

**ESTUDIO Y MODELAMIENTO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE BARRAS  
TUBULARES DE BRONCE SAE 65 POR COLADA CONTINUA PARA LA  
EMPRESA FORMAQ S.A.S.**

**CARLOS HERNAN CERINZA PINZON**

**UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE METALURGIA  
TUNJA  
2018**

**ESTUDIO Y MODELAMIENTO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE BARRAS  
TUBULARES DE BRONCE SAE 65 POR COLADA CONTINUA PARA LA  
EMPRESA FORMAQ S.A.S.**

**CARLOS HERNAN CERINZA PINZON**

**PROPUESTA DE TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TITULO DE  
INGENIERO METALURGICO**

**Director:  
FABIO RAUL PEREZ VILLAMIL**

**UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE METALURGIA  
TUNJA  
2018**

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del jurado 1**

---

**Firma del jurado 2**

**Tunja (20 de noviembre de 2018)**

## **DEDICATORIA**

A Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobretodo felicidad.

A mis padres María del Carmen Pinzón y Olman Cerinza porque con su esfuerzo, dedicación y amor me han fortalecido y ayudado a salir adelante en un camino de valioso aprendizaje.

A mi abuelita Mercedes Mórtigo ya que con su sabiduría y experiencia me ha guiado hacia la persona que soy y seré en un futuro.

A todos mis familiares, por sus buenos deseos y apoyo durante toda mi carrera universitaria.

## **AGRADECIMIENTOS**

Le agradezco a Dios primeramente por guiarme por el mejor camino y bendecirme cada día con nuevas experiencias y nuevas personas que me ayudaron durante todos estos años.

A mi Director de proyecto el ingeniero Fabio Raúl Pérez, gracias a él es posible este proyecto, gracias por sus enseñanzas y guía durante todo mi proceso de formación.

Al ingeniero Héctor Alirio Pérez por su participación y ayuda en el presente trabajo de investigación.

Al semillero de investigación de materiales siderúrgicos con su directora, la doctora Lais Mujica por brindarme el apoyo en la realización del proyecto.

Al Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales (INCITEMA), a la doctora Yaneth Pineda y a todas aquellas personas que laboran en allí.

A la empresa FORMAQ y toda su parte humana por brindarme su apoyo en todas las labores que se debieron realizar en la misma.

A mi UPTC que me ha otorgado la enseñanza, los profesores, los amigos, los colegas, los compañeros, ha sido una experiencia que ha cambiado mi vida y a todas las personas que colaboraron directa e indirectamente en el desarrollo de esta investigación.

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
<b>RESUMEN</b> .....	<b>11</b>
<b>INTRODUCCION</b> .....	<b>12</b>
<b>1. DESCRIPCION GENERAL DEL TRABAJO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>13</b>
<b>1.2 JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>14</b>
<b>1.3 OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
1.3.1 Objetivo general.....	15
1.3.2 Objetivos específicos .....	15
<b>2.1 DESCRIPCIÓN DE LA ALEACIÓN</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DE ALEACION</b> .....	<b>18</b>
2.2.1 Cobre .....	18
2.2.2 Estaño.....	19
2.2.3 Plomo.....	20
<b>2.3 MICROESTRUCTURA</b> .....	<b>21</b>
<b>2.4 METALURGIA DE LA ALEACIÓN</b> .....	<b>23</b>
<b>2.5 IMPORTANCIA DE LA ALEACIÓN PARA APLICACIONES EN CONSTRUCCIÓN DE PARTES Y ELEMENTOS DE MÁQUINAS</b> .....	<b>25</b>
<b>2.6 FUNDICION POR COLADA CONTINUA</b> .....	<b>25</b>
2.6.1 Antecedentes históricos de la colada continua .....	25
2.6.2 Descripción del proceso de colada continua.....	26
2.6.3 Partes principales que constituyen la colada continua.....	29
2.6.4 Tipos de colada continua. ....	33
2.6.5 Mecanismo de solidificación y enfriamiento. ....	38
<b>2.7 COMPARACIÓN DE COLADA CONTINUA CON COLADA EN LINGOTERA</b> .....	<b>39</b>
<b>2.8 VENTAJAS DE LA COLADA CONTINUA</b> .....	<b>41</b>
<b>2.9 TRANSFERENCIA DE CALOR</b> .....	<b>42</b>
2.9.1 Transferencia de calor por convección .....	42
2.9.2 Números adimensionales.....	43

<b>3 DESCRIPCION DE LA EMPRESA.....</b>	<b>45</b>
<b>3.1 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA, PARA PRODUCCIÓN NO FERROSA.....</b>	<b>45</b>
<b>3.2 FUNDICIÓN ARTESANAL CON MOLDES DE ARENA, DEFECTOS FRECUENTES.....</b>	<b>46</b>
<b>3.3 DEFECTOS FRECUENTES EN PROCESOS DE FUNDICIÓN .....</b>	<b>46</b>
<b>3.4 MÉTODOS DE INSPECCIÓN DE LA FUNDICIÓN. ....</b>	<b>49</b>
<b>4. PLANTEAMIENTO Y ALTERNATIVA .....</b>	<b>49</b>
<b>4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....</b>	<b>49</b>
4.1.1 Sistema de alimentación .....	50
4.1.2 Sistema de extracción.....	50
<b>4.2 PARÁMETROS FUNCIONALES Y DE DISEÑO.....</b>	<b>50</b>
4.2.1 Parámetros Funcionales .....	50
<b>5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>51</b>
<b>5.1 PRUEBAS DE COLADA CONTINUA EN LABORATORIO.....</b>	<b>51</b>
5.1.1 Selección del mejor material para el molde interno y externo.....	51
5.1.2 Selección del mejor grafito para la aplicación.....	55
5.1.3 Fabricación del molde y dispositivo interno.....	56
5.1.4 Fusión y colada del material. ....	58
<b>5.2 PRUEBAS DE COLADA CONTINUA EN PLANTA .....</b>	<b>60</b>
<b>6. SIMULACIÓN NUMÉRICA.....</b>	<b>72</b>
<b>6.1 GENERALIDADES .....</b>	<b>72</b>
<b>6.2 ASPECTOS MATEMÁTICOS A CONSIDERAR PARA LA DEFINICIÓN DEL SISTEMA.....</b>	<b>72</b>
<b>6.3 DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA. ....</b>	<b>73</b>
<b>6.4 GENERACIÓN DEL MALLADO.....</b>	<b>74</b>
<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>81</b>
<b>8. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>83</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>84</b>

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
<b>Figura 1.</b> Microestructura del bronce C90700 en estado de fundición .....	22
<b>Figura 2.</b> Microestructura bronce SAE 65 .....	22
<b>Figura 3.</b> Diagrama de fase cobre-estaño .....	24
<b>Figura 4.</b> Esquema de la máquina de colada continua proyectada por Bessemer	25
<b>Figura 5.</b> Abaco para el cálculo de máquinas de colada continua .....	27
<b>Figura 6.</b> Esquema de colado de tubos por un extremo ensanchado por el procedimiento semicontinuo .....	29
<b>Figura 7.</b> Lingotera monolítica para colada continua.....	30
<b>Figura 8.</b> Lingotera Water-Jacket para colada continua .....	31
<b>Figura 9.</b> Molde para colada continua de planchón delgado; a) vista superior. b) vista lateral.....	31
<b>Figura 10.</b> Esquema de distribuidor a) Vista superior, b) Vista lateral.....	32
<b>Figura 11.</b> Esquema de distribuidor tipo “T” a) Vista superior, b) Vista Frontal .....	33
<b>Figura 12.</b> Tipos y altura de máquinas de colada continua .....	35
<b>Figura 13.</b> Hornos de inducción para dúplex de colada continua.....	35
<b>Figura 14.</b> Colada semicontinua y continua de aleaciones no ferrosas .....	36
<b>Figura 15.</b> colada continua y semicontinua de aleaciones no ferrosas .....	37
<b>Figura 16.</b> Colada continua de molde curvo.....	37
<b>Figura 17.</b> Comparación entre colada convencional y colada continua .....	40
<b>Figura 18.</b> Esquema áreas de trabajo FormaQ.....	48
<b>Figura 19.</b> Defectos más comunes en las fundiciones .....	47
<b>Figura 20.</b> Porosidad de diferentes tipos de grafito.....	52
<b>Figura 21.</b> Puntos de fusión y sublimación de diferentes materiales.....	53
<b>Figura 22.</b> Valores de conductividad térmica de distintos materiales.....	53
<b>Figura 23.</b> Conductividad térmica de diferentes tipos de grafito. ....	54
<b>Figura 24.</b> Molde en grafito 2D, prueba horno de inducción UPTC.....	56
<b>Figura 25.</b> Molde y dispositivo interno utilizado en las pruebas de laboratorio. ....	57
<b>Figura 26.</b> Molde y dispositivo interno ensamblados (vista inferior) .....	57
<b>Figura 27.</b> Montaje de la prueba realizada en el laboratorio .....	58
<b>Figura 28.</b> Realización de la prueba de simulación de colada continua.....	59
<b>Figura 29.</b> Resultado pruebas de laboratorio. ....	59
<b>Figura 31.</b> Control máquina de colada continua de la empresa. ....	61
<b>Figura 30.</b> Máquina de colada continua de la empresa.....	61
<b>Figura 32.</b> Modificación del distribuidor con un crisol de carburo de silicio .....	62
<b>Figura 33.</b> Molde para colada continua de tubos de bronce .....	63
<b>Figura 34.</b> Diseño del dispositivo interno vista frontal y superior 3D.....	64



<b>Figura 35.</b> Dispositivo interno después de ser mecanizado vista frontal y superior. .....	65
<b>Figura 36.</b> Molde externo de grafito .....	66
<b>Figura 37.</b> Dispositivo interno ensamblado dentro del molde.....	66
<b>Figura 38.</b> Coquilla ubicada en la máquina de colada continua con el dispositivo interno.....	67
<b>Figura 39.</b> Barra falsa y rodillos extractores.....	68
<b>Figura 40.</b> Fusión del bronce SAE 65 .....	69
<b>Figura 41.</b> Extracción de la barra perforada .....	70
<b>Figura 42.</b> Barra perforada obtenida por el sistema de colada continua, vista lateral.....	71
<b>Figura 43.</b> Barra perforada obtenida por el sistema de colada continua, vista superior.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura 44.</b> Figura del producto final dibujada con el programa. ....	73
<b>Figura 45.</b> Generación de mallado del producto final y del molde.....	75
<b>Figura 46.</b> Temperaturas generadas y vectores de flujo de calor generados durante la simulacion. ....	79

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Composición química del bronce SAE 65.....	16
<b>Tabla 2.</b> Propiedades mecánicas del bronce SAE 65.....	16
<b>Tabla 3.</b> Propiedades físicas del bronce SAE 65.....	17
<b>Tabla 4.</b> Calidades de grafito dependiendo del producto a fabricar.....	54
<b>Tabla 5.</b> Propiedades físicas de diferentes tipos de grafito. ....	55
<b>Tabla 6.</b> Información de malla obtenida del programa.....	74
<b>Tabla 7.</b> Información de malla y Detalles.....	75
<b>Tabla 8.</b> Características del agua usada para la refrigeración del molde .....	76
<b>Tabla 9.</b> Parámetros en la colada continua de bronce en la empresa.....	77

## RESUMEN

Las aleaciones de bronce son utilizadas considerablemente en la industria en razón a su resistencia mecánica, resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión y conductividad eléctrica, propiedades que lo hacen comparable con algunos aceros en cuanto a resistencia mecánica; estas aleaciones presentan mejores características en cuanto a conductividad y resistencia a la corrosión, lo anterior lo hace apto para el uso en engranajes y accesorios de rotación donde se requiere una forma cilíndrica y con orificio de diferentes diámetros; teniendo en cuenta esta necesidad, se requiere la fabricación de barras tubulares de diferentes diámetros tanto externos como internos.

En las últimas décadas, la colada continua se ha mantenido en una posición prominente en el procesamiento de aleaciones de cobre comerciales, especialmente de barras y barras tubulares, es por ello que la empresa FORMAQ S.A.S requiere desarrollar investigaciones que propongan soluciones técnicas viables que mejoren la productividad y su competitividad, razón por la cual parte de este estudio se desarrolló en las instalaciones de la misma.

Para obtener estas barras tubulares se propone el estudio y simulación del proceso de colada continua, teniendo en cuenta la infraestructura ya existente en la empresa, enfocándonos básicamente en el molde de la máquina junto con otras variables esenciales de refrigeración, extracción y corte, presentes en la misma.

Durante la investigación se realizó el análisis del proyecto en varias etapas, primero se hace el reconocimiento de la máquina de colada continua de la empresa, las características y falencias que presentaba junto con cada detalle de operación. Posteriormente se realizaron pruebas en los laboratorios de metalurgia de la UPTC con el fin de buscar el material más adecuado que le diera las características apropiadas al producto terminado que se quería.

Con base en las pruebas realizadas se determinó la estabilidad térmica del bronce al ser vaciado en el molde, así como el perfil de solidificación durante el conformado del producto, teniendo en cuenta variables como el sistema de enfriamiento y la velocidad de extracción que se realizaba a la barra tubular.

En la simulación numérica realizada del proceso, se confirmaron los resultados obtenidos en la práctica, siendo el grafito el material más adecuado para la fabricación de estos productos. El programa fue alimentado con diferentes condiciones de operación y de esta manera analizar los parámetros más adecuados para la correcta elaboración de las barras.

## INTRODUCCION

Según la Encuesta Anual Manufacturera del año 2018 en Colombia existen 8.466 establecimientos dedicados a la industria. De ellos, 1.245 (el 17,16%) hacen parte de la industria metalmecánica. Existen 41 empresas básicas dedicadas a la producción de metales no ferrosos, 10 de ellas cuentan con un proceso de colada continua, y solamente 2 están trabajando en la fabricación de barras tubulares de diferentes diámetros. Hay algunas compañías que se encargan de la venta de este tipo de productos importados de países como Perú, Chile y México.

