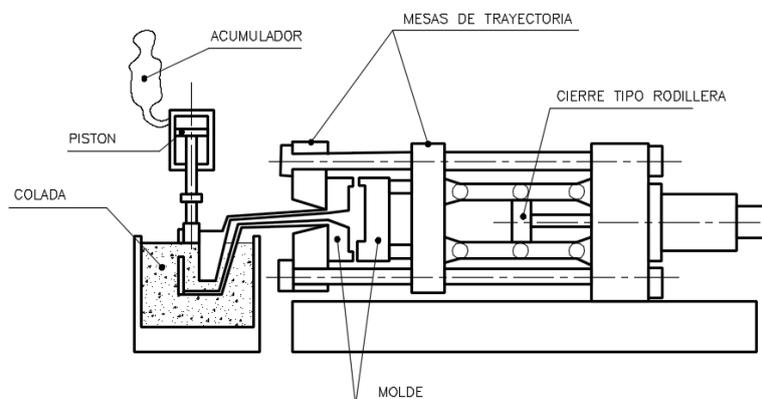


Figura 2.8. Proceso de fundición a alta presión con máquinas de Italtipresse Gauss [16].

2.4. Defectos en el proceso de fundición

Durante el proceso de manufactura pueden aparecer varios defectos, según factores como los materiales, el diseño de las piezas y las técnicas de proceso. En tanto que algunos defectos sólo afectan la apariencia de las partes producidas, otros pueden tener efectos adversos importantes en su integridad estructural [4].

Los principales defectos que ocurren en el colado con moldes permanentes son los rechupes, los cuales son cavidades que se producen en el centro y en la parte superior de la pieza fundida debido al cambio volumétrico en la solidificación que aborda por la zona superficial y va creciendo de espesor de manera paulatina a costa del metal que permanece líquido en el centro. Un segundo inconveniente que ocurre durante la solidificación de la pieza de fundición es la contracción, la cual es aproximada del 8 % del volumen total de la pieza conseguida. Este tipo de defecto se puede reducir colando con un molde de mayor dimensión para compensar la contracción, a su vez se disminuye la velocidad de enfriamiento recalentando la parte superior del molde por medio de arco eléctrico, carbón o polvo aluminotérmico o empleando mazarota en la parte superior. Otro método que se puede emplear para evitar un rechupe es comprimiendo la fundición en una prensa hidráulica con una presión de alrededor de 600 a 2000 kg por cm^2 [4].

En [4] cita algunos de los defectos que pueden producirse en la fundición, estos son:

2.4.1. Proyecciones metálicas

Son aletas, rebabas o proyecciones, como ampollas y superficies rugosas. En la *Figura 2.9.* se puede observar una ilustración de este tipo de defecto.

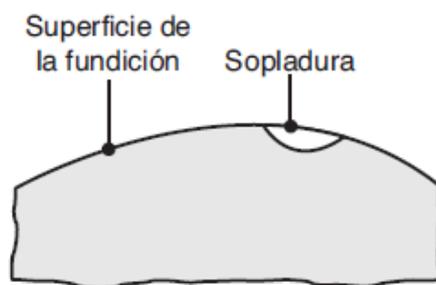


Figura 2.9. Defecto de proyección metálica [4].

2.4.2. Cavidades

Son cavidades redondeadas o rugosas, internas o expuestas que pueden ser sopladuras, puntas de alfiler y cavidades por contracción. Ver *Figura 2.10*.

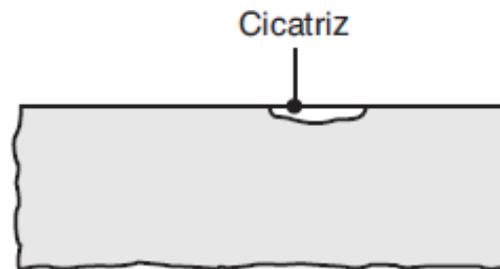


Figura 2.10. Defecto de cavidad [4].

2.4.3. Discontinuidades

Se trata de grietas, rasgadura en frío o caliente y puntos fríos que ocurren si no se permite que el metal se contraiga libremente a medida que se solidifica. Los puntos fríos son zonas localizadas en la fundición, que no se derriten por completo debido a la reunión de dos flujos de metal líquido provenientes de dos rejillas diferentes (*Figura 2.11.*).

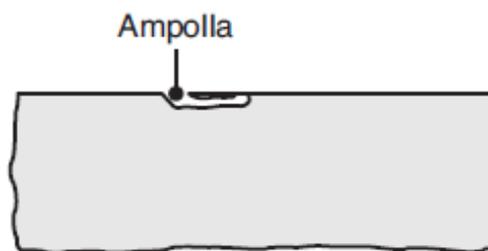


Figura 2.11. Defecto de discontinuidad [4].

2.4.4. Superficies defectuosas

Son pliegues, traslapes y cicatrices superficiales, capas de arena adherida y escamas de óxido, son causados ya sea por el uso de arenas demasiado fina o embestida desigual del molde. En la *Figura 2.12.* se observa una ilustración de este tipo de defecto.

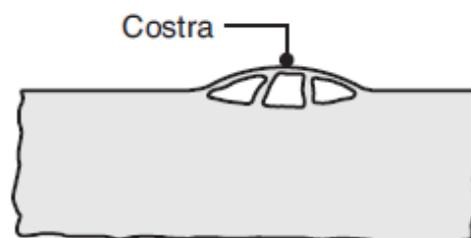


Figura 2.12. Superficie defectuosa [4].

2.4.5. Fundición incompleta

Como se observa en la *Figura 2.13*, son fallas que ocurren debido a la solidificación prematura, al volumen insuficiente del metal vaciado y fugas por la pérdida de metal del molde después de haber sido vaciado. También pueden provenir de una temperatura muy baja del metal fundido o de un vaciado muy lento del mismo.

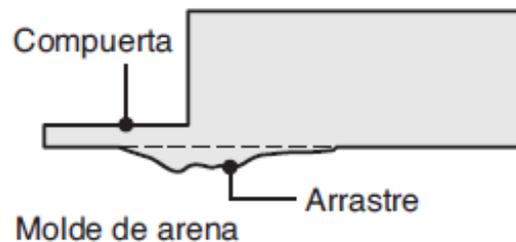


Figura 2.13. Defecto de fundición incompleta [4].

2.5. Consideraciones para el diseño de moldes permanentes

Algunas consideraciones que se debe tener para los materiales para moldes permanentes son las siguientes:

El molde debe tener buena estabilidad dimensional, resistencia a altas temperaturas, resistencia al choque térmico y resistencia a la fatiga, no debe deformarse o cambiar de tamaño incontrolablemente durante el ciclo. El molde debe ser capaz de soportar ciclos térmicos prolongados y repetidos sin ablandamiento, agrietamiento u oxidación [17].

El material del molde debe tener una maquinabilidad adecuada. El mecanizado de la cavidad suele ser el factor de costo más significativo. Las tasas de desgaste, rotura, avance de la herramienta influyen en el costo del molde [17].

El material de molde más común es el acero AISI P20 en condiciones pre endurecidas de 30 HRC. Las matrices de forja y los matrices de fundición a presión consisten principalmente en un acero AISI H13 con un rango de dureza de 45 a 60 HRC para matrices de forja y 46 ± 50 HRC para matrices de fundición a presión [17].

En el libro [4] se muestra una clasificación de los tipos de acero básico para matrices y herramientas resumidas en la *Tabla 2.1*.

Tabla 2.1. Tipos básicos de aceros para fundición [17].

Tipo	AISI
De alta velocidad	M (base de molibdeno) T (base de tungsteno)
De trabajo en caliente	H1 a H19 (base de cromo) H20 a H39 (base de tungsteno) H40 a H59 (base de molibdeno)
De trabajo en frío	D (alto carbono, alto cromo) A (aleación media, alta templabilidad) O (templabilidad en aceite)
Resistente al impacto	S
Aceros de moldes	P1 a P19 (bajo carbono) P20 a P39 (otros)
De propósito especial	L (baja aleación) F (carbono-tungsteno)
Templables al agua	W

2.5.1. Ángulos de salida

En general se debe tener un pequeño ángulo de salida (conicidad) en los modelos para moldes de arena o permanentes, debiendo ser una inclinación o ángulo de salida favorable de las superficies paralelas a la dirección de extracción, esto permitirá extraer el modelo con facilidad y sin perjudicar el molde. Dependiendo de la calidad del modelo, lo más común es que los ángulos de salida tengan de $0,5^\circ$ a 2° [4].

Al mismo tiempo en las piezas deben evitarse en lo posible las esquinas, ángulos y filetes agudos, pues actúan como concentradores de esfuerzos y pueden hacer que el metal (matriz) se agriete o desgarre durante la solidificación. También se deben evitar las aristas vivas debido a que estas pueden ocasionar cortes o lesiones al momento de manipular la fundición. El radio de filete se debe elegir para reducir las concentraciones de esfuerzo y garantizar el flujo adecuado de metal líquido durante la fundición. Por lo general, los radios de los filetes van de 3 mm a 25 mm ($\frac{1}{8}$ pulgada), aunque se pueden permitir radios menores en fundiciones pequeñas y en aplicaciones específicas. Sin

embargo, si los radios de los filetes son demasiado grandes, el volumen del material en esas regiones también es grande y, por consiguiente, la velocidad de enfriamiento es inferior [4].

2.5.2. Tolerancias dimensionales a la contracción

Se le llama tolerancia a la cantidad total que puede variar una pieza en la fabricación, en la *Tabla 2.2.* y *2.3.* se puede ver algunos datos para metales.

Tabla 2.2. Contracción lineal de piezas fundidas mediante inyección [4].

Metal	Aleación de plomo	Aleación de estaño	Aleación de zinc	Aleación de aluminio	Aleaciones de magnesio	Aleaciones de cobre
Contracción lineal %	0,3 – 0,5	0,2 – 0,4	0,5 – 0,7	0,4 – 0,6	0,5 – 0,7	0,7 – 1,2

Tabla 2.3. Tolerancias de contracción normal [4].

TOLERANCIA NORMAL A LA CONTRACCIÓN PARA ALGUNOS METALES FUNDIDOS	
Metal	Porcentaje (%)
Hierro fundido gris	0,83 - 1,3
Hierro fundido blanco	2, 1
Hierro fundido maleable	0,78 - 1,0
Aleaciones de aluminio	1,3
Aleaciones de magnesio	1,3
Latón amarillo	1,3 - 1,6
Bronce de fósforo	1,0 - 1,6
Bronce de aluminio	2,1
Acero de alto manganeso	2,6

2.5.3. Tiempo Solidificación $TTS(min)$

El tiempo de solidificación es el periodo requerido para que la colada insertada dentro del molde pase a estado sólido. Este tiempo depende del tamaño, de la forma del fundido, del tipo de aleación entre otras características. Para determinar este tiempo se emplea una relación empírica conocida como regla de Chvorinov. Ver ecuación (1) [13].

$$TTS = Cm \left(\frac{V}{A} \right)^2 \quad (1)$$

Donde:

TTS : tiempo de solidificación (min).

V : volumen del fundido (cm^3).

A : área superficial (cm^2).

Cm : constante del molde ($\frac{min}{cm^2}$).

2.5.4. Tiempo de llenado $MTF(s)$

El tiempo de llenado establece el periodo necesario para verter el material fundido hacia el molde. Este tiempo depende del volumen total que la pieza ocupa dentro del molde, incluido los canales de alimentación, la mazarota, entre otros. Para determinar el tiempo de llenado se emplea la ecuación (2).

$$MTF = \frac{V}{Q} \quad (2)$$

Donde:

MTF : tiempo mínimo de llenado (s)

V : Volumen de la pieza fundida (cm^3)

Q : caudal ($\frac{cm^3}{s}$)

2.5.5. Conductividad térmica k ($\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$)

Es una propiedad física que muestra la facilidad de un material para la transmisión de calor por conducción, es decir, por el movimiento de moléculas.

Las unidades de la conductividad se deducen de la ecuación de Fourier [18]. Ver ecuación (3).

$$\dot{Q} = -k \cdot A \cdot \frac{d_t}{d_n} \rightarrow k = \frac{-\dot{Q}}{\frac{A}{\frac{d_t}{d_n}}} \rightarrow [k] = \frac{W}{m \cdot K} \text{ ó } \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \quad (3)$$

Donde:

Q : Transferencia de calor.

k : conductividad térmica ($\frac{W}{m \cdot K}$).

A : área de la sección transversal (m^2).

$\frac{dt}{dn}$: gradiente de temperatura ($^\circ C$ ó K).

2.6. Procesos de remoción de material

Son un grupo de operaciones de conformado en los que se elimina el exceso de material de una pieza de trabajo original de tal forma que lo que se obtiene es la forma final deseada del producto. Su rama más importante es el maquinado convencional, en el que se utiliza una herramienta de corte afilada para cortar mecánicamente el material para obtener así la forma deseada. Los tres principales procesos de fabricación son el torneado, el fresado y el taladrado. Las “otras operaciones de maquinado” incluyen el perfilado, el cepillado, el escariado y el aserrado [13].

2.6.1. El maquinado

Es el proceso de manufactura en el que se utiliza una herramienta de corte para eliminar el exceso de material de una pieza de inicial, de modo que el material restante tenga la forma de pieza deseada. El proceso de corte está relacionado principalmente

con la deformación cortante de la pieza de trabajo para crear la viruta; cuando se retira la viruta, se expone una superficie nueva. En la *Figura 2.14.* se ilustra los procesos de mecanizado convencional.

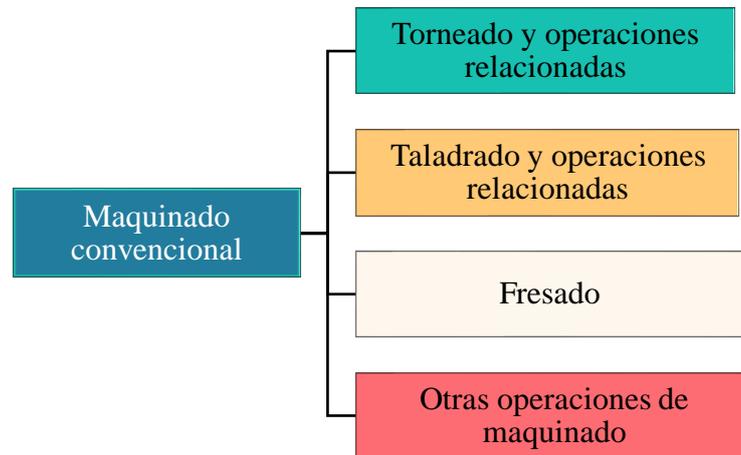


Figura 2.14. Operaciones de mecanizado [13].

2.6.2. Herramientas de corte

Es un elemento que sirve para retirar el exceso de material de la pieza, de forma que el material sobrante tenga la forma de la pieza deseada. La acción predominante del corte involucra la deformación cortante del material de trabajo para formar la viruta; al removerse la viruta, queda expuesta una nueva superficie [13].

Tabla 2.4. Tipos de herramienta [4].

HERRAMIENTA	DESCRIPCIÓN	FIGURA
Herramientas de una sola punta	La herramienta de una sola punta tiene un filo cortante, se utiliza para las operaciones torneado.	
Herramientas de múltiples filos cortantes	Tienen más de un borde de corte, en general realizan su movimiento respecto a la pieza de trabajo mediante rotación. Las operaciones de fresado y taladrado usan herramientas rotatorias de múltiples filos cortantes.	

La herramienta de corte posee uno o más filos de corte y están hechos de un material más duro que el material de la pieza de trabajo. El filo cortante sirve para separar una viruta del material de trabajo, hay dos tipos básicos de herramientas cortantes cuyos ejemplos se ilustran en la *Tabla 2.4*.

2.7. Parámetros de desbaste

Son todos aquellos parámetros que intervienen en el proceso de mecanizado por arranque de viruta.

2.7.1. Potencia de corte $P_c(kW)$

La potencia de corte (P_c) necesaria para efectuar un determinado mecanizado se expresa en *kilovatios* y se calcula a partir de la potencia de máquina por el rendimiento [4].

$$P_c = P_m \cdot n \quad (4)$$

Donde:

P_c : Potencia de corte (*kW*).

P_m : potencia de máquina (*kW*).

n : rendimiento.

2.7.2. Velocidad de corte $V_c(\frac{m}{min})$

La velocidad de corte se puede definir como la velocidad a la cual una máquina realiza el desbaste de un material empleando para ello una herramienta de corte. La velocidad de corte se mide en $\frac{pies}{min}$ o $\frac{m}{min}$ e indica la velocidad lineal a la cual el filo de la herramienta mecaniza la pieza [19].

La velocidad de corte adecuada para el mecanizado depende de las características mecánicas de cada materia, por lo que se deben tener en cuenta estos factores, siendo los principales: dureza, estructura y maquinabilidad. La herramienta de

corte también se selecciona en función de estas características por lo que es importante considerar para su selección [4].

2.7.3. Velocidad del husillo $N(rpm)$

Corresponde al número de revoluciones que realiza el eje principal de la máquina de mecanizado y se mide en rpm . Para el caso de la fresadora, corresponde al husillo que sostiene la herramienta de corte. El número de revoluciones depende de la velocidad de corte admitida y el diámetro de la fresa [19].

$$N = \frac{(V_c * 1000)}{\pi * D} \quad (5)$$

Donde:

V_c : velocidad de corte ($\frac{m}{min}$).

D : diámetro de la fresa (mm).

N : número de revoluciones (rpm).

2.7.4. Avance por diente $F_z(\frac{m}{min})$

Es la distancia que recorre la herramienta entre un corte y el siguiente tomando como referencia uno de los dientes. El avance por diente (f_z), para el caso de la fresadora, determina la cantidad de material que debe ser eliminado por los dientes de la fresa conforme esta avanza [19].

2.7.5. Velocidad de avance $V_f(\frac{in}{min} \text{ o } \frac{mm}{min})$

Es la velocidad total a la cual la herramienta de corte avanza tomando en cuenta todos los dientes que conforman la fresa. Se suele utilizar las unidades de medida según el caso [19].

$$V_f = N * z_c * f_z \quad (6)$$

Donde:

N : número de revoluciones (*rpm*).

z_c : número de dientes (unidades).

F_z : avance por diente ($\frac{mm}{diente}$).

V_f : velocidad de avance ($\frac{mm}{min}$).

2.7.6. Profundidad de corte a_p (*mm*)

Es la profundidad de la pasada arrancada de la superficie del material que se está mecanizando. Se mide de forma perpendicular al avance de la herramienta y usualmente se expresa en *mm* [19].

$$a_p = \frac{PC * 60X106}{a * v * k} \quad (7)$$

Donde:

a_p : profundidad de corte (*mm*).

