



**FACULTAD METALURGIA-ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**

ENFRIAMIENTO DE BOLAS DE ACERO 70XL FUNDIDAS EN MOLDES DE ARENA-ARCILLA

Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico

Autor: Eudis García Mosqueda

**Moa-2019
“Año 61 de la Revolución”**



**FACULTAD METALURGIA-ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**

ENFRIAMIENTO DE BOLAS DE ACERO 70XL FUNDIDAS EN MOLDES DE ARENA-ARCILLA

Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico

Autor: Eudis García Mosqueda

Tutor: Ms. C. Ing. Eider Gresesqui Lobaina, Prof. Inst.

**Moa-2019
“Año 61 de la Revolución”**

Declaración de Autoridad

Yo: Eudis García Mosqueda

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor de la Universidad de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el que podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Eudis García Mosqueda

Prof. Inst. Ing. Eider Gresesqui Lobaina, Ms.

C

Pensamiento

La ciencia puede divertirnos y fascinarnos, pero es la Ingeniería la que cambia el mundo.

Isaac Asimov

Agradecimientos

*Madre, la palabra “gracias” no es suficiente para agradecer todo el amor, el sacrificio y el esfuerzo que desde siempre has dado por mí. Te agradeceré desde el fondo de mi corazón, **Virginia Mosqueda Elías** por ser como eres, por tu amor sin límites. Prometo siempre esforzarme para que estés orgullosa de mí y hacer lo posible para que siempre seas feliz. A mis abuelas queridas Eleida y Blanca por su ayuda desinteresada y por su apoyo incondicional.*

A mi padre Eudys por desear y anhelar lo mejor para mí.

A mis hermanas Mileidis, Eleidis y a mi hermano Yordanis por formar parte de mí, por brindarme su cariño, su amor y darme la felicidad de contar con ellos.

A toda mi familia, por llenarme de amor, por ayudarme a formar mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño, por darme fuerzas y ser una lumbrera que me colma de ímpetu cada día.

A mi novia Ydelsi por su gran amor, paciencia, apoyo incondicional y que a pesar sabido ser una amiga. A su familia por ser personas estupendas. Gracias por estar a mi lado, te amo bb.

A todos mis compañeros de aula, que más que amigos han sido una familia en momentos de sacrificio, entrega, desvelos y alegrías, en

especial a Ráidel, Orleidis, Manuel Alejandro, Ramon, Ruslen, Carlos, Lorenzo todos en general.

A mis amistades en especial a Alejandro, Niubel, Luismar y sus familias, por su generosidad, apoyo, comprensión y su ayuda desinteresada en momentos difíciles; por buenos momentos de felicidad y alegría.

A mi tutor Eider, quien desde el primer momento me brindó su amistad y su bondad. Por sus útiles consejos, por impulsarme hacia la victoria y guiarme hacia este feliz término.

A mis consultantes Tomas y Roirber por su ayuda desinteresada y aportar sus experiencias en este proyecto.

Al claustro de profesores que durante estos años me formaron y aportaron los conocimientos esenciales para obtener estos resultados. Por compartir conmigo sus conocimientos, por enseñarme a ser útil, a emprender metas y a luchar.

A quienes jamás encontraré la forma de agradecer el cariño, comprensión y apoyo brindado en los momentos buenos y malos de mi vida, hago este triunfo compartido y a todos los que de una forma u otra contribuyeron en la realización de la tesis.

A todos GRACIAS.

Dedicatoria

A:

Mi madre Virginia Mosqueda Elías quien por su amor, paciencia y esfuerzo he podido llegar a cumplir un sueño más, por inculcar el ejemplo de voluntad y valentía, por creer y confiar en mí, gracias a Dios por la vida de mi madre, y gracias a la vida por permitirme verla y disfrutar cada día a su lado. A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

Mi sobrina Melody y mi sobrino Thiago, porque a pesar de la distancia, me brindan la fortaleza para seguir adelante, para que vean en mí un ejemplo a seguir.

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo modelar y simular el proceso de enfriamiento de una tecnología de fundición de bolas de acero 70XL, desde el estado líquido al sólido. Para esto se realizó la tecnología de fundición en moldes de arena para bolas con 90 mm de diámetro, quedó establecida con 24 bolas, un tragadero, dos escoriadores y cuatro alimentadores. A través de la modelación y simulación del proceso de solidificación de las bolas en el software ProCAST, se conoce que la aleación en todas las partes del molde queda totalmente solidificada a los 1 979,24 segundos. Se comprueba que con las dimensiones dadas al diseño, el porcentaje de porosidad en la moldura será mínimo, puesto que las partes que solidifican de último en el molde, poseen un valor de 0 a 6,67 % de poros, lo que resulta insignificante para las bolas. Las curvas de enfriamiento muestran que cuando ha transcurrido un tiempo de aproximadamente 10 segundos, la distribución de temperatura en el molde, de mayor a menor, se distribuye en mazarota, bola 2, bola 1 y escoriador respectivamente. Mientras que a los 20 segundos, la bola 1 alcanza menores valores de temperatura, debido a que es la sección del molde menos afectada por el flujo de metal.

Abstract

The present investigation also aims at the cooling process of a 70XL steel ball casting technology, from the liquid to the solid state. For this, casting technology was performed on the sand for the balls with 90 mm diameter, it was maintained with 24 balls, one trap, two scrapers and four feeders. Through the modeling and simulation of the solidification process of the balls in the ProCAST software, it is known that the alloy in all parts of the mold is fully solidified at 1 979.24 seconds. It is checked that the dimensions of the design, the percentage of porosity in the molding, the minimum time, the value of 0 to 6,67 % of pores, which is insignificant for the balls. The cooling curves show when you have passed a time of about 10 seconds, the distribution of temperature in the mold, from highest to lowest, is distributed in sprue, ball 2, ball 1 and scraper respectively. While at 20 seconds, the ball 1 reaches lower temperature values, because it is the section of the mold less affected by the flow of metal.

ÍNDICE	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	4
1.1 Introducción.....	4
1.2 Generalidades del proceso de solidificación.....	4
1.3 Proceso de cristalización.....	5
1.4 Cavidad por contracción.....	8
1.5 Generalidades sobre los frentes de solidificación	12
1.6 Alimentación de la contracción del metal	13
1.6.1 Condiciones a para lograr la alimentación de la contracción	15
1.6.2 Influencia de la geometría de la pieza y la mazarota sobre la alimentación	15
1.7 Aplicaciones del software AutoCAD.....	16
1.8 Aplicaciones del software ProCAST	17
1.9 Conclusiones del capítulo	18
CAPÍTULO 2. TECNOLOGÍA DE FUNDICIÓN	19
2.1. Introducción.....	19
2.2. Particularidades del elemento en estudio	19
2.3. Generalidades de la proyección de la tecnología de moldeo.....	20
2.3.1. Selección de la temperatura de vertido, colada, tiempo de enfriamiento, desmoldeo y limpieza	21
2.3.2. Cálculo de la masa de la bola.....	22
2.4. Ubicación del elemento en el molde y determinación del plano divisor 	22
2.5. Cálculo de los espesores mínimos de pared	23
2.6. Cálculo de las sobremedidas tecnológicas	24
2.7. Cálculo y diseño del sistema de alimentación.....	24

2.8.	Cálculo del rechupe específico	26
2.9.	Determinación del volumen de mazarotado.....	27
2.10.	Cálculo del número necesario de mazarotas	28
2.11.	Cálculo de las dimensiones de las mazarotas	28
2.12.	Dimensiones de las cajas de moldeo	29
2.13.	Modelación y simulación del proceso de colada en el ProCAST	30
2.14.	Conclusiones del capítulo 2	32
	CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	33
3.1.	Introducción.....	33
3.2.	Temperatura de vertido, colada, tiempo de enfriamiento, desmoldeo y limpieza.....	33
3.3.	Determinación de la masa de la bola	34
3.4.	Determinación de los espesores mínimos de pared	34
3.5.	Determinación de las sobremedidas tecnológicas	34
3.6.	Determinación y diseño del sistema de alimentación.....	35
3.7.	Dimensiones de las cajas de moldeo	37
3.8.	Resultados de la simulación del proceso de vaciado	38
	3.8.1. Dirección del vector del fluido y secuencia de llenado	38
	3.8.2. Simulación de la fracción de sólido.....	41
	3.8.3. Curvas de enfriamiento.....	45
3.9.	Costo de producción de la bola según la EMNi	45
3.10.	Impacto medio ambiental.....	46
3.11.	Conclusiones del capítulo 3	47
	CONCLUSIONES GENERALES	48
	RECOMENDACIONES.....	49
	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	50

ANEXO 1	52
----------------------	-----------

INTRODUCCIÓN

En la industria cementera se hace necesario el consumo de bolas de molinos de diversos diámetros, pero el desgaste de estas ocasiona pérdidas económicas considerables. Además, los nuevos diseños de molinos que consumen energía eléctrica, exigen incrementar los parámetros de trabajo de las bolas, principalmente la tenacidad y la resistencia al desgaste y a los impactos, para lograr una molienda de mayor calidad.

El cemento, es uno de los principales elementos para actividades de construcción y constituye un material base que puede fabricarse en países que presenten la tecnología adecuada. Si bien la obtención de la materia prima (clínquer) es a través de la explotación de yacimientos a cielo abierto y su obtención resulta ser económica, en las diferentes etapas de producción, en la planta de cemento se requiere de un alto aporte de energía, considerado entre el 2 y el 20 % la que el molino requiere para transformarla en trabajo de desmenuzamiento.

Son diversos los estudios realizados en función de los cuerpos moledores de los molinos y en el mundo existen grandes fabricantes de estos como Magotteaux S.A., Suprasteel y otros con gran respeto a nivel internacional. Sin embargo, en el taller 08 de la Empresa Mecánica del Níquel (EMNi) de Moa, la aleación usada para fabricar las bolas para molinos de procesamiento de la materia prima que conlleva a la obtención del cemento, es el 70XL, con diámetros de 60, 70, 80 y 90 mm.

Una vez fabricadas los medios molturadores, por sus condiciones de trabajo posterior, son sometidos a tratamientos térmicos de normalizado, temple y revenido, a partir de las exigencias de la norma Gost 977-88, con relación a las propiedades mecánicas a obtener, según las características de su explotación. Se ha podido evidenciar que una vez obtenidas por fundición, aparecen cavidades de contracción (poros), que conducen a un previo deterioro de los mismos puestos que son más susceptibles a la formación de grietas y a la fractura.

En el presente trabajo de diploma se establece como **situación problemática**:

La Empresa Mecánica del Níquel (EMNi) de Moa “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”, efectúa desde el año 2013 una línea de producción de bolas de molinos. Estas son fabricadas de acero 70XL y son empleadas en la molienda del clínquer en la industria cementera cubana. Esta aleación, para las condiciones de trabajo de las bolas, es sometida a tratamientos térmicos de normalizado, temple y revenido, a partir de las exigencias de la norma Gost 977-88, con relación a las propiedades mecánicas a obtener, según las características de su explotación. Luego del proceso de fundición, aparecen cavidades de contracción, lo que influye en la calidad de fabricación de las mismas. Una posible solución a este fenómeno es hacer una tecnología de fundición que posea un correcto llenado de las diferentes partes del molde y evaluar su veracidad por medio de una modelación y simulación computacional del proceso de enfriamiento, desde el estado líquido al sólido. Con estos resultados, se mejoraría la calidad del producto final y por consiguiente la economía de la entidad.

Se define como **problema de la investigación**:

Desconocimiento del comportamiento del proceso de enfriamiento en una tecnología de fundición de bolas de acero 70XL, desde el estado líquido al sólido, en un molde de arena.

Objeto de estudio:

Modelación y simulación del proceso de solidificación del proceso de fundición de bolas de acero 70XL, en un molde de arena.

Y su **campo de acción**:

Simulación computacional del proceso de enfriamiento.

A partir del objetivo general declarado se establece la siguiente **hipótesis**:

Si se selecciona adecuadamente la temperatura de vertido y el número de mazarotas, es posible modelar y simular el comportamiento de una tecnología de fundición que garantice la alimentación de las diferentes partes del molde con una mínima aparición de cavidades de contracción en bolas de acero 70XL.

Se define como **objetivo general**:

Modelar y simular el proceso de enfriamiento de una tecnología de fundición de bolas de acero 70XL, desde el estado líquido al sólido, en un molde de arena.

Para la investigación se establecen los siguientes **objetivos específicos**:

1. Hacer la tecnología de fabricación por fundición de las bolas de acero 70XL con 90 mm de diámetro.
2. Realizar la simulación del proceso de solidificación de las bolas.
3. Determinar las curvas de enfriamiento del molde diseñado desde el estado líquido al sólido.

Para dar cumplimiento al objetivo general se desarrollan las siguientes **tareas**:

1. Análisis del estado del arte en los defectos de piezas fundidas y los procesos de simulación computacional.
2. Evaluación de la tecnología de fundición para el elemento seleccionado.
3. Simulación del proceso de solidificación según objeto de estudio.
4. Determinación de las curvas de enfriamiento del molde diseñado desde el estado líquido al sólido.

CAPÍTULO 1.
MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

1.1 Introducción

En la actualidad es de vital importancia conocer hasta dónde ha llegado la humanidad en la temática analizada, para así evitar conclusiones erróneas. Un importante proceso industrial es la fundición en moldes de arena-arcilla, en donde se producen bienes materiales a usar en las industrias y entidades.

Según (Kondic, 1969) citado por (Rodríguez, 2008) plantea que es muy frecuente tomar los procesos de fundición como un barómetro que mide el estado económico de una sociedad, basándose en que los metales son la clave del desarrollo de nuestra era industrial; y que los procesos de fundición, es la etapa inicial y básica para producir los bienes materiales a ser usados en las demás industrias, es decir, es un bien de capital.

Este capítulo tiene como objetivos:

- Conocer el estado del arte de la temática analizada, realizando una revisión bibliográfica que permita la orientación de los objetivos del trabajo.
- Definir los aspectos teóricos que permitirán llevar a vías de hecho la investigación propuesta.