El presente trabajo consiste en el análisis de producción de la empresa de fundición y maquinado llamada FORMAQ S.A.S. ubicada en la ciudad de Bogotá D.C, ésta empresa se dedica a la fabricación y venta de partes industriales hechas en materiales no ferrosos, principalmente aleaciones de cobre, para ello cuenta con la maquinaria y el personal técnico adecuado para las diferentes operaciones que se realizan en ella.

FORMAQ S.A.S. Cuenta con una máquina de colada continua vertical descendente ensamblada por Tecnika Saray S.A, en la cual se producen barras macizas de diferentes diámetros. De igual manera la empresa cuenta con una zona de fundición en la cual se fabrican bujes por un proceso de colada por gravedad, utilizando moldes de arena endurecidos por la reacción que ocurre entre el silicato de sodio y el CO<sub>2</sub>, de la misma manera los machos que le dan la cavidad interna a estos productos son hechos por el mismo proceso de moldeo.

El objetivo principal de este trabajo es mejorar el proceso de fabricación que tiene la empresa. La nueva propuesta consiste en pasar a una producción en serie, para lo cual es necesario contar con los equipos adecuados y así proveer a la empresa con un nuevo método que mejore su proceso de fabricación y la calidad de sus productos.

De igual manera, se desea estudiar el comportamiento que presenta el bronce SAE 65 en la fabricación de barras tubulares por el proceso de colada continua, logrando generar unas características de operación adecuadas para que los productos finales cuenten con la calidad solicitada por el cliente.

El proceso de colada continua permite obtener excelentes cualidades metalúrgicas entre las cuales encontramos: grano fino, estructura homogénea, libre de poros y otras discontinuidades metálicas y un buen acabado superficial. Logrando estas características, se obtienen productos con mejores propiedades en cuanto a resistencia a la tracción, al impacto y a la fatiga.

## **1. DESCRIPCION GENERAL DEL TRABAJO.**

### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Formaq es una empresa del sector Metalmecánico dedicada a la fundición y fabricación de piezas de materiales no ferrosos, entre los principales metales que se funden se encuentran las aleaciones de cobre, para ello cuenta con un horno de crisol el cual tiene una capacidad de 60 kg. También tiene una zona de producción por colada continua con un horno basculante de una capacidad máxima de 500 kg de material fundido, siendo el encargado de alimentar el distribuidor para que el metal líquido pueda ingresar al molde refrigerado, y ser allí donde ocurre la solidificación.

Además, la empresa cuenta con todas las herramientas adecuadas para la preparación de moldes de arena y para el mecanizado de las piezas fundidas. El método de producción con que la empresa trabaja actualmente para la fabricación de barras tubulares o bujes de diferentes diámetros presenta algunos inconvenientes, los cuales se ven reflejados en la baja producción, además de porosidades, incrustaciones de arena y tamaño de grano grande. Todos estos problemas al final se reflejan en la baja resistencia mecánica del elemento fabricado y adicionalmente se tiene una baja competitividad con productos importados

Para resolver estos problemas se ha estudiado la posibilidad de crear un mecanismo que permita la utilización de la máquina de colada continua que tiene la empresa para la fabricación de barras tubulares, las ventajas que se encuentran al utilizar este nuevo método son: producción uniforme, aumento significativo de la misma, reproductividad de piezas libres de defectos y mejoras en otros parámetros de calidad como el tamaño de grano el cual es fino y que le confiere mayor resistencia mecánica al elemento que se fabrica.

Analizando estas ventajas se ha determinado que se pondrá en práctica este método de producción, analizando todos los factores pertinentes y las variables esenciales para la puesta en marcha de la máquina de colada continua vertical para la fabricación de barras tubulares, específicamente se estudiará el comportamiento del bronce SAE 65.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

La colada o vaciado es uno de los procesos más antiguos que se conocen para trabajar los metales, es el proceso que da forma a un objeto al entrar material líquido en una cavidad formada en un bloque de arena aglomerada u otro material que se llama molde o coquilla.

La colada continua es un método de fabricación con el que se producen barras o planchones que avanzan y se solidifican a medida que se va vertiendo el material líquido en una lingotera sin fondo, que se alimenta indefinidamente. Es allí donde Formaq produce las barras macizas de diferentes diámetros y con longitudes hasta de 3 metros. Por esta razón y teniendo en cuenta las ventajas de la colada continua se ha decidido mejorar las características de operación en esta línea de producción, diseñando un mecanismo que ayude en la fabricación de barras tubulares por este método.

Es importante resaltar la importancia para el desarrollo de una región la creación efectiva de relaciones cohesionadas entre la industria y las universidad, es prioritario que dentro de las proyecciones estratégicas de estas alianzas se piense en rutas coherentes que logren darle a entender a los actores involucrados de qué forma se puede lograr desde lo institucional y lo personal, estrategias que logren identificar de qué manera se puede medir cada acción de vinculación y en lo personal trabajar con los investigadores en la universidad y los diferentes líderes de procesos en la industria en los resultados de confianza.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo general**

Estudiar y simular el proceso de fabricación de barras tubulares de bronce SAE 65 por colada continua para la empresa FORMAQ Bogotá D.C.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Conocer el estado actual de equipos de la empresa Formaq para el diseño de un mecanismo que permita obtener barras tubulares por el proceso de colada continua.
- Analizar el comportamiento del bronce SAE 65 en las etapas de fusión y sostenimiento en el horno de retención y solidificación en la coquilla refrigerada.
- Construir el molde y el dispositivo interno en un material que permita el control adecuado de la solidificación del metal con características de refrigeración y de extracción adecuadas.
- Simular el sistema de enfriamiento, la distribución de calor en el molde para la obtención de barras tubulares sin defectos de solidificación

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 DESCRIPCIÓN DE LA ALEACIÓN

El bronce UNS C90700 o SAE 65 también es conocido como bronce de engranes y coronas resistentes a la corrosión. Este es adecuado para la realización de válvulas, cajas de bombas, cojinetes, tornillos sin fin, cuando el servicio es pesado y sea necesario un bronce rígido para mediana velocidad. Es de gran calidad antifriccional, muy buena elasticidad y conductibilidad eléctrica. Además, soporta altas temperaturas sin perder sus propiedades mecánicas.

**Tabla 1.** Composición química del bronce SAE 65

Cu%	Sn%	Pb%	Zn%	Fe%	Ni%	Sb%	P%	S%	Al%	Si%
88-90	10-12	0,50	0,50	0,15	0,50	0,20	1,50	0,05	0,005	0,005

**Fuente.** ASTM B505 / B505M – 18 Especificación estándar para colada continua de aleaciones de cobre

**Tabla 2.** Propiedades mecánicas del bronce SAE 65

Resistencia a la tracción (min)		Resistencia al rendimiento (con una extensión de 0.5% bajo carga min)		Alargamiento (en 2 pulg. 0,50 mm min,%)
KSI	MPa	KSI	MPa	
40	276	25	172	10

**Fuente.** ASTM B505 / B505M – 18 Especificación estándar para colada continua de aleaciones de cobre



**Tabla 3.** Propiedades físicas del bronce SAE 65

PROPIEDAD	VALOR
Punto de fusión - Liquidus	999 ° C
Punto de fusión - Solidus	831 ° C
Densidad	8.77 gm / cm <sup>3</sup> a 20 ° C
Gravedad específica	8.77
Resistividad eléctrica	17.86 microhm-cm a 20 ° C
Conductividad eléctrica	0.056 MegaSiemens / cm a 20 ° C
Conductividad térmica	70.6 W / m a 20 ° C
Coefficiente de expansión termica	18,4 · 10 <sup>-6</sup> por ° C (20 ° -200 ° C)
Capacidad específica de calor	377.1 J / kg a 293 ° C
Módulo de Elasticidad en Tensión	103400 MPa

**Fuente:** CONCAST, metal products.

La composición química de la aleación varía en porcentajes de los elementos principales contenidos según la norma y tienen un rango de aceptación con un mínimo y un máximo de cada uno de ellos y otros elementos de aleación, que le dan las propiedades específicas a este tipo de bronce. Es un bronce con excelentes características físicas para el trabajo pesado. El contenido de plomo le permite ser un producto con excelente característica antifricción. El plomo en esta aleación baja el coeficiente de fricción del bronce, permitiendo que el material se desgaste más lentamente. Es por ello que podría soportar sin lubricación por algún tiempo o con lubricante seco. El estaño le brinda una mayor resistencia mecánica al material. Los elementos aleantes juntamente con el cobre, le brindan una alta resistencia a la corrosión y oxidación a las diferentes piezas fabricadas con este material. Además de presentar una buena maquinabilidad.

El proceso de fabricación más común de esta aleación es por medio de la fundición, la cual puede ser centrífuga, colada continua, fundición en arena, entre otros. Lo que hace el fósforo al ser añadido, es actuar como desoxidante en el momento de la fundición y aleación de los componentes. Al introducir fósforo, se obtiene una mejor fluidez del metal, lo que mejora la propiedad de colabilidad. El porcentaje de fósforo para la especificación UNS C90700 es de 1,5% máx. Solo para el caso de piezas obtenidas por colada continua el valor máximo permitido no debe sobrepasar el 1.5%. Esto se debe a que, si se aumenta la cantidad de fósforo, se forma fosfuro de cobre ( $Cu_3P$ ), un compuesto muy duro. El material que posee este componente será frágil y las aplicaciones para el mismo serán mínimas<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> ASTM B584 Standard Specification for Copper Alloy Sand Castings for General Applications. Estados Unidos. 2000, p 2.

## 2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DE ALEACION

Los componentes principales de esta aleación son el cobre, estaño y plomo, que juntos ocupan por lo menos el 95% del peso de la misma. El porcentaje restante de los elementos de mayor cantidad lo conforman el zinc y níquel; y como elementos residuales están el hierro, antimonio, azufre, fósforo, aluminio y silicio.

### 2.2.1 Cobre

El cobre es el metal industrial más antiguo de la tierra, después de los metales preciosos oro y plata, según lo demuestran las fusiones de escorias de cobre encontradas con una antigüedad de más de 7.000 años antes de Cristo. Este material favorece al desarrollo sostenible de las naciones por ser duradero y reciclable sin perder sus propiedades. Es el segundo metal más consumido en el mundo después del aluminio. En el año 2000, el consumo mundial de cobre fue de 20 millones de toneladas, de las cuales el 25% provenían de chatarra<sup>2</sup>.

Se produce por medio de un proceso pirometalúrgico: se acumula mineral de cobre con un alto contenido de azufre y se lo convierte en una masa de sulfuro de hierro y sulfuro de cobre. El oxígeno introducido cambia el sulfuro de hierro en óxido de hierro y el sulfuro de cobre en un cobre impuro conocido como cobre blíster, que tiene que ser purificado. Existen además otros métodos para la obtención de este metal.

Es un material con alta conductividad eléctrica y térmica, resistente a la corrosión, buena maquinabilidad, tiene resistencia y facilidad de fabricación. Es un metal no magnético. Puede ser soldado con latón, estaño y de fácil revestimiento metálico (galvanizado) o barnizado. Estas propiedades se las mejoran mediante aleaciones, teniendo como base el cobre. El cobre que se utiliza para conductores eléctricos contiene 99% del mismo y se lo conoce como cobre electrolítico o cobre libre de oxígeno de alta conductividad. Este cobre también es utilizado en materiales para techos, tuberías, radiadores y empaques para autos, cubas, recipientes de presión en equipos para destilería y otros procesos. El cobre electrolítico contiene de 0.02 a 0.05% de oxígeno, el mismo que se combina con cobre formando óxido cuproso. Su punto de fusión está en 1084.62°C y el de ebullición 2927°C<sup>3</sup>.

Las principales cualidades del cobre para su aplicación son: 60% conductividad eléctrica, 21% resistencia a la corrosión, 11% transmisión de calor, 7% propiedades mecánicas (fácil fabricación, maleable, dúctil, elástico, no produce chispa, no es magnético), y 1% estética. El cobre y sus aleaciones se utilizan en todo tipo de cables eléctricos, electrónica y telecomunicaciones; aire acondicionado, refrigeración, fontanería y calefacción; barcos aviones, automóviles y ferrocarril; células solares, monedas, chips.

---

<sup>2</sup> RUBIO, Arlandis. Metalurgia del cobre. Asociación de ingenieros industriales. Madrid. 2013, p5

<sup>3</sup> AVNER, S. Introducción a la metalurgia física. México. McGraw Hill. 1998, p 10.

El consumo de mundial para el año 2000 fue: 28% Europa Occidental, 21% América del Norte, 18% Asia (sin contar China y Japón), 12% China, 9% Japón, 6% América del Sur, 4% Europa Oriental, 2% África y Oceanía.

El 90% de las reservas mundiales de cobre se encuentra en la cuenca de las montañas rocosas de estados unidos, la prolongación de la cadena en Canadá, los andes de Perú y Chile, Indonesia y Zambia en la cuenca centro y sur de África. Entre los principales países productores de concentrados de mineral de cobre están Chile con 4,7 millones/año, Estados Unidos 1,3 millones/año e Indonesia 1,0 millones/año.

### 2.2.2 estaño

Es un metal de color blanco, duro y poco maleable que no se altera con el aire, pero con el calor se oxida. Forma aleaciones con casi todos los metales principalmente con el hierro para formar hojalata y con el cobre para formar bronce.

Es también uno de los metales más antiguos, ya que se cree que pudo ser utilizado unos 3.500 años antes de Cristo. En la península ibérica se registran datos sobre la explotación del mismo 2.800 años antes de Cristo. A comienzos de nuestra era surge Cornwall-Inglaterra como uno de los grandes proveedores de estaño<sup>4</sup>.