PC : potencia de la máquina (*kW*).

a_e : empañe (*mm*).

V_f : velocidad de avance ($\frac{mm}{min}$)

k_c : fuerza de corte específica. ($\frac{N}{mm^2}$).

De forma generalizada, el avance por diente tiene un valor de alrededor de 0,1 *mm* (0,004 *pulgada*) a 0,5 *mm* (0,02 *pulgada*) y las profundidades de corte rondan entre 1 *mm* a 8 *mm* (0,04 a 0,30 *pulgada*) [4]. Estos valores son dependientes de los fabricantes de las herramientas de corte, por lo cual se debe consultar las tablas de parámetro de las herramientas a utilizar.

2.7.7. Software CAD-CAM

CAD/CAM significa diseño asistido por computador y manufactura asistida por computadora respectivamente. El CAD (por sus siglas en inglés) comprende el uso de computadoras para crear planos de diseño y modelos de productos. Los sistemas CAD son herramientas poderosas y se utilizan en el diseño y modelado geométrico de componentes y productos. Uno de los softwares más utilizado es SolidWorks [4].

La manufactura asistida por computadora (CAM, por sus siglas en inglés) comprende el uso de software de control numérico para crear instrucciones detalladas que impulsan a las máquinas de control numérico por ordenador (CNC) para la fabricación de piezas hasta obtener un producto [4].

Los sistemas CAD/CAM son la combinación del diseño asistido por computadora y la manufactura asistida por computadora. Esta combinación permite transferir información de la etapa de diseño a la etapa de planeación de manufactura sin necesidad de introducir manualmente los datos sobre la geometría de la parte [4].

2.8. Funciones código G y código M

Se denomina lenguaje de programación a un medio de comunicación con la computadora por medio de caracteres simbólicos. El programador representa en este lenguaje el componente que se va a procesar y la computadora convierte dicha descripción en comandos para la máquina NC. El programa crea en forma automática el código de la máquina (Código G). El lector puede referirse al ANEXO 1, donde se detallan algunos de los códigos y sus respectivas funciones en esta programación y que viene como manual de la ROMI D800 que se encuentra en la Universidad técnica del Norte. Este código es valioso para comunicar instrucciones de maquinado al hardware CNC [4].

Existen otros tipos de códigos denominados "M". El lector puede referirse al ANEXO 2, donde se detallan los códigos y las funciones que cumplen dentro de la programación. Realizan funciones similares a las operaciones "G", pero cumplen funciones programadas dentro de la máquina y se utiliza muchas veces para ejecutar programas como repeticiones, finales de mecanizados, activación y desactivación de refrigerante, entre otros [13].

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se presenta el método utilizado para el desarrollo del proyecto, indicando las distintas etapas de diseño de las piezas que conforma el molde, la selección de materiales y determinación del método constructivo y parámetros de mecanizado empleando para ello diseño CAD, simulaciones CAM (selección de herramientas) y simulación de fundición.

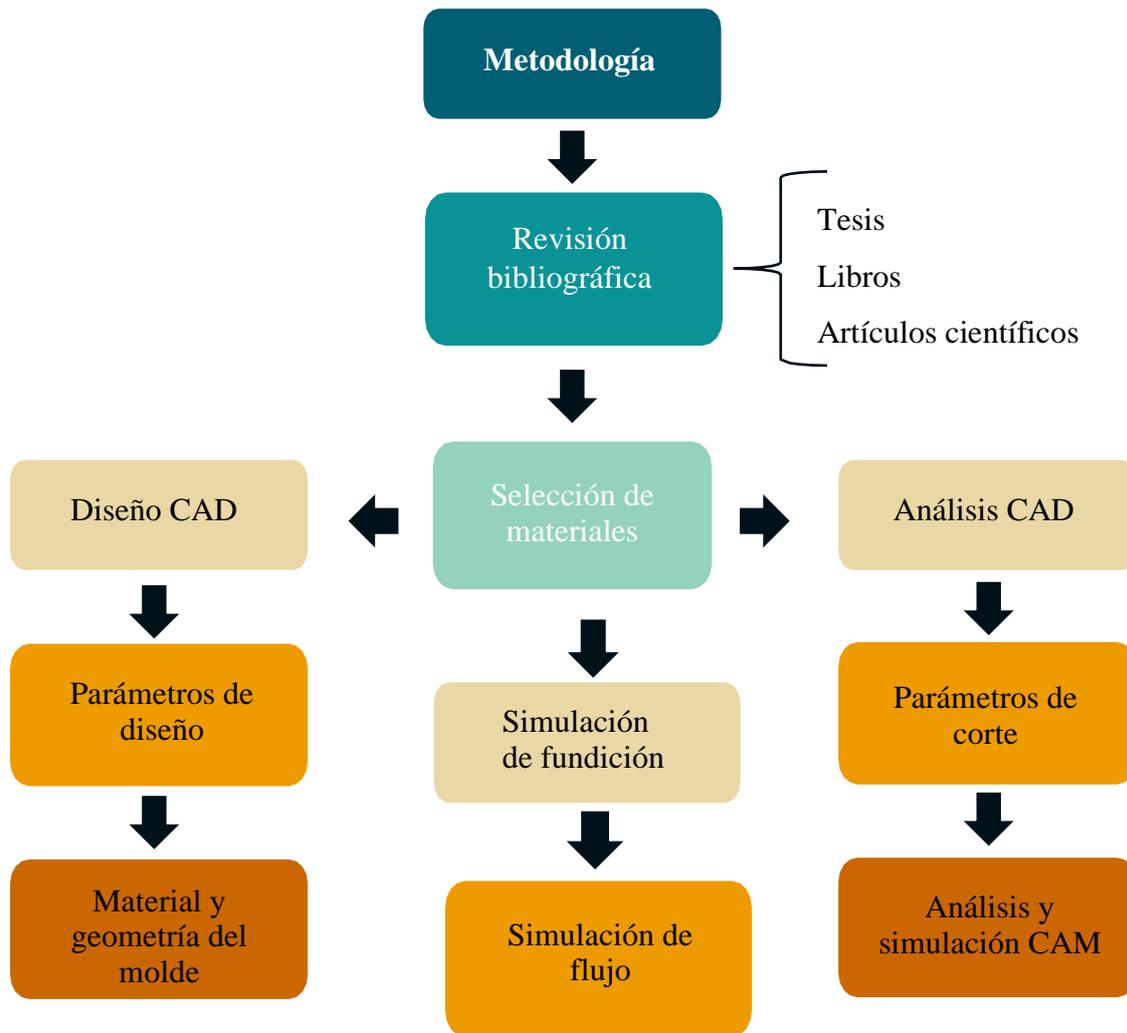


Figura 3.1. Diagrama metodológico.

3.1. Requerimientos del diseño

Se considera la norma ucraniana DSTU 8538-2015 para tener en cuenta las dimensiones de las bolas y las desviaciones marginales en bolas de diámetro menores a 120 mm [20].

Tabla 3.1. Dimensiones de bolas según la norma DSTU 8538-2015 [20].

Diámetro clasificado (mm)	Diámetro nominal (mm)	Desviaciones máximas del diámetro nominal (mm)
15	15	
20	20	± 1,0
25	25	
30	31,5	
35	36,5	± 2,0
40	41,5	
45	46,5	
50	52	
55	57	
60	62	± 3,0
65	68	
70	73	
80	83	
90	94	± 4,0
100	104	
110	114	± 5,0
120	125	

Para la obtención correcta del molde de fundición, se considera una serie de requerimientos mínimos que debe cumplir el modelo, teniendo en cuenta que las bolas pueden fabricarse de acuerdo a las especificaciones de los fabricantes y los consumidores, por lo tanto, la empresa SMO con experiencia en fabricación de bolas especifica valores como la contracción para el hierro blanco (1,5 %). Además, se tiene otras consideraciones de dimensiones para el molde a fabricarse:

- Matriz para fundición circular de 5 bolas de 5 in.
- Compensación para la contracción del material 1,5 %.
- Diámetro mínimo del molde de 457 mm.
- Diámetro exterior pieza cavidad 147 mm.
- Material de fundición para las bolas de hierro blanco.

3.2. Selección de materiales

La selección final del material del molde se realizó bajo la asesoría de la empresa metalúrgica SMO ubicada en la ciudad de Otavalo, empleando una aleación de hierro para el molde y otra para las bolas como se detalla en *Tabla 3.2.*

Tabla 3.2. Elementos del material de fundición del molde y las bolas

Molde – Hierro gris		Bolas – Hierro blanco	
Elemento	Concentración	Elemento	Concentración
Hierro gris	Material base	Hierro blanco	Material base
Carbono	3,2 %	Cromo	1 %
Manganeso	0,5 %	Carbono	2 %
Silicio	2,5 %	Manganeso	0,5 %
Azufre y fosforo	0,04 %	Silicio	2 %
		Azufre y fosforo	0,04 %

La cavidad de las bolas dentro del molde se construyó empleando un eje de acero de transmisión de la serie 1018 con las especificaciones de la *Tabla 3.3.* y la *Tabla 3.4.*

Tabla 3.3. Composición química AISI 1018.

COMPOSICIÓN QUÍMICA				
% C	% Si	% Mn	% P	% S
0 – ,20	0 – 0,25	0 – 0,70	0 – 0,04	0 – 0,5

Tabla 4.4. Propiedades mecánicas AISI 1018.

PROPIEDADES MECÁNICAS			
RESISTENCIA MECÁNICA $\frac{N}{mm^2}$	PUNTO DE FLUENCIA $\frac{N}{mm^2}$	Elongación % Mín.	DUREZA ROCKWELL B
410 - 520	235	20	143

3.3. Uso de herramientas CAD para el diseño

Para el diseño del molde de fundición se hace uso de la herramienta de diseño CAD SolidWorks con el propósito de crear un modelo 3D virtual del proyecto. Durante esta etapa se toma en cuenta las normas de diseño existentes y se verificaron las tolerancias dimensionales, ángulos de salida, contracción del material fundido y zonas rectangulares o cuadradas de tal forma que no existan retenciones durante el desmoldeo de las bolas de fundición. Posterior a la etapa de diseño CAD y la obtención del modelo, se generan planos de partición con el objetivo de ser utilizados durante las simulaciones y el mecanizado.

3.4. Método de fundición

El método de fundición planteado para la utilización de este molde consiste en la inserción de material dentro de una abertura ubicada en la parte superior central del molde el cual está conformado por dos piezas para facilitar el desensamble y obtención de las bolas. El material fundido se deposita en el núcleo y se distribuirá uniformemente hasta llegar a las cavidades de las bolas a través de los canales construidos para este fin. De ser necesario, las cavidades de la pieza superior del molde pueden poseer aberturas que permitirán el desfogue del aire contenido en el interior, de tal forma que permitan un mejor llenado.

El principal propósito de esta simulación es la de garantizar el éxito de la fundición para así de esta manera reducir tiempo, dinero, costos y recursos. Para realizar correctamente se calcula diferentes variables como son el tiempo de llenado y el tiempo de solidificación, de tal forma que se consiguiera parametrizar adecuadamente por medio del software la temperatura del molde, temperatura de colada, disminuyendo los posibles defectos que pudiesen ocurrir durante todo el proceso de fundición.

Es importante tener en cuenta los valores del coeficiente de conductividad térmica k para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor (HTC) para el hierro, parámetro que determinara la cantidad de calor que se transfiere entre la fundición y el molde. Tomando de la *Tabla 4.5.* para fundición gris se tiene $k = 36,7 \frac{W}{mK}$, por la resistencia a la tracción del hierro $350 \frac{N}{mm^2}$ y a la temperatura más alta de la tabla $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Para la fundición blanca se tiene el valor de $k = 15 \text{ a } 30 \frac{W}{mK}$. El valor de HTC(Q) se puede calcular con la ecuación (3) descrita en el capítulo 2. Para este caso el HTC se toma con la simulación de fundición.

Tabla 4.5. Conductividad térmica para hierro fundido gris [21].

Resistencia a la tracción ($\frac{N}{mm^2}$)	150	180	220	260	300	350	400
	Conductividad térmica $\frac{W}{mK}$						
100 °C	65,6	59,5	53,6	50,2	47,7	45,3	45,3
500 °C	40,9	40,0	38,9	38,0	37,4	36,7	36,0

3.4.1. Análisis del método constructivo

Para la construcción del molde, se optó por el método de fundición debido a que permite la fabricación de piezas sólidas con formas no convencionales y detalles que de otra forma no se podrían obtener o que serían mucho más costoso para su fabricación. Para el análisis y verificación del modelo de fundición del molde se empleó la herramienta de SolidWorks. Sin embargo, debido a la complejidad del molde, no resulta posible la realización de todos los detalles del modelo por lo que se determinó que se emplearía el mecanizado para terminar la construcción. Debido a la alta precisión que debe tener el molde para la correcta fabricación de las bolas de fundición, se estableció el mecanizado CNC como opción viable para la culminación del proyecto.

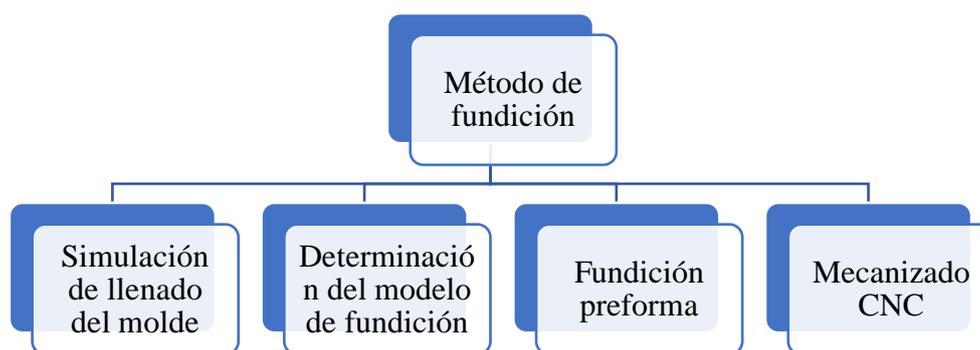


Figura 3.2. Diagrama de construcción del molde.

3.4.2. Método manual para piezas externas

Se opta por el método de fabricación manual en las piezas que pueden permitir mayores tolerancias y no son necesarias la alta precisión que ofrecen las máquinas CNC. En este caso se puede proceder al uso de CAD, fundición en arena y el método

de impresión 3D como refuerzo. En el diagrama de la *Figura 3.3.* se detallan los procesos a seguir.

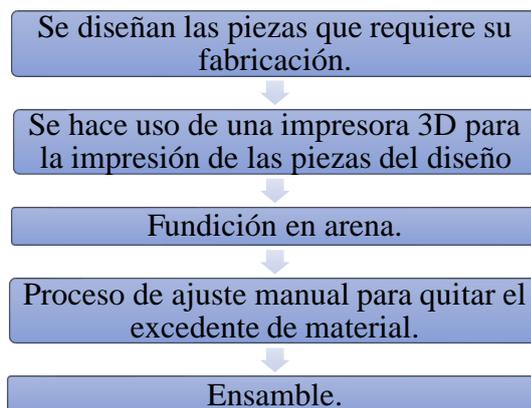


Figura 3.3. Proceso del método manual de fabricación.

3.5. Uso de herramientas CAM para el mecanizado

Como etapa final del proceso de fabricación del molde de fundición se tiene un procedimiento de mecanizado CNC para la elaboración de los detalles finales del molde. Con el objetivo de garantizar un buen resultado final se realiza un proceso de simulación el cual consiste en colocar las piezas del molde dentro del programa SolidCAM y realizar las operaciones de mecanizado desde diferentes caras para determinar la posición óptima para el procedimiento.

3.6. Mecanizado CNC

Para el mecanizado CNC se cuenta con el centro de mecanizado localizado en los laboratorios de la Universidad técnica del Norte, la cual cuenta con la fresadora ROMI D800 como se puede observar en la ilustración de la *Figura 3.4.*



Figura 3.4. Fresadora ROMI D800

CAPÍTULO IV

IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS

4.1. Modelo de fundición en SolidWorks

Se realiza el diseño CAM del modelo de fundición de bolas de 5 bolas de 5 *pulgadas* más contracción de 1,5 % como se muestra en la *Figura 4.1.*, posteriormente se usa este modelo para la simulación de fundición. Las dimensiones están dadas en el plano del ANEXO 3.

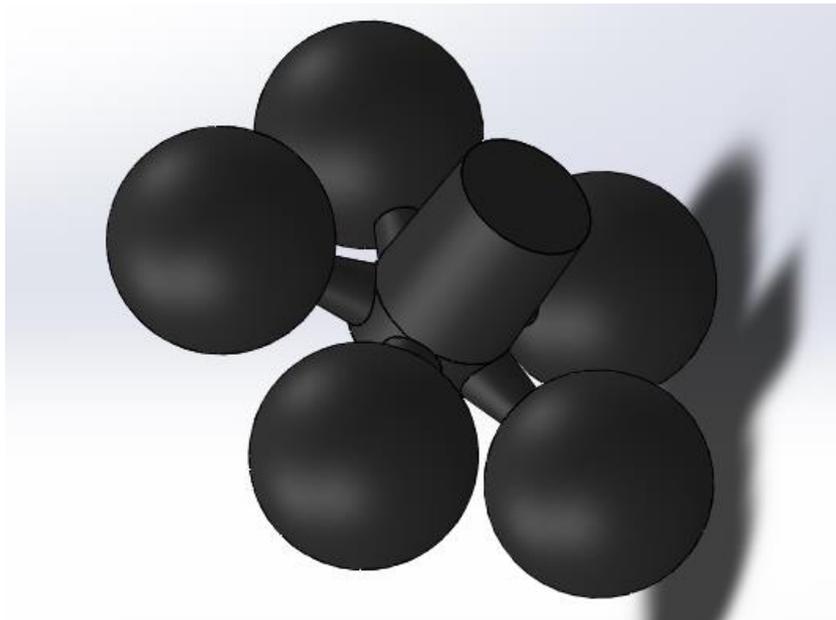


Figura 4.1. Modelo de fundición teórico elaborado en SolidWorks.

4.2. Simulación del proceso de fundición

Este análisis tiene como propósito determinar la temperatura óptima para la fundición de la aleación que se utilizara para las bolas de molienda y la temperatura del molde (modelo implícito). Para ello se realizó diversos ensayos, empleando para ello herramientas de software, partiendo de una temperatura base de 1300 °C hasta los 1550 °C para las bolas de molienda y de 300 °C a 400 °C para la temperatura de precalentado del molde.