1.2 Generalidades del proceso de solidificación

La solidificación es un proceso físico que consiste en el cambio de estado de la materia de líquido a sólido producido por una disminución en la temperatura. Es el proceso inverso a la fusión. En aquellas regiones donde el flujo ha creado trayectorias, la continua contracción crea un descenso en la presión del líquido residual que puede llegar a ser negativa, lo que genera succión de la superficie de la pieza. Esto continuará hasta que toda la pieza haya solidificado, a menos que los esfuerzos hayan crecido hasta valores suficientemente altos para crear una repentina disipación de gas o de vapor, lo que generará una cavidad. Al paralizarse el hundimiento de la superficie, se inician otros eventos que conducen a la creación de defectos internos (Kumanin, 1976). En general, la solidificación de un metal o aleación puede dividirse en las siguientes etapas:

1. Formación de núcleos estables en el material fundido (nucleación). Para ello los embriones iniciales de sólido crecen y proporcionan núcleos (si éstos no se crearan el sólido embrionario se volvería a fundir).
2. Cristalización o crecimiento del núcleo en las tres direcciones del espacio en las dendritas para dar origen a cristales.
3. Formación del grano: Los cristales anteriores van dando origen a una estructura granular que se junta con la que proviene de otro lugar en los límites de grano.

Plantea (Flemings, 1983), que la distribución térmica en una pieza varía en función de la distancia desde un sumidero de calor como lo son los enfriadores y las paredes del molde; así como también, a partir de fuentes de generación de calor como suplementos, materiales exotérmicos y mazarotas. Plantean estos mismos autores la importancia de lograr una solidificación direccional y creciente, para la eliminación de cavidades y rechupes en las zonas críticas de una pieza. Consideran además que la transferencia de calor tiene una íntima relación con la geometría de la pieza y con las propiedades de la aleación y del molde. Esto conduce, a la formación de estructuras y subestructuras de solidificación y en consecuencia a las propiedades que caracterizan a las molduras producidas.

1.3 Proceso de cristalización

En las aleaciones con temperaturas superiores a su punto de fusión, los átomos se agrupan al azar, de modo irregular y son portadores de elevada energía y movimiento. A medida que el líquido se enfría y se acerca al punto de solidificación, la energía de algunos átomos puede haber disminuido y con ello su movilidad dentro de la masa, de tal forma que pueden ocupar respecto a los otros, una posición más orientada, lo que se asemeja a su disposición en el metal sólido.

Una vez alcanzada la temperatura de solidificación, estos grupos aislados de átomos pueden haber quedado ya orientados y enlazados como el cristal elemental, adquiriendo una estructura rígida de orientación los unos respecto a los otros. Los átomos vecinos, una vez perdida la energía térmica necesaria, se agregan al cristal elemental formado, creando nuevos cristales dentro de la masa líquida.

Estos cristales en crecimiento, cuando alcanzan cierto tamaño se convierten en núcleos de cristalización y a su alrededor comienza a tejerse la red cristalina, a medida que más y más átomos van perdiendo energía con el enfriamiento. Como la formación de los núcleos de cristalización puede comenzar indistintamente en cualquier parte de la masa líquida, los cristales pueden comenzar a crecer en múltiples lugares simultáneamente.

En el proceso de cristalización, mientras que el líquido circunda al cristal ya formado y creciente, este va manteniendo una forma relativamente correcta, los átomos vecinos se van enlazando en la posición adecuada y la red cristalina se incrementa manteniendo su geometría. Sin embargo, debido a que la transferencia de calor del material fundido puede ser en diferentes direcciones (por ejemplo, hacia las paredes de molde), la red cristalina puede ir creciendo en unas direcciones más que en otras por lo que los cristales van adquiriendo una forma alargada y se constituyen en los llamados ejes de cristalización (Guliáev, 1977).

Otro aspecto que impide la formación de cristales geoméricamente correctos es que en el transcurso de su crecimiento dentro de la masa líquida, estos empiezan a entrar en contacto, por consiguiente, después de la solidificación completa, la forma exterior de los cristales formados adquiere un carácter casual. Tales cristales se denominan granos y los cuerpos metálicos, compuestos de un gran número de granos (policristalinos). Los tamaños de los granos dependen de la velocidad con que se forman y crecen los núcleos. El primer proceso consiste en la formación de partículas pequeñísimas de los cristales (gérmenes) o (centros o núcleos de cristalización).

El segundo proceso es el de crecimiento de los cristales a partir de estos (núcleos de cristalización).

La velocidad de enfriamiento o el grado de subenfriamiento mayor, es la razón de solidificación, este influye notoriamente sobre la forma del frente.

El grado de subenfriamiento (ΔT), (figura 1.1). Es el enfriamiento del líquido por debajo de la temperatura de equilibrio de cristalización. Es la diferencia entre las temperaturas teórica y efectiva de cristalización.

T_s – Es la temperatura teórica (las energías libres del metal líquido y sólido son iguales, el material estará en equilibrio. A esta temperatura no hay ni cristalización ni fusión.

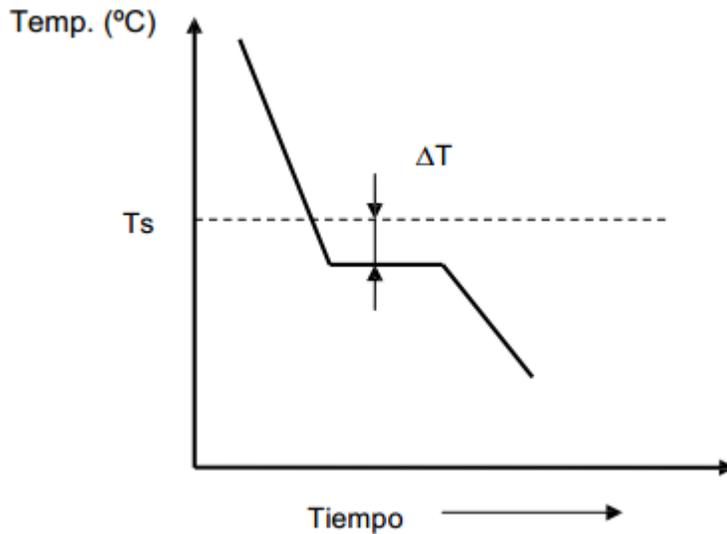


Figura 1.1. Grado de subenfriamiento.

La velocidad de todo el proceso de cristalización está determinada cuantitativamente por dos magnitudes:

- La velocidad de formación de los centros de cristalización (n.c).
- La velocidad de crecimiento de los cristales (v.c).

La relación de v.c y n.c en dependencia del grado de subenfriamiento, puede observarse en la figura 1.2.

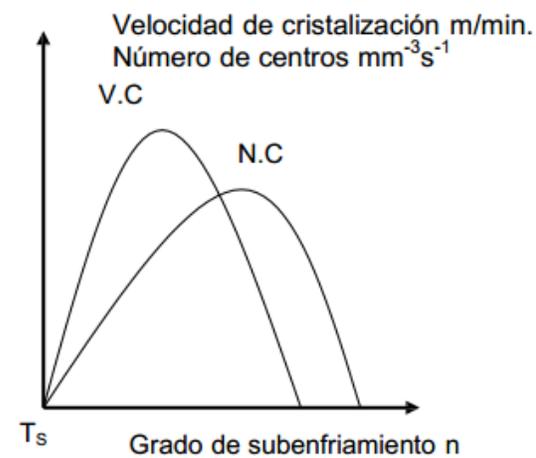


Figura 1.2. Formación de los cristales.

(Guliáev, 1977), plantea además que N.C y V.C están determinados por el grado de subenfriamiento. Si los grados de subenfriamientos son pequeños se forman cristales grandes poco numerosos, cuando los valores de V. C son grandes y el de N.C es pequeño. Cuando los valores de V.C son pequeños y los de N.C grandes, hay un gran subenfriamiento, se forma un gran número de cristales pequeños.

El rechupe (Guliáev, 1977) es consecuencia de la contracción del metal líquido en el molde durante las etapas en que el metal está en estado líquido y durante la solidificación. Cuando se habla de alimentar el rechupe, o lo que es lo mismo, de suministrar a la pieza una cantidad extra de metal para compensar la contracción o rellenar la cavidad del rechupe, en realidad lo que se está haciendo es compensar la contracción. El procedimiento usual, para garantizar que no aparezca la cavidad del rechupe en la pieza, se debe a que la mazarota aporte la cantidad de metal líquido suficiente para compensarla contracción en estado sólido para llenar la cavidad del rechupe. Para que tenga lugar la alimentación de la contracción deben cumplirse dos condiciones:

- Que exista la suficiente cantidad de metal líquido (se garantiza con un adecuado diseño de la mazarota).
- Que el metal líquido alimente las cavidades de rechupe (se garantiza con una selección adecuada de la posición de la mazarota).

Además de las condiciones de diseño y posición de las mazarotas, existen características propias del metal que dificultan o favorecen la alimentación de la contracción.

1.4 Cavidad por contracción

La cavidad por contracción (rechupe), según (Veinik, 1968) y (Rodríguez, 2008) es una depresión de la superficie o un hueco interno en la fundición debido a la contracción por solidificación que restringe la cantidad de metal fundido disponible en la última región que solidifica. Ocurre frecuentemente cerca de la parte superior de la fundición, como se muestra en la figura 1.3.

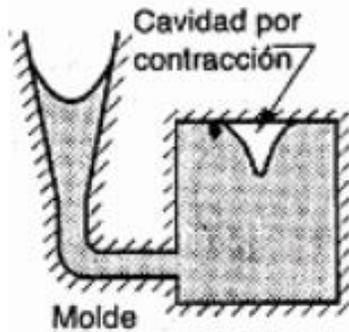


Figura 1.3. Cavidad por contracción

En la pieza fundida se pueden desarrollar varios defectos durante la solidificación según se produzca la contracción volumétrica o dirigida. Si no fuera el alto valor de la contracción del acero, estos defectos por cavidades de contracción y porosidades dispersas no se producirían.

(Veinik, 1968), plantea que aún cuando un modelo de fundición es una réplica de la pieza, no posee exactamente sus dimensiones debido al fenómeno de expansión y de contracción que se sucede en el sólido, o en el líquido, cuando se les somete a aumentos o disminuciones de temperatura; por lo tanto este es un fenómeno muy importante a tomarse en cuenta en la tecnología de fundición. Al descender la temperatura, el metal que ha sido vertido dentro de un molde se contrae en tres etapas diferentes. Esas etapas, en orden descendente de temperatura desde la de vaciado, son:

- Contracción en el líquido.
- Contracción líquido-sólido.
- Contracción en el estado sólido.

Los autores (Veinik, 1968); (Campbell J. , 1993); (Flemings, 1983) y (Quintero Hernández, 1979) plantean que, en orden descendente de temperatura, los efectos sobre la formación y sobre las características de cualquier pieza fundida dependen de la cantidad de calor que es extraído de la pieza.

Si la intensidad de extracción de calor es muy intensa, la contracción proveniente del líquido juega un rol muy importante en la solidificación, debido a que sobre la

superficie del sólido se forma una capa de sólido mucho antes de que se extraiga todo el calor de sobrecalentamiento y esa capa crea una especie de coraza; entonces, cuando se produce la posterior reducción de volumen del metal líquido genera un mayor volumen de rechupes y poros.

Varios autores (Korolkov, 1960); aseguran que la contracción de solidificación está asociada a la transformación de fase, que ocurre entre las temperaturas del líquido y del sólido. Es muy importante, porque es en esta etapa del proceso donde se produce el rechupe.

Esta contracción de solidificación en gran parte depende del rango de temperaturas de solidificación, para una aleación binaria; depende también del modo cómo se hace solidificar el metal o la aleación, ya que como resultado del cambio de volumen entre las fases líquida y sólida, se forma una cavidad de rechupe en la pieza fundida, y que cuando no se le controla, produce los defectos conocidos como esfuerzos de fase. Para metales puros y aleaciones eutécticas, las variaciones de volumen al solidificar aparecerán principalmente como cavidades concentradas de rechupe, situadas en los puntos más calientes de la pieza solidificada. En aleaciones que al solidificar lo hacen en un rango de temperaturas, el volumen de la cavidad concentrada de rechupe es menor, debido a la formación de porosidad dispersa; cuyo volumen para aleaciones con un amplio rango de solidificación será igual al volumen de cavidad de rechupe concentrado, como sucede cuando se solidifica en el vacío. Durante la solidificación bajo condiciones ordinarias, es decir a presión atmosférica se producirá algo de porosidad dispersa y por esta razón se produce el rechupe externo, así como el rechupe concentrado que no aparece en aquellas aleaciones solidificadas al vacío. El tecnólogo de fundición, mediante el adecuado uso de las mazas, toma precauciones para compensar esos dos primeros cambios volumétricos y así evitar la formación de rechupes dentro de la pieza

Al igual que la contracción en el estado líquido, la contracción en el estado sólido es una contracción lineal porque aparecen como reducciones lineales en las

dimensiones de la pieza que se está enfriando a consecuencia de las contracciones térmicas.

Durante el descenso de la temperatura, la contracción térmica es el único factor que afecta a la magnitud de la contracción lineal en sólido, a pesar de que usualmente se asume que el valor de la contracción lineal es un tercio del valor del rechupe de solidificación. Para metales puros y aleaciones que solidifican a temperatura constante el valor de esta contracción lineal está determinado de manera aproximada por el producto del coeficiente de expansión lineal por el valor de su temperatura de solidificación. Para aleaciones que cristalizan en un rango de solidificación, la contracción lineal aparece una vez que se ha establecido el esqueleto continuo en el volumen que está solidificando y por lo tanto, en presencia de una cierta cantidad de líquido remanente. Este proceso de cavidad de contracción se puede desarrollar solo durante la solidificación, (Campbell J. , 1993).

De acuerdo con investigadores como (Korolkov, 1960) y (Titov, 1981) el volumen de la cavidad de contracción tiene un valor de 6 a 8 % del volumen de la pieza fundida. Este volumen depende de la contracción del metal líquido dentro de la pieza solidificada y la contracción durante la solidificación.

El rechupe es una cavidad rugosa, siendo un hueco en la pieza fundida, usualmente de forma cónica, con una aspereza de granos gruesos en la superficie. Esta aspereza es originada por los diferentes desarrollos de las dendritas y es un factor principal por el cual las cavidades por contracción pueden ser distinguidas de las cavidades de gases. La cavidad por contracción es directamente proporcional al alto coeficiente de contracción en el acero líquido. El tamaño de la cavidad de contracción puede ser disminuido de las siguientes maneras:

- Reducir el coeficiente de la contracción volumétrica del metal líquido.
- Reducir la temperatura del acero cuando permanece en la cazuela de colada.
- Reducir el tipo de cubeta de colada.