El estaño es un metal relativamente escaso en la naturaleza y caro. Es un metal plateado, maleable, que no se oxida con facilidad en presencia del aire y tiene una gran resistencia a la corrosión. Se encuentra en su mayoría en la casiterita o piedra de estaño, que es un mineral que contiene entre 79-85% del estaño, en el que se presenta como óxido ( $\text{SnO}_2$ ). Este mineral es de color entre castaño oscuro y negro, que se encuentra en forma de cristales pesados y duros, en yacimientos primarios juntamente con minerales de molibdeno y tungsteno. En yacimientos secundarios se lo encuentra en una forma más pura en una estructura granular acompañado con otros minerales pesados, que forman el estaño de aluvión. Este mineral es molido y se enriquece en dióxido de estaño por flotación, con ayuda del coque se lo calienta en un horno de reverbero con el que se obtiene el metal. La casiterita abunda actualmente en Bolivia y Asia Oriental. También se lo puede encontrar en la cilindrita, que son depósitos hidrotermales.

Su punto de fusión es 232°C y el de ebullición 2602 °C. A bajas temperaturas, se forma un fenómeno conocido como la peste del estaño, en la cual se puede considerar que el estaño se enferma de cierta manera ya que adquiere un color gris, aumentando su volumen en un 26% hasta desmenuzarse y convertirse en polvo. Se dice que es un estaño enfermo ya que puede contagiar al metal sano.

---

<sup>4</sup> MINSUR. El Estaño. Minería responsable. Perú. 2013. 14.

Su mayor parte se encuentra aleado con otros metales, principalmente con cobre, formando el bronce, que fue la primera aleación creada por el hombre, en la que puede existir de un 3 a un 20% de estaño y el resto cobre principalmente<sup>5</sup>.

Para los bolivianos, el estaño en particular fue el metal que dio vida y sustento por más de un siglo, porque Bolivia junto con Tailandia y Malasia fueron los mayores productores de estaño en el mundo. Hoy en día, los mayores productores de este material son China, Malasia, Perú, Bolivia y Brasil.

Al menos el 60% del metal obtenido se lo utiliza en la industria de la hojalata y el resto para fabricar bronce, soldaduras blandas y compuestos químicos. Sus usos específicos son el revestimiento del cobre, hierro y otros metales usados para fabricar latas de conserva; recubrimiento de otros metales, por lo general aceros, para brindar una protección contra la corrosión. Se lo utiliza para disminuir la fragilidad del vidrio, soldaduras blandas aleadas con plomo, producción de instrumentos musicales, sus compuestos forman parte de fungicidas, tintes y dentífricos.

### 2.2.3 Plomo

El plomo es un metal pesado con color plateado de cierta tonalidad de azul, que se empaña para conseguir un color gris mate. Es muy blando y maleable, siendo el menos tenaz de los metales. Es flexible, inelástico y se funde con facilidad. Tiene una densidad relativa o gravedad específica de 11,4 a 16°C. Tiene una gran densidad, un punto de fusión bajo (327.4°C) y hierve a 1725 °C. En contacto con el aire se oxida con facilidad, formándose una capa de óxido superficial, que quita el brillo del material, pero sirve como protección de una oxidación interna<sup>6</sup>.

Rara vez se puede encontrar al plomo en su estado elemental, más bien su presencia por lo general radica como sulfuro de plomo en la galena. Se lo puede encontrar también en otros minerales como son la cerusita y anglesita. La mayoría de ellos contienen menos del 10% de plomo. Los minerales son triturados y se concentran por flotación por espuma hasta el 70% o un poco más. Los que son constituidos por sulfuros se tuestan produciendo óxido de plomo y una mezcla de sulfatos, silicatos de plomo y otros metales. Este óxido se reduce en coque de alto horno para obtener el metal. El plomo metálico resultante de los procesos de horno de calcinación y de alto horno, contienen cantidades significativas de contaminantes como arsénico, antimonio, cobre, bismuto, zinc, oro y plata. Los contaminantes oxidados son eliminados como escoria. Por medio del proceso Parkes, se puede recuperar la plata y el oro<sup>7</sup>.

El plomo metálico es usado en un 40% como metal, 25% en aleaciones y 35% en compuestos químicos. Los compuestos de plomo más utilizados en la industria son los

---

<sup>5</sup> KALPAKJIAN, S. Manufactura, ingeniería y tecnología. Pearson Ed. Brasil. 2002, p 8.

<sup>6</sup> MUÑOZ, H. Obtención de Plomo. Riesgos Ambientales. Perú. 2015, p 23.

<sup>7</sup> LDA International, Primary extraction of lead. Technical Notes. México. 2013. P 56.

óxidos de plomo, el tetraetilo de plomo y los silicatos de plomo. El uso más amplio de este metal es la fabricación de acumuladores. El plomo forma aleaciones con muchos metales y es de esta forma en la que mayormente se lo utiliza.

Las principales aplicaciones son la fabricación de perdigones y proyectiles de armas de fuego, la aleación con estaño es usada en soldadura, se utiliza en aleaciones para mejorar las propiedades de los materiales. En la actualidad es utilizado también como cubierta para cables por su gran ductilidad, que le permite estirarse para formar un forro continuo para los conductores internos; estos pueden ser cables de teléfono, televisión, internet o electricidad.

El uso de plomo en pigmentos sintéticos ha tenido una gran importancia, pero hoy en día está decreciendo su uso. También es utilizado en compuestos de plomo como carbonatos, silicatos, y sales de ácidos orgánicos. Es utilizado también como estabilizador contra el calor y la luz para los plásticos de cloruro de polivinilo. Los silicatos de plomo se utilizan como esmaltes de vidrio y cerámica.

Es necesario manejarlo con cuidado, ya que es un metal tóxico que afecta la salud, que puede producir saturnismo o plumbosis. Cuando es inhalado o existe ingesta de vapores de plomo, polvos de óxido de plomo o humos del mismo metal, puede ser muy tóxico para la salud. Las principales fuentes a las que se puede estar expuesto son en la producción de baterías, pinturas antioxidantes, pigmentos cerámicos, aleaciones que contengan plomo y estaño usadas en soldaduras para aplicaciones eléctricas, antidetonante de gasolinas, fabricación de pesas de plomo, municiones, fundición de plomo en general, en la industria gráfica por los tipos de plomo, entre otros<sup>8</sup>.

### **2.3. MICROESTRUCTURA**

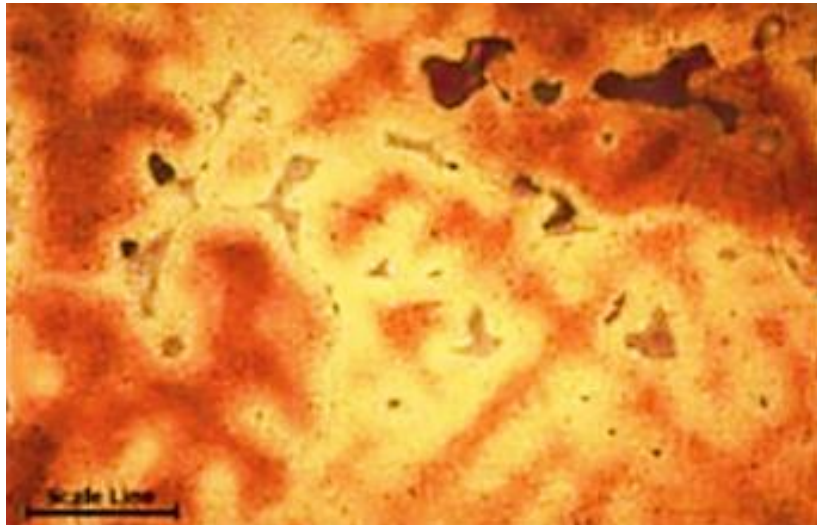
Los bronce al estaño son más fuertes y dúctiles que los latones rojos y semi rojos, además tienen una alta resistencia al desgaste y un bajo coeficiente de fricción comparado con el acero. Los bronce al estaño, con un 15.8 % de estaño, conservan una estructura de cobre alfa ( $\alpha$ ). El estaño fortalece en solución sólida al cobre, aunque tiene poca solubilidad a temperatura ambiente. Las transformaciones de fases a temperatura ambiente son lentas y usualmente no ocurren, por lo tanto, estas aleaciones son aleaciones monofásicas.

En la Figura 1, se puede observar la microestructura del bronce C90700 en estado de fundición a 50 micras la cual consiste en núcleos de dendritas, así mismo, tiene una composición de gradiente de incrementar el estaño a medida que crecen. El último líquido a solidificar es el estaño, formando fases alfa y delta que ocupan las áreas entre los brazos de las dendritas.

---

8 IESS. Norma de salud y seguridad para la exposición laboral al plomo. 2013

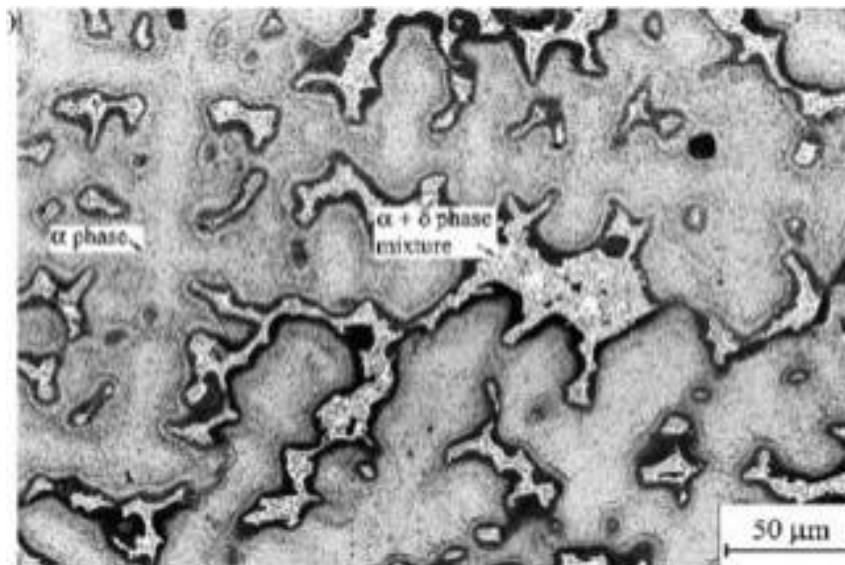
**Figura 1.** Microestructura del bronce C90700 en estado de fundición a 50 micras.



**Fuente:** Universidad de la Florida. 2014.

La microestructura del bronce al estaño con plomo es similar a los materiales sin plomo con adiciones de partículas de plomo en medio de los límites de las dendritas. El plomo es prácticamente insoluble en cobre sólido y es solidificado como plomo casi puro en los límites de grano<sup>9</sup>.

**Figura 2.** Microestructura bronce SAE 65



**Fuente:** Savaskan, T. y Alemdag, Y. 2008.

<sup>9</sup> COPPER Development. Metallurgy of Copper-Base Alloys. Estados Unidos. 2016, p 75.

Así mismo, en la figura 2, se observa que la microestructura **del** bronce UNS C90700 (CuSn12) es rica en cobre ( $\alpha$ ) dendritas y eutectoide ( $\alpha+\delta$ ).

## 2.4. METALURGIA DE LA ALEACIÓN

Las aleaciones de cobre fundido se pueden clasificar en tres categorías metalúrgicamente:

- Aleaciones de solución sólida de una sola fase
- Aleaciones polifásicas
- Materiales compuestos

Para entender el rendimiento de diferentes aleaciones, primero se debe entender lo que ocurre con la estructura básica de cobre cuando se añaden pequeñas cantidades de metales de aleación. Las reacciones se producen durante la solidificación y enfriamiento de aleaciones de su estado fundido.

En términos simples, la disposición final de los metales de aleación respecto a la estructura normal del cobre FCC, determina las propiedades del material de la aleación. Los metales de la aleación encuentran su lugar en la estructura del cobre en tres formas básicas:

1. Sustituyen a los átomos de cobre en la estructura FCC (cúbica centrada en las caras)
2. Se combinan con el cobre y formar regiones localizadas (fases), donde la estructura cristalina es de una forma que difiere de la de cristal de cobre FCC.
3. Ellos son rechazados por la estructura de cobre de solidificación, pero están atrapados dentro de los cristales de la aleación, ya que se congelan y crecen.

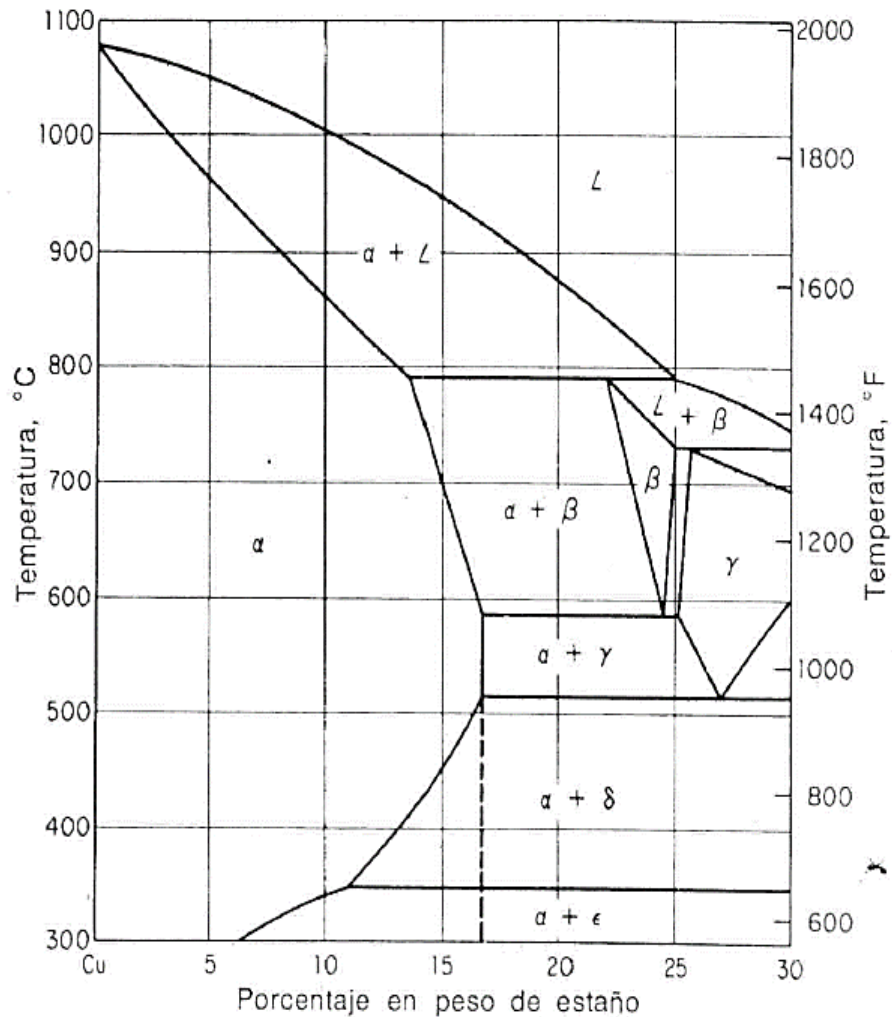
La aleación descrita es parte de los bronce al estaño. En la fig. 3 se puede apreciar la porción rica en cobre de esta aleación. La fase  $\beta$  se forma como resultado de una reacción peritética a 798°C. A 586°C, la fase  $\beta$  tiene una reacción eutectoide para formar la mezcla ( $\alpha + \gamma$ ). A 520°C, y también sufre una transformación eutectoide a ( $\alpha + \delta$ ). El diagrama indica la descomposición de la fase  $\delta$ , la que se da por una reacción eutectoide a 350°C, formando ( $\alpha + \varepsilon$ ). Esta reacción es muy lenta, haciendo que la fase  $\varepsilon$  no exista en las aleaciones comerciales.