Utilizando un intervalo de 50 °C para recorrer todo el rango, se ensayó como el incremento de temperatura afecta a la solidificación de la fundición y como se distribuye el calor en la pieza y el molde en el lapso de 35 s. (tiempo de llenado), se observa las imágenes en el software en un rango de colores. Además, con el valor de conductividad térmica (k) se obtiene el coeficiente de transferencia de calor (HTC) para la fundición blanca $HTC = 2000$.

4.2.1. Ensayo a 1300 °C en la fundición y 300 °C – 400 °C en el molde

En este ensayo se puede observar que la temperatura a la cual se distribuye el material fundido, se observa como el material se solidifica y no permite el llenado total, quedando zonas vacías. Transcurrido el MTF se puede ver que sobresale el color amarillo denotando estar por debajo de la temperatura de solidificación (*Figura 4.2.*).

Por otro lado, para el ensayo realizado a una temperatura de precalentado del molde a 400°C, se observa una mejora en el llenado, pero aún se solidifica antes del llenado completo, lo que significa que hay exceso de porosidades (el lector puede referirse al análisis de porosidades en el capítulo 5). En el llenado total se puede observar la temperatura general del modelo de fundición predominando el color amarillo y con tonos de color naranja que indican que aún no se llega a la temperatura adecuada. Ver *Figura 4.3.* y *Figura 4.4.*

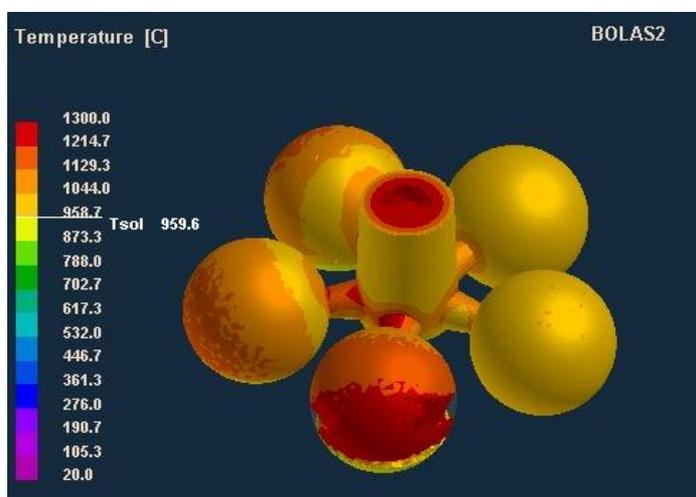


Figura 4.2. Análisis a temperatura de fundición de 1300 °C y temperatura del molde de 300 °C.

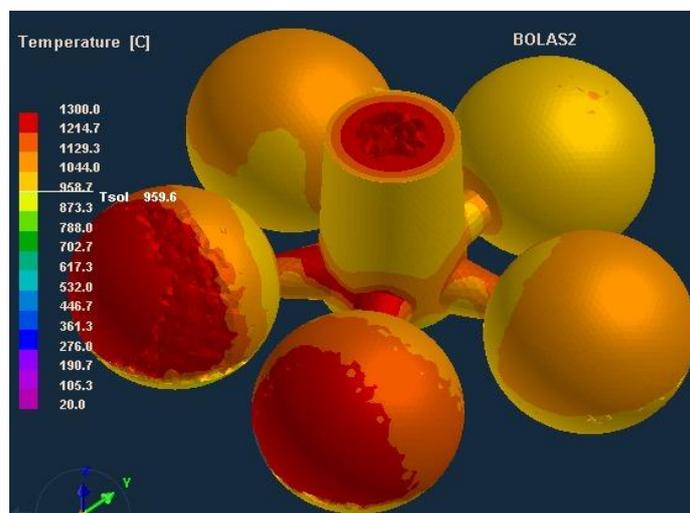


Figura 4.3. Análisis a temperatura de fundición de 1300 °C y temperatura del molde de 350 °C.

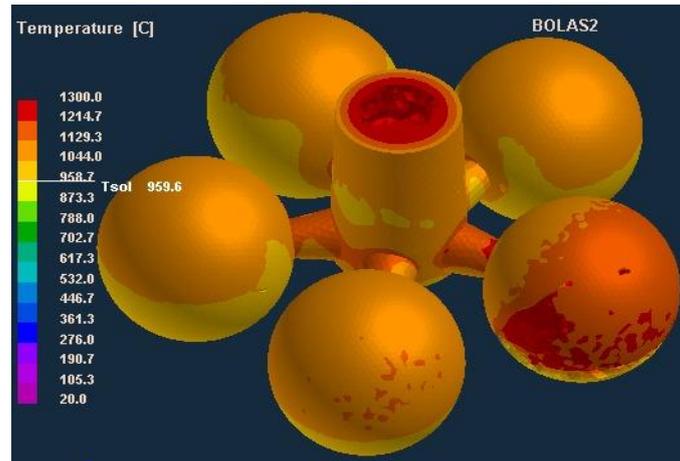


Figura 4.4. Análisis a temperatura de fundición de 1300 °C y temperatura del molde de 400 °C.

4.2.2. Ensayo a 1350 °C en la fundición y 300 °C - 400 °C en el molde

La temperatura a la cual se encuentra la fundición es superior a la de los ensayos anteriores, sin embargo, la zona inferior de la fundición se encuentra a una temperatura de 906,7 °C mientras que la zona superior se encuentra alrededor de 1084. Existe solidificación antes de completarse el llenado (Figura 4.5., 4.6. y 4.7.).

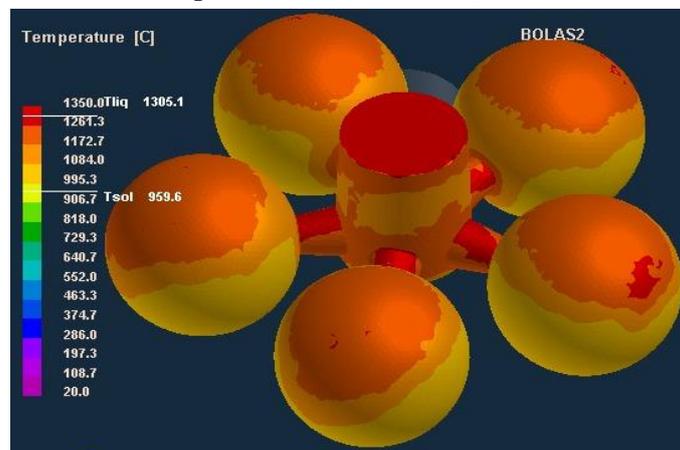


Figura 4.5. Análisis a temperatura de fundición de 1350 °C y temperatura del molde de 300 °C.

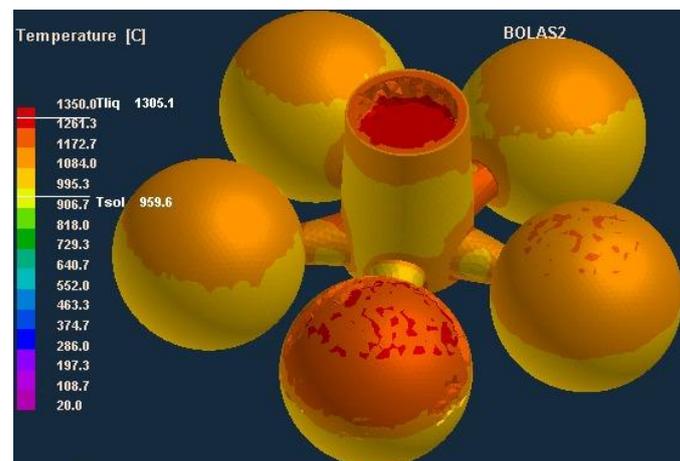


Figura 4.6. Análisis a temperatura de fundición de 1350 °C y temperatura del molde de 350 °C.

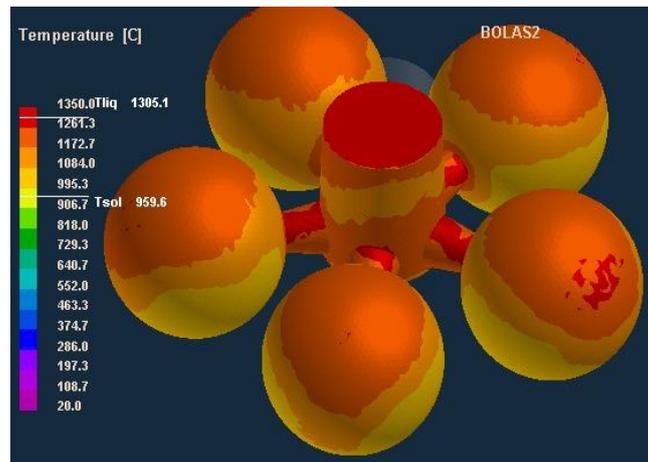


Figura 4.7. Análisis a temperatura de fundición de 1350 °C y temperatura del molde de 400 °C.

4.2.3. Ensayo a 1400 °C en la fundición y 300 °C - 400 °C en el molde

Los resultados son mucho mejores que en las simulaciones anteriores. Esto debido a que la temperatura general de la fundición se mantiene estable en toda la pieza de fundición, siendo la temperatura mínima sobre los 1124 °C (Figura 4.8. y 4.9.).

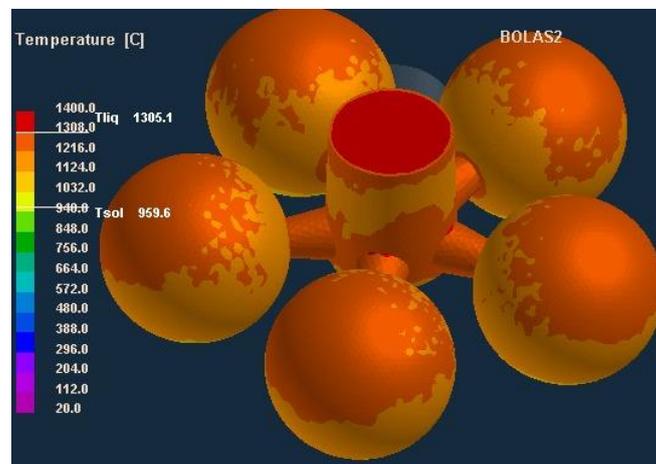


Figura 4.8. Análisis a temperatura de fundición de 1400 °C y temperatura del molde de 300 °C.

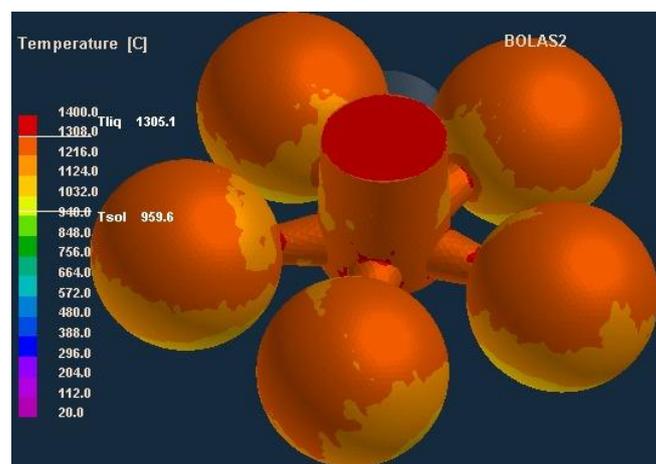


Figura 4.9. Análisis a temperatura de fundición de 1400 °C y temperatura del molde de 350 °C.

4.2.4. Ensayo a 1550 °C en la fundición y 400 °C en el molde

En la *Figura 4.10*. se observa como el flujo del material descende por la mazarota central y se desplaza hacia las cavidades que conformaran las bolas empleando los correspondientes canales. En la *Figura 4.11*. se puede apreciar el proceso de llenado de las cavidades, mientras que en la *Figura 4.12*. se tiene el molde lleno con material de fundición una temperatura de estado líquido (superior a 1305,1 °C). La temperatura de colada debe ser superior a 1408 °C, se tiene entonces un proceso de llenado completo exitoso con temperatura estable. Con esto se obtiene las condiciones adecuadas de temperaturas del material de fundición y del molde implícito, lo cual es un indicador favorable del proyecto.

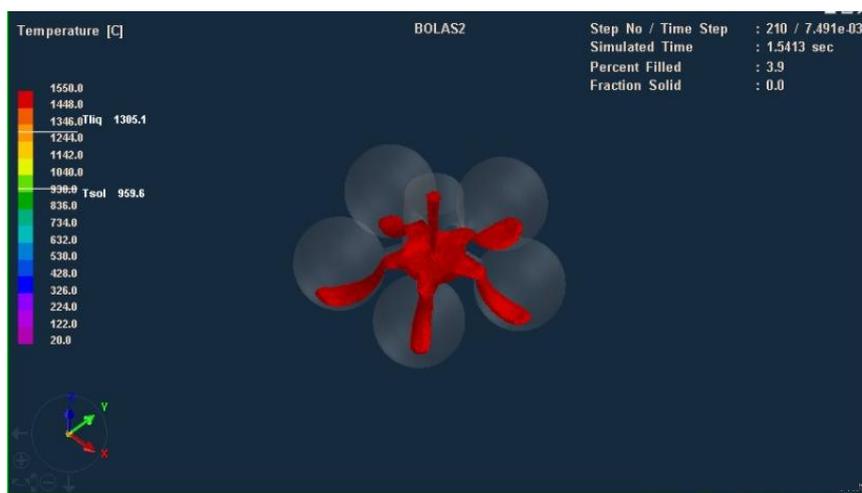


Figura 4.10. Simulación de la entrada del material de fundición al interior del molde.

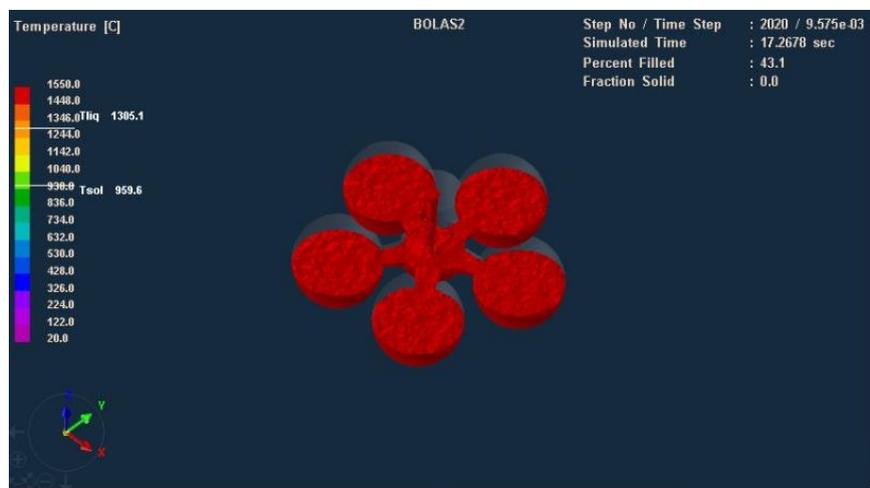


Figura 4.11. Simulación del llenado de las cavidades del molde.

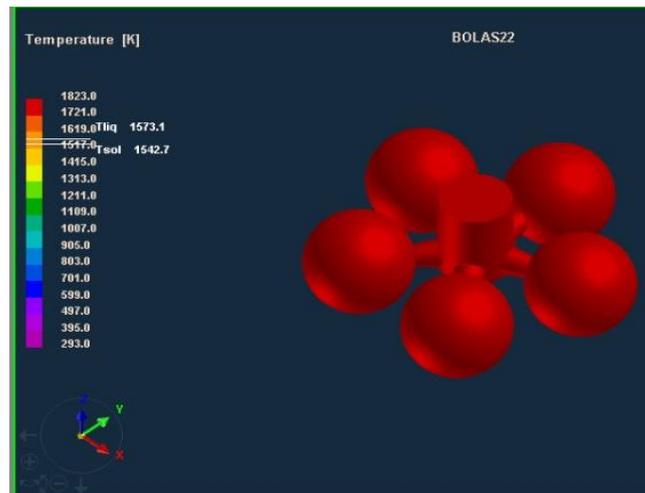


Figura 4.12. Simulación completa de la fundición de las bolas.

La ilustración de la *Figura 4.13*. muestra la fracción sólida de 36,7 % en un minuto (58,5 s) en el que aún se aprecia los puntos de líquido en los centros de la fundición, y *Figura 4.14*. donde se tiene la solidificación total (98,2 %) en 3 minutos (198,5 s).

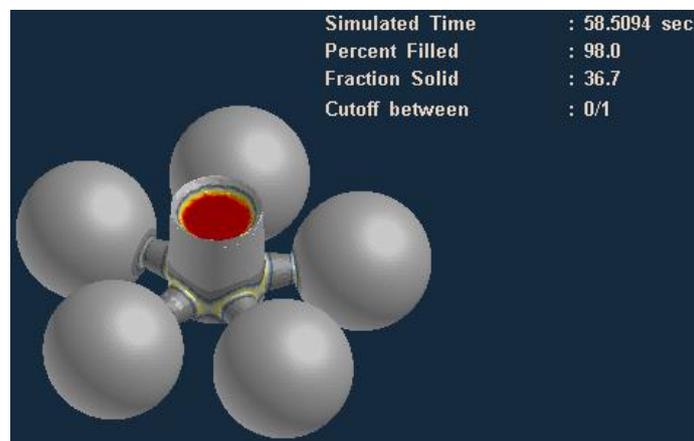


Figura 4.13. 36,7 % de solidificación de la fundición en 58,5 s.

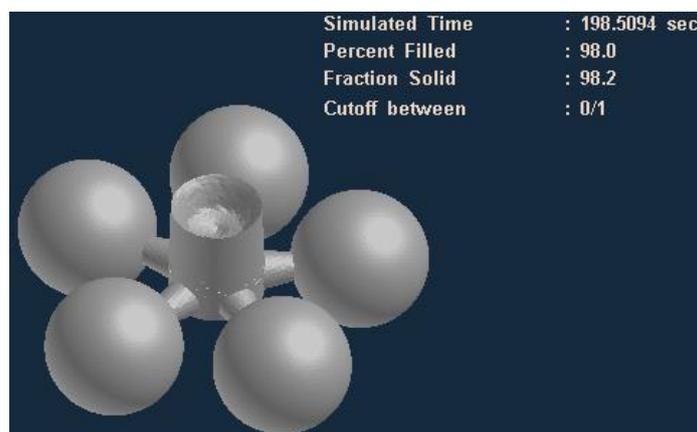


Figura 4.14. 98,2 % de solidificación de la fundición en 198,5 s.