- Incrementar la conductividad de calor del material del molde.
- Reducir los espesores de la pieza fundida.
- Reducir el rango de temperatura de la solidificación.
- Reducir el coeficiente de contracción volumétrica durante la solidificación.
- Incrementar el coeficiente de contracción del metal líquido.
- Reducir la temperatura media del metal sólido hacia el final de la solidificación.
- Tomar las medidas para igualar la temperatura en las secciones de la pieza.

1.5 Generalidades sobre los frentes de solidificación

Según (Rodríguez, 2008), al penetrar el metal en el molde comienza el proceso de transferencia de calor que provoca a la larga la solidificación del metal. Este proceso de transferencia se efectúa a régimen no estacionario, es decir, que el gradiente de temperatura y las propiedades termo-físicas del metal cambian continuamente a lo largo del tiempo. Plantea esta misma autora que la solidificación del metal comienza desde las paredes del molde hacia el interior del mismo, lo que hace que exista un frente de solidificación que avanza hacia el interior en función de la disminución de la temperatura con el tiempo (Titov, 1981; Goyos L. , 1985), de esta forma aseguran que la forma del frente de solidificación tiene una gran importancia práctica, pues la característica del rechupe depende del tipo de frente. Según (Goyos L. , 1985), las cuatro formas principales de frente son: frente plano, columnar, dendrítico y con nucleación independiente.

- Frente plano

En el frente plano se presenta en las aleaciones que solidifican a temperatura constante como los metales puros y los de composición eutéctica y en las aleaciones de pequeño intervalo de solidificación.

- Frente columnar

El frente columnar responde a las mismas condiciones del anterior, pero con condiciones de extracción del calor menos violentas.

- Frente dendrítico

El frente dendrítico se presenta en aleaciones de mediano intervalo de solidificación y se muestran picos en forma de mesetas con inicio cercano a una misma línea.

- Frente con nucleación independiente:

Se presenta en las aleaciones con amplio intervalo de solidificación. Mientras mayor sea el grado de subenfriamiento de la aleación mayor será la razón de solidificación y ambos influyen notoriamente sobre la forma del frente. La forma del rechupe depende directamente de la forma del frente de la solidificación. Se distinguen tres tipos fundamentales de rechupe.

1. En cavidades: Se presenta cuando el frente es plano o columnar, y resulta el tipo de rechupe más sencillo de alimentar.
2. Porosidad en la línea media: Se presenta cuando el frente es dendrítico y resulta complejo para alimentar.
3. Porosidad dispersa: Se presenta cuando existe nucleación independiente y resulta el más complejo para alimentar.

1.6 Alimentación de la contracción del metal

El volumen específico de las aleaciones es mayor en estado líquido que en estado sólido. Por este motivo, estos metales se contraen al solidificarse y al enfriarse. Esto provoca un déficit de volumen que se manifiesta en forma de defecto. (Veinik, 1968) y (Rodríguez, 2008), plantean que aun cuando un modelo de fundición es una réplica de la pieza, no posee exactamente sus dimensiones debido al fenómeno de expansión y de contracción que se sucede en el sólido, o en el líquido, cuando se les somete a aumentos o disminuciones de temperatura; por lo tanto, este es un fenómeno muy importante a tomarse en cuenta en la tecnología de fundición. Al descender la temperatura, el metal que ha sido vertido dentro de un molde se contrae en tres etapas diferentes. Esas etapas, en orden descendente de temperatura desde la de vaciado, son:

1. Contracción en el líquido.

2. Contracción líquido-sólido.

3. Contracción en el estado sólido.

De acuerdo con investigadores como (Korolkov, 1960) y (Titov, 1981), el volumen de la cavidad de contracción tiene un valor de 6 a 8 % del volumen de la pieza fundida. Este volumen depende de la contracción del metal líquido dentro de la pieza solidificada y la contracción durante la solidificación. El tamaño de la cavidad de contracción puede ser disminuido tomando las siguientes medidas:

1. Reducir el coeficiente de la contracción volumétrica del metal líquido.
2. Reducir la temperatura del acero cuando permanece en la cazuela de colada.
3. Reducir el tipo de cubeta de colada.
4. Incrementar la conductividad de calor del material del molde (Solidificación Direccional).
5. Reducir los espesores de la pieza fundida.
6. Reducir el rango de temperatura de la solidificación.
7. Reducir el coeficiente de contracción volumétrica durante la solidificación.
8. Incrementar el coeficiente de contracción del metal líquido.
9. Reducir la temperatura media del metal sólido hacia el final de la solidificación.
10. Tomar las medidas para igualar la temperatura en las secciones de la pieza.

Durante el descenso de la temperatura, la contracción térmica es el único factor que afecta a la magnitud de la contracción lineal en sólido, a pesar de que usualmente se asume que el valor de la contracción lineal es un tercio del valor del rechupe de solidificación. Para metales puros y aleaciones que solidifican a temperatura constante el valor de esta contracción lineal está determinado de manera aproximada por el producto del coeficiente de expansión lineal por el valor de su temperatura de solidificación. Para aleaciones que cristalizan en un rango de solidificación, la contracción lineal aparece una vez que se ha establecido el esqueleto continuo en el volumen que está solidificando y por lo tanto, en presencia de una cierta cantidad de líquido permanente. Este proceso de cavidad de contracción se puede desarrollar solo durante la solidificación (Campbell, 1993; Flemings, 1983).

1.6.1 Condiciones a para lograr la alimentación de la contracción

Para logra una adecuada alimentación de las contracciones es necesario observar dos condiciones esenciales:

- Debe existir la suficiente cantidad de metal líquido.
- El metal líquido debe llegar a las cavidades del rechupe.

La primera condición se cumple con un adecuado diseño de la mazarota, debiendo existir la suficiente cantidad de metal líquido y la segunda con una selección adecuada de la posición de la misma.

Una de las condiciones para el correcto trabajo de las mazarotas es que posea el volumen de metal líquido necesario para alimentar la contracción. Esto implica que el volumen del rechupe tiene gran importancia en el cálculo de la mazarota, (Beeley, 1972). Los métodos de cálculo de mazarotas generalmente se desarrollan para aleaciones específicas. En los métodos generales, es necesario conocer la magnitud del rechupe para aplicar correctamente las expresiones de cálculo.

Cuando se analiza una aleación de la que no se dispone de métodos de cálculo específico es necesario conocer la magnitud del rechupe para usar algún método de una aleación similar.

Es posible también en la mayoría de las aleaciones, evaluar el rechupe de forma aproximada mediante el triple del valor de la contracción tomado para la confección de la plantilla.

1.6.2 Influencia de la geometría de la pieza y la mazarota sobre la alimentación

La geometría de la pieza y de la mazarota ejerce una influencia notable en la alimentación (Goyos & Martinez, 1985).

El diseño de la mazarota incluye la determinación de la forma de la misma para garantizarla alimentación de la pieza.

De la geometría de la mazarota depende que ella sea la última en solidificar y que exista a lo largo del proceso la cantidad adecuada del metal en estado líquido.

Como parámetro geométrico fundamental que es necesario evaluar es el módulo, y es la relación existente entre el volumen contenido en una forma geométrica determinada y la superficie que la contiene.

Esto responde a una ley que se conoce con el nombre de Ley de Chovrinov o Ley de los módulos y puede deducirse a partir del análisis del proceso.

Esta ley muestra un fenómeno sumamente importante, y es que el calor contenido en un volumen dado es evacuado a través de la superficie que lo contiene y que está en contacto con el molde. Resulta evidente que mientras mayor sea el volumen de metal este demorará más en solidificarse. De forma similar mientras más extensa sea la superficie que evacua calor, la solidificación será más rápida.

De la ley de los módulos se deriva una conclusión práctica e importante (Goyos & Martinez, 1985).

La solidificación transcurrirá en una pieza de forma que las partes de la misma que tienen módulos pequeños solidifican primero y los de mayor módulo después. De esto se desprende que si la mazarota ha de ser la última en solidificarse su módulo debe ser mayor que el mayor módulo de la pieza.

A pesar de la utilidad de la ley de los módulos, debe tenerse en cuenta qué zonas particulares de la pieza pueden diferir del módulo general, por lo que se impone siempre un análisis de la presencia o no de nudos térmicos puesto que allí aparecerá el rechupe.

1.7 Aplicaciones del software AutoCAD

Es uno de los sistemas informáticos comerciales de mayor divulgación y aplicación en el mundo contemporáneo con una gran cantidad de facilidades y prestaciones que los han convertido en uno de los más populares.

Tiene poderosas herramientas para el trazado bidimensional y el acotado de dibujos de cualquier complejidad y para cualquier especialidad. Posee también herramientas para la modelación espacial de curvas, superficies y sólidos geométricos. Es programable por medio de tres lenguajes de alto nivel: AutoLISP, Visual Basic y C++.

Permite el desarrollo de bibliotecas gráficas de cualquier tipo que son utilizables desde un Centro de Diseño. Tiene varias interfaces para el intercambio de información desde AutoCAD hacia otros sistemas o de estos últimos hacia AutoCAD. Interactúa con sistema de bases de datos de proyectos. Tiene poderosas herramientas para el trabajo en redes de proyectos, incluyéndose entre ellas la utilización a ese fin de internet.

1.8 Aplicaciones del software ProCAST

El software funciona mediante elemento finito y tiene una amplia aceptación de la industria de manufactura ya que es una herramienta importante para el diseño de productos y el desarrollo de procesos que mejoren el rendimiento y calidad de las fundiciones. ProCAST (ver figura 1.4) provee una solución eficiente y exacta para satisfacer las necesidades industriales, comparado con el proceso tradicional de prueba y error. ProCAST es una solución clave para reducir los costos de manufactura, reducir los tiempos de entrega para el desarrollo de moldes y mejorar la calidad del proceso de fundición (BENAVIDES T., 2011).



Figura 1.4. Cartel del software ProCAST.

Este software proporciona una solución completa que permite evaluaciones predictivas completas del proceso de fundición incluyendo; el llenado del molde, solidificación, microestructura y simulaciones termomecánicas; estas últimas permiten evaluarla contracción de la fundición y la distorsión de la misma. ProCAST permite visualizar rápidamente los efectos del diseño del molde y permite tomar decisiones correctas en cualquier etapa del proceso de manufactura.

También aborda todas las problemáticas derivadas del proceso de fundición como análisis de ciclos, simulación de fundición por gravedad, alta y baja presión, con molde de arena, simulación del llenado, análisis de solidificación, proceso de enfriamiento, análisis de tensión y distorsión, análisis de porosidades (micro y macro).

1.9 Conclusiones del capítulo

- En la revisión bibliográfica se pudo comprobar la actualidad del tema, sin embargo no queda bien definido el proceso de solidificación de piezas tipo bolas de acero que permita establecer un proceso de simulación para determinar los defectos más comunes durante el proceso de fundición.
- El control del proceso de solidificación de una pieza en el molde es de gran importancia para lograr piezas con la menor cantidad de defectos posibles.
- La selección de las temperaturas es un parámetro de especial interés en el empleo de ProCAST para realizar análisis térmicos en el proceso de solidificación de piezas fundidas.

CAPÍTULO 2.
TECNOLOGÍA DE FUNDICIÓN

CAPÍTULO 2. TECNOLOGÍA DE FUNDICIÓN

2.1. Introducción

Debido a la importancia de evaluar la tecnología de fundición para un correcto diseño del sistema de alimentación y el control de los parámetros involucrados en el proceso de solidificación, en este capítulo se tiene como **objetivo**: plasmar la metodología de cálculo correspondiente a la fabricación por fundición en moldes de arena-arcilla de bolas de acero 70XL con 90 mm de diámetro. Para esto se define la secuencia de operaciones a desarrollar durante el proceso de fundición y se especifican las condiciones de la simulación de la moldura.

2.2. Particularidades del elemento en estudio

Las bolas en estudio, de acero 70XL para molinos de trituración de clínquer, fabricada en la EMNi de Moa, no posee orificios ni partes rectas (ver figura 2.1). Esto significa que su propia geometría proporciona transiciones suaves y un mínimo de nudos térmicos, por lo que no será necesario calcular ángulos de salida.



Figura 2.1. Bolas de molinos fabricadas por fundición.

Las bolas de molinos deben tener propiedades mecánicas específicas para su utilización en los molinos del cemento, lo que lo convierte en un material de interés para la ingeniería. La composición química de la aleación en cuestión se muestra en la tabla 2.1. Las cantidades de los elementos que participan en la composición

de la aleación se encuentran dentro del rango permisible por los estándares establecidos por la norma NC-13-05-83.

Tabla 2.1. Composición química del acero 70XL

C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Fe
0,588	0,368	0,736	0,884	0,654	0,263	Balance

Se puede observar que los elementos más representativos en la aleación lo constituyen el Mn (0,73 %), el Cr (0,88 %), el Ni (0,65 %) y el Fe (96,3 %). La gran diferencia en la cuantía de este último con respecto al resto de los elementos, es que el mismo representa junto con el carbono la base de las aleaciones de acero.

El níquel (Ni) normalmente aparece disuelto en la ferrita (formando soluciones sólidas de sustitución), dado que su solubilidad en la cementita o su tendencia a formar carburos es muy baja. El efecto principal que origina la entrada en solución sólida de otros elementos en la ferrita es la distorsión de su red cristalina (diferente tamaño atómico), que a su vez produce el endurecimiento de la ferrita.

El manganeso (Mn) y el cromo (Cr) aparecen disueltos y también forman carburos estables (generalmente más estables que la cementita), aunque si están presentes en bajas concentraciones, entran en solución tanto en la cementita como en la ferrita. El manganeso no forma carburos, sino que aparece disuelto en la cementita.

El acero 70XL es de medio contenido de carbono por contener 0,5 % de este elemento. Según su posición en el diagrama Fe-C, es de tipo hipoeutectoide. Se considera como bajo aleado al cromo y es utilizado en resortes, herramientas manuales, además de partes y piezas en los que se requiere de elevada dureza y resistencia al desgaste; propiedades estas que se logran con la inclusión en la composición química de los elementos más representativos mencionados anteriormente. Con este fin se les aplica tratamientos térmicos de normalizado, temple y revenido.

2.3. Generalidades de la proyección de la tecnología de moldeo

Teniendo en cuenta que el movimiento de los medios molturadores, una vez en funcionamiento dentro del molino, puede describirse como colisión con rotura

inducida, principalmente por impacto o como rodadura con rotura inducida, principalmente por aplastamiento y desgaste (King Wong, 2001); que según (Alcántara Yemen, 2008), la fragmentación del mineral se produce a través de los procesos de presión, impacto y erosión de los materiales involucrados en el proceso, se afirma que los cuerpos molidores deben poseer elevada resistencia al impacto y a la abrasión.