La pendiente de la línea solvus por debajo de 520°C muestra una pérdida de solubilidad del estaño en la fase  $\alpha$ . La precipitación de la fase  $\delta$  o  $\varepsilon$  es lenta debido al cambio de solubilidad que se da en la etapa antes mencionada. Es por ello que las fundiciones de bronce al estaño que se enfrían lentamente y que contienen menos del 7% de estaño, solo muestran una fase (solución  $\alpha$  sólida). Pero en la mayor parte de las aleaciones que poseen más del 7% de estaño, se puede encontrar algo de la fase  $\delta$ .

En la figura se observa que a menos de 11 % de estaño, una aleación mientras que se enfría se ve una solidificación en un intervalo de temperatura, convirtiéndose completamente sólida cuando la temperatura cae por debajo de aproximadamente 850 °C.

En condiciones de equilibrio de un enfriamiento lento, la fase sólida que se forma es un cristal cúbico centrado en las caras (fase alfa). Los átomos de estaño sustituyen directamente en la estructura, en lugar de átomos de cobre. Los átomos de estaño tienen el efecto de fortalecimiento del cobre puro, ya que tensionan la estructura, es decir, que alteran la distancia habitual entre los átomos de cobre.

**Figura 3.** Diagrama de fase cobre-estaño



**Fuente:** AVNER, S. Introducción a la metalurgia física. México. McGraw Hill. 1998, p 86.



## **2.5. IMPORTANCIA DE LA ALEACIÓN PARA APLICACIONES EN CONSTRUCCIÓN DE PARTES Y ELEMENTOS DE MÁQUINAS**

Esta aleación forma un bronce con las características ideales para el trabajo pesado con una excelente antifricción por su contenido de plomo, permitiendo trabajar a las partes o elementos de máquina hechas de este material durante periodos más extensos sin lubricación, si esta llegara a fallar; sufriendo un desgaste más lento.

Es un excelente material para ser usado bajo condiciones de altas velocidades, altas presiones, golpes y vibraciones. Su aplicación típica es en rodamientos, ruedas helicoidales, engranajes, rodamientos para cargas pesadas y velocidades relativamente bajas, cajas de engranajes, reductores de velocidad, cuerpos de válvula, entre otros de los usos más recomendados de esta aleación son cojinetes, fundición de bujes para altas velocidades y fuertes presiones, bombas, impulsores, aplicaciones donde se requiera alta resistencia a la corrosión, fundiciones a presión, bujes para molinos, hornos de cemento, troqueladoras, laminadoras, compresores y bujes en general.

## **2.6. FUNDICION POR COLADA CONTINUA**

### **2.6.1 Antecedentes históricos de la colada continua**

La colada continua es un método de trabajo que comenzó a desarrollarse industrialmente hacia el año de 1950. Este proceso parte del acero fundido, obteniéndose directamente palanquillas o productos planos de longitud teóricamente casi ilimitada y con espesores variables, en lugar de obtenerse lingotes de acero como era el caso del proceso tradicional, el cual era más caro y lento para fabricar y fue más utilizado en el siglo XX.

Henry Bessemer, fue quien inventó la fabricación de acero en el convertidor en los últimos meses del año de 1855 y a principios de 1856, y también fue el primero que inventó y patentó la idea de colada continua en la segunda mitad del siglo XIX.

La máquina proyectada por Bessemer, que, si bien no llegó a construir, debía colar acero entre dos cilindros metálicos refrigerados interiormente con agua, obteniendo un producto plano como se muestra en la figura 4.

Uno de los factores que más contribuyó al éxito de la colada continua fue el empleo de un molde metálico oscilante refrigerado con agua, inventado por Siegfried Junghans, al que puede considerarse realmente como el iniciador e inventor de la colada continua. Patentó su descubrimiento en Alemania, en 1933, y en Estados Unidos de América, en 1938, las primeras máquinas de tipo experimental las construyeron en 1943.

**Figura 4.** Esquema de la máquina de colada continua proyectada por Bessemer



**Fuente:** The AISE steel Foundation; "The making shaping and treating of steel". Estados Unidos. 2003, p 46.

Se puede considerar que la colada continua comenzó a funcionar industrialmente con regularidad y éxito en 1950. La primera instalación fue proyectada por Jughans y se instaló en la empresa Mannesman, en Alemania, en la fábrica de Huckingen. Uno de los factores más importantes para la obtención de productos a partir de la colada continua es el molde, pues es aquí donde se determina la calidad del producto final.

### 2.6.2 Descripción del proceso de colada continua

La esencia del procedimiento consiste en que el metal líquido se vierte uniforme y continuamente en un molde cristalizador enfriado por el uno y el otro extremo, se extrae el lingote (varilla, tubo, piezas brutas de sección cuadrada, rectangular u otra) solidificadas.

Con este procedimiento es posible obtener molduras de todas las aleaciones conocidas, tanto ferrosas como no ferrosas. La elevada eficacia económica del empleo de este procedimiento se logra por las ventajas siguientes:

- La posibilidad de obtener un lingote, tubo, perfil de longitud ilimitada y de sección transversal requerida.
- El aumento de salida de molduras aptas a cuenta de la reducción del gasto de metal para mazarotas y bebederos.

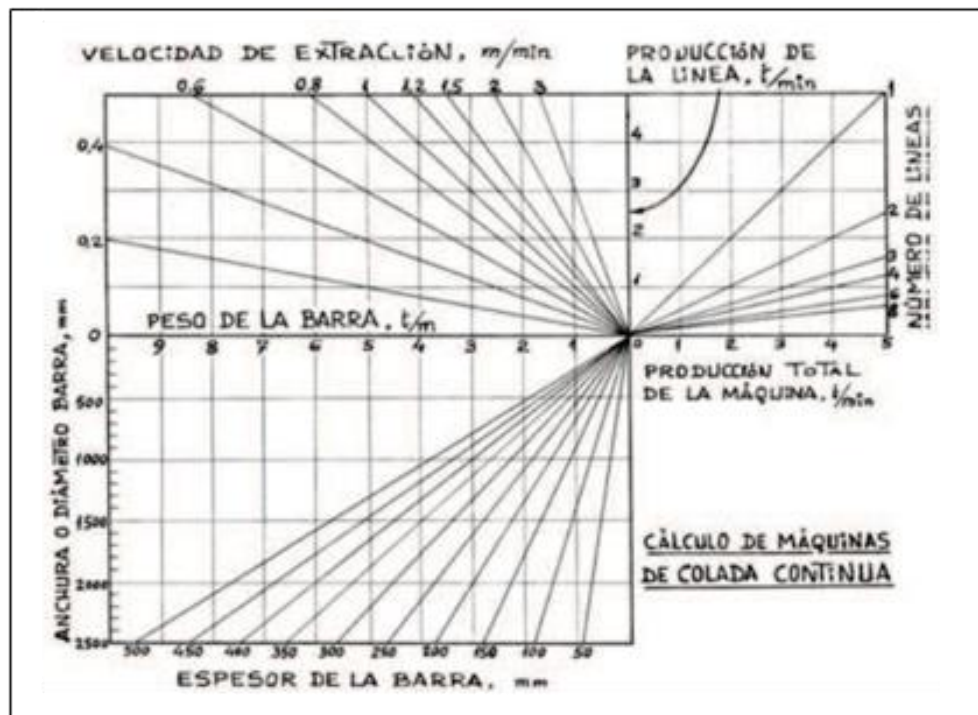
- La disminución de gastos para la elaboración de lingoteras.
- La reducción de la heterogeneidad de segregación de la pieza fundida, la eliminación de los rechupes de contracción y las porosidades de gas.

El proceso tecnológico se realiza en máquinas para fundir especiales, que pueden ser con la dirección vertical y horizontal del artículo que se funde. Con más frecuencia se emplean máquinas con movimiento vertical de la pieza que se funde.

La elevada calidad del metal de las molduras se consigue creando las condiciones de extracción dirigida del calor y, correspondientemente, de la solidificación de la moldura, como también de la constante alimentación con metal líquido del frente de cristalización. Como resultado, las molduras y lingotes no tienen porosidades de contracción y de gas ni inclusiones no metálicas.

Para conocer las características y posibilidades de producción de máquinas de colada continua o para proyectar el tipo de máquina que hay que instalar para una determinada producción y perfil, se usa el ábaco que se aprecia en la figura 5. Conociendo la sección de las barras que se desea fabricar se pueden hallar en este gráfico las soluciones más convenientes.

**Figura 5.** Abaco para el cálculo de máquinas de colada continua



**Fuente:** ENRIQUEZ José, y Colaboradores; Monografías Sobre Tecnología del Acero. 2009. p 29.

La producción de tubos por el procedimiento semicontinuo (ver figura 6) se realiza en máquinas apropiadas para el tipo de fundición. Sobre la bandeja 1 con el cebo 2 se coloca un macho de arena que crea una ranura en el extremo ensanchado 3 del tubo 1. La fundición líquida de la cuchara 4 se vierte en el cristalizador 5 (molde de paredes delgadas enfriado por agua) y, cuando el metal alcanza su parte superior, se comienza a bajar la bandeja 1 y junto con ella también se extrae el tubo solidificado 6 del cristalizador.

Para elevar y bajar la bandeja sirve el motor 7. La velocidad de extracción del tubo del cristalizador debe ser tal que el tiempo de permanencia del metal en este sea suficiente para su solidificación.

En la práctica para tubos con un espesor de la pared de 10-12 mm la velocidad de extracción constituye 0,75-1 m/min.

En el proceso de fundición tiene lugar la extracción sucesiva del tubo del cristalizador, lo que asegura un alto rendimiento del proceso.

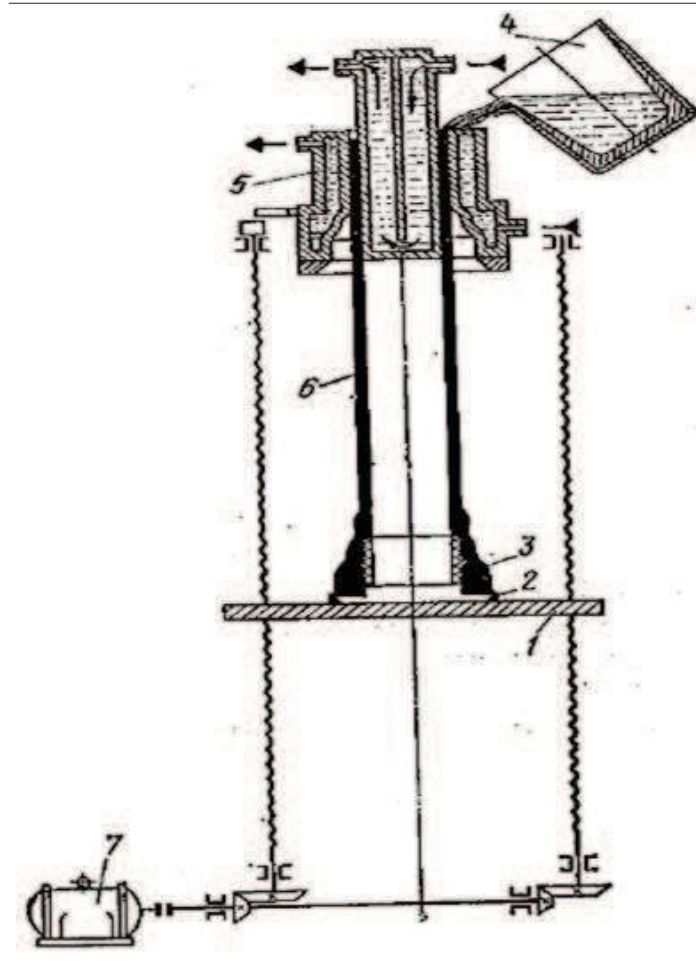
La calidad de los tubos (rugosidad de la superficie, propiedades mecánicas) resulta alta, correspondiente a la calidad de las molduras que se obtienen en moldes metálicos. Con este procedimiento se funden tubos de hasta 0,8 m de diámetro y 10 m de largo.

El método alternativo a la colada continua es la laminación en caliente, proceso de más coste de fabricación y que se reserva para aleaciones que no pueden ser fabricadas por colada continua debido a su rango de temperaturas de solidificación elevado o cuando se requieren características especiales.