4.3. Diseño del molde en SolidWorks

El plano de partición permite dividir al molde en dos piezas independientes con el propósito de facilitar el desmoldeo de las piezas de fundición. Para realizar se centró la pieza de fundición al medio del molde y se realizó un corte en la mitad del diseño como se puede ver en la ilustración de la *Figura 4.15*. Posteriormente al resultado se le agregó puntos de unión y anclaje que garantizaran la integridad del molde durante su uso.

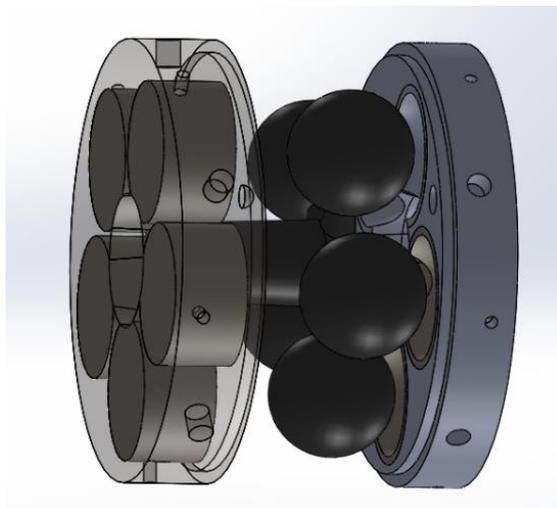


Figura 4.15. Partición del molde.

En este diseño es posible realizar el cambio de los núcleos (cavidades) de fundición para hacer mantenimiento o reemplazarlos una vez que han cumplido su vida útil. La ventaja que ofrece es que no hay que volver a hacer un molde completo nuevamente, sino que se reduce al cambio de las cavidades, lo que permite reutilizar el molde sin fabricar uno completo. El molde consta de 3 piezas diferentes ensamblables (*Figura 4.16*), y una adicional externa que sirve para moldeo de los canales en arena (*Figura 4.17*). Ver ANEXO 4. *Plano de conjunto*.

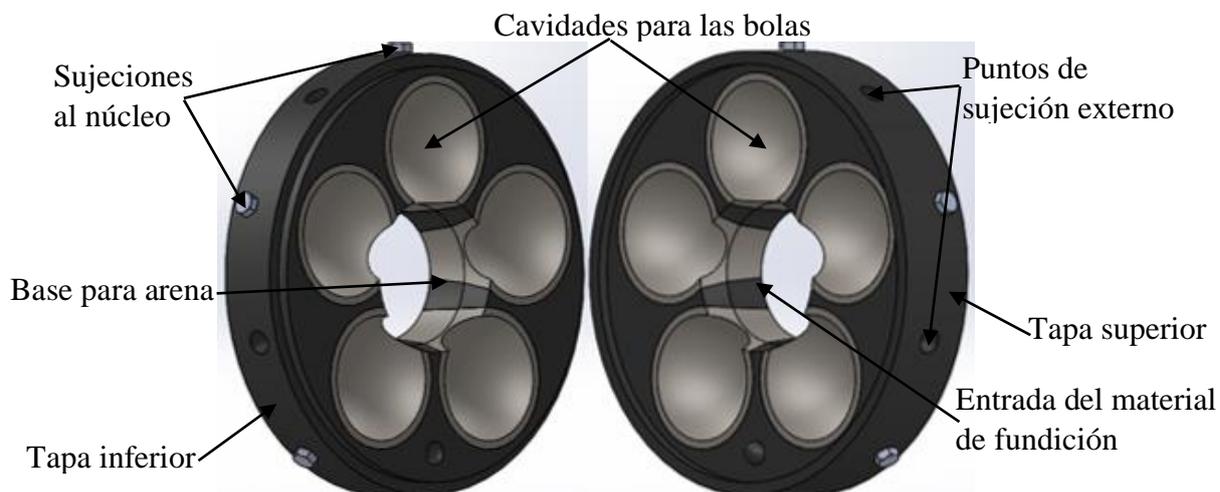


Figura 4.16. Modelo CAD del molde.

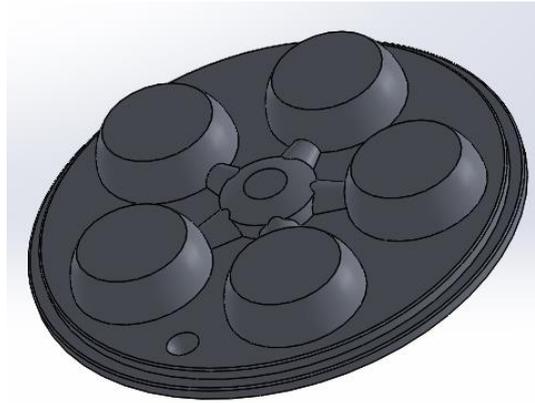


Figura 4.17. Patrón de bolas diseñado en SolidWorks.

4.3.1. Simulaciones del mecanizado

Para evitar retrasos y fallos en el mecanizado del molde se hizo uso de la simulación CAM para determinar el método óptimo de mecanizado para la etapa final de fabricación. Por medio de la simulación, se determinó de forma adecuada el tipo de herramienta, el tipo de operación de fresado, la velocidad del husillo, velocidad de avance, profundidad de pasada, estrategia y operaciones de mecanizado (Figura 4.18.).

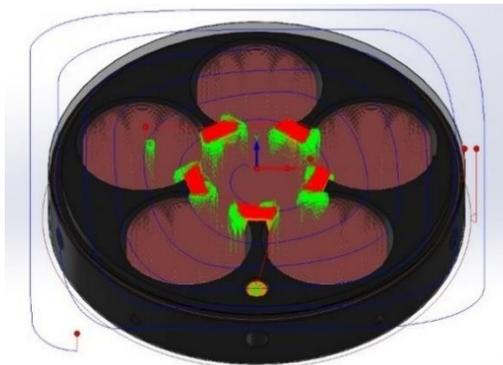


Figura 4.18. Fresado de la parte superior de una pieza del molde.

Para las cavidades de las bolas de fundición, se hizo una operación de fresado 3D el cual tenía por objetivo eliminar el excedente de material del molde y preparar los ángulos de entrada para el material de fundición. Ver Figura 4.19.

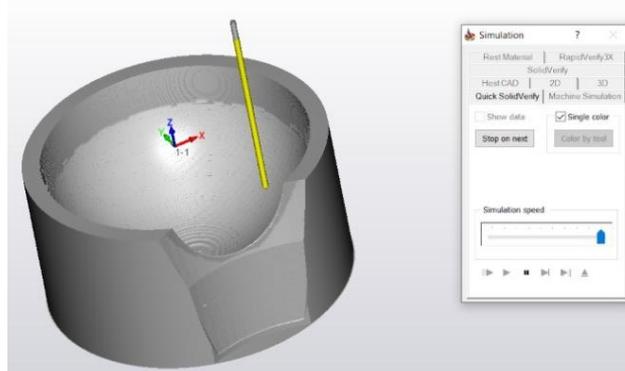


Figura 4.19. Fresado de la cavidad del molde.

Se encontró que la mayoría de las operaciones se podían realizar desde el lado superior de las piezas a excepción de los taladrados que se realizaron por los laterales. Finalmente se optó por realizar las operaciones de planeado, contorneado y fresado de formas en un mismo proceso de mecanizado CNC para asegurar la precisión. Dentro de las operaciones que se planificaron para este procedimiento están:

- Fresado de la parte superior del molde.
- Fresado de la parte inferior del molde.
- Fresado de sección de la cavidad de la fundición.

4.4. Cálculos de mecanizado

Los cálculos para el mecanizado se dividen en dos secciones. Cálculo de mecanizado para fresado y cálculos de mecanizado para taladrado.

4.4.1. Cálculos para el fresado

Dentro de las operaciones de fresado se tienen las siguientes:

- Planeado (Tapa superior e inferior del molde)
- Contorneado (excedente lateral del molde)
- Fresado de cavidad de bolas de fundición (planeado, contorneado)

Para los cálculos se cuenta con herramientas de carburo de tungsteno. Para la determinación de los parámetros óptimos de mecanizado se empleó los datos tabulados de velocidades de corte y avance de acuerdo con [19].

Adicionalmente se conoce que para el centro de mecanizado ROMI D800 ubicado en la Universidad Técnica del Norte, la potencia nominal de máquina es de 15 KW, con una eficiencia estimada de 85 %.

Tabla 4.1. Velocidades de corte recomendadas para herramientas de carburo [19].

Material	Fresa de carburo
	<i>m/min</i>
Acero aleado	45 - 75
Aluminio	300 - 600
Bronce	60 - 120
Hierro fundido	40 - 60
Acero de maquinado libre	120 - 180
Acero para maquinaria	45 - 75
Acero inoxidable	30 - 90
Acero para herramienta	40 - 60

Tabla 4.2. Avance recomendado para herramientas de carburo [19].

Material	Fresa para refrentar	Fresa frontal
	<i>mm</i>	<i>mm</i>
Aluminio	0,5	0,25
Bronce	0,3	0,15
Hierro fundido	0,4	0,2
Acero de maquinado libre	0,4	0,2
Acero para maquinaria	0,35	0,2
Acero para herramienta	0,35	0,18
Acero inoxidable	0,25	0,13

Datos para el planeado tapa superior e inferior:

- $a_p = 3 \text{ mm}$
- $d = 100 \text{ mm}$ (Fresa de refrentado)
- $Z = 6$ (# de filos de corte)
- $K_s = 1785,8 \frac{N}{\text{mm}^2}$

Se determinó la potencia teórica máxima que puede suministrar el centro de mecanizado haciendo uso de la ecuación (4).

$$P_c = 15 \text{ KW} \cdot 0,85 = 12,75 \text{ KW}$$

Empleando la *Tabla 4.1.* y haciendo uso de la ecuación (5) se determinó la N .

$$N = \frac{60 \text{ m/min}}{\pi \cdot 100 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \approx 190 \text{ RPM}$$

La velocidad de avance para el desbaste se calcula por medio de la ecuación (6).

$$V_f = f_z \cdot Z \cdot N = 0,4 \text{ mm} \cdot 6 \cdot 190 \text{ RPM} = 456 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

La profundidad de corte radial en este caso se tomó como la semicircunferencia de la fresa. Ecuación (8).

$$ae = \pi \cdot r \tag{8}$$

Se obtuvo entonces:

$$ae = \frac{\pi \cdot d}{2} = \frac{\pi \cdot 100 \text{ mm}}{2} = 157,08 \text{ mm}$$

Y la potencia requerida para la operación se determinó por la ecuación (9).

$$P_{c_{real}} = a_p \cdot ae \cdot V_f \cdot K_s \tag{9}$$

$$3 \text{ mm} \cdot 157,08 \text{ mm} \cdot 456 \frac{\text{mm}}{\text{min}} \cdot 1785,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \cdot \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} = 6,396 \text{ KW}$$

Datos para el contorneado:

- $a_p = 3 \text{ mm}$
- $ae = 3 \text{ mm}$
- Largo de la pieza = 76 mm
- Diámetro del contorneado = 457 mm
- $d = 16 \text{ mm}$ (Fresa frontal)

- $Z = 4$ (# de filos de corte)
- $K_s = 1785,8 \frac{N}{mm^2}$

Se determinó la potencia teórica máxima que puede suministrar el centro de mecanizado por medio de la ecuación (4).

$$P_c = 15 \text{ KW} \cdot 0,85 = 12,75 \text{ KW}$$

Empleando la *Tabla 4.1.* se determinó el N .

$$N = \frac{60 \frac{m}{min}}{\pi \cdot 16 \cdot 10^{-3} m} \approx 1194 \text{ RPM}$$

La velocidad de avance calculada para el desbaste es de:

$$V_f = 0,2 \text{ mm} \cdot 4 \cdot 1194 \text{ RPM} = 955,2 \frac{mm}{min}$$

La potencia requerida para la operación se determinó por la ecuación (9).

$$3 \text{ mm} \cdot 3 \text{ mm} \cdot 955,2 \frac{mm}{min} \cdot 1785,8 \frac{N}{mm^2} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \cdot \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} = 255,87 \text{ W}$$

El tiempo de mecanizado es entonces el tiempo que le toma a la herramienta dar una vuelta entera al molde multiplicado por las veces que debe realizar esta operación hasta completar el largo total.

$$T = \frac{2\pi r}{V_f} \cdot \frac{L_t}{a_p} \quad (12)$$

$$T = \frac{2\pi \cdot 228,5 \text{ mm}}{955,2 \frac{mm}{min}} \cdot \frac{76 \text{ mm}}{3 \text{ mm}} = 38,08 \text{ min}$$

La operación de desbaste interno emplea los mismos parámetros de N , velocidad de avance y potencia de corte que, en el contorneado, a excepción del tiempo de mecanizado el cual es mayor.

Datos para el planeado del núcleo:

- $a_p = 3 \text{ mm}$

- $d = 100 \text{ mm}$ (Fresa de refrentado)
- $Z = 6$ (# de filos de corte)
- $K_s = 440 \frac{N}{\text{mm}^2}$

Velocidad de corte:

$$N = \frac{75 \frac{m}{\text{min}}}{\pi \cdot 100 \cdot 10^{-3} m} \approx 238 \text{ RPM}$$

Velocidad de avance:

$$V_f = 0,35 \text{ mm} \cdot 6 \cdot 238 \text{ RPM} = 499,8 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

La profundidad de corte radial se toma idéntica a la del planeado en el molde y se toma con el valor de: $157,08 \text{ mm}$.

La potencia requerida para la operación se determinó por ecuación (9).

$$3 \text{ mm} \cdot 157,08 \text{ mm} \cdot 499,8 \frac{\text{mm}}{\text{min}} \cdot 440 \frac{N}{\text{mm}^2} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \cdot \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} = 1,726 \text{ KW}$$

Datos para el contorneado:

- $a_p = 3 \text{ mm}$
- $a_e = 3 \text{ mm}$
- Largo de la pieza = 86 mm
- Diámetro del contorneado = 457 mm
- $d = 16 \text{ mm}$ (Fresa frontal)
- $Z = 4$ (# de filos de corte)
- $K_s = 440 \frac{N}{\text{mm}^2}$

Velocidad de corte:

$$N = \frac{75 \text{ m/min}}{\pi \cdot 16 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \approx 1492 \text{ RPM}$$

La velocidad de avance calculada para el desbaste es de:

$$Vf = 0,2 \text{ mm} \cdot 4 \cdot 1492 \text{ RPM} = 1193,6 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

La potencia requerida para la operación es:

$$3 \text{ mm} \cdot 3 \text{ mm} \cdot 1193,6 \frac{\text{mm}}{\text{min}} \cdot 440 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \cdot \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} = 78,78 \text{ W}$$

El tiempo de mecanizado es:

$$T = \frac{2\pi \cdot 76,2 \text{ mm}}{1193,6 \frac{\text{mm}}{\text{min}}} \cdot \frac{86 \text{ mm}}{3 \text{ mm}} = 11,50 \text{ min}$$

4.4.2. Cálculos para el taladrado

Dentro de las operaciones de taladrado se tienen las siguientes:

- Perforación pasante en el molde de $D = 11 \text{ mm}$ con perforación previa de $D = 6,75 \text{ mm}$.
- Perforación no pasante en la cavidad de $D = 11 \text{ mm}$ con perforación previa de $D = 6,75 \text{ mm}$.

Para los cálculos se cuenta con brocas de HSS. Los parámetros óptimos de mecanizado se determinaron mediante las siguientes tablas velocidades de corte y avance de acuerdo con [19].

Tabla 4.3. Velocidades de corte recomendadas para herramientas de HSS [20].

Velocidades de corte para brocas de HSS	
Material	$\frac{m}{min}$
Acero para herramienta	18
Hierro fundido	24
Acero para maquinaria	30
Latón y aluminio	60

Tabla 3.4. Avance por revolución recomendado para el taladrado [20].

Tamaño de la broca (mm)	Avance por revolución (mm)
Menor a 3	0,02 - 0,0
3 - 6	0,5 - 0,1
6 - 13	0,1 - 0,18
13 - 25	0,18 - 0,38
25 - 38	0,38 - 0,63

Para la perforación pasante en el molde se hicieron dos operaciones. Una primera perforación de 6,75 mm y una segunda de 11 mm. Para la primera operación se tuvieron lo siguiente datos:

Datos para el taladrado en el molde:

- $d_1 = 6,75 \text{ mm}$
- $K_s = 1785,8 \frac{N}{\text{mm}^2}$
- $L = 24,5 \text{ mm}$

La velocidad de corte y las RPM para el taladrado son para el material del molde.

$$N = \frac{24 \frac{m}{\text{min}}}{\pi \cdot 6,75 \cdot 10^{-3} m} \approx 1132 \text{ RPM}$$

La velocidad de avance se toma por medio de la interpolación de parámetros de avance la Tabla 4.4. y por la ecuación (10).

$$Va = fn \cdot N \tag{10}$$

$$fn = 0,1 \text{ mm} + \frac{|6 - 6,75| \cdot |0,1 - 0,18|}{|6 - 13|} \text{ mm} \approx 0,109 \text{ mm}$$

$$Va = 0,109 \text{ mm} \cdot 1132 \text{ RPM} = 123,39 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

El área de corte de la viruta se determina por el largo del filo de uno de los lados de la broca y por el avance por revolución. El ángulo de la punta es de 120° por lo que el ángulo entre la horizontal y la punta forma 30° . Ecuación (11).

$$Ac = fn \cdot h \quad (11)$$

$$h = \frac{D}{2 \cos 30^\circ} \rightarrow Ac = fn \cdot \frac{D}{2 \cos 30^\circ}$$

$$Ac = 0,109 \text{ mm} \cdot \frac{6,75 \text{ mm}}{\sqrt{3}} = 0,425 \text{ mm}^2$$

La potencia de corte necesaria queda definida entonces por:

$$Pc = 0,425 \text{ mm}^2 \cdot 24 \frac{\text{m}}{\text{min}} \cdot 1785,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 303,59 \text{ W}$$

Y el tiempo de corte se calcula por la ecuación (12).

$$Tc = \frac{Lc}{Va} \quad (12)$$

$$Tc = \frac{24,5 \text{ mm}}{123,39 \frac{\text{mm}}{\text{min}}} = 0,19 \text{ min} = 11,4 \text{ s}$$

Para la segunda operación se tuvieron los siguientes datos:

- $d1 = 6,75 \text{ mm}$
- $d2 = 11 \text{ mm}$
- $Ks = 1785,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
- $L = 24,5 \text{ mm}$

Donde:

La velocidad de corte y las *RPM* para la segunda operación es de:

$$N = \frac{24 \frac{\text{m}}{\text{min}}}{\pi \cdot 11 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \approx 694 \text{ RPM}$$

La velocidad de avance se toma por medio de la interpolación de parámetros de avance la *Tabla 4.4.* y se calcula por la ecuación (10).

$$fn = 0,1 \text{ mm} + \frac{|6 - 11| \cdot |0,1 - 0,18|}{|6 - 13|} \text{ mm} \approx 0,157 \text{ mm}$$

$$Va = 0,157 \text{ mm} \cdot 694 \text{ RPM} = 108,96 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

El área de corte de la viruta se determina por la ecuación (11).

$$Ac = fn \cdot \frac{d2 - d1}{2 \cos 30^\circ}$$

$$Ac = 0,157 \text{ mm} \cdot \frac{11 \text{ mm} - 6,75 \text{ mm}}{\sqrt{3}} = 0,385 \text{ mm}^2$$

La potencia de corte necesaria queda definida entonces por:

$$Pc = 0,385 \text{ mm}^2 \cdot 24 \frac{\text{m}}{\text{min}} \cdot 1785,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 275,01 \text{ W}$$

Y el tiempo de corte es:

$$Tc = \frac{Lc}{Va} = \frac{24,5 \text{ mm}}{108,96 \frac{\text{mm}}{\text{min}}} = 0,22 \text{ min} = 13,2 \text{ s}$$

Par la cavidad, se realizó una operación de taladrado no pasante con perforación previa donde se tienen los siguientes datos para la primera perforación.