Por lo anteriormente expuesto, las bolas de molinos para la trituración de clínquer deben poseer una excelente esfericidad, mayor dureza en la superficie que en el núcleo y una adecuada composición química, aparejada con una microestructura característica que permita mostrar la resistencia mecánica necesaria para las sollicitaciones del trabajo.

Se escoge para la proyección de la tecnología, el método de moldeo químico con resina furánica autofraguante, debido a que esta tiene un tiempo más corto de endurecimiento del molde y proporciona un buen acabado superficial a las molduras.

Serán montadas en una misma caja de moldeo un total de 24 bolas, distribuidas en cuatro conjuntos de seis bolas cada uno, según se muestra en el anexo 1.

2.3.1. Selección de la temperatura de vertido, colada, tiempo de enfriamiento, desmoldeo y limpieza

El proceso de vertido al molde se realiza con cierto sobrecalentamiento de la aleación, para equilibrar la pérdida de temperatura que ocurre por transferencia de calor al entorno en el transcurso de la descarga, de la extracción de la escoria y por el contacto con las paredes de la cubeta de colada. Además, esto favorece la fluidez y mejora la capacidad de llenado del molde. También se debe tener en cuenta que las altas temperaturas de vertido propician una mayor oxidación del metal y una mayor absorción de gases.

A tales efectos (Goyos & Martinez, 1985); y (Titov, 1981) han establecidos rangos de temperaturas para el vaciado del metal de los hornos y la temperatura de vertido al molde, dependiendo de la composición química de la aleación y

espesores de la pieza, así como el tiempo de solidificación o permanencia de la pieza en el molde para realizar su desmoldeo.

Esta limpieza consiste en quitar de las superficies la arena quemada y adherida, eliminar las rebabas en las piezas moldeadas que se forman en el lugar de división del molde, así como, la superficie áspera en los puntos de acoplamiento de los elementos del sistema de alimentación, luego se debe retirar el sistema de alimentación y se logra el acabado total de la limpieza.

2.3.2. Cálculo de la masa de la bola

La masa del elemento (G) se determina mediante el cálculo de su volumen multiplicado por el peso específico de la aleación (acero), a través de la expresión 2.1.

$$G = V \cdot \rho \quad 2.1$$

El peso específico es representado por medio de la letra griega ρ y posee un valor de 7,86 kg/dm³. Mientras que el volumen (V) en dm³, se calcula por la ecuación 2.2, siendo R el radio, igual a 45 mm y π una constante adimensional equivalente a 3,14.

$$V = \frac{4}{3}\pi \cdot R^3 \quad 2.2$$

Una vez calculado el volumen de una bola, se procede a multiplicar su valor por 24, para tener el volumen necesario a alimentar y poder determinar el volumen necesario de mazarotado.

2.4. Ubicación del elemento en el molde y determinación del plano divisor

Para lograr una correcta ubicación de la pieza en el molde y determinar del plano divisor que garantice buena esfericidad y alta calidad de la moldura en el molde de arena-arcilla, es de suma importancia tener en cuenta junto a otros factores la influencia de la gravedad en el transcurso del suministro de metal líquido al interior de la cavidad. Para esto se valora que en la parte superior de la cavidad del molde

se concentran los poros de gas por la elevada temperatura del mismo, los defectos provocados por la escoria y las cavidades de contracción.

Por estas razones y teniendo en cuenta que los elementos a tratar en la presente investigación son bolas de acero (aunque de gran importancia en cuanto a la esfericidad), la ubicación elegida para el moldeo puede considerarse más conveniente durante el montaje en placa, con división al centro (figura 2.2). Con esto se logra comodidad en el moldeo y fácil extracción de la plantilla con una mínima cantidad de partes sueltas. Esta medida debe facilitar el proceso de colada, la salida de los gases y la ubicación del sistema de alimentación para contribuir a una total alimentación de la pieza.

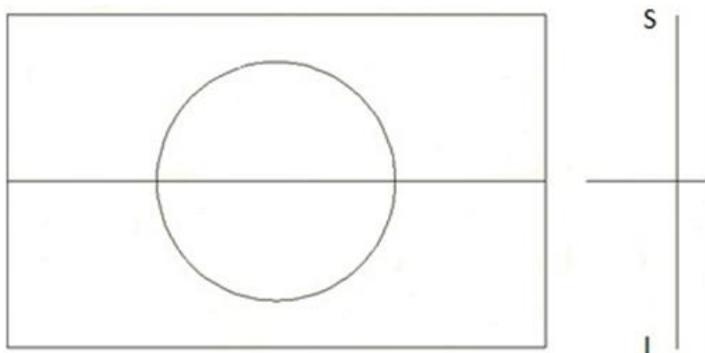


Figura 2.2. Plano divisor de la bola en el molde.

2.5. Cálculo de los espesores mínimos de pared

Para fabricar las bolas de acero 70XL, primero se debe determinar si la misma, teniendo en cuenta su diámetro, se puede obtener por fundición en moldes de arena-arcilla, según lo planteado por (Goyos L. , 1985) y (Beeley, 1972). Para ello se emplea la expresión de cálculo 2.3, recomendada para piezas macizas.

$$N = \frac{2(l) + b + h}{4} \quad 2.3$$

Aquí, N es la dimensión equivalente expresada en m, los parámetros l, b y h (expresados en metros), representan la longitud, el ancho y la altura respectivamente. Como se trata de una bola, todos estos parámetros involucrados en la expresión de cálculo, tienen el mismo valor (90 mm).

Para el caso específico del acero 70XL tratado en la presente investigación, se puede asumir la tecnología con espesores mínimos de 4 a 5 mm si $N < 0,5$. Mientras que para $N > 8$ m se toma de 30 a 40 mm.

2.6. Cálculo de las sobremedidas tecnológicas

En la producción de piezas fundidas con rebordes en metales de gran contracción, al solidificar ocurre el frenado de la misma, por lo que las dimensiones entre las superficies de los rebordes que no se maquinan se toman en la plantilla sin la disminución de la medida, o con esta considerablemente disminuida. Aquí se usan márgenes tecnológicos en la parte que no se maquina, porque no siempre es cómodo tomar algunas dimensiones durante la preparación de la plantilla.

Se conoce por contracción de la aleación (E), expresada en %, al cambio de volumen que experimenta la aleación durante su solidificación y enfriamiento (Goyos L. , 1985). Debido a la geometría esférica de la pieza y a que no posee orificios, se determina que la misma posee una solidificación libre.

La contracción de la moldura, teniendo en cuenta las dimensiones del elemento se determinan por medio de la expresión de cálculo 2.4.

$$E = \frac{l_m - l_p}{l_p} \cdot 100 \% \quad 2.4$$

En esta ecuación, l_m y l_p son la dimensión de la plantilla y de la pieza fundida respectivamente, expresada en mm.

El resultado de este cálculo será aumentado a la dimensión de la plantilla para que luego de solidificada la aleación, las bolas tengan las dimensiones nominales. Debe tenerse en cuenta que algunas circunstancias dificultan la selección de la magnitud de la contracción. Entre estas están el frenado de la contracción de la pieza fundida que se crea en el molde y que es difícil de calcular.

2.7. Cálculo y diseño del sistema de alimentación

El cálculo del sistema de alimentación para el llenado de los moldes, se realiza en dos etapas. Primero se determina el tiempo de vertido y después el área de control. Cada una de las expresiones presenta coeficientes que fueron

determinados tomando como referencia las recomendaciones de (Goyos L. , 1985). El tiempo de vertido (t) se obtiene a través de la expresión 2.5 como sigue.

$$t = S \cdot \sqrt{G} \quad 2.5$$

En esta expresión, t es el tiempo de vertido en segundos y S es un coeficiente de corrección sobre el espesor de las paredes del elemento que se obtiene a partir de los valores de densidad relativa (δ_r) por la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Valores del coeficiente de corrección sobre el espesor de las paredes (S)

δ_r	0-1,0	1,1-2,0	2,1-3,0	3,1-4,0	4,1-5,0	5,1-6,0	6,1-7,0
S	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4

La densidad relativa se logra por medio del cociente entre el peso del metal líquido en el molde (G) expresado en kg y el volumen relativo o espacial de la pieza (V), en kg/cm^3 , como se observa en la expresión 2.6. Para calcular este volumen se toman las máximas dimensiones de la pieza.

$$\delta_r = \frac{G}{V} \quad 2.6$$

El cálculo del área de control del sistema de alimentación se determina por medio de la expresión 2.7. En la misma, $\sum F_a$ es el área de control o la sumatoria de la sección alimentadora en dm^3 , K es la velocidad específica de vertido en $\text{kg/cm}^2/\text{s}$, mientras que L es el coeficiente de fluidez que se toma en un rango de 0,8-1,0.

$$\sum F_a = \frac{G}{t \cdot K \cdot L} \quad 2.7$$

La velocidad específica de vertido (K) se determina también en correspondencia con la densidad relativa (δ_r) por medio de la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Valores de la velocidad específica de vertido (K)

δ_r	0-1,0	1,1-2,0	2,1-3,0	3,1-4,0	4,1-5,0	5,1-6,0	6,1-7,0
K moldes húmedos	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,9	0,95
K moldes secos	0,95	1,0	1,15	1,2	1,3	1,4	1,5

Debido a la configuración del elemento en estudio, se determinan las áreas involucradas en el sistema de alimentación con un tragadero, dos escoriadores y

cuatro alimentadores (dos a cada lado). Estos alimentadores están conectados a una bola cada uno, por las que se conducirá el metal líquido a una mazarota que deberá suministrar metal líquido a seis bolas cada una. Con esto se tiene un total de cuatro mazarotas como se muestra en el anexo 1. Los parámetros del diseño geométrico de los mismos, se calculan mediante la utilización de tablas, a partir del área de control calculada.

La relación entre las áreas de las secciones transversales de los alimentadores, los escoriadores y el tragadero se muestran en la tabla 2.4, siendo 1,0; 2,0; 2,0 la recomendada para elementos fundidos de acero. Para determinar el área de la sección del alimentador, el valor del área de control se multiplica por F_a . Este resultado se divide entre la cantidad de alimentadores y con este valor se determinan las dimensiones según (Goyos L. , 1985).

Tabla 2.4. Relación entre alimentador, escoriador y tragadero

F_a	F_e	F_t
1,0	2,0	1,5
1,0	2,0	2,0
1,0	3,0	3,0
1,0	1,1	1,2

Para determinar el área de la sección de los escoriadores, el valor del área de control se multiplica por F_e . Este resultado se divide entre la cantidad escoriadores que se dispondrán a cada lado del tragadero y con esto se determinan las dimensiones de los escoriadores.

En el caso de la sección del tragadero, el valor del área de control se multiplica por F_a . Este resultado se divide entre uno, puesto que es la cantidad de tragaderos a emplear para hacer entrar la aleación líquida al molde y con este valor se determinan las dimensiones.

2.8. Cálculo del rechupe específico

Cada aleación presenta una contracción volumétrica diferente y por tanto, disímil volumen de rechupe. Las aleaciones con mayor volumen de rechupe como los aceros, presentan una mayor necesidad de alimentación, mientras que las de baja contracción presentarán necesidades menores.

Para el cálculo del rechupe específico se tiene en cuenta el tipo de aleación y el porcentaje de composición. Para el caso del acero es posible evaluar el rechupe con bastante certeza mediante la expresión 2.8.

$$RE = REC + 1,03 \cdot \%Si + 0,0585 \cdot \%Mn + 0,12 \cdot \%Cr - 0,0354 \cdot \%Ni - 0,53 \cdot \%W + 1,7 \cdot \%Al + 0,013 \cdot (T - 1600) \quad 2.8$$

En esta expresión, RE representa el rechupe específico en %; REC es el rechupe de la aleación según su contenido de C en % y T es la temperatura de vertido al molde en °C. Se conoce a través de lo planteado por (Goyos L. , 1985), que el valor del rechupe de la aleación según su contenido de C, se puede determinar a una temperatura de 1600°C con la ayuda de la tabla 2.5 como sigue.

Tabla 2.5. Contenido de carbono a 1600 °C

% de C	0,0	0,1	0,2	0,4	0,8	1,0	1,2
REC	2,3	3,7	4,5	5,5	6,7	7,2	7,5

2.9. Determinación del volumen de mazarotado

Para considerar la presencia de mazarotas en una tecnología de fundición es de suma importancia el conocimiento del valor de los módulos. Según consideraciones de (Goyos L. , 1985), el módulo de una pieza o área de esta, es la relación existente entre el volumen de su forma geométrica y el área superficial que la contiene.

La mazarota debe contener el suficiente metal en estado líquido para alimentar la pieza, teniendo en cuenta la utilización del metal contenido y su propio rechupe. Su módulo debe ser un 20 % mayor que el de la pieza o área de alimentación, para que la nutra satisfactoriamente. Este incremento se toma para compensar el aumento de la superficie de la mazarota, que ocurre cuando se forma la cavidad de contracción de esta. Estas condiciones se expresan mediante las expresiones 2.9 y 2.10.

$$M_m \geq 1,2M_p \quad 2.9$$

$$V_m \geq \frac{V_p \cdot RE}{U - RE} \quad 2.10$$

En estas expresiones de cálculo, M_m y M_p son el módulo de la mazarota y de la pieza respectivamente, mientras que V_m representa el volumen de la mazarota y V_p el volumen de la pieza. El parámetro U contabiliza hasta qué punto el metal de la mazarota desempeña un papel activo. En este caso, se escogen mazarotas lateral cilíndrica, por lo que el porcentaje de utilización del metal (U) es de 14%.

2.10. Cálculo del número necesario de mazarotas

La necesidad del cálculo del número necesario de mazarotas está dada por el hecho de que la misma es capaz de alimentar tan solo a la porción de la pieza o sistema de alimentación que la rodea. La distancia a que alcanza efecto el mazarotado en la pieza depende del material y de la geometría presente y se conoce como distancia de alimentación (DA).

En el caso de estudio actual, quien determina la cantidad de mazarotas no es la DA, sino la propia geometría del sistema de alimentación, según el anexo 1. Al analizar el sistema de alimentación propuesto, se evidencia que existe complejidad en el mismo. Cada bola representa un elemento a alimentar, por lo que son 6 esferas para cada mazarota (4) en el sistema de alimentación dentro de la misma caja.