Los dos procesos de obtención de planchales o tubos de materiales no ferrosos son muy diferentes. Mientras en la colada continua se pasa de metal líquido a banda sólida en corto espacio de tiempo, en la laminación en caliente primero se obtiene una placa de laminación con una velocidad de colada más lenta a un espesor mucho mayor que la banda de colada, sigue después un precalentamiento y homogeneizado de la placa y finalmente la laminación en caliente a temperatura por encima de la de recristalización.

Como consecuencia de los diferentes procesos, las planchales de colada continua y de laminación en caliente tienen propiedades muy diferentes, bien en propiedades mecánicas o en aspectos de su metalurgia física.

**Figura 6.** Esquema de colado de tubos por un extremo ensanchado por el procedimiento semicontinuo



**Fuente:** CAPELLO, Edoardo; "tecnología de la fundición"; España. 1981, p 455.

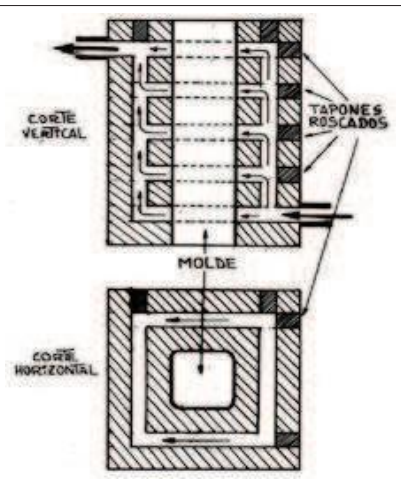
### 2.6.3 Partes principales que constituyen la colada continua.

- **Lingotera**

Los moldes son comúnmente de cobre, refrigerados con agua y pulidos internamente, para disminuir la fricción y evitar rasgaduras del hilo debido a rugosidades, en el molde se realiza la adición de fundentes para disminuir la fricción entre molde-metal, además de la distribución homogénea de la transferencia de calor. Su longitud o altura varía entre los 500 a 800 mm. Los primeros moldes se fabricaron utilizando bloques de cobre que se mecanizaban

totalmente, dejando un agujero central para la colada y posterior solidificación para el caso del acero. Estos moldes tenían el defecto de ser muy pesados y caros.

**Figura 7.** Lingotera monolítica para colada continua



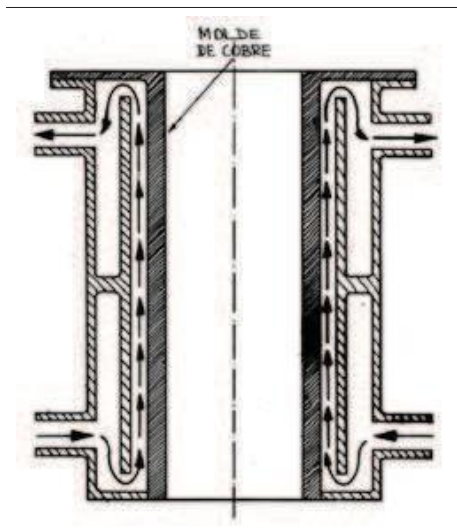
**Fuente:** ENRIQUEZ José. Monografías Sobre Tecnología del Acero. España. 2009, p 40.

Después se fabricaron lingoteras compuestas. Se utiliza tubo de cobre de 5 a 12 mm de espesor cuyo interior tiene la forma y medidas del perfil que se desea obtener. Hay una serie de chapas de acero que forman las cámaras de refrigeración alrededor del tubo. Las lingoteras tubulares son las preferidas para la colada de secciones pequeñas, especialmente palanquillas, a elevadas velocidades. Son menos pesadas y menos caras que las macizas, y en la actualidad son las más usadas.

En su extremo superior el tubo está sostenido por una brida o placa en una camisa externa, que forma un conducto anular exterior para el agua de refrigeración. Todo ello va alojado en una envolvente más pesada. Al ser delgadas las paredes del tubo, se pueden conseguir regímenes elevados de transferencia térmica y, en consecuencia, grandes velocidades de colada, especialmente si el chorro de agua fluye ascendente por el conducto anular. En ambos casos se utiliza una refrigeración intensa por el interior.

Las lingoteras de cámara suelen recibir el nombre de "water-jacket" (camisa de agua). La vida útil de las mismas suele ser de 100 a 300 coladas. Durante muchos años las lingoteras se han construido con paredes paralelas, pero a partir de 1975 se comenzaron a utilizar con gran éxito moldes troncocónicos o tronco piramidales con su base mayor en la parte superior. En ellas el contacto del acero con la lingotera es más prolongado que las de paredes paralelas.

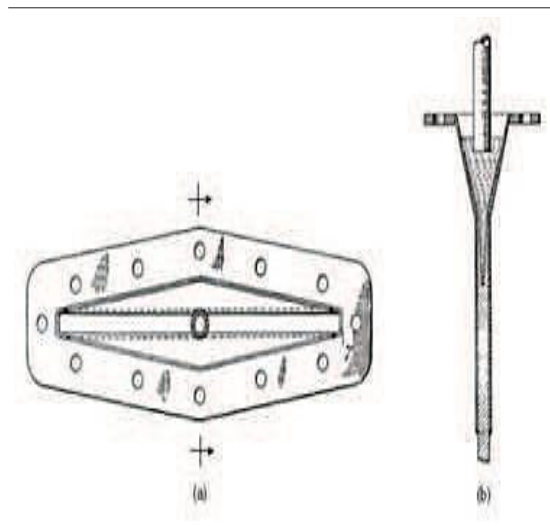
**Figura 8.** Lingotera Water-Jacket para colada continua



**Fuente:** ENRIQUEZ José. Monografías Sobre Tecnología del Acero. España. 2009, p 41.

El sistema de construcción en dos piezas (tubo y camisa de agua) permite colocar deflectores para trabajar según régimen turbulento en lugar de laminar y conseguir así una refrigeración más eficiente.

**Figura 9.** Molde para colada continua de planchón delgado; a) vista superior. b) vista lateral.



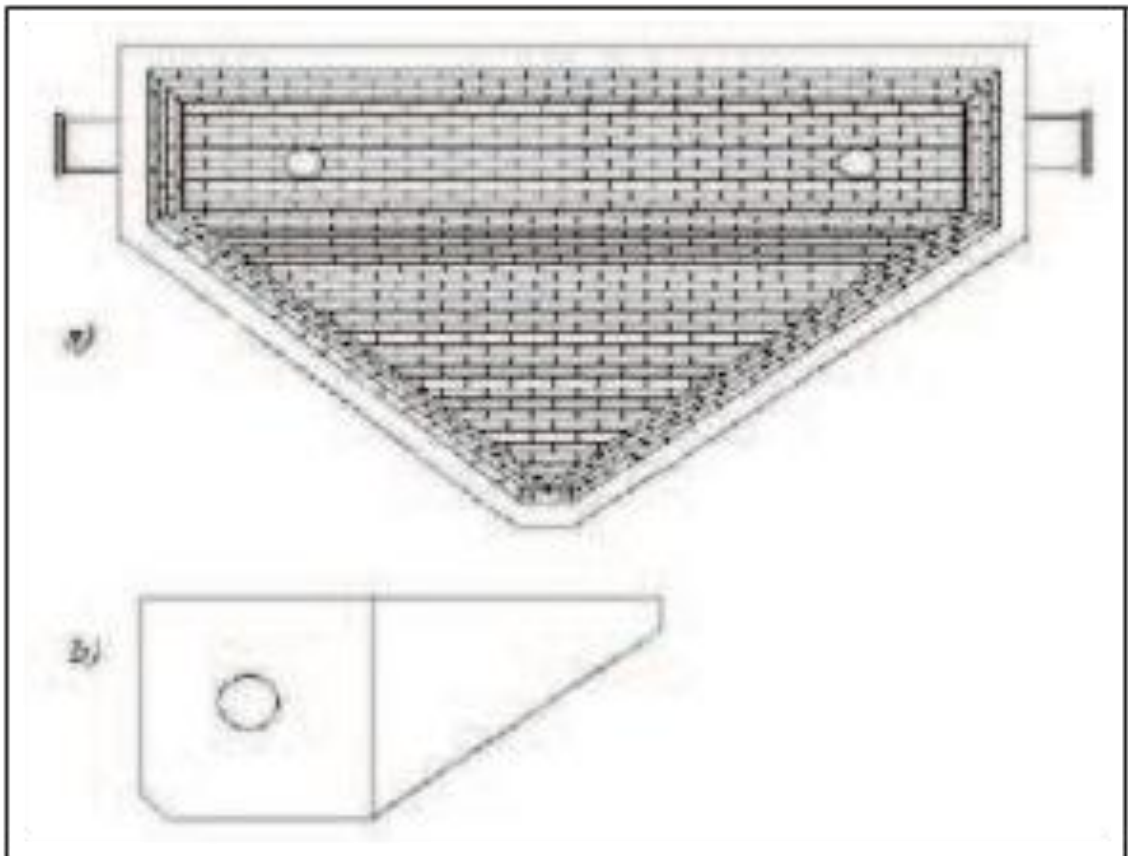
**Fuente:** The AISE steel Foundation. The making shaping and treating of steel. Estados Unidos. 2003, p 48.

- **Distribuidor**

El distribuidor, es un tipo de reactor intermedio entre el crisol proveniente de los hornos y los moldes. Su función es principalmente la de recibir el metal fundido proveniente del crisol; contenerlo con un mínimo de pérdidas de calor y continuamente entregarlo lo más limpio posible.

La diversidad de los distribuidores es muy variada, algunas veces se les clasifican de acuerdo a la manera de vaciar; sin embargo, normalmente se les diferencia con base en su forma física: Tipo "Delta", Tipo "T", Tipo "V", Tipo "Recto"<sup>10</sup>

**Figura 10.** Esquema de distribuidor tipo "Delta" a) Vista superior, b) Vista lateral.



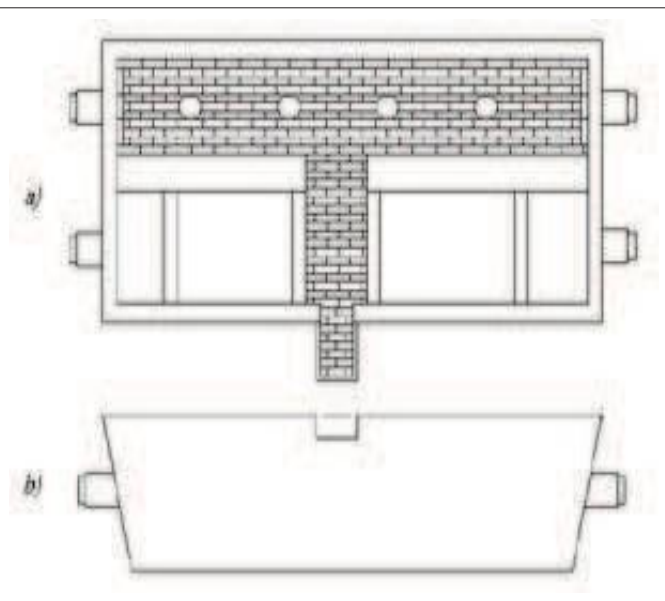
**Fuente:** VALADEZ, Carlos. Estudio físico del flujo del acero líquido. España. 2010, p 23.

---

<sup>10</sup> The AISE steel Foundation. The making shaping and treating of steel. Estados Unidos. 2003, p 52.



**Figura 11.** Esquema de distribuidor tipo “T” a) Vista superior, b) Vista Frontal



**Fuente:** VALADEZ, Carlos. Estudio físico del flujo del acero líquido. España. 2010. p 24.

#### 2.6.4 Tipos de colada continua.

Las máquinas de colada continua han ido evolucionando en su construcción pasando de las primeras completamente verticales hasta máquinas que han disminuido su altura notablemente. En estas últimas el material se vacía en una lingotera curva y solidifica con un radio determinado de curvatura, volviendo después de su solidificación total a enderezarse para el corte final. Algunas máquinas modernas para aceros especiales de alta calidad mantienen el concepto de verticalidad en su totalidad para alcanzar la calidad metalúrgica durante la solidificación del producto<sup>11</sup>.

Las máquinas de lingotera curva son las más extendidas en su aplicación. Esta tendencia a disminuir la altura (y costo de inversión) de las instalaciones de colada continua ha llegado al máximo con las máquinas horizontales.

Ya desde los primeros tiempos de existencia de las máquinas de colada continua se ha investigado para conseguir bajar el costo de las máquinas. Disminución de altura de las máquinas permite reducir la altura de los puentes grúa, estructuras de soporte, etc., haciendo que disminuyan los costos de inversión. También se ha avanzado en una nueva generación de máquinas de colada continua que permite reducir extraordinariamente los costos de laminación para chapa. Por orden cronológico como se ven en la figura 12.

<sup>11</sup> ENRIQUEZ José. Monografías Sobre Tecnología del Acero. España. 2009, p 45.

➤ Colada continua horizontal

A mediados del siglo XIX Sellers y Bessemer intentaron desarrollar una máquina de colada continua horizontal, y desde entonces los metalúrgicos de todo el mundo han trabajado en este proceso. Las primeras máquinas (año 1930) se diseñaron para colada continua de metales no ferrosos o fundiciones grises laminares o nodulares. Cuando se intentaron utilizar para colada de acero surgió el problema de la disolución del grafito que se empleaba como material del molde. Son equipos dúplex con un horno de inducción, de crisol o canal para fusión primaria que alimenta a un horno de canal en cuya pared vertical se encuentra incrustada la lingotera refrigerada de salida.

➤ Colada continua precisa:

Con objeto de reducir las transformaciones en caliente de los productos se están colando en la máquina de colada continua formas cada vez más ajustadas al producto final, mediante la aplicación de las tecnologías denominadas Near Net Shape Casting Process (NNSC) o Compact Strip Production (CSP). Especial mención de esta tendencia tecnológica es la fabricación de productos con sección en forma de “hueso de perro” (“beam blank”) para la fabricación de grandes perfiles estructurales, como dobles “T”, o la fabricación en colada- laminación directa de bobinas en caliente.