Datos para el taladrado del núcleo:

- $d1 = 6,75 \text{ mm}$
- $Ks = 440 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
- $L = 10 \text{ mm}$

La velocidad de corte y las *RPM* para el taladrado son para el material del núcleo:

$$N = \frac{30 \frac{m}{min}}{\pi \cdot 6,75 \cdot 10^{-3} m} \approx 1415 \text{ RPM}$$

La velocidad de avance se toma por medio de la interpolación de parámetros de avance de la *Tabla 4.4.* y se calcula por la ecuación (10).

$$fn = 0,1mm + \frac{|6 - 6,75| \cdot |0,1 - 0,18|}{|6 - 13|} mm \approx 0,109 mm$$

$$Va = 0,109 mm \cdot 1415 \text{ RPM} = 154,24 \frac{mm}{min}$$

Área de corte:

$$Ac = 0,109 mm \cdot \frac{6,75 mm}{\sqrt{3}} = 0,425 mm^2$$

La potencia de corte necesaria queda definida entonces por:

$$Pc = 0,425 mm^2 \cdot 30 \frac{m}{min} \cdot 440 \frac{N}{mm^2} \cdot \frac{1 min}{60 s} = 93,5 W$$

Y el tiempo de corte es:

$$Tc = \frac{10mm}{154,24 \frac{mm}{min}} = 0,06 min = 3,89 s$$

Para la segunda operación se tuvieron los siguientes datos:

- $d1 = 6,75 mm$
- $d2 = 11 mm$
- $Ks = 440 \frac{N}{mm^2}$
- $L = 10 mm$

Donde:

La velocidad de corte y las *RPM* para la segunda operación es de:

$$N = \frac{30 \frac{m}{min}}{\pi \cdot 11 \cdot 10^{-3} m} \approx 868 \text{ RPM}$$

La velocidad de avance se toma por medio de la interpolación de parámetros de avance de la *Tabla 4.4.* y se calcula por la ecuación (10).

$$f_n = 0,1 \text{ mm} + \frac{|6 - 11| \cdot |0,1 - 0,18|}{|6 - 13|} \text{ mm} \approx 0,157 \text{ mm}$$

$$V_a = 0,157 \text{ mm} \cdot 868 \text{ RPM} = 136,28 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

El área de corte de la viruta se determina por el largo del filo de uno de los lados de la broca y por el avance por revolución. Adicionalmente, se debe tomar en cuenta la perforación anterior por lo que el área de corte es menor que en el caso anterior.

$$A_c = 0,157 \text{ mm} \cdot \frac{11 \text{ mm} - 6,75 \text{ mm}}{\sqrt{3}} = 0,385 \text{ mm}^2$$

La potencia de corte necesaria queda definida entonces por:

$$P_c = 0,385 \text{ mm}^2 \cdot 30 \frac{m}{min} \cdot 440 \frac{N}{\text{mm}^2} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 84,7 \text{ W}$$

Y el tiempo de corte es:

$$T_c = \frac{10 \text{ mm}}{136,28 \frac{\text{mm}}{\text{min}}} = 0,07 \text{ min} = 4,2 \text{ s}$$

4.5. Hojas de proceso

Para la correcta fabricación de las piezas por mecanizado, se vuelve importante establecer un orden correcto de operaciones para garantizar que el resultado sea el deseado, estableciendo la manera de sujetar las piezas, las herramientas a utilizar, el proceso y las maquinas necesarias. Partiendo de la información obtenida por las simulaciones de mecanizado CNC y cálculos manuales se desarrollaron las hojas de proceso para el mecanizado.

Para las hojas de proceso de la tapa superior del molde. El lector puede referirse al ANEXO 9.

Para las hojas de proceso de la tapa inferior del molde. El lector puede referirse al ANEXO 10.

Para las hojas de proceso del núcleo de cavidades. El lector puede referirse al ANEXO 11.

4.6. Fabricación del molde

El modelo del molde diseñado consta de 3 piezas, una superior y una inferior los mismos contienen al núcleo de cavidades, este último será el que le dé la forma a la fundición. Las estructuras como son los canales de alimentación y la mazarota se construyen de forma separada dentro del molde utilizando arena por medio de una cuarta pieza externa llamada modelo de patrón construido en piezas separadas sobre una platina circular.

Se estableció como coordenadas de origen el centro del molde y empleando la herramienta SolidCAM y los modelos 3D ya diseñados en los apartados 4.3. y 4.3.1., se obtuvo los programas en código G para el CNC. Durante el mecanizado del molde, se utilizó las bridas de sujeción (CK-12), mismas que garantizaron el apriete de la pieza evitando así que se mueva. Para la sujeción de la herramienta se empleó el cono BT-40 y una boquilla ER-32 los cuales aseguran que la herramienta no presente vibraciones, disminuyendo el posible error que pueda presentar.

4.6.1. Núcleo de cavidades

Se tomó el eje de acero 1018 de 5,5 pulgadas de diámetro y se cortó en 10 secciones de 87 mm para su mecanizado CNC. Ver *Figura 4.20*.



Figura 4.20. Corte en secciones del eje de acero 1018.

Las cavidades de fundición se mecanizaron empleando para ello el centro de mecanizado ROMI D800. El procedimiento realizado corresponde a un fresado de forma para darle el redondeo adecuado al interior de la cavidad y un fresado en un

lateral para la ranura del canal de alimentación. También se realizó un taladrado en la parte posterior al canal de alimentación para la inserción de un tornillo de fijación con el resto del molde. El ANEXO 11 detalla el proceso empleado para la fabricación del núcleo de cavidades. En la *Figura 4.21.* se puede apreciar la pieza terminada.



Figura 4.21. Resultado final del mecanizado de las cavidades de fundición.

4.6.2. Tapa superior e inferior del molde

Para la fabricación de la tapa superior e inferior del molde, se empleó la técnica de moldeado en arena la cual consistió en la fabricación de una preforma del modelo CAD para la generación de su molde en arena para fundición (*Figura 4.22.*). La aleación del molde se fundió dentro de un horno a una temperatura de 1800 °C y posteriormente se procedió al colado. En el resultado final se dejó un excedente de 2 mm de cada lado para la etapa de mecanizado con CNC.



Figura 4.22. Preforma del modelo CAD.

La fabricación se hace mediante la fresadora ROMI-D800 con los pasos detallados en la hoja de procesos (se hace mención en el apartado 4.5.) del ANEXO 9. y ANEXO 10. En la *Figura 4.23.*, se puede observar la tapa superior(izquierda) y la tapa inferior(derecha) del molde de fundición ya finalizada y ensamblada. Se puede apreciar puntos de anclaje a la tapa inferior, las cavidades para las bolas y el centro donde se encontrará el núcleo que permitirá la entrada de material de fundición. La tapa inferior del molde es similar a la tapa superior con la clara diferencia de que en este caso los puntos de anclaje se construyeron para encajar con los de la tapa superior.



Figura 4.23. Tapa superior(derecha) e inferior(izquierda) del molde de fundición ensamblado con los núcleos.

4.6.3. Patrón de bolas

Para la fabricación del modelo patrón de bolas se sigue el siguiente procedimiento:

Se tiene el diseño en el apartado 4.3. (*Figura 4.17*), el cual consiste en una pieza central con los canales de alimentación y 5 piezas circulares iguales con diámetro equivalente a la cavidad del molde.

El total de piezas independientes son dos, puesto que una de ellas se repite 5 veces. Utilizando la impresora 3D “*Artillery Genius*” (*Figura 4.24.*), se imprimen en PLA (material) las piezas del diseño (*Figura 4.25.*). El proceso de impresión tomó 7 horas para la pieza que se introducirá en las cavidades del molde y alrededor de 6 horas para la pieza central que contiene los canales.



Figura 4.24. Impresora Artillery Genius.



Figura 4.25. Piezas de impresión 3D listas para ser moldeadas en arena

Las piezas se colocaron en un recipiente metálico que posteriormente se llena de arena para la generación de las piezas. Ver *Figura 4.26*. Se realiza un total de 5 fundiciones de la forma esférica y una para la sección central, se usa aluminio.



Figura 4.26. Moldeo en arena para las piezas del patrón de bolas de fundición

Una las piezas listas, se ajustan las irregularidades y se quita el excedente de material para proceder al ensamblaje.

Utilizando una plancha circular cuyo diámetro coincide con la ceja del molde, se monta todo el conjunto, dejando en el centro de la pieza con las entradas de alimentación y al final de cada entrada se coloca el modelo circular para las bolas. Se sujeta todo con pernos. Ver *Figura 4.27*.



Figura 4.27. Patrón de las bolas.

Una vez concluida la fabricación, en la *Figura 4.28*. se ilustra el conjunto del molde lista para ser usada.



Figura 4.28. Molde para 5 bolas de 5 pulgadas

CAPÍTULO V

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El presente capítulo se analiza y se toma los parámetros adecuados que se obtuvieron de las simulaciones de fundición, se aplica la fundición real en el molde fabricado y se realiza un análisis corto de geometría, dimensión y superficie de una bola fundida. Además, se realiza un análisis de costos para justificar el costo del molde permanente.

5.1. Análisis de porosidad de fundición en la simulación

Como indicador de un proceso de fundición correcto, se realizó un análisis de porosidad en la simulación con el objetivo de determinar la existencia de rugosidades en las bolas de fundición. Se estableció como un resultado satisfactorio un valor mínimo o de 0 % de rugosidad en las bolas, por lo cual en este análisis se verifica el valor de este parámetro. En la *Figura 5.1.*, *Figura 5.2.* y *Figura 5.3.* no hay mayor cambio, se observa la existencia de porosidades de fundición de aproximadamente 6 % en todas las superficies de las bolas y en toda la mazarota.

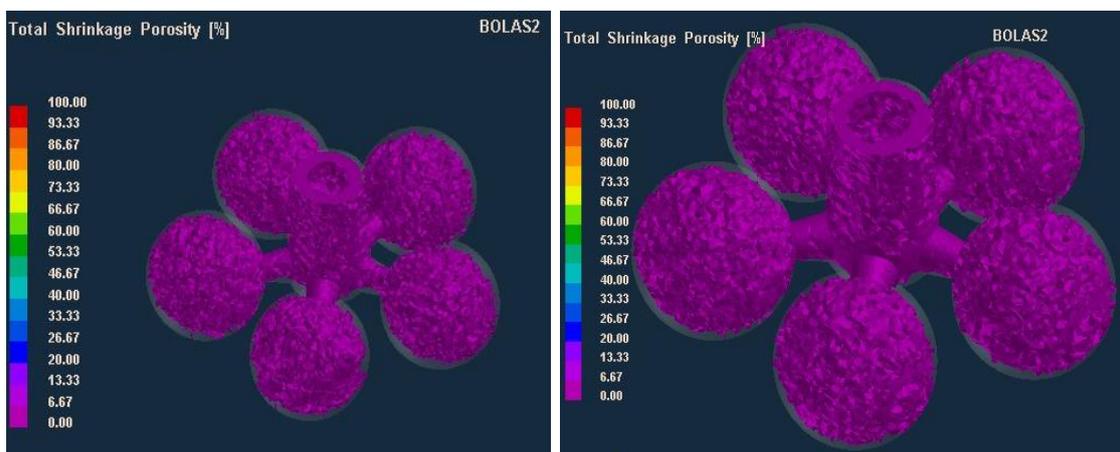


Figura 5.1. Análisis de porosidad a 1300 °C: molde a 300 °C (izq.), y molde a 400 °C (Der).

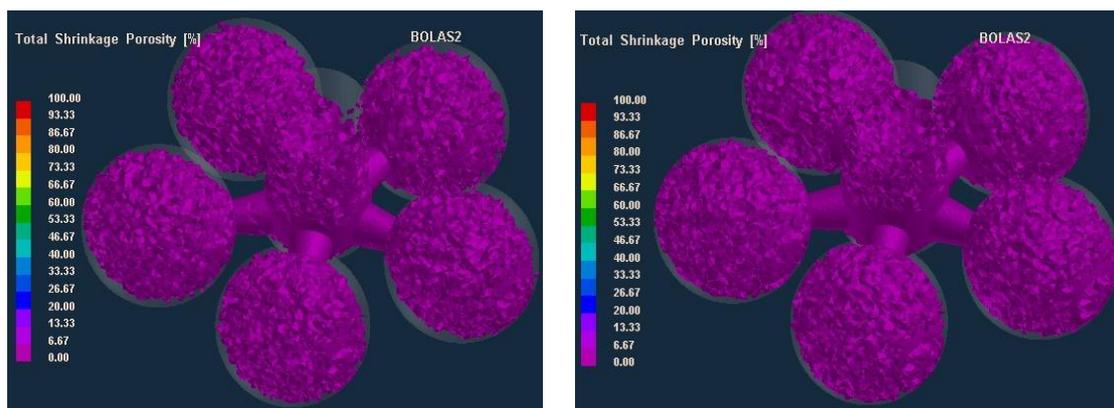


Figura 5.2. Análisis de porosidad a 1350 °C: molde a 300 °C (izq.), y molde a 400 °C (Der).

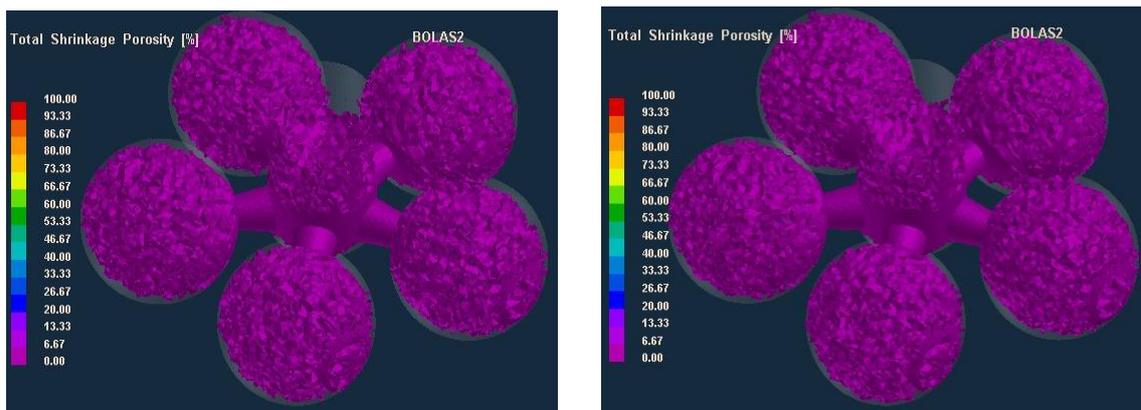


Figura 5.3. Análisis de porosidad a 1400 °C: molde a 300 °C (izq.), y molde a 400 °C (Der).

Llegando a los 1550 °C en la fundición y a 400 °C del molde la porosidad en las bolas tiende a 0 %, y se tiene la máxima porosidad en la mazarota. Ver Figura 5.4.

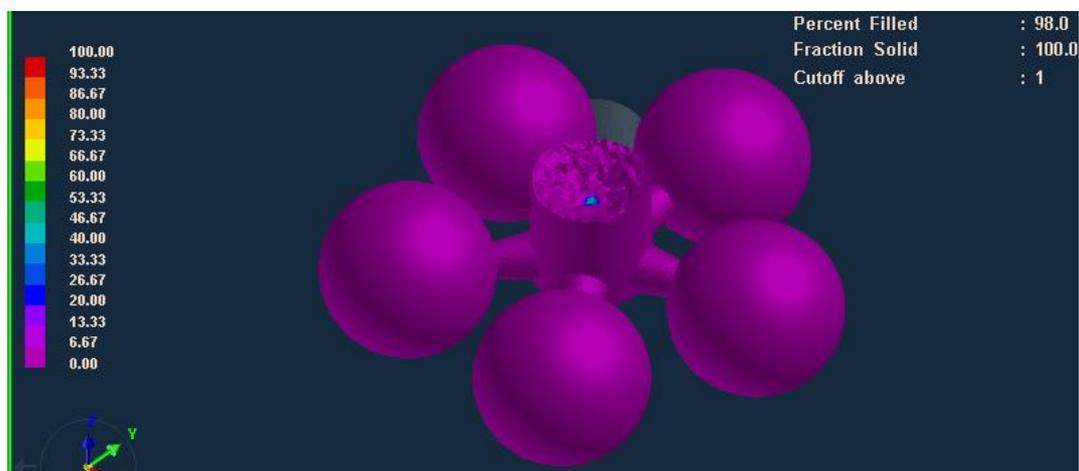


Figura 5.4. Análisis de porosidad a 1550 °C en la fundición y 400 °C del molde.

5.1.1. Análisis de porosidad con criterio Niyama

El criterio de Niyama es un método empleado en los softwares de simulación con el propósito de determinar los defectos en la fundición como el rechufe y porosidad en la pieza. Este criterio solo puede ser aplicado posterior a la etapa de simulación de temperatura debido a que depende de que esta última se haya realizado para su aplicación [14].

Con este criterio, lo que se busca es predecir las zonas de la pieza de fundición con mayor probabilidad de desarrollo de defectos al emplear los parámetros de simulación ya establecidos de temperatura de molde y de la colada, lo que permite obtener una visualización en términos de cantidad de la porosidad.

Para el caso de la fundición a 1300 °C con una temperatura de molde de 300 °C se encontró que, aunque el acabado superficial aparentaba tener un bajo grado de rugosidad, existían áreas grandes con problemas de rechupe y cavidades que indicaban un resultado indeseado en el acabado final. Este resultado se mantuvo incluso para un precalentamiento de molde de 400 °C. Ver *Figura 5.5*.