2.11. Cálculo de las dimensiones de las mazarotas

El cálculo de las dimensiones de las mazarotas, para el objeto de estudio actual, se realiza según recomendaciones de (Beeley, 1972) y (Goyos & Martinez, 1985). A continuación se enumeran los parámetros a tener en cuenta, definidos por las dimensiones de la pieza según se muestra en la figura 2.3 con los parámetros de la tabla 2.6.

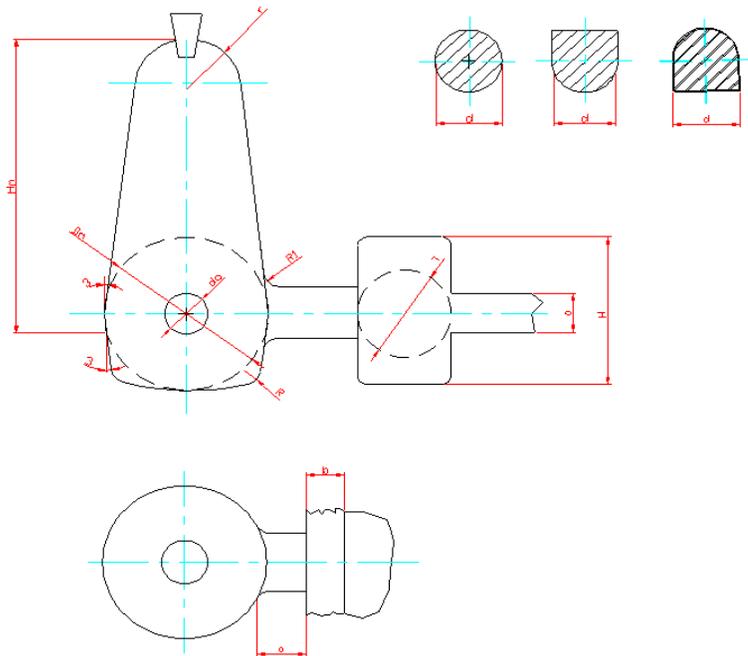


Figura 2.3. Dimensiones básicas de las mazarotas cilíndricas.

Tabla 2.6. Mazarotas laterales cilíndricas cerradas

Dimensiones de la pieza	D, H, L, b, a (De acuerdo a la forma de la sección de la pieza a alimentar)
Volumen de la pieza	V_p (Volumen a alimentar por la mazarota)
Diámetro de la esfera de metal	$d_0 = 0,4\sqrt[3]{V_p}$
Dimensiones del cuello de la mazarota	$B = d = 1,5 T$
Longitud del cuello de la mazarota	$h = 0,2 D_m$
Radios de redondeo	$R = 0,2 D_m$ (fondo de la mazarota.) $R_1 = 0,05 D_m$ (cuello de la mazarota.)
Diámetro del círculo inscripto.	$D_m = d_0 + B$
Altura de la mazarota.	$H_m = d_0 + 1,7 D_m$

2.12. Dimensiones de las cajas de moldeo

Las dimensiones de la caja de moldeo se determinan por las dimensiones de la pieza fundida, cantidad de piezas a moldear, posición, dimensiones de las mazarotas, sistema de alimentación o por las dimensiones de la portada de sus machos si están presentes en la pieza.

Se tiene en cuenta que la distancia en la capa de mezcla entre la cavidad del molde y las paredes de la caja de moldeo tienen que asegurar la resistencia

debida al molde, para evitar su destrucción y deformación por la acción de las presiones estática y dinámica del metal vertido. Además, que las dimensiones de la caja de moldeo no deben ser excesivas porque aumenta la laboriosidad en la producción del molde y el consumo de la mezcla de moldeo. Las distancias mínimas entre las diferentes partes de la cavidad del molde y las partes de la caja de moldeo se obtienen según (Goyos & Martinez, 1985), a través de la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Distancia permisible entre piezas y elementos del molde

Distancia Permisibles										
Distancias pieza-pieza y pieza-molde										
Tipo de pieza	Dimensiones									
	a	b	B	s			d			
Pequeña	20 – 30	35 – 60	50 – 75	0,3 de la altura de plantilla			0,5 de la altura de la plantilla			
Mediana	50 – 75	75 – 100	100 – 125							
Grande	125 – 175	150 – 200	175 – 200	-			-			
Distancias pieza-conductos de alimentación										
Base del conducto (C) (mm) d - a	Tipo de molde	Masa de la pieza (kg)								
		De a	50	51	251	501	50	51	251	501
		K1								
- 25	Seco		30	35	-	-	30	35	-	-
	Verde		50	60	-	-	30	35	-	-
26 – 50	Seco		40	40	45	50	40	40	45	50
	Verde		50	55	60	70	45	50	55	60
51 -	Seco		50	50	55	60	50	50	55	60
	Verde		60	65	70	80	60	60	65	70

2.13. Modelación y simulación del proceso de colada en el ProCAST

Durante la solidificación de las bolas de molino luego de la colada en el molde, ocurre un proceso térmico transitorio por el contacto de la aleación con las

paredes de la cavidad, en donde se tiene en cuenta la transferencia de calor por conducción y convección. Para hacer el dibujo del molde con las dimensiones según los cálculos realizados, se utiliza el software profesional AutoCAD, el cual está dotado de herramientas para diseñar elementos industriales. El dibujo se exporta hacia el software profesional ProCAST, puesto que este se enfoca en la simulación del proceso de fundición, conteniendo una gran variedad de bases de datos de diversos materiales. En la investigación se tiene en cuenta varias secciones del molde, según muestra la figura 2.4.

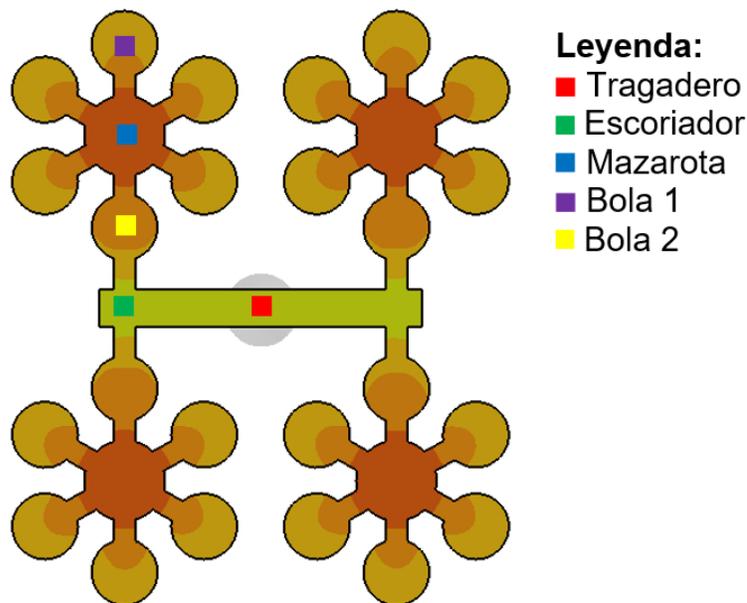


Figura 2.4. Secciones del molde usadas en la simulación.

Las propiedades del material del molde son constantes y las del acero como, la conductividad térmica y la entalpía están en correspondencia con los valores de temperatura, estos fueron exportados de la página (MatWeb).

Las condiciones a tener en cuenta en la simulación del proceso de solidificación son:

- Temperatura de vertido, se selecciona teniendo el tipo de material de la pieza a fundir, estas se escogen en un rango de 1 480– 1 500 °C.
- Conductividad térmica del acero, este parámetro se selecciona en correspondencia con la temperatura con un valor de 46,6 W/mK.

- Densidad del acero es 7,87 g/cm³.
- Conductividad térmica del molde, se selecciona teniendo en cuenta las características de la mezcla de moldeo con un valor de 0,33 W/mK.
- Densidad del molde (1,6 g/cc).
- Calor específico del molde (0,753 J/g°C).

Se escogen estas variables porque son las que tiene mayor incidencia en el proceso de solidificación desde el estado líquido al sólido en las piezas fundidas seleccionadas.

Los pasos a seguir para realizar la simulación por el método de elementos finitos (M.E.F) son los siguientes:

- Definir el modelo geométrico del molde.
- Establecer las condiciones de frontera.
- Definir el mallado.
- Corrida de la simulación.
- Procesamiento.

2.14. Conclusiones del capítulo 2

- Quedó plasmada la metodología de cálculo correspondiente a la fabricación por fundición en moldes de arena-arcilla de bolas de acero 70XL con 90 mm de diámetro.
- Se escoge para la proyección de la tecnología, el método de moldeo químico con resina furánica autofraguante.
- Se dispone de un total de cuatro mazarotas con el objetivo de alimentar seis bolas cada una, para un total de 24 bolas en el molde.

CAPÍTULO 3
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción

En este capítulo se tiene como **objetivo** exponer los resultados obtenidos del desarrollo de la tecnología de fundición para la obtención de bolas de acero 70XL para molinos de trituración de clínquer. También da lugar a los resultados derivados de la modelación y simulación del proceso de enfriamiento de la aleación en el interior del molde.

3.2. Temperatura de vertido, colada, tiempo de enfriamiento, desmoldeo y limpieza

Los parámetros de llenado del molde son una etapa importante en la obtención de la pieza fundida, de estos depende en gran medida el éxito en la obtención de piezas fundidas sin defectos, los factores involucrados en el llenado, son la temperatura de vaciado del horno, la temperatura de vertido al molde y la permanencia del molde antes de ser desmoldeado.

Las temperaturas de vaciado del horno a la cubeta de colada y de vertido al molde, son seleccionadas según las recomendaciones para piezas elaboradas de acero, con valores de 1 580 °C y 1500-1480 °C respectivamente. La moldura deberá tener un tiempo de permanencia en el molde antes de ser extraída de 5 horas, para garantizar una total solidificación de cada una de las bolas.

Una vez alcanzado el tiempo requerido para el desmoldeo, las bolas se extraen de los moldes mediante la utilización de una desmoldeadora Webac, que consiste en un sacudidor con una estación de desmoldeo por vibración con rejilla de 2 x 2 m y una carga máxima de cinco toneladas.

Por último se realiza la limpieza consistente en quitar de las superficies la arena quemada y adherida, eliminar las rebabas en las piezas moldeadas que se forman en el lugar de división del molde, así como, la superficie áspera en los puntos de acoplamiento de los elementos del sistema de alimentación, luego se debe retirar el sistema de alimentación con electrodos de carbón y se logra el acabado total de

la limpieza para el caso de las bolas con tambor rotatorio, durante un tiempo aproximado de 45 minutos para mejorar el acabado superficial.

3.3. Determinación de la masa de la bola

Para determinar la masa del elemento en estudio se tuvieron en cuenta los aspectos que involucran su magnitud en kilogramos, como son cálculo de su volumen multiplicado por el peso específico de la aleación (acero), a través de la expresión 2.1. Con un peso específico de $7,86 \text{ kg/dm}^3$, un radio de 45 mm y un volumen (V) de $0,3815 \text{ dm}^3$, obtenido por la expresión 2.2, se tiene un valor de 3 kg.

Con el volumen de la bola y la masa de la misma se tiene que las mazarotas diseñadas deberán suministrar una cantidad de material que alimente un total de $9,156 \text{ dm}^3$, puesto que son un total de 24 bolas en toda la geometría de la moldura.

3.4. Determinación de los espesores mínimos de pared

Una vez analizada la posibilidad de obtener el espesor mínimo del elemento, que coincide con su propio diámetro (90 mm) con la ayuda de la expresión 2.3, teniendo en cuenta que los parámetros l , b y h (expresados en metros), representan la longitud, el ancho y la altura respectivamente con una medida de 90 mm cada uno se tiene una dimensión equivalente N de 0,09 m, por lo que se cumple la condición planteada en el epígrafe 2.5 y se determina que las bolas pueden obtenerse por el método de fundición en moldes de arena.

3.5. Determinación de las sobremedidas tecnológicas

En la determinación de la sobremedida tecnológica se tuvo en cuenta lo exigido por la expresión 2.4 para el cálculo de la contracción de la fundición. El diámetro del elemento una vez fundido (l_p) es de 90 mm, mientras que el valor del porcentaje de contracción del acero (E) es de 2 % respectivamente. Por tal razón, la sobremedida tecnológica o dimensión que se le da a la plantilla (l_m) para contrarrestar el cambio de volumen que experimenta la aleación durante su

solidificación y enfriamiento es de 2 mm de longitud, puesto que l_m da como resultado 91,8 mm.

3.6. Determinación y diseño del sistema de alimentación

Mediante el desarrollo de las expresiones de cálculo 2.5-2.10, se determinaron los parámetros fundamentales correspondientes al diseño de la tecnología de fabricación por fundición de las bolas de molino.

El tiempo de vertido (t) se obtuvo a través de la expresión 2.5, relacionando la masa de las bolas a obtener y el coeficiente de corrección sobre el espesor de las paredes del elemento(S). Un total de 24 bolas de 3 kg cada una en el molde suma una masa total de 72 kg. A partir de un valor de densidad relativa (δ_r) de 0,1886 kg/cm^3 , se tiene que el coeficiente S es de 0,8, con lo que el tiempo de vertido es de 7 segundos.

La determinación del área de control del sistema de alimentación se logra por medio de la expresión 2.7. Esta relaciona la masa, velocidad específica de vertido (K) en $\text{kg}/\text{cm}^2/\text{s}$ y el coeficiente de fluidez (L) igual a 1.

Los alimentadores tendrán una geometría cilíndrica con un diámetro de 13 mm. Las secciones transversales de los dos decantadores de escoria o conductos de repartición poseerán dimensiones de b , α , h y r con valores de $39 \times 52 \times 22 \times 5$ mm según se muestra en la figura 3.1.

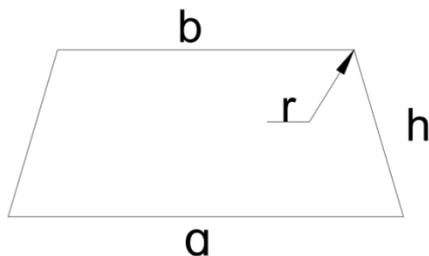


Figura 3.1. Sección transversal de los alimentadores.

Las dimensiones del tragadero se toman según la figura 3.2 con dimensiones de diámetro del tragadero (D), R, r, H_1 con valores de $36 \times 25,5 \times 7 \times 12$.