➤ Colada continua vertical:

Es el primer sistema que se utilizó, especialmente para las aleaciones no ferrosas. En ella, al final del recorrido vertical se cortan las palanquillas, todavía muy calientes, por medio de un soplete y luego se voltean, son puestas en posición horizontal y arrastradas con un juego de rodillos hasta la zona de almacenaje.

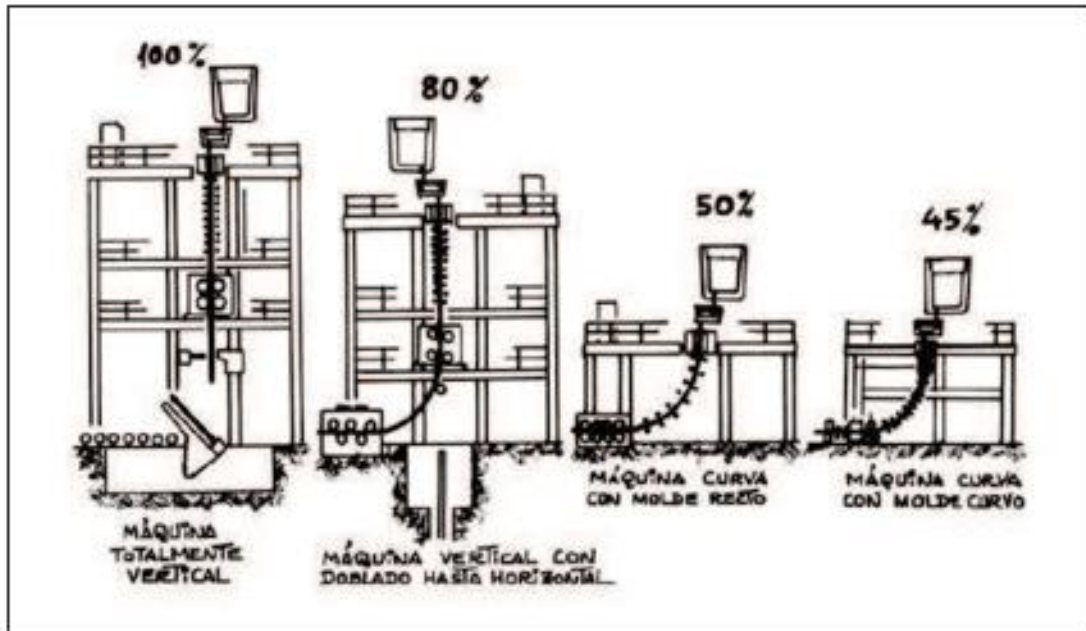
➤ Vertical, con curvado y enderezadores posteriores:

Con objeto de evitar la extraordinaria altura que debían tener los edificios para alojar a las primeras máquinas de colada continua, se ha desarrollado este sistema, en el que doblando las palanquillas cuando ya está bien solidificado el acero, se obtienen buenos resultados y se consigue reducir la altura total de la instalación.

➤ Vertical, con curvado a la salida del molde:

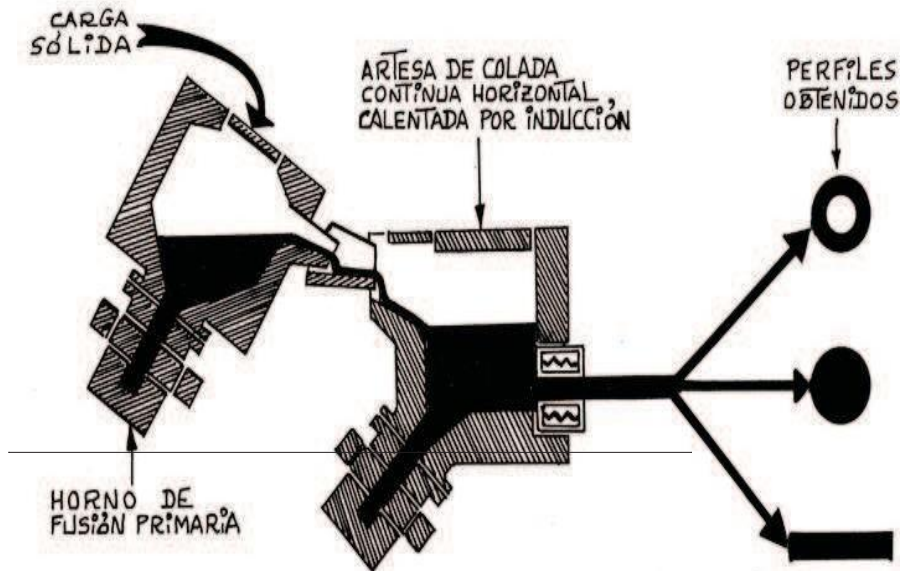
Se caracteriza porque el doblado de la palanquilla comienza a la salida del molde, en la zona de refrigeración secundaria, mientras el corazón está todavía en estado líquido. Se diferencia del modelo anterior en que en aquél el enfriamiento secundario se hace en una zona recta y en este caso es en la curva.

**Figura 12.** Tipos y altura de máquinas de colada continua



**Fuente:** ENRIQUEZ José. Monografías Sobre Tecnología del Acero. España. 2009, p 46.

**Figura 13.** Hornos de inducción para dúplex de colada continua



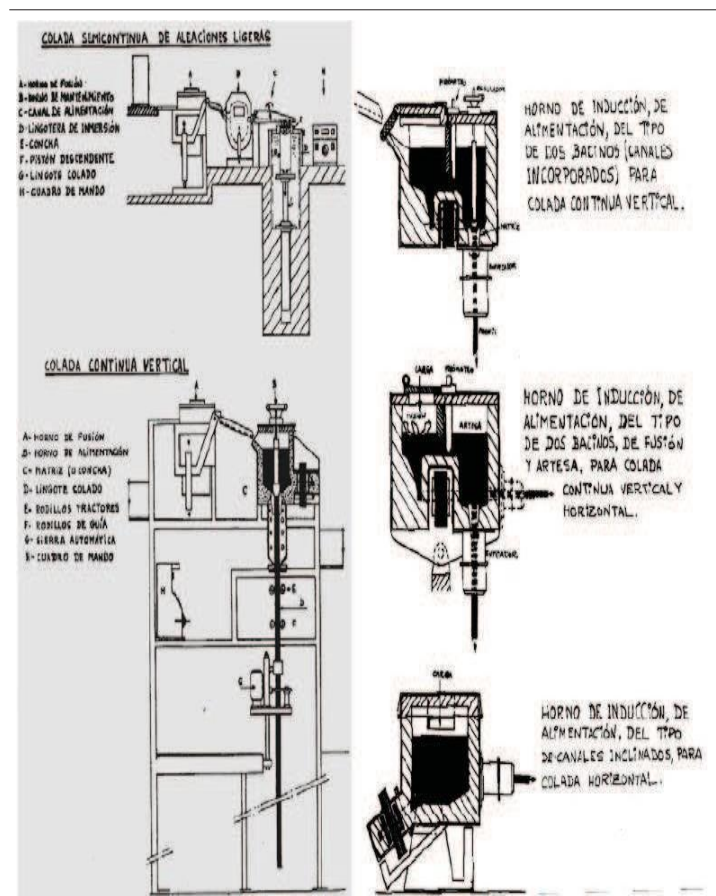
**Fuente:** ENRIQUEZ José. Monografías Sobre Tecnología del Acero. España. 2009, p 47.

➤ Molde curvo y enderezado posterior:

Esta instalación es la de menor altura de las convencionales y que se ha desarrollado más recientemente. En este sistema el molde metálico es curvo y la fase de enfriamiento secundario se realiza sobre palanquilla curva que luego, por medio de los rodillos enderezadores, se transforma en barras rectas.

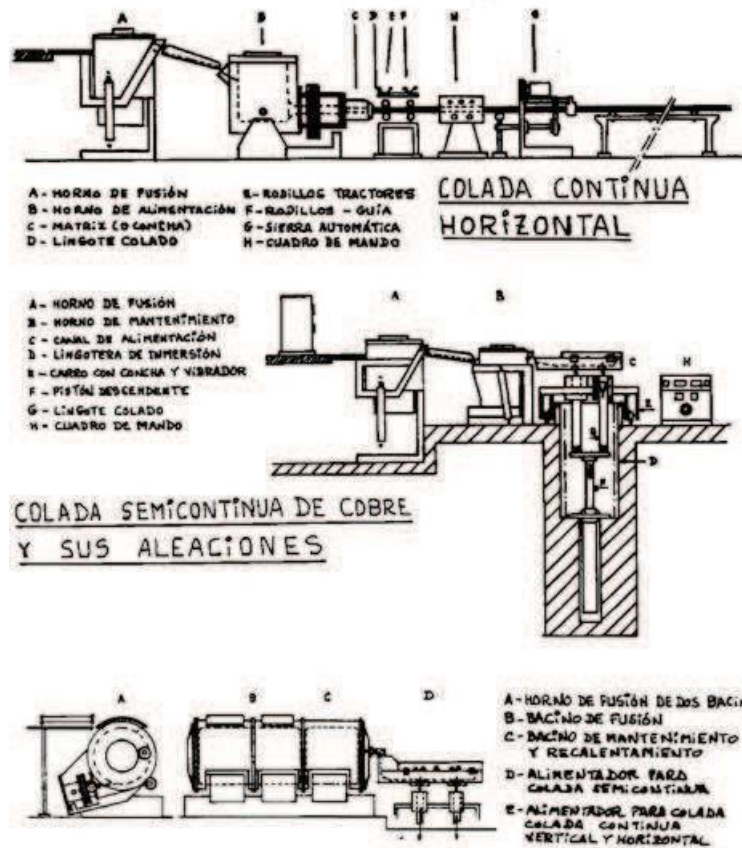
La longitud del enfriamiento secundario en una máquina de molde curvo determina principalmente el radio de curvatura de la máquina, sobre todo cuando se piensa en elevadas velocidades de colada. Es necesario incorporar un sistema de rodillo guía para favorecer el movimiento del perfil que sale a lo largo de la trayectoria curva desde el molde hasta el grupo de rodillos de enderezado. Las máquinas con moldes curvos son especialmente adecuadas para la colada de secciones pequeñas del orden de 2 a 7 pulgadas de espesor, pero también se están introduciendo para la producción de secciones más grandes.

**Figura 14.** Colada semicontinua y continua de aleaciones no ferrosas



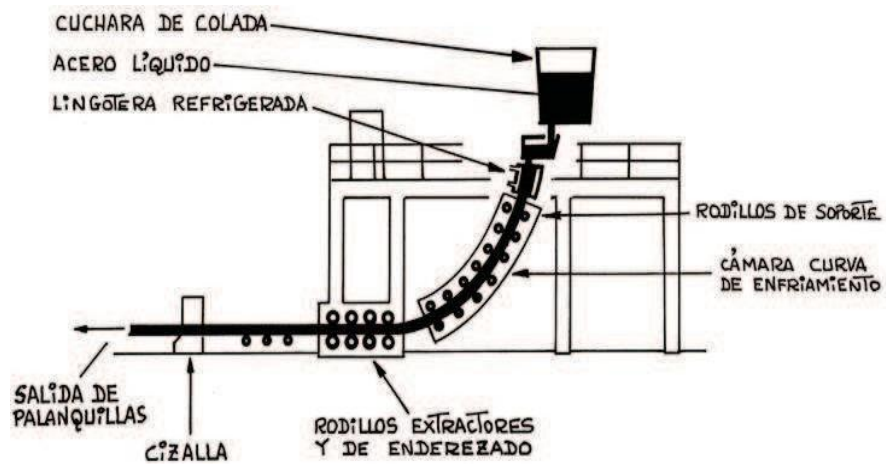
**Fuente:** ENRIQUEZ José. Monografías Sobre Tecnología del Acero. España. 2009, p 48.

Figura 15. colada continua y semicontinua de aleaciones no ferrosas



Fuente: ENRIQUEZ José. Monografías Sobre Tecnología del Acero. España. 2009, p 49.

Figura 16. Colada continua de molde curvo



Fuente: ENRIQUEZ José. Monografías Sobre Tecnología del Acero. España. 2009, p 50.

### 2.6.5 Mecanismo de solidificación y enfriamiento.

El metal líquido se vierte de manera regular e ininterrumpida en la lingotera. En el interior de la misma está colocado, al principio de cada colada, un tope formado por un trozo de palanquilla de sección idéntica a la que se desea fabricar. Es lo que se llama “barra falsa”, sobre la que se inicia la solidificación.

Cuando se ha solidificado el primer baño metálico colado en la lingotera, se hace descender de una forma continua la barra falsa sobre la que se inició la solidificación, que está apoyada y conducida por una varilla vertical de gran longitud, dispuesta debajo del tope.

Esta varilla (a veces una cadena) sirve para sostenerlo y hacerlo descender cuando convenga. En el descenso, el tope arrastra a la barra solidificada que, cuando sale del molde, sufre la acción enfriadora de las duchas de agua y después completa su enfriamiento al aire.

En el curso de la solidificación y enfriamiento de una barra de colada continua se pueden distinguir, por orden cronológico, cuatro etapas principales:

➤ **Enfriamiento primario con contacto directo metal-lingotera:**

Al comenzar la colada, en cuanto se pone el metal líquido en contacto con la pared fría de la lingotera, se forma una piel sólida en cuyo interior hay metal todavía líquido. Esta piel tiene una temperatura de 300 °C. A medida que la barra desciende, esta piel, delgada al principio, va aumentando de espesor y se va haciendo cada vez más resistente. El espesor solidificado a la salida del molde tiene mucha importancia. Si el espesor es muy pequeño, es posible que se produzcan desgarros y roturas. Si es demasiado grueso puede haber problemas en el curvado posterior.

El enfriamiento del metal dentro del molde provoca una contracción de la sección transversal de la barra; esta contracción es suficiente para que la piel se despreque de la pared de la lingotera. Los puntos de la misma sección transversal no se separan simultáneamente del molde y hay una altura en la que el contacto de barra y lingotera es bastante irregular e imperfecto.