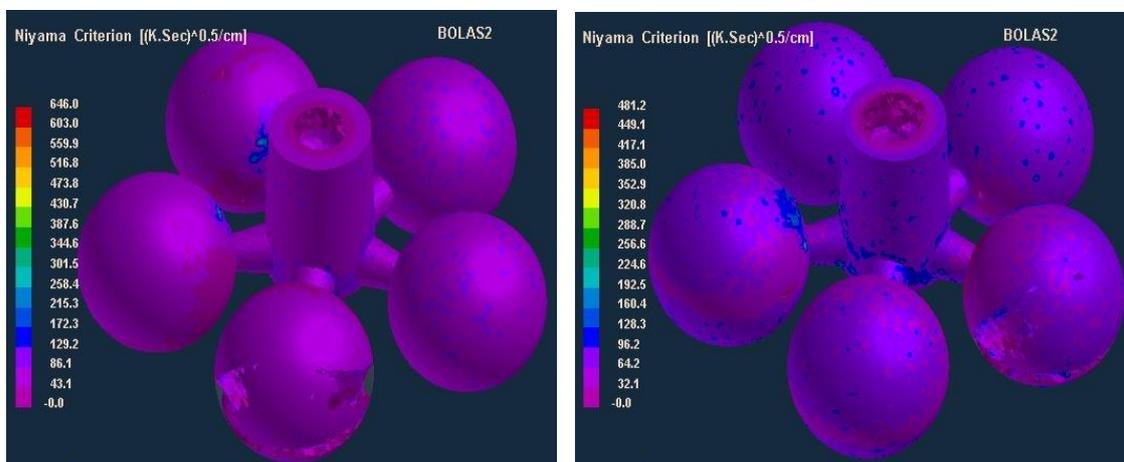


Figura 5.5. Análisis de Niyama a 1300 °C en la fundición: molde a 300 °C (izq.), y molde a 400 °C.

Para la temperatura de colada de 1350 °C y precalentamiento del molde a 300 °C, se obtuvo un resultado sin cavidades ni rechupes. Sin embargo, el acabado superficial se volvió irregular, existiendo zonas con una porosidad muy baja y zonas con una porosidad mayor. Para el caso del molde con temperatura de precalentado a 400 °C, el resultado fue similar con la diferencia que el grado de rugosidad aumentó y se encontró puntos de alta y baja irregularidad distribuidos en toda la pieza de fundición, a diferencia de las zonas específicas halladas en la simulación a 300 °C. Ver *Figura 5.6*.

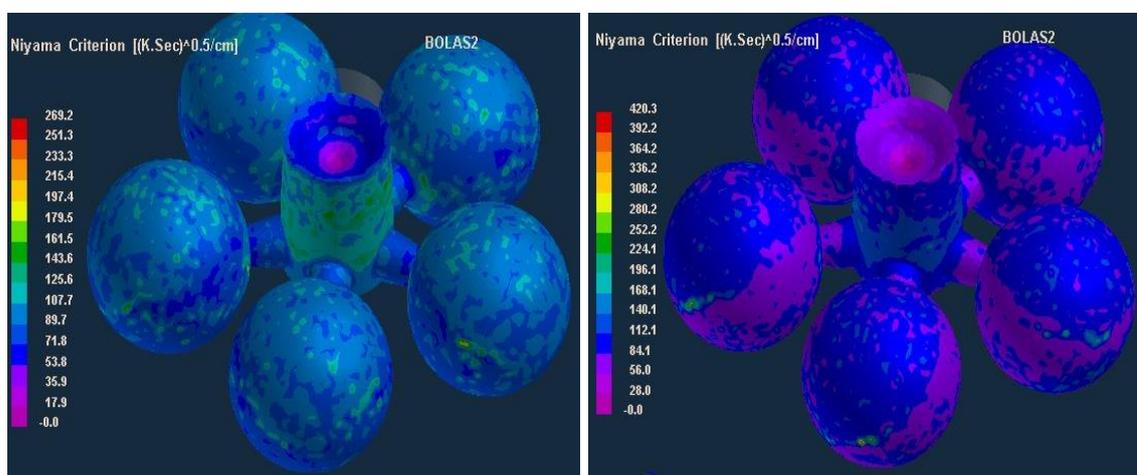


Figura 5.6. Análisis de Niyama a 1350 °C en la fundición: molde a 300 °C (izq.), y molde a 400 °C.

En las simulaciones, para una temperatura de colada de 1400 °C y un molde precalentado a 300 °C, se encontró un resultado similar al análisis realizado a una temperatura de fundición de 1300 °C y de molde de 400 °C, con una distribución homogénea de puntos de alta y baja porosidad en toda la pieza. Sin embargo, el resultado cambia para el caso de una temperatura de colada de 1400 °C y de precalentado de molde de 400 °C. Se encontró que la porosidad en las bolas de fundición era constante y menor a la simulación anterior, sin presencia de deformidades y con un mejor acabado superficial. Ver *Figura 5.7*.

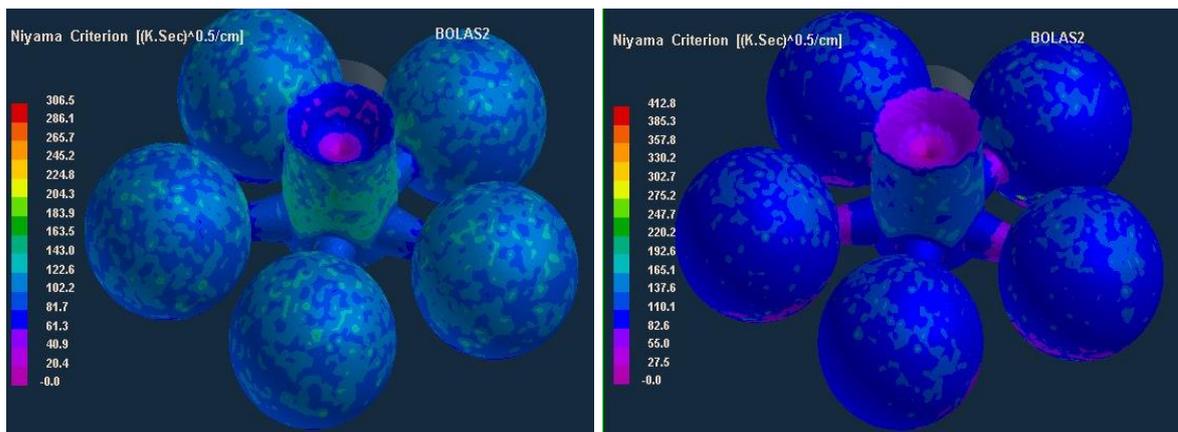


Figura 5.7. Análisis de Niyama a 1400 °C en la fundición: molde a 300 °C (izq.), y molde a 400 °C.

En la *Figura 5.8*, se observa una mayor regularidad en la pieza fundida, sin la existencia de rechupes o alguna otra deformación. Es notable el cambio a las simulaciones anteriores.

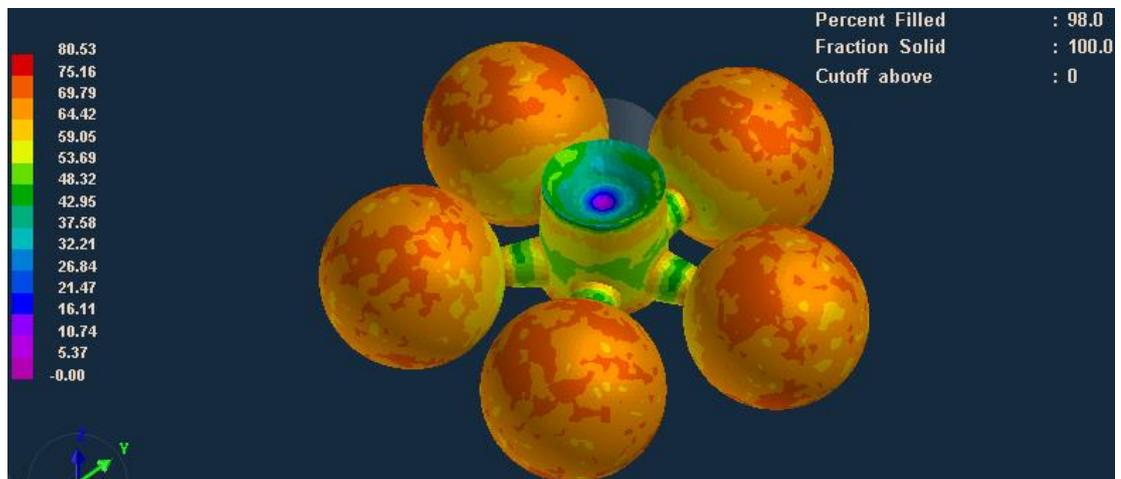


Figura 5.8. Análisis de Niyama a 1550 °C en la fundición y 400 °C del molde.

5.2. Fundición de las bolas

Para las pruebas de fundición de bolas en molde permanente, se valió de las instalaciones de la empresa SMO.

5.2.1. Parámetros óptimos para la fundición

El estudio termodinámico del proceso de llenado del molde mediante simulación permitió determinar los parámetros óptimos de temperatura de colada y de molde. La *Tabla 5.1.* muestra los valores seleccionados para la fundición de bolas de molienda en molde permanente.

Tabla 5.1. Parámetros óptimos para el colado de las bolas de molienda en molde permanente.

Temperatura de fundición del material	Temperatura de precalentada del molde	Observaciones de simulación
1550 °C	400 °C	Temperatura de colada mínima 1408 °C. Tiempo de llenado mínimo MTF= 35 s. Tiempo de solidificación <i>TTS</i> = 3,31 <i>min.</i> El material fluye adecuadamente. No existe porosidad observable (tiende a 0 %).

5.2.2. Procedimiento para la fabricación de bolas de molienda

- Se debe localizar una zona plana lo suficientemente grande y se coloca ahí el patrón de moldeo.
- Se coloca la tapa inferior del molde sobre el patrón y se compacta arena. Se puede emplear arena verde o arena de sílice.
- Se realiza el mismo procedimiento con la tapa superior, se compacta la arena y se deja una entrada la cual se convertirá en la mazarota.
- Se cubre con 40 gramos de polvo de grafito en las estructuras de arena para una mejor durabilidad.

- Se procede a realizar un precalentado del molde con el fin de evitar un choque térmico. La temperatura de precalentado utilizada se puede observar en la *Tabla 5.1*.
- Se cubre las superficies de la cavidad con una capa fina de pintura refractara (sílice disuelta en agua) para evitar la fundición se adhiera al molde y prolongar así la vida útil del molde.
- Se cierra el molde y se realiza el colado.
- Se espera un tiempo de solidificación aproximado de 3,31 *min* para garantizar el resultado
- Se abre el molde y se obtiene el modelo de fundición.

5.2.3. Preparación del molde

Se realiza el procedimiento de preparación del molde y del material a usar. La preparación del molde se inicia construyendo los canales y el bebedero donde se ingresará el material empleando para ello el patrón de bolas, arena y grafito. El proceso se realiza en dos etapas consistiendo en colocar cada tapa del molde sobre el patrón para construir las respectivas estructuras en cada pieza. En la tapa inferior se realiza los canales para el desplazamiento del material, mientras que en la tapa superior además de la otra mitad de los canales se forma el bebedero el mismo que cumple con la función de la mazarota. Ver *Figura 5.9*.



Figura 5.9 Canales para el desplazamiento del material de fundición.

Una vez elaborados los canales de desplazamiento del material, se hizo un precalentado del molde, con una temperatura de 400 °C para evitar un choque térmico por la diferencia de temperatura entre el material fundido y el molde. Posterior al precalentado, se hizo un recubrimiento con una pintura refractaria para facilitar el desprendimiento de la pieza resultante de la fundición. Ver *Figura 5.10*.



Figura 5.10. Preparación del molde con pintura refractaria.

5.2.4. Colado del material

La fundición del material para la fabricación de las bolas se realizó empleando un crisol a una temperatura superior a 1516 °C y a una temperatura de colado superior a 1408 °C. La aleación utilizada se corresponde al hierro blanco con la adición de los elementos que se pueden observar en la *Tabla 3.2*. En la *Figura 5.11*, se puede observar el proceso de fundición y colado en el molde para la obtención de las bolas.



Figura 5.11. Fundición y colado del material para las bolas.

5.2.5. Desmoldeo de las bolas

Una vez que el material se insertó dentro del molde, se esperó el tiempo de enfriamiento: mínimo $3,31 \text{ min}$ para que éste se solidifique. El resultado final corresponde a la *Figura 5.12*, el cual se asemeja muy significativamente al esperado por la simulación de la *Figura 4.14*.



Figura 5.12. Desmoldeo de las bolas de fundición.

5.2.6. Separación y obtención de las bolas

Como paso final para la obtención de las bolas de fundición, se separó cada bola de forma individual por medio de herramientas manuales. Se realizó un proceso de rectificado el cual consistió en limado de la zona de corte para disminuir la rugosidad de la zona. Ver *Figura 5.13*.



Figura 5.13. Limado de la zona de contacto con el alimentador del molde.

5.3. Análisis de la contracción real de las bolas

Una vez obtenidas las bolas por fundición, se realizó un análisis por medio del cual se determinó su tamaño real una vez estabilizada la temperatura a la del ambiente. El propósito de este análisis es corroborar el cumplimiento dimensional del modelo de fundición obtenido para de esta forma validar el procedimiento.

Tabla 5.2. Análisis dimensional de las bolas de fundición con error porcentual.

Dimensiones de la cavidad del molde (in)	Dimensión de la bola con la contracción esperada (in)	Dimensión real de las bolas (in)	Error (%)
5,11	5	5,05	0,99
5,11	5	5,07	1,38
5,11	5	5,02	0,40
5,11	5	5,05	0,99
5,11	5	5,04	0,79
5,11	5	5,07	1,38
5,11	5	5,04	0,79
5,11	5	5,02	0,40
5,11	5	5,01	0,20
5,11	5	5,03	0,60
Error promedio			0,79

Para obtener la medida real del diámetro de las bolas de fundición se empleó como instrumento de medida un calibrador, con el cual se realizó varias mediciones con el fin de obtener los valores reales.

En la *Tabla 5.2.* se puede comprobar que el margen de error está dentro de lo permitido, ya que con el cálculo de error porcentual se tiene un máximo de 1,38 % y un mínimo de 0,2 %, lo que en milímetros es +1,8 mm y +0,2 mm respectivamente y basándose en las desviaciones máximas del diámetro nominal de las bolas de 120 mm de la *Tabla 3.1.*, se encuentra dentro de los ± 5 mm.

5.4. Análisis superficial de la bola de fundición

Durante la fase de solidificación de las bolas de fundición pueden ocurrir defectos en el acabado superficial de las bolas de fundición debido a diferentes factores que pueden afectar este proceso. Para comprobar si el resultado es favorable de acuerdo con los objetivos de la investigación se tuvo que realizar un análisis superficial en el cual se determinó la existencia de irregularidades en las bolas.

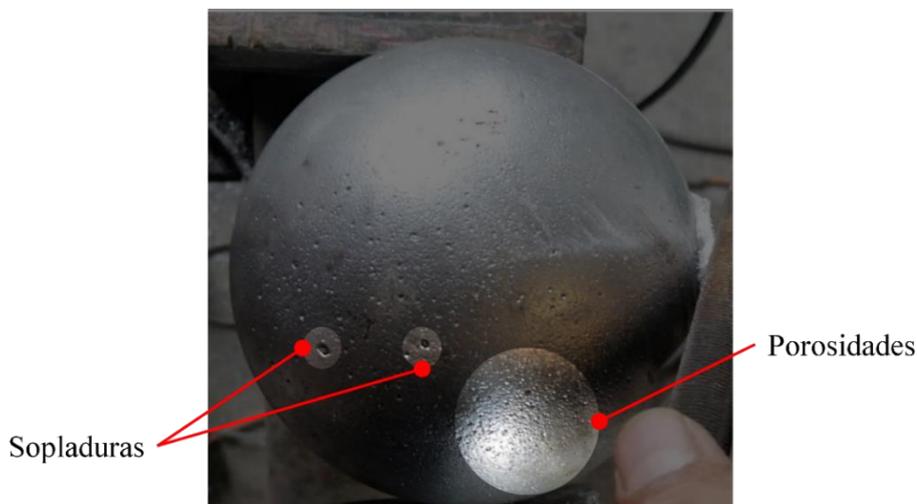


Figura 5.14. Análisis superficial sobre las bolas de fundición.

Teniendo en cuenta la NORMA DSTU 8538-2015 [20], la calidad de la superficie de las bolas de molienda se controla visualmente sin el uso de dispositivos de aumento, se puede observar pequeños agujeros que destacan por su tamaño de aproximadamente 2 mm, posiblemente fue causado por la disolución de gases de hidrógeno y se formaron en el transcurso de la solidificación. También se tiene defectos o porosidades de fundición, estos son pequeños agujeros los cuales son causados por la resistencia a la contracción.

Además, la misma norma menciona que la superficie de las bolas no debe contener grietas ni defectos que produzcan desviaciones marginales en el tamaño de las bolas. Por lo tanto, se puede aceptar este margen de defecto ya que no existe una desviación marginal en el tamaño.

5.5. Análisis de costos

Para realizar este análisis, se tomó en cuenta todos los costos utilizados durante el proceso de fabricación del molde y producción de las bolas de fundición. Los principales costos determinados durante todo el proceso de investigación y fabricación son los siguientes:

- Materia prima directa
- Mano de obra directa (Rol de pagos)
- Costos indirectos de fabricación (depreciaciones de equipos, herramental)
- Costos de transporte
- Otros costos

De acuerdo con lo anterior descrito, se realizó la tabla donde se detalla cada ítem y su valor con el fin de obtener los costos totales.

Tabla 5.3. Hoja de costos.

Hoja de costos	
Fabricación de un molde permanente para la fabricación de bolas de fundición	
Descripción	Costo
Mano de obra directa	\$ 600
Mano de obra indirecta	\$ 300
Costos materiales (eje de acero 1018 y material de fundición)	\$ 700
Costos indirectos de fabricación (herramientas, equipos de medición)	\$ 300
Costos de transporte (envío de material, transporte hacia la empresa SMO)	\$ 50
Otros costos (Energía eléctrica)	\$ 50
Total:	\$ 2000

5.6. Justificación del costo de fabricación del molde permanente

Este apartado tiene el propósito de justificar la inversión en la fabricación del molde permanente para las bolas de molienda. Para ello se realizó un análisis de costos de fabricación empleando una referencia de 10000 bolas de molienda las cuales se planteó como el máximo de bolas que se podrían fabricar durante la vida útil del molde [22].