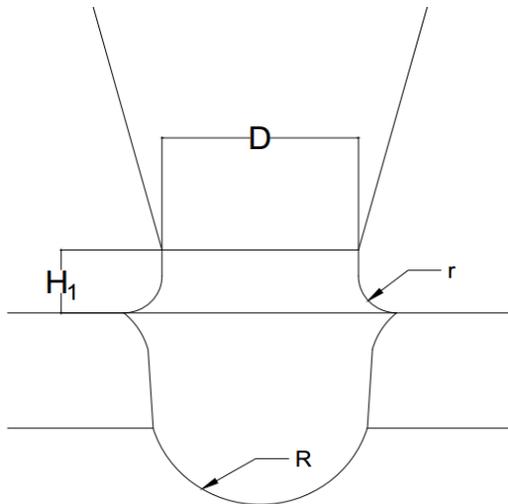


Figura 3.2. Secciones del tragadero.

Tabla 3.1. Parámetros de diseños del sistema de alimentación de las bolas

Ecuaciones	Denominación	Resultado	Multiplicando por 24 bolas	U/M
2.8	Rechupe específico	4,71	-	%
	Volumen del mazarotado	$\geq 0,1927$		dm ³
2.1	Masa de la bola	3	72	kg
2.2	Volumen de la bola	0,381	9,16	dm ³
	Módulo de la pieza	0,625		mm
	Módulo de la mazarota	$\geq 0,750$		mm
	Número necesario de mazarotas	4	-	U
	Diámetro de la base del tragadero	36		mm
	Área de sección del alimentador	2,5		mm ²
	Área de sección del escoriador	10		mm ²
	Área de sección del tragadero	10		mm ²

Por el contenido de la tabla anterior se puede inferir que la condición establecida por (Goyos & Martinez, 1985), para determinar el correcto funcionamiento de las mazarotas por el método de los módulos se cumple, puesto que el valor de las mismas es superior al 20 % del módulo de las bolas.

Se determinaron las dimensiones de las mazarotas que alimentan el molde de las bolas. En la figura 3.3 se muestran los resultados alcanzados definidos por las dimensiones del molde.

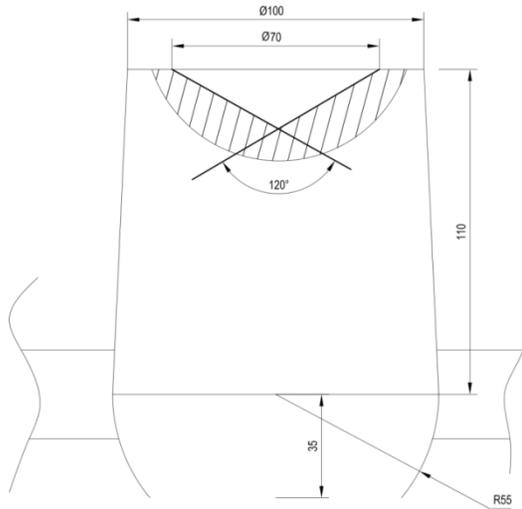


Figura3.3. Dimensiones de las mazarotas

3.7. Dimensiones de las cajas de moldeo

Teniendo en cuenta las dimensiones de los sistemas de alimentación y las consideraciones que se han establecido en el capítulo anterior, se seleccionó para la realización del moldeo de la tubería en T una caja de moldeo con las siguientes dimensiones: 1 000 X 800 X 400. Un ejemplo del molde con el sistema de alimentación y las bolas de acero se muestra en la figura 3.4.

Para el moldeo de la posición superior de las bolas la caja: 1000 x 800 x 270 mm.

Para el moldeo de la posición inferior de las bolas la caja: 1000 x 800 x 130 mm.

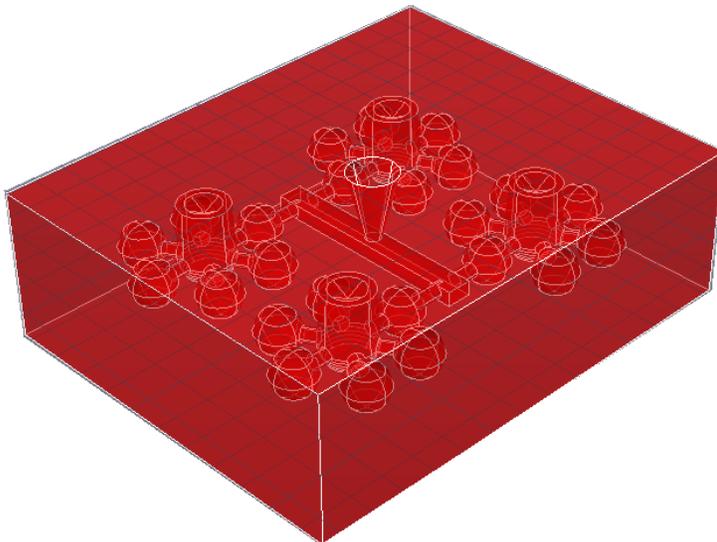


Figura 3.4. Caja de moldeo diseñada en AutoCAD.

3.8. Resultados de la simulación del proceso de vaciado

Para la valoración de los resultados obtenidos en el proceso de simulación en el ProCAST, se tuvieron en cuenta las condiciones de temperatura de vertido, conductividad térmica y densidad del acero, además de la conductividad térmica, el calor específico y la densidad del molde, planteadas en el epígrafe 2.13.

La figura 3.5 muestra el mallado con la cantidad de nodos con que se realiza la modelación del molde diseñado. Los puntos señalados en la figura representan la ubicación de las secciones de interés para la investigación, puesto que se consideran partes elementales del sistema.

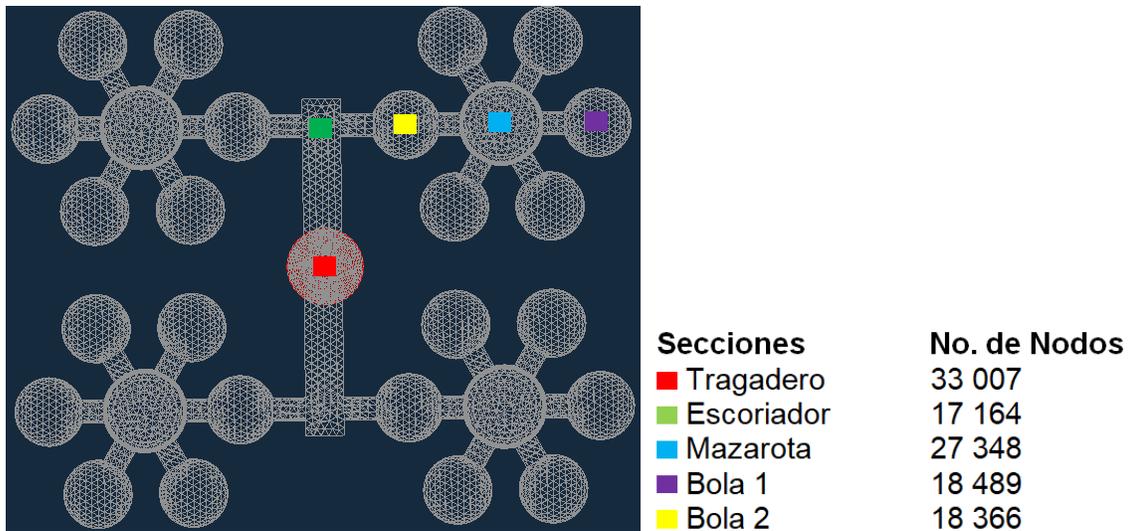


Figura 3.5. Mallado de la simulación.

3.8.1. Dirección del vector del fluido y secuencia de llenado

Al sistema diseñado se le realizaron simulaciones para observar las direcciones que toma el fluido una vez en contacto con el molde, teniendo en cuenta el tiempo transcurrido y las diferentes partes del sistema.

A través de la figura 3.6 se comienza a observar el patrón de flujo continuo que asume la aleación líquida desde que se vierte en el molde (cero segundos) con temperatura de 1 500 °C. A 0,37 segundos el fluido se transporta por los escoriadores (figura 3.7) hasta llegar a las esquinas del mismo. Aquí se observa

que choca en las paredes en un tiempo aproximado de 0,59 segundos y rebota haciendo un movimiento de dispersión hacia varios lados (figura 3.8).

Para entrar a la bola 2, primero pasa por los alimentadores como se observa en la figura 3.9. En este momento, debido al ángulo de inclinación del elemento y a la velocidad del fluido, el líquido sube por las paredes de la sección correspondiente, haciendo contacto con la superficie de la bola, pero sin llenarla por completo, puesto que es necesario compensar la necesidad de metal de todo el sistema incluyendo las mazarotas, para que exista un equilibrio y llenado parejo del molde.

En la figura 3.10 y 3.11 se observa que luego de la sección dos, el líquido fluye hacia las mazarotas, las que están dispuestas con un volumen suficiente como para alimentar a través de los canales diseñados a la bola 1 y al resto del sistema. En este instante ya han transcurrido alrededor de 2,50 segundos y la bola 2 está prácticamente llena, a diferencia del resto de las esferas. Esto se debe a que en el diseño del sistema de alimentación, la bola 2 también funciona como alimentador de las mazarotas. Cuando ha transcurrido todo este tiempo, la fracción de sólido en la aleación es de 4,3 %.

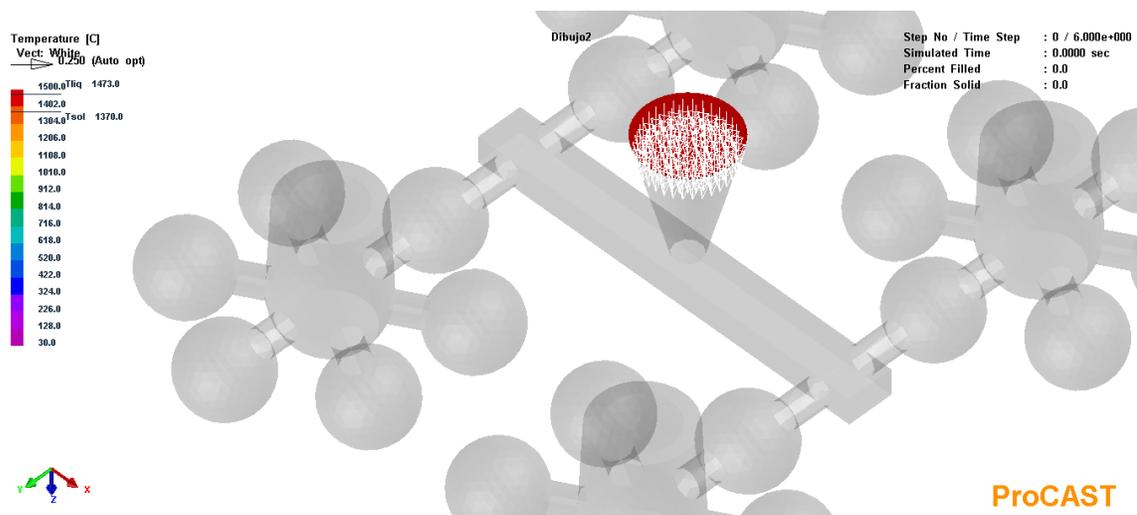


Figura 3.6. Dirección del fluido a 0 segundos.

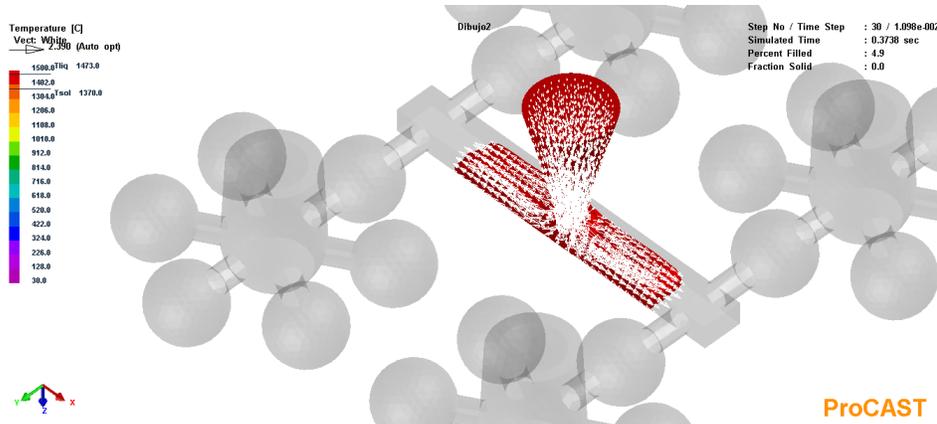


Figura 3.7. Dirección del fluido a 0,37 segundos.

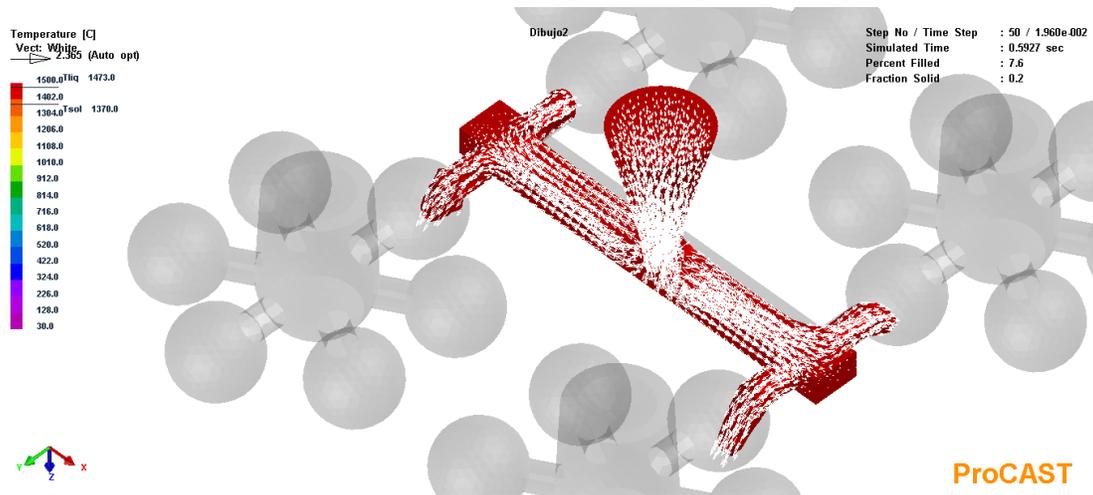


Figura 3.8. Dirección del fluido a 0,59 segundos.