La longitud de la zona de contacto completo de la lingotera es tanto mayor cuanto más rápida sea la velocidad de extracción de la barra y mayores las dimensiones de su sección transversal.

➤ **Enfriamiento primario sin contacto directo metal-lingotera:**

A continuación, la contracción térmica de esta primera costra solida la separa del apoyo de la lingotera; la costra debe tener una pared lo suficientemente fuerte como para soportar la presión metalostática interna. En general, como en la colada antigua en lingotera, las esquinas se enfrían y contraen más rápidamente que las paredes; a su vez, las paredes más pequeñas enfrían y contraen antes que las anchas.

La longitud de la lingotera no suele ser mucho mayor que 500 mm. En la última parte despegada se forma una película gaseosa (1 a 3 %) que separa la barra de la lingotera; esto es un inconveniente para su refrigeración. En esta zona las pérdidas caloríficas por conductividad, pasan a ser por radiación y, en menor medida, por convección. Desde ese momento, y con el metal todavía dentro de la lingotera, pero sin contacto con la misma, el enfriamiento se verifica más lentamente que al principio. La temperatura inicial de la barra, que al iniciarse la separación del molde era de unos 300 °C, se eleva luego rápidamente durante unos momentos debido al flujo de calor desde el corazón de la barra a la piel.

- Enfriamiento secundario por duchas de agua pulverizada:

Comienza el enfriamiento secundario para terminar en esta zona la completa solidificación de la barra hasta el corazón. En esta zona se producen los posibles defectos internos.

A la salida de la lingotera, y para poder mantener un ritmo de enfriamiento y solidificación rápido, se refrigera la barra con enérgicas duchas de agua. Se origina un fuerte gradiente térmico entre el corazón y la piel. El número de duchas controlará el momento de solidificación total del metal del corazón de la barra.

- Enfriamiento al aire:

Ya no hay duchas de agua y, en consecuencia, desaparece drásticamente el gradiente térmico.

Se observa un recalentamiento de la superficie exterior, disminuyendo el enfriamiento del corazón de la barra. La homogeneización de las temperaturas se consigue durante el descenso por simple enfriamiento de la barra al aire libre, después de terminado el enfriamiento por duchas de agua. Hasta este momento, el gradiente térmico en las partes solidificadas era muy grande, debido a la gran rapidez con que se producía el enfriamiento.

Como se ha citado, al comenzar esta zona se produce un calentamiento superficial del metal debido a que en esta fase el enfriamiento es menos enérgico. El corazón, que se encuentra ya en estado sólido, continúa también su enfriamiento. El gradiente térmico de la superficie al interior es inferior al de las etapas anteriores.

## **2.7. COMPARACIÓN DE COLADA CONTINUA CON COLADA EN LINGOTERA**

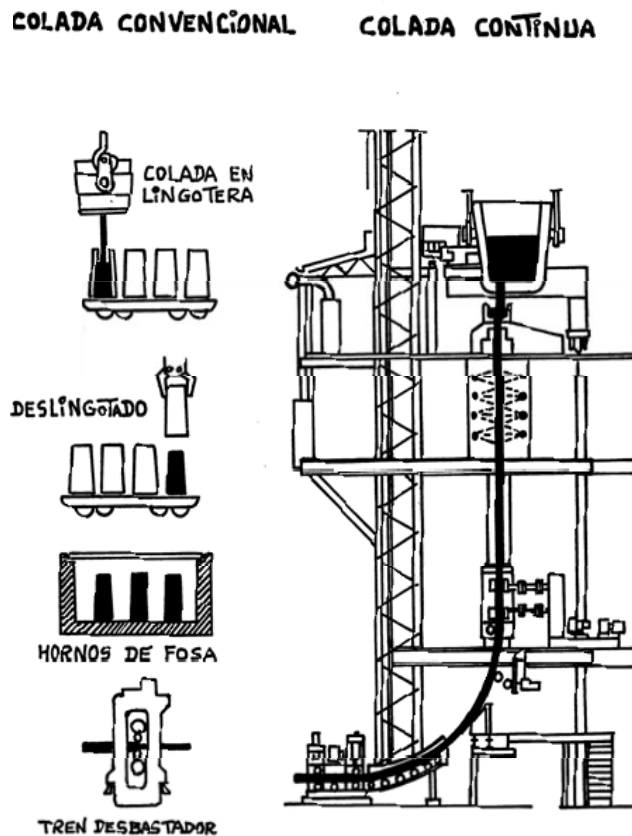
El antiguo método consistente en la colada en lingoteras y laminación posterior de los lingotes ha sido el sistema tradicional empleado para la fabricación de palanquillas durante los 100 años transcurridos aproximadamente desde el descubrimiento del convertidor Bessemer hasta mediados del siglo XX. Consta de las siguientes fases:



- Colada del acero desde la cuchara a las lingoteras, desmoldeo, obtención de los lingotes de acero y reposición de las lingoteras.
- Transformación de esos lingotes por laminación en grandes trenes denominados “trenes blooming” o “trenes slabing” en productos o perfiles intermedios. Estos perfiles se llaman, según su forma, “palanquillas” (“blooms”) cuando son de sección aproximadamente cuadrada de 50 a 300 mm de lado y “llantones” (“slabs”) cuando son de sección rectangular variable en los rangos de 50 x 200 y 300 x 1000 mm o mayores.
- Laminación de las palanquillas o llantones (planchones) en trenes comerciales para obtener las barras, perfiles, alambres, chapas o flejes de las medidas deseadas.

Una instalación de colada tradicional en lingoteras exige, aparte de equipos pesados y caros, el trabajo de 100 operarios. En cambio, una máquina de colada continua de la misma producción demanda sólo 30, aproximadamente.

**Figura 17.** Comparación entre colada convencional y colada continua



**Fuente:** La Colada del Acero. Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. España. 2010.



## 2.8. VENTAJAS DE LA COLADA CONTINUA

La calidad del metal fabricado por colada continua correctamente procesado satisface los requisitos exigibles a un material de calidad homogénea, libre de defectos internos y con buen acabado superficial. Presenta las siguientes ventajas en comparación con la colada tradicional en lingoteras:

- Eliminación del proceso intermedio de laminación de lingotes hasta desbastes o productos intermedios, evitando así las operaciones y costes derivados de este proceso.
- Disminución sensible de la cantidad de mano de obra necesaria en comparación con la empleada en la colada convencional en lingoteras.
- Mayor productividad.
- Eliminación de factores de coste tan importantes como son los fosos para lingoteras, su preparación y las operaciones de desmoldeo y limpieza, así como los costosos trenes blooming - slabbing y equipos auxiliares.
- Importante reducción del consumo de energía al no ser necesaria la operación de recalentamiento de lingotes en los hornos.
- Mayor rendimiento metálico del metal líquido, expresado como la relación existente entre el peso del semiproducto útil obtenido y el total colado en la máquina.
- Supresión del rechupe, que solamente se producirá en el extremo final de la barra.
- El trabajo en secuencia, en el que cada cuchara entra cuando se vacía la anterior, aumenta el rendimiento y productividad a la vez que reduce los costos de refractario y consumibles.
- Reducción del tiempo transcurrido entre la elaboración del metal líquido y la obtención del semiproducto que se va a laminar en caliente.
- Mejor calidad superficial de los productos, con supresión o reducción de los costes ocasionados por los esmerilados y escarpados.
- Producto uniforme, libre de segregaciones y con mejor calidad interna. La rapidez del enfriamiento no deja tiempo suficiente para que se segreguen los elementos aleados. De esta manera se obtienen productos de una gran homogeneidad, que lleva consigo mayor uniformidad en las propiedades físicas, químicas y mecánicas, tanto longitudinal como transversal.

La aplicación de la informática al control del proceso garantiza una gran regularidad de los productos y permite cumplir de forma eficaz con los patrones modernos de calidad. En resumen, el proceso de colada continua implica menores costes de fabricación por cada tonelada de producto fabricado y una calidad normalmente superior a la obtenida con los procesos convencionales en lingotera.

Estas ventajas técnicas y económicas explican el crecimiento permanente de este proceso. Se ha pasado de un 3 % del total de acero fabricado al final de la década de los sesenta hasta un valor próximo al 100 % al final del siglo XX.

Hay excepciones:

- La fabricación de productos de gran tamaño para forja, cuyas dimensiones impiden fabricarlos por colada continua.
- Algunos aceros especiales de alta aleación.
- Las piezas moldeadas de acero.

## 2.9. TRANSFERENCIA DE CALOR.

En la colada continua, al igual que en la mayoría de los procesos en los que se involucra la transferencia de calor, esta se realiza mediante tres mecanismos básicos que son conducción, convección y radiación, describiendo brevemente a continuación lo que será de interés para este estudio.

### 2.9.1 Transferencia de calor por convección

Este es un proceso de transporte de energía que se puede presentar de dos formas; natural o forzado. El primero se presenta cuando las condiciones del elemento enfriador se mantienen sin movimiento, es decir, solo se da la transferencia de calor del cuerpo más caliente hacia el más frío sin la acción de un fenómeno externo que acelere; el segundo sucede por medio de bombas extractoras o por otros dispositivos, que provocan el movimiento de un fluido forzando el enfriamiento.

En el caso de la convección forzada, para llevar a cabo cálculos se debe conocer el coeficiente convectivo de transferencia de calor ( $h$ ); el cual indica el grado de convección entre un objeto y su entorno. Para obtener dicho valor se deben considerar varios aspectos del sistema en el que se va a desarrollar la convección, tales como:

- La geometría del sistema.
- El fluido por el cual se encuentra rodeado el objeto.
- La temperatura del objeto que desprende calor.
- La velocidad del fluido.

Cada sistema posee un coeficiente de transferencia de calor particular, el cual deberá obtenerse de manera experimental o bien realizando operaciones con ecuaciones y experimentos ya existentes. Por ejemplo, la ley de enfriamiento de Newton establece que la cantidad de calor que pierde un objeto "caliente", con aire soplando a su alrededor, es proporcional a la diferencia de temperaturas entre el objeto y el medio refrigerante; la cual puede ser utilizada para calcular la transferencia de calor, entre una pared y el fluido en movimiento que la rodea.

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_{\alpha})$$

Esta ecuación establece que la rapidez de transferencia de calor está relacionada con el coeficiente de transferencia de calor  $k$  de cada material, y con la diferencia

de temperaturas entre la pared y aquella del fluido en movimiento, en donde se desarrolla.

Por otro lado, la cantidad de calor extraída por el flujo de agua en contacto con un cuerpo sólido puede ser calculado mediante el flujo másico, por su capacidad calorífica y la diferencia de temperaturas del agua de enfriamiento a la entrada y salida, como se muestra en la ecuación:

$$q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Donde  $m$  es el flujo másico del agua de enfriamiento (kg/s);  $C_p$  es la capacidad calorífica (J/kg/°C) y  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura en el agua de enfriamiento (°C).

El valor de flujo másico del fluido de enfriamiento,  $m$ , se puede estimar del producto del flujo volumétrico ( $Q$ ) y la densidad del mismo ( $\rho$ ), por lo que la ecuación anterior resulta de la siguiente manera

$$q = Q \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T$$

La cantidad neta de energía que el fluido de enfriamiento puede ser capaz de remover, deberá ser obtenida por el producto del calor estimado y el tiempo de contacto entre el sólido y el fluido.

De igual forma la cantidad de energía liberada por una masa líquida al solidificarse, se puede obtener de la ecuación

$$q = -m \cdot \Delta H.$$

Donde  $m$  es la masa del sólido formado y  $\Delta H$  es el calor latente de transformación líquido a sólido. La masa puede ser sustituida por la densidad y el volumen del cuerpo solidificado, quedando la ecuación de la siguiente manera.

$$q = -\rho \cdot v \cdot \Delta H.$$

## 2.9.2 Números adimensionales

Existen correlaciones para realizar cálculos de transferencia de calor, considerando otros parámetros del fluido como son la viscosidad, la densidad, la velocidad del flujo, la diferencia de temperaturas entre el fluido vaciado y el recipiente; así como de la geometría del sistema en que se lleve a cabo tal proceso. La resultante estequiométrica no tiene unidades, mencionando a estas situaciones adimensionales, tal es el caso de:

- El número de Nusselt. (Nu)

Se emplea frecuentemente para resolver problemas de transferencia de calor por convección. Definiéndose mediante la relación

$$Nu = \frac{h \cdot Lc}{k}$$

Dónde:  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor;  $Lc$  la longitud del objeto que va a emitir calor,  $k$  representa la conductividad térmica del fluido.

Si se expresa en números adimensionales estará representada por la relación:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^b \cdot Pr^c$$

$Re$  el número de Reynolds,  $Pr$  el número de Prandtl,  $b$  y  $c$  constantes establecidas. La relación Nusselt, también se puede expresar en función del coeficiente de calor por convección y conducción:

$$Nu = \frac{\text{rapidez de la extracción del calor por conveccion}}{\text{rapidez de la extracción del calor por conduccion}}$$

Si el numerador y el denominador tienen una magnitud similar (Relación cercana a 1), se trata de un caso característico de flujo laminar; por el contrario, si la relación resulta en un número grande, se va a tener un flujo turbulento.