Se comparó con un análisis similar utilizando como homologos los moldes en arena y se determinó el ahorro existente como la diferencia entre ambos análisis. Los parámetros que se tomaron en cuenta son los siguientes:

- Personal necesario para la fabricación
- Remuneración diaria de la mano de obra
- Tiempo total de trabajo necesario para la fabricación de las bolas de molienda
- Costos de los moldes

En la *Tabla 5.4.* se lista una serie de datos referentes a costes de material para la fabricación de un determinado número de bolas de molienda. Estos datos fueron obtenidos gracias a la empresa SMO, los cuales se emplearán para los cálculos de los costos.

Tabla 5.4. Datos referenciales para la fabricación de moldes de arena.

Datos referenciales para una producción de 10152,5 kg de fundición	
Costos de arena	\$ 840
Costo material base	\$ 2656
Costo ferroaleaciones	\$ 4071
Peso de las bolas (kg)	8,62
Kilos de material a fundir (kg)	10152,5
Cantidad de bolas a fabricar	1178
Tiempo de trabajo	10 días

Para conocer el costo de moldeado en arena para una producción de 10000 bolas de molienda, se extrapolaron los datos de referencia de tal forma que se obtuvo la *Tabla 5.5.*

Tabla 5.5. Costos de producción extrapolados.

	Producción de referencia	Producción de 10000 bolas de molienda
Material de fundición para las bolas de molienda (kg)	10152,5	86200
Costo material	\$ 2656	\$ 22550,82
Costo ferro materiales	\$ 4071	\$ 34564,91
Costo molde de arena	\$ 840	\$ 7136,78
Otros costos de fundición	\$ 2464	\$ 20920,64

A partir de la *Tabla 5.5.* y empleando una regla de 3 entre los costos de arena y la cantidad de bolas a fabricar se determinó cual sería el coste de material necesario para la fabricación de 10000 bolas de molienda. Este valor se comparó con el coste del molde permanente el cual es un precio fijo determinado por la *Tabla 5.6.*

Tabla 5.6. Comparativa de costos de molde para la fabricación de bolas de molienda

	Molde de arena	Bolas por fabricar
Costo molde	\$ 7136,78	\$ 2000
Cantidad de bolas a fabricar	10000	10000
Peso de las bolas	8,62 kg	8,62 kg
Kilogramos de material	86200 kg	86200 kg

Como otro factor clave que influye en gran medida en los costos es el precio de la mano de obra directa. Esto se debe a que para el caso del moldeado con molde permanente no se necesita tanto personal como para el moldeado en arena, lo cual se ve reflejado en un costo menor para un mismo tiempo de trabajo. Ver *Tabla 5.7.*

Tabla 5.7. Costo mano de obra.

	Cantidad	Costo/día	días	Subtotal
Molde de arena				
Supervisor	1	\$ 30	85	\$ 2550
Moldeador	2	\$ 25	85	\$ 4250
Fundidor	1	\$ 25	85	\$ 2125
Ayudante	2	\$ 25	85	\$ 4150
IESS	6	\$ 3	85	\$ 1530
Total				\$ 14705
Molde permanente				
Supervisor	1	\$ 30	85	\$ 2550
Moldeador	1	\$ 25	85	\$ 2125
Fundidor	1	\$ 25	85	\$ 2125
Ayudante	0	\$ 25	85	0
IESS	3	\$ 3	85	\$ 765
Total				\$ 7565

Es importante recalcar que aparte de los costos ya mencionados en esta sección, existen otros costos como son consumibles o alimentación que por motivos de simplificación de la comparativa no se tomaron en cuenta. Los costes de material y de fundición se tomaron idénticos para ambos casos debido a que no se ve afectado por el tipo de molde.

Tabla 5.8. porte del costo del material y de mano de obra.

	Costo material + agregados	Costos de fundición	Costo molde	Costo mano de obra	Costo de fabricación por kilo
Moldeo en arena	\$ 57115,73	\$ 20920,64	\$ 7136,78	\$ 14705	\$ 1,16
Molde permanente	\$ 57115,73	\$ 20920,64	\$ 2000	\$ 7565	\$ 1,02

Los costos obtenidos por la *Tabla 5.8.* corresponden únicamente a los de fabricación de las bolas de molienda. Para la obtención de un precio de venta real se es necesario la adición de la utilidad para la empresa y el IVA correspondiente. La utilidad es un valor que se fija de acuerdo con los criterios de la empresa en cuestión mientras que el IVA es un valor fijo del 12 %. El valor de utilidad empleado para esta justificación se ajustó de acuerdo con el criterio actual de SMO, sin embargo, puede ser fijado en otros valores según sea conveniente para la empresa. Ver *Tabla 5.9.*

Tabla 5.9. Costo teórico de venta de las bolas de molienda.

	Costo fabricación	Utilidad	IVA %12	Total
Con moldeo en arena	\$ 1,16	\$ 1,27	\$ 0,29	\$ 2,72
Con molde permanente	\$ 1,02	\$ 1,27	\$ 0,27	\$ 2,56

Para concluir con este análisis, se encontró que los costos de fabricación empleando el molde permanente resulto en ahorro con respecto al moldeado en arena debido a un menor gasto de material para construcción del molde y un menor costo en la mano de obra. También se encontró un menor precio teórico de venta para las bolas de fundición construidas con un molde permanente, el cual se determinó para un caso donde la utilidad seria la misma comparada con la del moldeado en arena. Esto implicaría que la empresa podría ofrecer un precio mucho más competitivo sin pérdidas lo cual representaría una ventaja y una ganancia.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

En este capítulo se realiza un resumen de los principales puntos tratados durante el desarrollo del proyecto de fabricación de un molde permanente para bolas de fundición.

- Se determinó las principales características para el diseño del molde permanente de bolas para una producción por lotes, los cuales son: fundición gris como material del molde y acero 1018 para el núcleo o pieza cavidad, además las características térmicas del molde 400 °C y de la colada para la fundición 1550 °C.
- Para este trabajo se utiliza el método empírico ya que se diseñó el molde permanente por medio de software CAD con el cual se determinó dimensiones, piezas, forma geométrica. Por medio de CAM se determinó el método constructivo, concluyendo en el uso de moldeado para la fabricación del molde y un posterior mecanizado para la realización de detalles que con fundición no se lograban conseguir.
- La simulación del proceso de fundición es un método poderoso que permitió visualizar las características térmicas iniciando con la temperatura de fundición a 1300 °C y temperatura de precalentamiento del molde a 300 °C, hasta obtener el adecuado a temperatura de fundición de 1550 °C y temperatura del molde a 400 °C, reduciendo de esta forma los tiempos de fabricación y disminuyendo los costos totales a \$ 2000, debido a que no se requirieron la construcción de varios prototipos para garantizar el resultado.
- Para las tolerancias de $\pm 0,1$ a $\pm 0,5$ necesarias para el modelo del molde, el mecanizado CNC permitió efectuar todos los detalles en el molde de bolas de fundición de forma correcta y sin problemas. La precisión de este tipo de máquinas de control numérico permitió que el resultado final sea el deseado.
- En el análisis de porosidad de las simulaciones se pudo observar el porcentaje de porosidad con respecto a la temperatura, presentando un 6% de porosidad en todas las bolas y la mazarota a una temperatura de 1300 °C del material y 300 °C del molde, conforme se aumenta la temperatura, el porcentaje de porosidad disminuye hasta que tiende a 0 % en todas las bolas a una temperatura de fundición de 1550 °C del material y 400°C del molde.

- La validación del prototipo se realizó con la fundición de bolas de molienda y comparándola con lo esperado por las simulaciones. Se comprobó que el grado de precisión de las bolas de molienda fue muy acertado con un error porcentual promedio de máximo de 0,79 % o 0,79 *mm*, lo que se traduce a un valor que se encuentra en el intervalo de -0,5 *mm* y +0,5 *mm*, cumpliendo así las expectativas.

6.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda el uso de herramientas CAD para el diseño de prototipos de molde de fundición, debido a que brindan información clara y concisa de las dimensiones, formas y detalles que se tendrán en el modelo además de reducir el tiempo necesario para la fabricación del prototipo.
- Se recomienda el uso de herramientas CAM para evaluar y establecer un correcto método constructivo para la fabricación del modelo del molde de fundición. Se recomienda evaluar los posibles defectos que puedan existir en el prototipo por software y realizar los respectivos cambios en el modelo 3D.
- Se recomienda tomar en cuenta el coeficiente de transferencia de calor (HTC) para realizar simulaciones de fundición, debido a que brinda una mejor aproximación del modelo a la realidad.
- Para el mecanizado CNC se recomienda establecer una metodología que permita realizar el mayor número de operaciones posibles sin necesidad de reubicar el prototipo en otra posición. Esto debido a que de esta forma se garantiza un mejor resultado final y una mejor exactitud del proceso.
- Se recomienda realizar varios ensayos de fundición con objeto de analizar y comparar los resultados obtenidos con los esperados.

REFERENCIAS

- [1] M. A. Arroyo Ortega, «Comparación del desgaste de cuerpos molidores por uso de agua de mar en el proceso de molienda (Tesis de pregrado).», Curicó, 2028.
- [2] Ningguo Zhicheng Machine Manufacturing Co., Ltda(NZMM), «mgzcmachinery,» 2021. [En línea]. Available: <https://es.ngzcmachinery.com/>.
- [3] J. Soriano, «Moldes en procesos de fundición de metal,» jhovannasorianomoldesfundicion, [En línea]. Available: <https://jhovannasorianomoldesfundicion.weebly.com/index.html>.
- [4] S. Kalpakjian y S. R. Schmid, *Manufactura, Ingeniería y tecnología*, Pearson, Ed., Prentice Hall.
- [5] F. J. BELZUNCE, «ACEROS Y FUNDICIONES: Estructuras, Transformaciones, Tratamientos térmicos y alicaciones,» 2001.
- [6] M. Vázcones Carrasco y L. Torres León, «Minería en el Ecuador: sostenibilidad y licitud,» *Estudios del Desarrollo Social: Cuba y América Latina.*, n° 2, 2018.
- [7] G. C. Tonato Toapanta, «Análisis del arancel y de los impuestos, Valor Agregado (IVA),Consumos Especiales (ICE) y Salidas de Divisas (ISD), en las importaciones y su incidencia en la balanza comercial del país. Periodo 2005-2015,» Quito, 2017.
- [8] R. Báez, *Ecuador, pasado y presente*, Libresa, 1995.
- [9] B. S. Gómez Alencastro, «MOLDE PERMANENTE PARA PROBETAS DE ALEACIONES DE ALUMINIO APLICANDO LAS NORMAS ASTM B-108,» Ibarra, 2018.
- [10] M. D. Jami Jami, «Diseño y construcción de un molde permanente para la fabricación de bornes de baterías automotrices,» 2018.
- [11] D. R. Karwa, «Machine Desing,» Jodhpur (Rahasthan), India, 2006.
- [12] Ikaskuntza, «BirtLH,» [En línea]. Available: <https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/>. [Último acceso: 05 Enero 2022].
- [13] M. P. Groove, *Fundamentos de Manufactura Moderna*, México: Mc GrauHill, 2007.
- [14] F. H. Oviedo Fierro y A. F. Vinuesa Lozada, «Diseño y construcción de un molde permanente utilizando el software vulcan,» Quito, 2012.
- [15] J. Montes, L. Martínez y J. C. Del Real Romero, *Procesos industriales para materiales metálicos*, vol. 2da edición, Vision Libros, 2006.

- [16] Ital PresseGauss, «A Norican Technology,» [En línea]. Available: <https://www.italpressegauss.com/es-es/my-application-and-industry/application-by-process/what-is-gravity-die-casting>. [Último acceso: 14 Noviembre 2021].
- [17] M. Ajay y Mukherjee, International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication, 2014, pp. 2254-2255..
- [18] M. J. Montes Pita, Teoría y problmas de transmisión de calor, Madrid, 2015.
- [19] S. Krar y A. Check, Tecnologías de las máquina herramientas, vol. 5ta edición, Mexico: AlfaOmega, 2003.
- [20] A. Vladimirova, E. Kosogonova, Y. Pikhtin, O. Rudyuk, V. Solionyi y D. Stalinsky, «STEEL MILLING BALLS FOR BALL MILLS,» State Register, Kiev, 2015.
- [21] Foseco, Foseco ferrous foundryman's handbook, J. R Brown, Ed., Gran Bretaña: butterworth heinemann, 2000.
- [22] B. Gomez Alencastro, F. Valecia Aguirre, D. Ortíz Morales y C. Mejía Echeverría, «Construcción de un molde permanente para probetas de aleaciones,» *UIS Ingenierías*, 2018.
- [23] INDUSTRIAS ROMI S/A, «OPERATOR'S MANUAL ROMI GLM - CNC FANUC Oi TD,» Sao Paulo - SP - Brazil.

ANEXOS

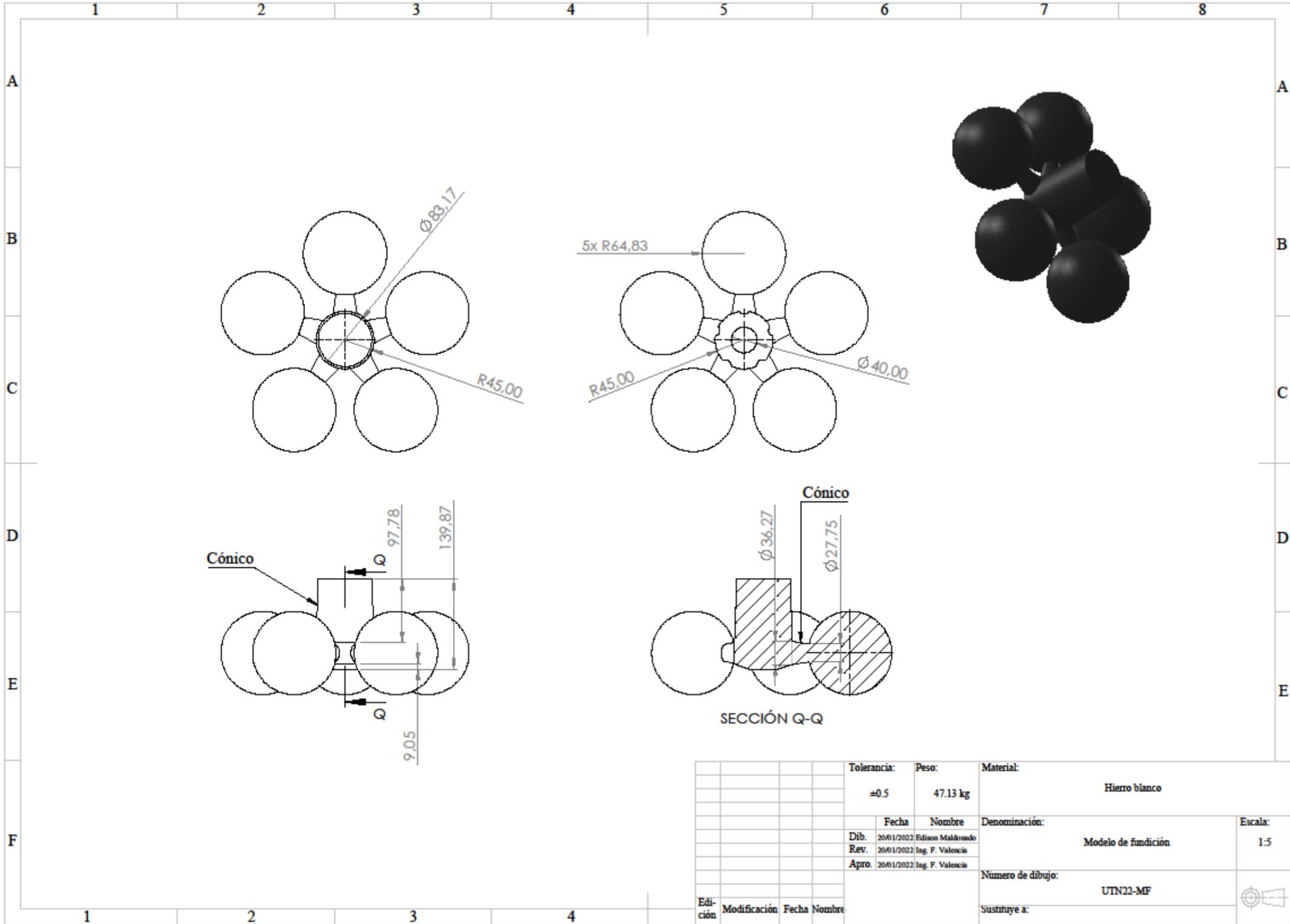
ANEXO 1. Funciones código G más utilizados [23].

CÓDIGO G	FUNCIÓN
G00	Posicionamiento rápido
G01	Interpolación Linear
G02	Interpolación circular en el sentido de las agujas del reloj
G03	Interpolación circular en el sentido opuesto de las agujas del reloj
G04	Activa parada exacta
G05	Mecanizado de ciclo de alta velocidad
G12.1	Modo de interpolación en coordenadas polares
G17	Selecciona el plano de trabajo “XY”
G18	Selecciona el plano de trabajo “XZ”
G19	Selecciona el plano de trabajo “YZ”
G40	Cancela la compensación de radio de herramienta
G41	Activa la compensación de radio de herramienta (a la izquierda del perfil)
G42	Activa la compensación de radio de herramienta (a la derecha del perfil)
G53	Sistema de coordenadas de máquina
G54	Selección sistema de coordenadas de trabajo 1°
G55	Selección sistema de coordenadas de trabajo 2°
G56	Selección sistema de coordenadas de trabajo 3°
G57	Selección sistema de coordenadas de trabajo 4°
G58	Selección sistema de coordenadas de trabajo 5°
G59	Selección sistema de coordenadas de trabajo 6°
G70	Entrada de datos en pulgadas
G71	Entrada de datos en milímetros
G72	Ciclo de acabado
G90	Sistema de coordenadas absolutas
G91	Sistema de coordenadas incrementales
G94	Avanzo en milímetro/pulgada por minuto
G95	Avanzo en milímetro/pulgada por rotación

ANEXO 2. Funciones código M [23].