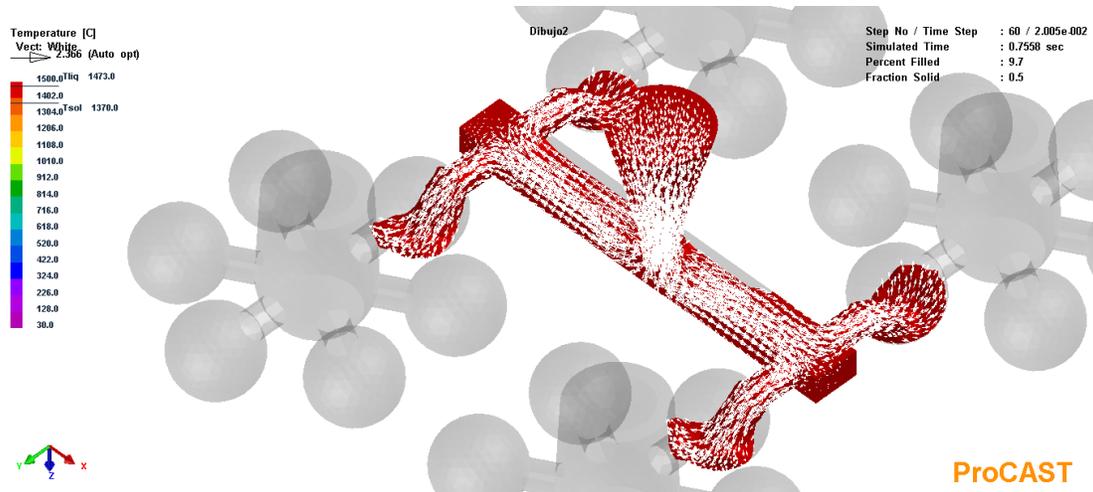


Figura 3.9. Dirección del fluido a 0,75 segundos.

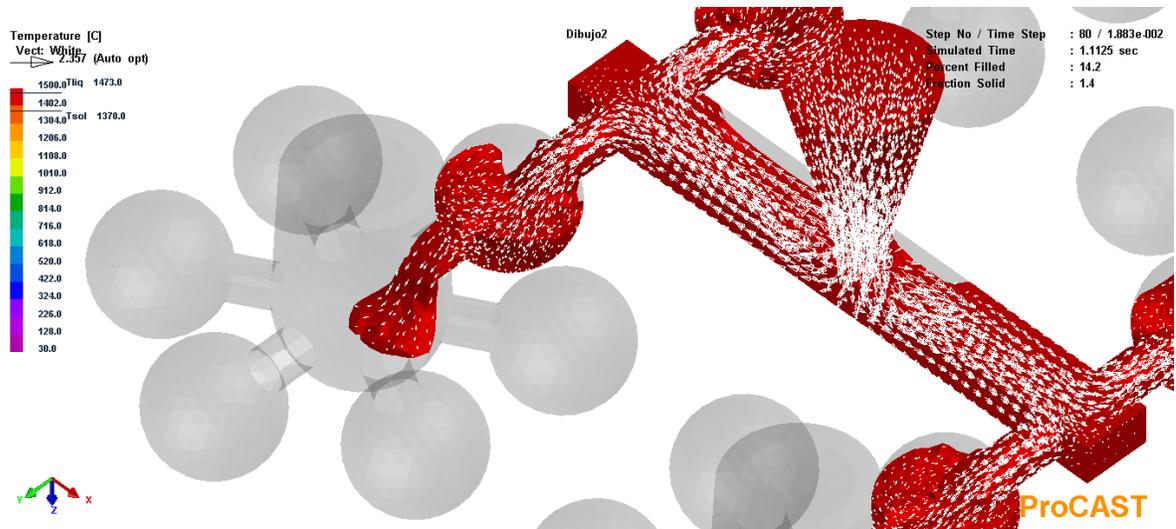


Figura 3.10. Dirección del fluido a 1,11 segundos.

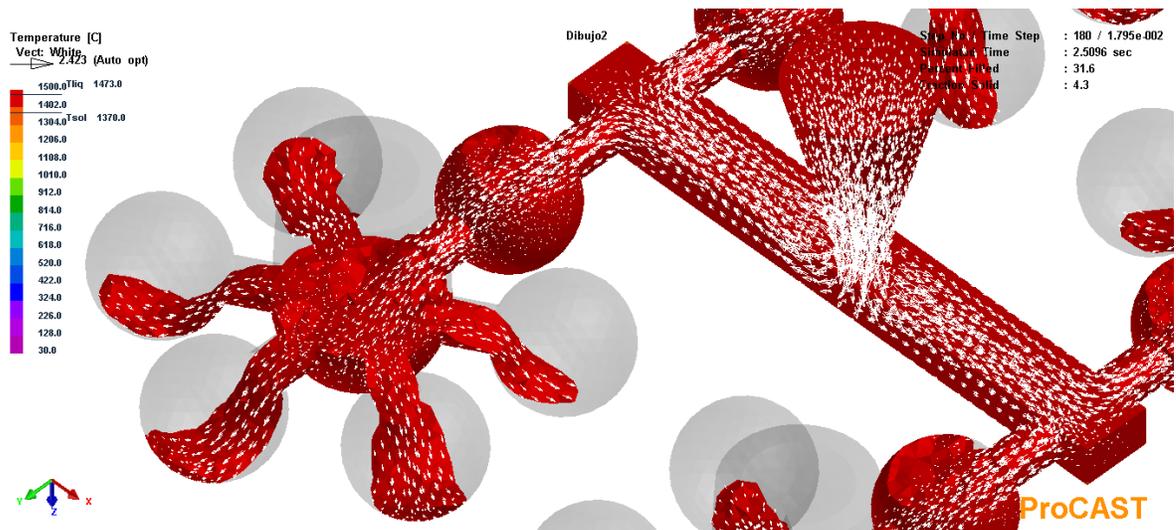


Figura 3.11. Dirección del fluido a 2,50 segundos.

3.8.2. Simulación de la fracción de sólido

Debido a que durante el llenado y enfriamiento del molde existe una variación de los coeficientes de transferencia de calor (HTC), los cuales pueden ser determinados utilizando los beneficios del software ProCAST, teniendo la condición inicial de la temperatura de colada, las fracciones de sólido de la aleación y teniendo en cuenta el porcentaje de llenado del molde y el tiempo transcurrido, se muestran en las figuras 3.12-3.16.

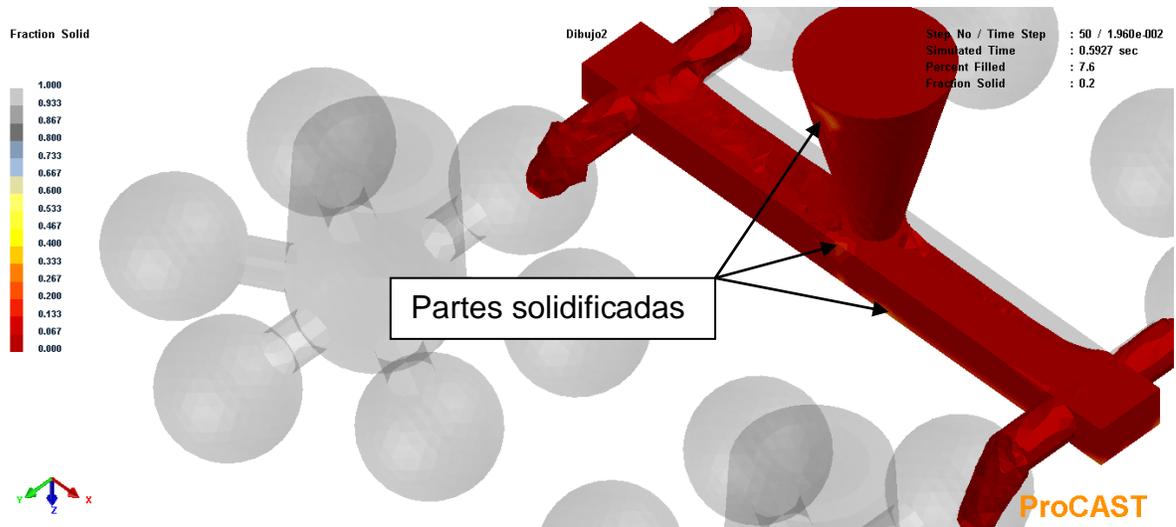


Figura 3.12. Fracción de sólido a los 0,59 segundos.

La figura 3.12 refleja que el primer porcentaje de solidificación (0,2 %) ocurre cuando el molde está lleno en solo 7,6 % y cuando ha transcurrido un tiempo de 0,59 segundos. Esto se debe a la transferencia de calor que surge con el contacto de la aleación líquida y las paredes del molde.

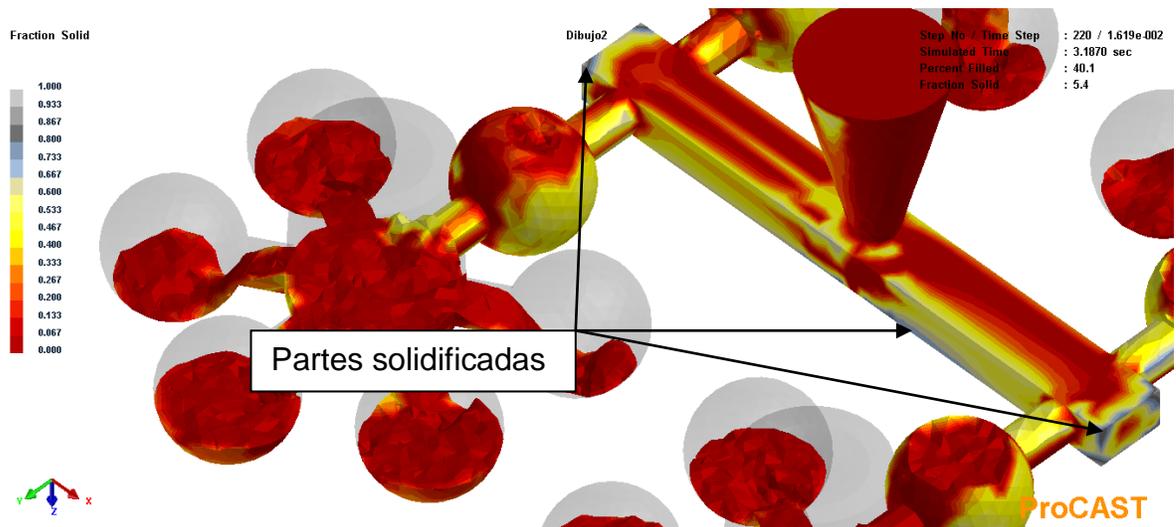


Figura 3.13. Fracción de sólido a los 3,18 segundos.

Cuando ha transcurrido un tiempo de 3,18 segundos, las partes de la aleación que se ha solidificado (coloreado en gris y azul dentro del molde), con un llenado de 40,1 %, representan el 5,4 %. La simulación muestra que en este momento la superficie de la bola 2 ya comenzó su proceso de solidificación. Sin embargo se intuye que en su interior, la misma mantiene metal en estado líquido, puesto que

las restantes partes del molde no han sido llenadas y deben ser alimentadas con la aleación que le suministra esta sección a la mazarota.

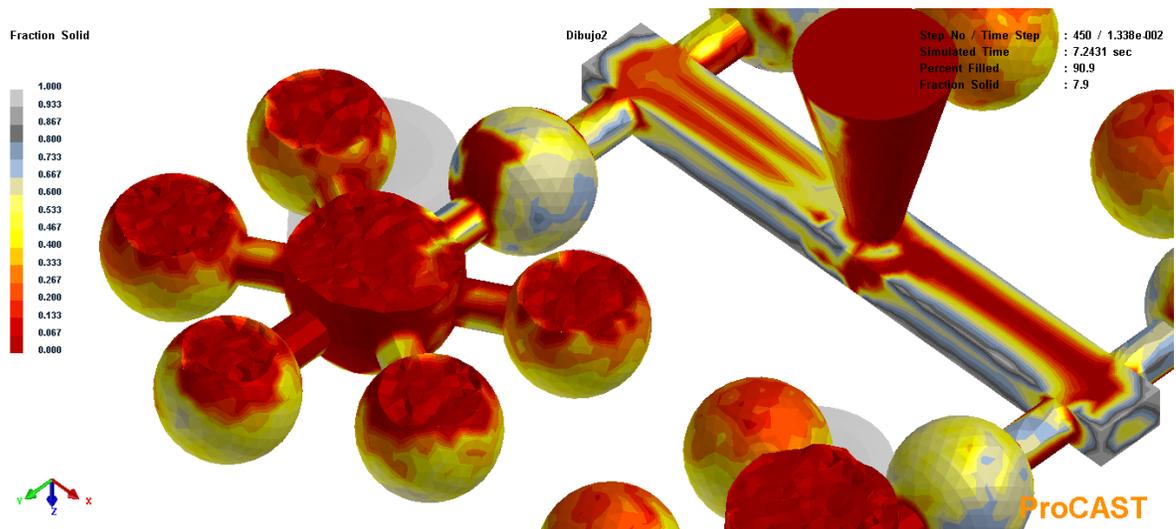


Figura 3.14. Fracción de sólido a los 7,24 segundos.

A los 7,24 segundos, el molde está prácticamente lleno con un 90,9 %. La fracción de metal que llegó a la temperatura de sólido es de 7,9 %. Se visualiza además, que las bolas en su mayoría están prácticamente llenas y con gran porcentaje de solidificación, aunque su parte superior permanece sin llenar o no se ha endurecido todavía. Por este motivo es muy importante dar a las bolas fundidas dentro del molde, el tiempo recomendado de descanso.