CÓDIGO M	FUNCIÓN
M00	Parada del programa
M01	Parada opcional del programa
M02	Fin del programa
M03	Gira el husillo en sentido contrario a las agujas del reloj
M04	Gira el husillo en el sentido de las agujas del reloj
M05	Detiene el husillo
M07	Activa el sistema de refrigeración de alta presión
M08	Prende el sistema de refrigeración
M09	Apaga los sistemas de refrigeración
M30	Fin del programa y regreso al inicio del programa
M36	Abre puerta automática
M37	Cierra puerta automática

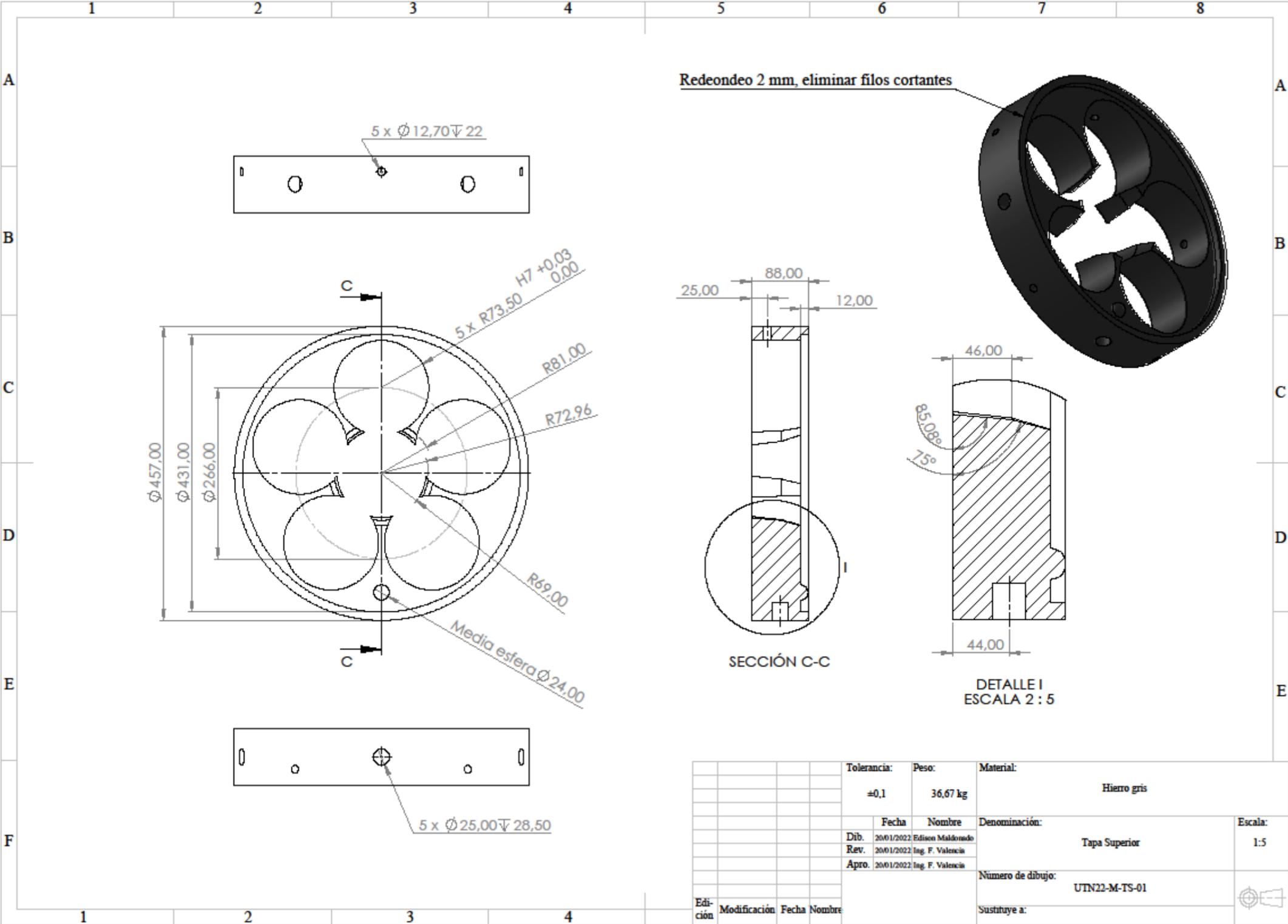
ANEXO 3. Plano del modelo de fundición



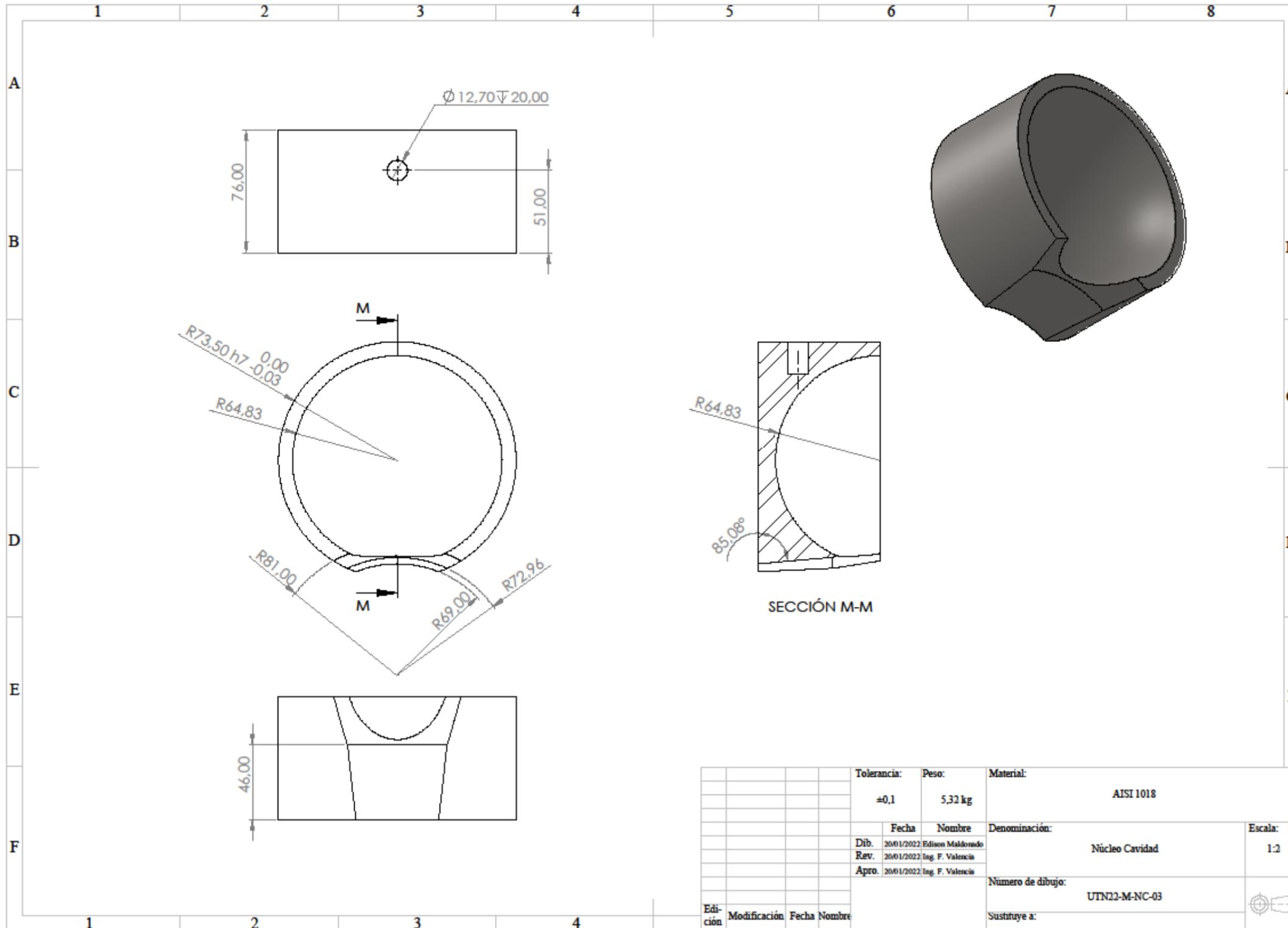
ANEXO 4. Plano de conjunto

10	Tornillo	HUSKEY 0.5005-13x1.25x1-N		5		
1	Patrón de bolas	UTN22-M-PB-04	Aluminio fundido	4		16,75
10	Núcleo cavidad	UTN22-M-NC-03	AISI 1018	3		5,32
1	Tapa inferior	UTN22-M-TI-02	hierro gris	2		33,49
1	Tapa superior	UTN22-M-TS-01	hierro gris	1		36,67
No. de pieza	Denominación	No. de norma / dibujo	Material	No. de orden	No. del modelo / semiproducto	Peso kg / pieza
		Tolerancia:	Peso:	Material:		
		±0,1				
		Fecha	Nombre	Denominación:		Escala:
		Dib. 20/01/2022	Edison Maldonado			1:5
		Rev. 20/01/2022	Ing. F. Valencia		Plano de conjunto	
		Apro. 20/01/2022	Ing. F. Valencia			
				Número de dibujo:		
					UTN22-M-PC	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	Sustituye a:		

ANEXO 5. Plano de la tapa superior

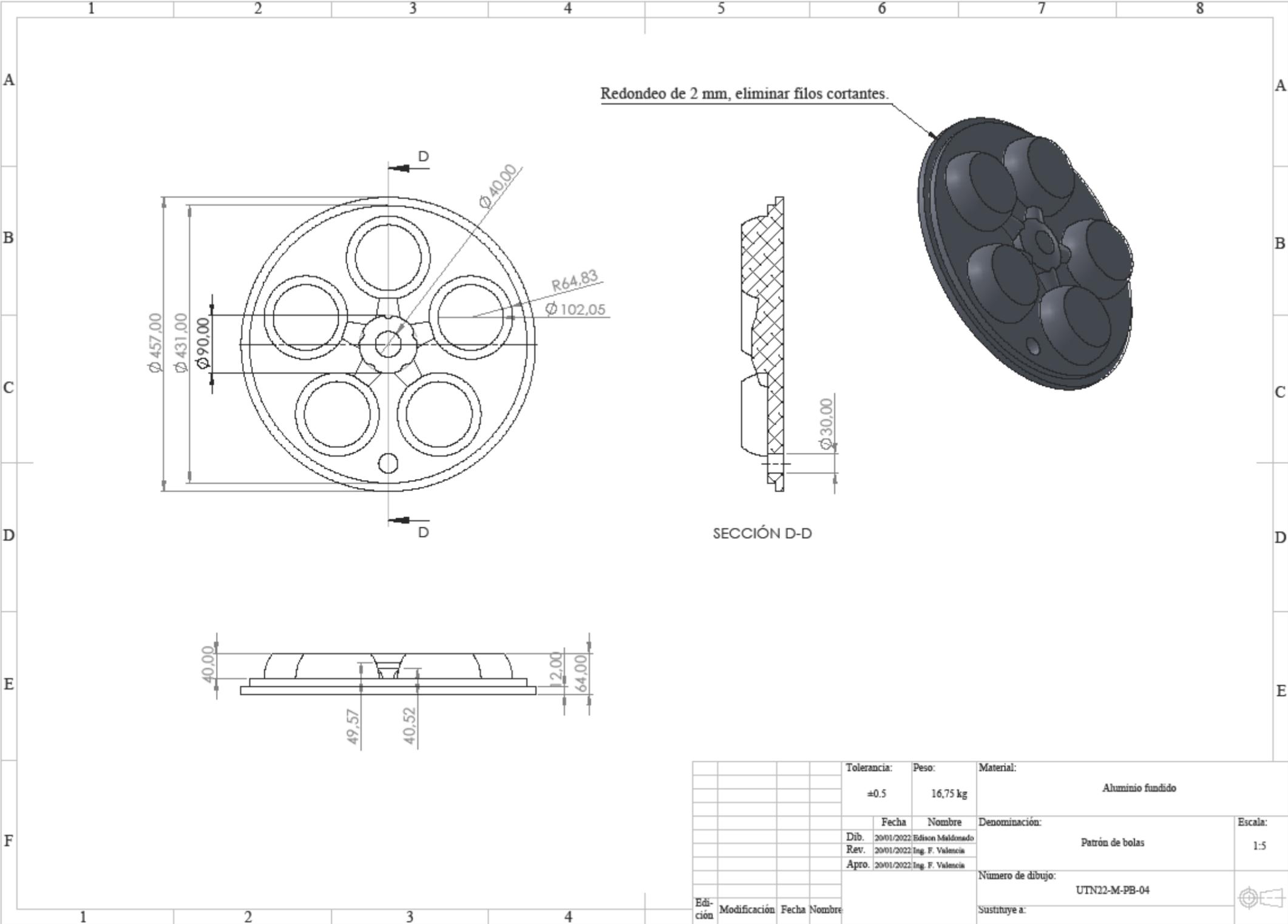


ANEXO 7. Plano del núcleo de cavidad

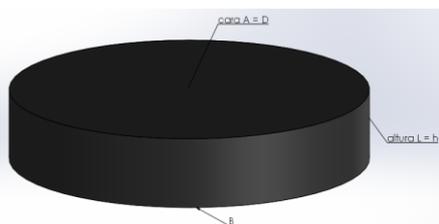
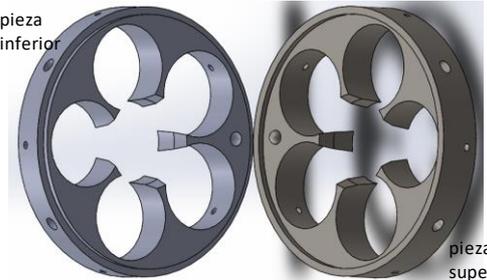
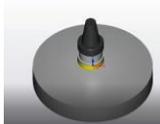
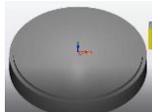
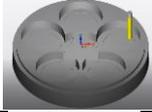
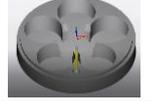


				Tolerancia:	Peso:	Material:	
				$\pm 0,1$	5,32 kg	AISI 1018	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dib. 20/01/2022	Edison Maldonado	Núcleo Cavidad	1:2
				Rev. 20/01/2022	Ing. F. Valencia		
				Apro. 20/01/2022	Ing. F. Valencia		
						Número de dibujo:	
						UTN22-M-NC-03	
						Sustituye a:	
Edi- ción	Modificación	Fecha	Nombre				

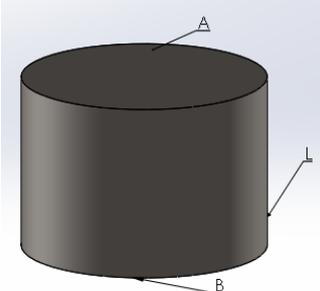
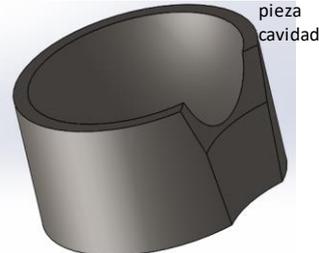
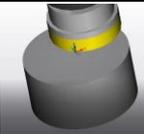
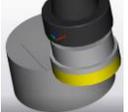
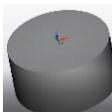
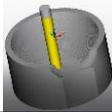
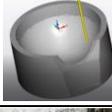
ANEXO 8. Plano del patrón de bolas



ANEXO 10. Hoja de proceso para la tapa inferior del molde.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE		 									
PROYECTO:	Molde permanente para bolas de 5 pulgadas para molinos horizontales	CONJUNTO N°:1	TRABAJO N°: 1	FECHA: 16/01/2022							
PIEZA:	Pieza inferior	PLANO N°: 2	HOJA:1/1								
MATERIAL:	Hierro gris	DIMENSIONES EN BRUTO: D= 461 x h= 86mm									
REALIZADO POR: Edison Maldonado											
 											
FACE	SUB-FACE	OPERACION	DENOMINACION	CROQUIS	HERRAMIENTA	psd	P mm	N rpm	Va mm/s	tc min	CONTROL
MECANIZADO	FRESADO	1	Cero pieza		Fresa punta recta Ø100mm 6 filos						Medidor de nivel
		2	Planeado cara A		Fresa punta recta Ø100mm 6 filos		3	190	456.00		Medidor de nivel
		3	Contorneado externo altura L		Fresa punta recta Ø16mm 110 mm de largo, 4 filos		3	1194	955.2	38.08	Calibrador pie de rey
		4	Desbaste interno		Fresa punta recta Ø16mm 110 mm de largo, 4 filos		3	1194	955.2		Calibrador pie de rey
		5	Acabado interno		Fresa punta redonda Ø10mm 110 mm de largo, 4 filos		1	1194	955.2		Calibrador pie de rey
TALADRADO	TALADRADO	6	Agujeros primera pasada		Broca Ø 6.75		24.5	1132	123.39	0.19	Calibrador pie de rey
		7	Agujeros segunda pasada		Bbroca Ø 11		24.5	694	108.96	0.22	Calibrador pie de rey
	ROSCADO		8	Machuelado		Machuelos 1/2					Escuadra

ANEXO 11. Hoja de procesos para las cavidades del molde.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE		 										
PROYECTO:	Molde permanente para bolas de 5 pulgadas para molinos horizontales	CONJUNTO N°:1	TRABAJO N°: 1	FECHA: 16/01/2022								
PIEZA:	Pieza cavidad	PLANO N°: 3	HOJA:1/2									
MATERIAL:	Acero 1018	DIMENSIONES EN BRUTO:	D= 152.4mm x h= 86mm									
REALIZADO POR: Edison Maldonado												
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div>												
FACE	SUB-FACE	OPERACION	DENOMINACION	CROQUIS	HERRAMIENTA	psd	P mm	N rpm	Va mm/s	tc min	CONTROL	
MECANIZADO	FRESADO	1	Cero pieza		Fresa punta recta Ø100mm 6 filos						Medidor de nivel	
		2	Planeado cara A		Fresa punta recta Ø100mm 6 filos		3	238	499.8			Medidor de nivel
		3	Contorneado externo altura L		Fresa punta recta Ø16mm 110 mm de largo, 4 filos		3	1492	1193.6	11.50		Calibrador pie de rey
		4	Desbaste interno		Fresa punta recta Ø16mm 110 mm de largo, 4 filos		3	1492	1193.6			Calibrador pie de rey
		5	Acabado interno		Fresa punta redonda Ø10mm 110 mm de largo, 4 filos		3	1492	1193.6			Calibrador pie de rey
		6	Acabado cavidad		Fresa punta redonda Ø3mm. 100 mm de largo, 4 filos		3	1492	1193.6			Calibrador pie de rey
TALADRADO	TALADRADO	7	Agujeros no pasantes primera pasada		Broca Ø 6.75		10	1415	14.24	0.06	Calibrador pie de rey	
		8	Agujeros no pasantes segunda pasada		Broca Ø 11		10	868	136.28	0.07	Escuadra	