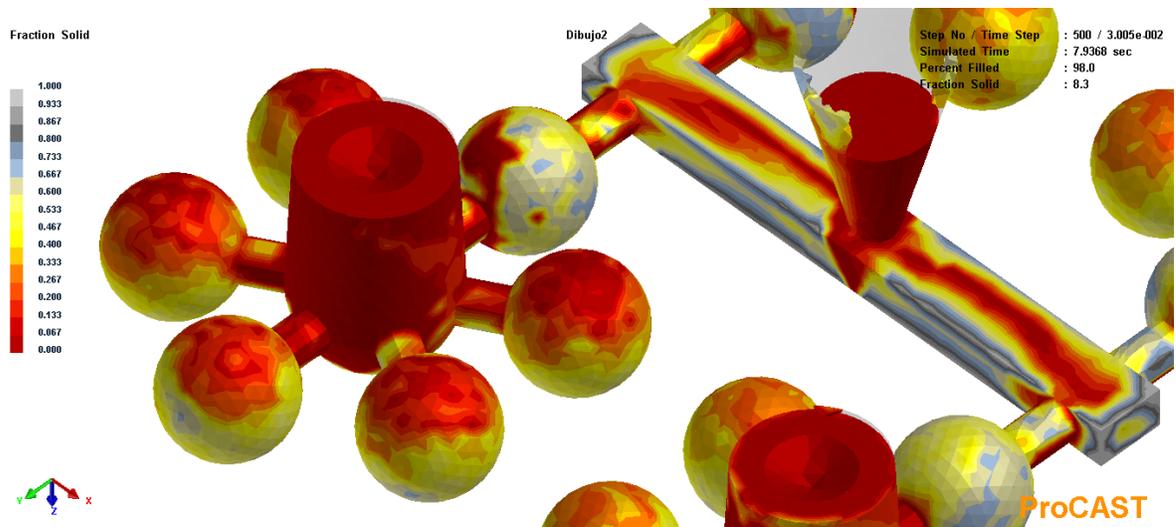


Figura 3.15. Fracción de sólido a los 7,93 segundos.

Las secciones del molde terminan de llenarse cuando ha pasado un tiempo de 7,93 segundos. Esto contrasta con el cálculo del tiempo de vertido calculado por métodos matemáticos en el epígrafe 2.7, que fue de 7 segundos. Se comprueba satisfactoriamente que las partes que permanecen más calientes dentro del molde corresponden a la sección de las mazarotas, lo que sugiere que en la práctica el diseño realizado garantiza el suministro de metal líquido a las bolas.

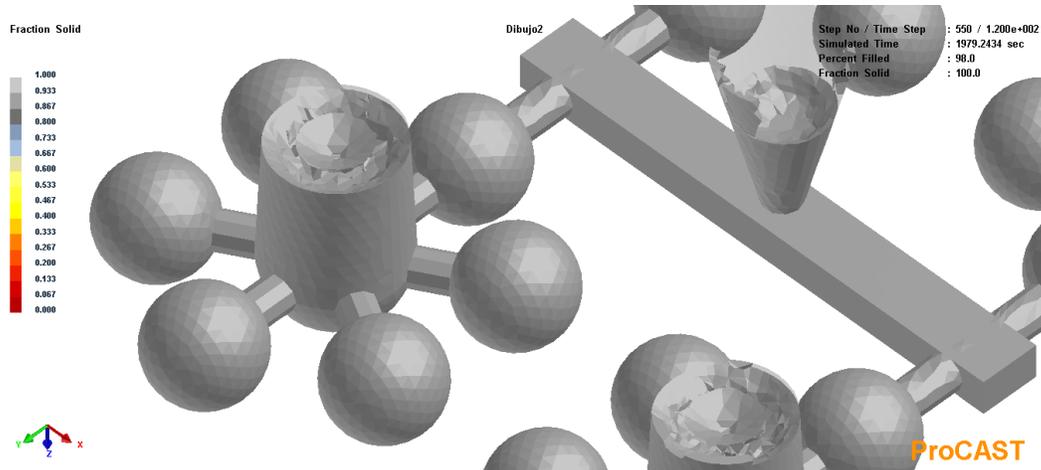


Figura 3.16. Fracción de sólido a los 1 979,24 segundos.

Por el método de la simulación escogido se determina, que la aleación en todas las partes del molde queda totalmente solidificada a los 1 979,24 segundos. Se comprueba además por medio de la figura 3.17, que con las dimensiones dadas al diseño, el porcentaje de porosidad en la moldura será mínimo, puesto que las partes que solidifican de último en el molde, poseen un valor de 0 a 6,67 % de poros, lo que resulta insignificante para las bolas.

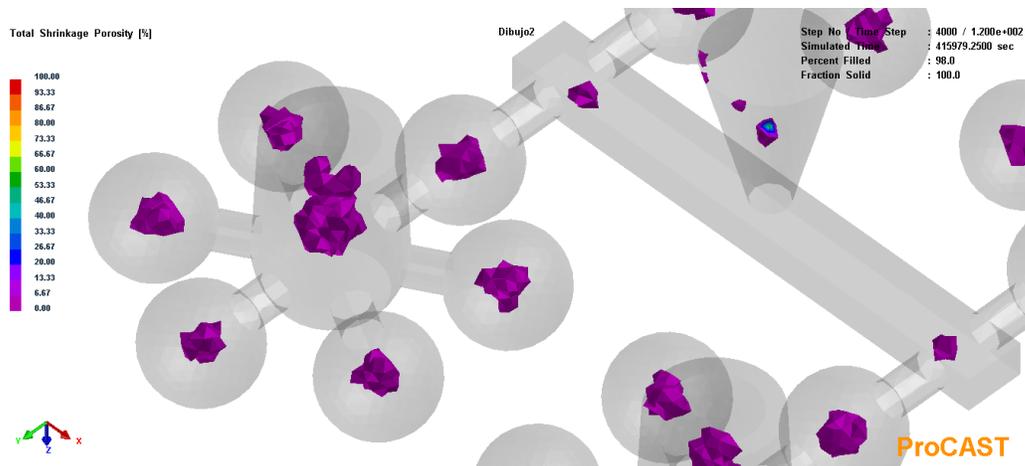


Figura 3.17. Fracción de sólido a los 1 979,24 segundos.

3.8.3. Curvas de enfriamiento

La figura 3.18 representa la curva de enfriamiento. De modo general se observa una solidificación pareja, de lo que se infiere un proceso de solidificación dirigida. En un plano más detallado se interpreta que cuando ha transcurrido un tiempo de aproximadamente 10 segundos, la distribución de temperatura en el molde, de mayor a menor, se distribuye en mazarota, bola 2, bola 1 y escoriador respectivamente.

A los 20 segundos, la bola 1 alcanza menores valores de temperatura, debido a que es la sección del molde menos afectada por el flujo de metal. Luego, las curvas se vuelven a unir, por lo que el enfriamiento es más parejo.

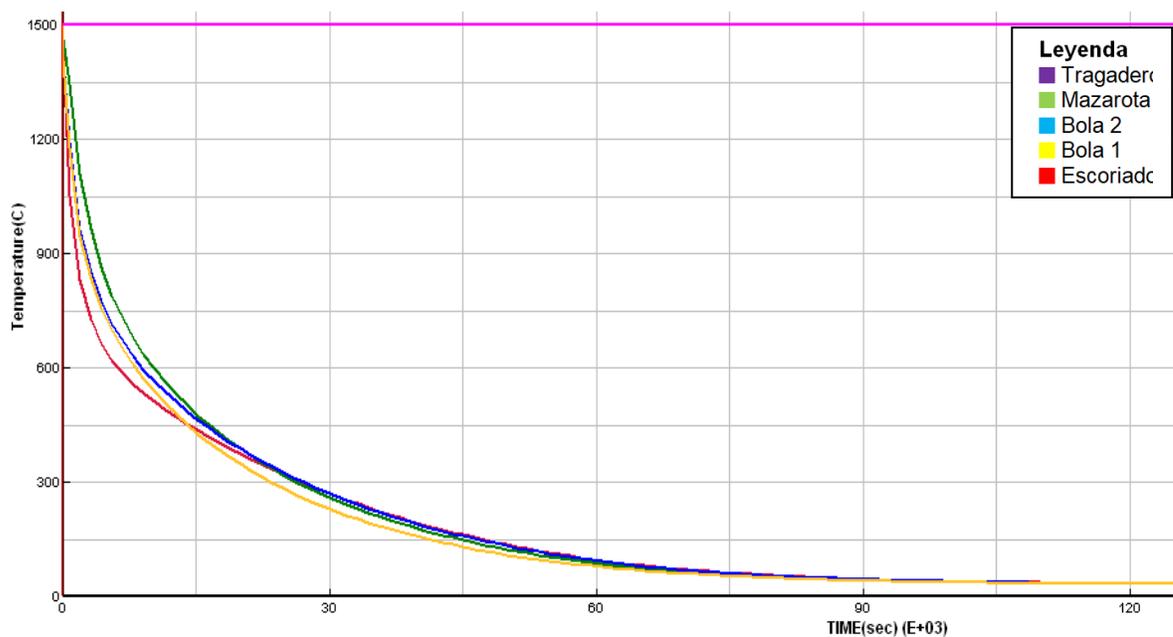


Figura 3.18. Curva de enfriamiento de la aleación en el molde.

3.9. Costo de producción de la bola según la EMNi

La producción de un producto está estrechamente relacionado con su costo de producción, el cual, para ser comercializado deberá tener precios competitivos con los obtenidos por otros fabricantes, de lo contrario lejos de proporcionarle eficiencia a las empresa cubanas se incurriría en grandes pérdidas a las mismas. A continuación en la tabla 3.2 se muestra el costo de producción de la presente tecnología de las bolas fundidas según datos de la EMNi.

Tabla 3.2. Precios por unidades de bolas

Precio por unidad (Fundición, EMNI)			
Tipo de Bola	MN	CUC	Total
90 mm	\$ 11,20	\$ 9,60	\$ 20,74

El costo de producción alcanzado en moneda nacional por la EMNI es aceptado por las empresas cementeras cubanas.

3.10. Impacto medio ambiental

La Empresa Mecánica del Níquel “Comandante Gustavo Machin Hoed de Beche”, es altamente generadora de residuos sólidos y gaseosos, provenientes fundamentalmente de los procesos de fundición y maquinado. En la fundición se generan gases nocivos que van a parar en la atmósfera afectando así el medio circundante y la vida de la flora y la fauna de las zonas aledañas. Además de arena de moldeo que se derrama, la cual posee varios componentes como aglutinantes, melaza, que de cierta forma inciden en los suelos. Incorporar el factor ambiental en la industria y en general en la sociedad es un objetivo de especial relevancia en el mundo, de ahí que sea importante hacer el mayor énfasis en mantener un estricto control del proceso, lo cual se une al factor económico directo.

La operación de los hornos de fusión es una de las mayores fuentes de contaminación de emisiones de partículas, tanto en términos de fuentes de contaminación como de la intensidad de emisión de cada fuente.

La resina autofraguante contiene alcohol fulfurílico que es nocivo por inhalación, nocivo en contacto con la piel y por ingestión, también contiene formaldehído que es tóxico por inhalación, tóxico en contacto con la piel, tóxico por ingestión, provoca quemaduras y posibilidad de efectos irreversibles.

Este producto contiene ingredientes que pueden ser perjudiciales si se manejan mal. Por lo tanto, se recomienda precaución en su uso y manejo. Deberá evitarse el contacto con el mismo, utilizando equipo protector adecuado. La ropa contaminada debe ser lavada antes de volverla a usar.

3.11. Conclusiones del capítulo 3

- Quedaron expuestos los resultados obtenidos del desarrollo de la tecnología de fundición para la obtención de bolas de acero 70XL para molinos de trituración de clínquer.
- Se mostraron los resultados derivados de la modelación y simulación del proceso de enfriamiento de la aleación en el interior del molde.
- Se simularon las curvas de enfriamiento de las diferentes partes del molde.

CONCLUSIONES GENERALES

- La tecnología de fabricación por fundición de las bolas de acero 70XL con 90 mm de diámetro, quedó establecida con 24 bolas, un tragadero, dos escoriadores y cuatro alimentadores.
- A través de la modelación y simulación del proceso de solidificación de las bolas, se conoce que la aleación en todas las partes del molde queda totalmente solidificada a los 1 979,24 segundos.
- Se comprueba que con las dimensiones dadas al diseño, el porcentaje de porosidad en la moldura será mínimo, puesto que las partes que solidifican de último en el molde, poseen un valor de 0 a 6,67 % de poros, lo que resulta insignificante para las bolas.
- Las curvas de enfriamiento muestran que cuando ha transcurrido un tiempo de aproximadamente 10 segundos, la distribución de temperatura en el molde, de mayor a menor, se distribuye en mazarota, bola 2, bola 1 y escoriador respectivamente. Mientras que a los 20 segundos, la bola 1 alcanza menores valores de temperatura, debido a que es la sección del molde menos afectada por el flujo de metal.

RECOMENDACIONES

- Aprovechar otros beneficios del software ProCAST, con el fin de mejorar los procesos de fundición.
- Asumir el software ProCAST en la evaluación de la solidificación de otras piezas.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

1. Alcántara Yemen, R. (2008). *Diseño de un molino de bolas*. Chile.
2. Beeley, P. R. (1972). *Foundry Technology*. Butterworths.
3. BENAVIDES T., J. R. (2011). *ESTUDIO DE LA SOLIDIFICACIÓN DE UN HIERRO NODULAR*. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN, FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA, San Nicolás de los Garza.
4. Campbell. (1993). *Castings*. Butterworth-Heinemann.
5. Campbell, J. (1993). *Butterworth-Heinemann*. England.
6. Flemings, M. C. (1983). *Solidification Technology in the Foundry and Casthouse*. The Metals Society.
7. Goyos, L. (1985). *Tecnología de la fundición II*. La Habana: ISPJAE.
8. Goyos, L., & Martinez, H. (1985). *Tecnología de la fundición II*. ISPJAE.
9. Guliáev, A. P. (1977). *Metalografía*. Moscú: Editorial Mir.
10. King Wong, Y. (2001). *Molienda*. Nueva York.
11. Kondic, V. (1969). *Metallurgical Principles of Founding*. Edward Arnold Pub.
12. Korolkov, A. (1960). *Casting Properties of Metals and Alloys*. Consultants Bureau.
13. Kumanin, I. B. (1976). *Cuestiones de la teoría de los procesos de fundición*. Moscú: Editorial Construcción de Maquinarias.
14. *MatWeb*. (s.f.). Recuperado el 21 de mayo de 2019, de MatWeb - The Online Materials Information Resource: <http://www.matweb.com/membership/regstart.aspx>
15. Quintero Hernández, E. (1979). *Distribución de temperaturas en molde de arena*. México.
16. Rodríguez, A. (2008). *Solidificación en piezas fundidas de acero de medio*. Moa.
17. T. y. (1981). *Tecnología del proceso de fundición*. Moscú: Mir.
18. Titov. (1981). *Foundry Practice*. Moscú: MIR.

19. Titov, N., & Stepanov, A. (1981). *Foundry Practice*. Rusia: MIR.

20. Veinik, A. I. (1968). *Thermodynamics for the Foundryman*. Maclaren.

ANEXO 1