➤ El número de Reynolds. ( $Re$ )

Usado para establecer relaciones entre los datos de transferencia de calor por medio de convección, el número de Reynolds sirve para caracterizar el movimiento de un fluido, y se expresa como un cociente, en el que se relaciona la fuerza de inercia con la fuerza viscosa de un fluido.

$$Re = \frac{L \cdot v \cdot \rho}{\mu}$$

Donde  $\rho$  es la densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ );  $v$  es la velocidad del fluido ( $\text{m/s}$ );  $L$  indica una longitud característica ( $\text{m}$ )  $\mu$  indica la viscosidad del fluido ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ). Si se considera en lugar de largo de la tubería el diámetro de esta ( $D$ ), se obtiene la relación:

$$Re = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu}$$

➤ El número de Prandtl. ( $Pt$ )

Este está representado por la resistencia hidrodinámica y la térmica que ofrece el fluido, en donde a diferencia de otros números adimensionales el de Prandtl, no contiene variables de longitud, ya que sólo depende del fluido con el que se trabaja.

$$Pt = \frac{\text{resistencia hidrodinamica}}{\text{resistencia termica}}$$

### 3. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

Formaq es una empresa que se dedica a la fabricación de partes mecánicas utilizando el proceso de fundición, entre los principales metales que se funden se encuentran las aleaciones de cobre, para ello cuenta con un horno de crisol a base de gas, una máquina de colada continua cuyo funcionamiento es vertical descendente, la cual fue ensamblada por Tecnika Saray s.a. y un torno CNC en el área de mecanizado.

#### 3.1 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA, PARA PRODUCCIÓN NO FERROSA.

La empresa ha estado en la industria metalmecánica por más de 20 años, y durante este periodo ha adquirido la destreza en la ejecución de este trabajo y al mismo tiempo se ha organizado para realizarlo de una manera más productiva, esto consiste en que la planta está dispuesta en áreas de trabajo de tal manera que los procesos se realizan de una manera rápida, las áreas de trabajo con que cuenta la empresa son las siguientes:

- Área de diseño. En esta área se planifica el trabajo según las especificaciones del cliente, se realizan los planos, se dimensionan las partes y se emiten las órdenes de trabajo.
- Área de materiales. En esta área se encuentra todo tipo de chatarra de los diversos metales que se utilizan en la fabricación de las piezas.
- Área de arenas. Es un lugar específico en donde se almacenan las arenas de fundición tales como: arena natural para moldeo en verde (húmedo), bentonita, arena de sílice para moldeo con silicato de sodio y CO<sub>2</sub>, actualmente se ha venido cambiando el moldeo al CO<sub>2</sub> por moldeo con resinas.
- Área de moldeo. En esta área se elabora los modelos y los moldes que previamente fueron diseñados y revisados en el área de diseño.
- Área de fusión. En esta área se encuentran los hornos de fundición, las prensas para forja y la máquina de colada continua.
- Área de desmoldeo. En esta área se retira la parte fundida del molde se cortan los bebederos y conductos, para luego aplicarle una limpieza superficial con discos abrasivos y si es necesario se le aplica limpieza por medio de chorros de arena.
- Área de control de calidad. En esta área se inspecciona que la pieza fundida no presente defectos, y si se encuentran, esta se regresa para reprocesarla, caso contrario se la pasa al área de mecanizado si fuera así el caso.

- Área de mecanizado. En esta área se realiza el mecanizado correspondiente a las partes terminadas y revisadas según sea el requerimiento del cliente, la empresa cuenta con la maquinaria necesaria para este tipo de trabajo.

### **3.2. FUNDICIÓN ARTESANAL CON MOLDES DE ARENA, DEFECTOS FRECUENTES.**

El proceso para producir piezas u objetos útiles con metal en estado líquido se le conoce como proceso de fundición, este proceso se ha practicado desde el año 2000 a.C y consiste en vaciar metal fundido en moldes con la forma de la pieza u objeto que se desea fabricar, esperar que solidifique al enfriarse y adquiera resistencia mecánica.

Para lograr la producción de una pieza fundida es necesario realizar las siguientes actividades:

1. Diseño de los modelos de las piezas y sus partes internas
2. Diseño del molde
3. Preparación de los materiales para los modelos y los moldes
4. Fabricación de los modelos y los moldes
5. Colado de metal fundido
6. Enfriamiento de los moldes
7. Extracción de las piezas fundidas
8. Limpieza de las piezas fundidas
9. Terminado de las piezas fundidas
10. Recuperación de los materiales de los moldes

### **3.3. DEFECTOS FRECUENTES EN PROCESOS DE FUNDICIÓN**

Hay numerosas contingencias que causan dificultades en una operación de colado y originan defectos de calidad en el producto. Existen defectos comunes en todos los procesos de fundición como lo son:

- Llenado incompleto.

Este defecto aparece en una fundición que solidificó antes de completar el llenado de la cavidad del molde, las causales típicas incluyen: 1) fluidez insuficiente del metal fundido, 2) muy baja temperatura de vaciado, 3) vaciado que se realiza muy lentamente y 4) sección transversal de la cavidad del molde muy delgada.

- Junta fría.

Una junta fría aparece cuando dos porciones del metal fluyen al mismo tiempo, pero hay una falta de fusión entre ellas debido a solidificación o enfriamiento prematuro, sus causas son similares a las del llenado incompleto.

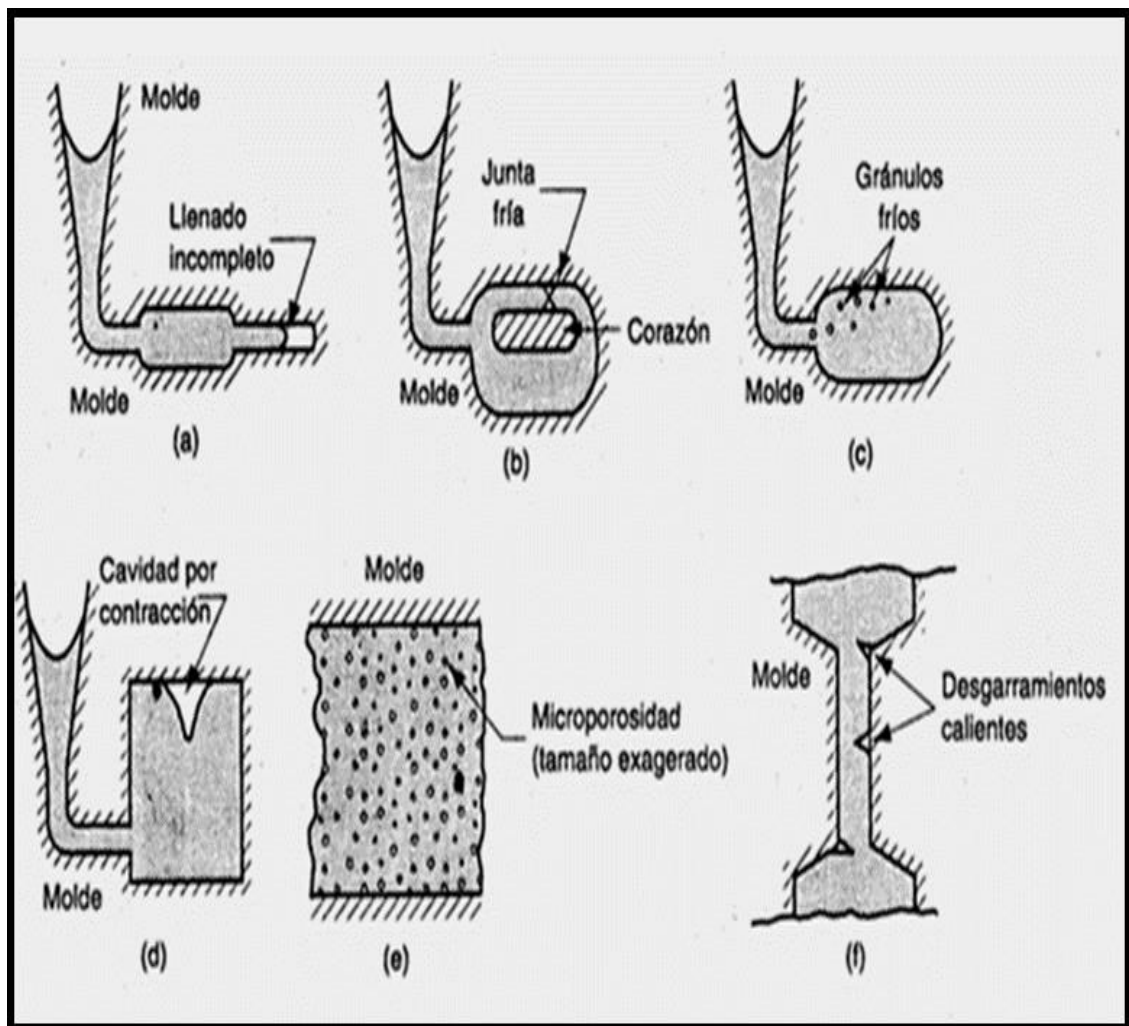
- Metal granoso o gránulos fríos.

Las salpicaduras durante el vaciado hacen que se formen glóbulos de metal que quedan atrapados en la fundición. Un buen diseño del sistema y de los procedimientos de vaciado que eviten las salpicaduras puede prevenir este defecto.

- Cavidad por contracción.

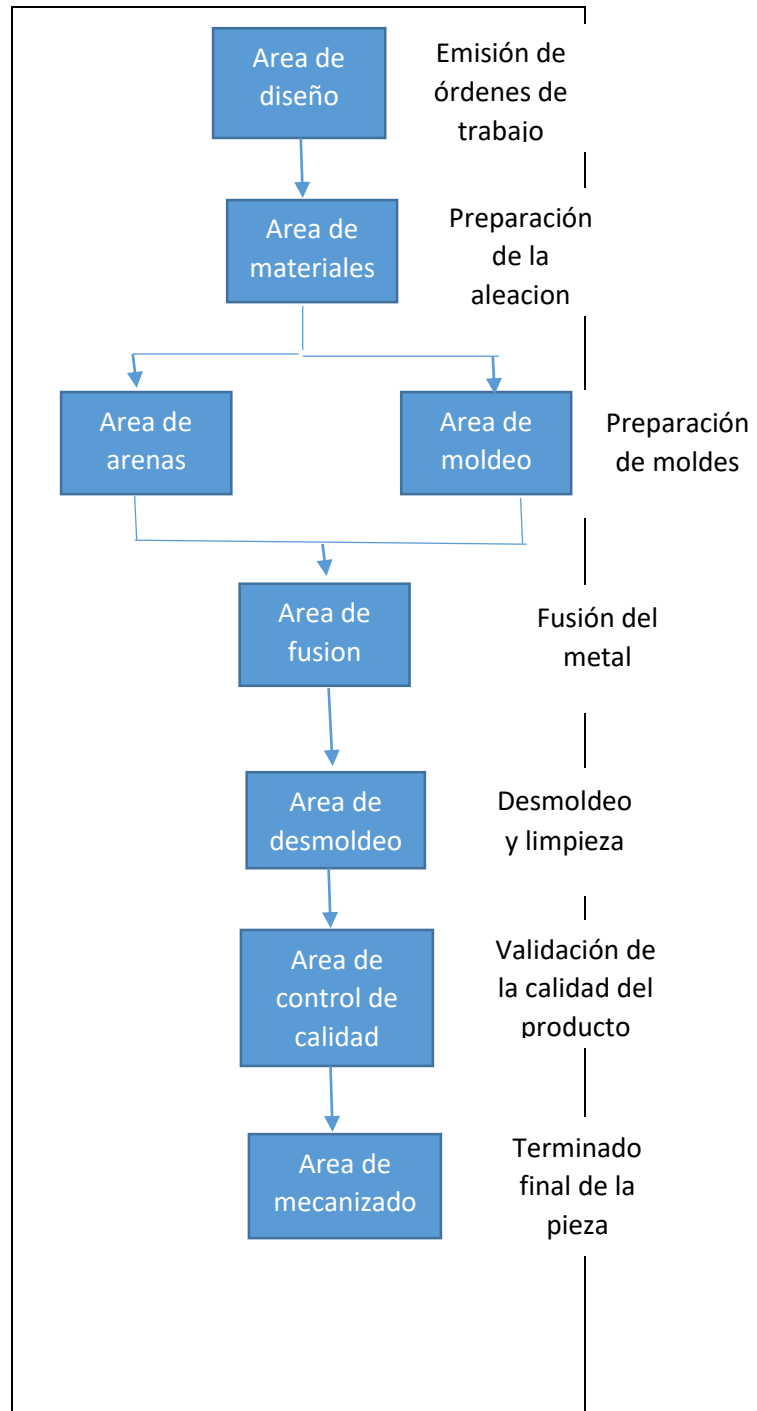
Este defecto es una depresión de la superficie o un hueco interno en la fundición debido a la contracción por solidificación que restringe la cantidad de metal fundido disponible en la última región que solidifica. Ocurre frecuentemente cerca de la parte superior de la fundición, en cuyo caso se llama rechufe, el problema se puede resolver frecuentemente por un diseño apropiado de la mazarota.

**Figura 18.** Defectos más comunes en las fundiciones



**Fuente:** CAPELLO, Edoardo; (1981); "tecnología de la fundición"

**Figura 19.** Esquema áreas de trabajo Formaq



**Fuente:** autor



- Microporosidad.

Se refiere a una red de pequeños huecos distribuida a través de la fundición debida a la contracción por solidificación del último metal fundido en la estructura dendrítica. El defecto se asocia generalmente con las aleaciones, debido a la forma prolongada, en que ocurre la solidificación en estos metales.

- Desgarramiento caliente.

Este defecto, también llamado agrietamiento caliente, ocurre cuando un molde que no cede durante las etapas finales de la solidificación, o en las etapas primeras de enfriamiento, restringe la contracción de la fundición después de la solidificación, este defecto se manifiesta como una separación del metal en un punto donde existe una alta concentración de esfuerzos, causado por la indisponibilidad del metal para contraerse naturalmente.

En la fundición en arena y otros procesos con molde desechable o consumible, esto se previene arreglando el molde para hacerlo retráctil. En los procesos de molde permanente se reduce el desgarramiento en caliente, al separar la fundición del molde inmediatamente después de la solidificación.

### **3.4. MÉTODOS DE INSPECCIÓN DE LA FUNDICIÓN.**

- a. Inspección visual para detectar defectos obvios como llenado incompleto, cortes fríos y grietas severas en la superficie.
- b. Medida de las dimensiones para asegurarse que están dentro de las tolerancias.
- c. Pruebas metalúrgicas, químicas, físicas y otras relacionadas con la calidad inherente del metal fundido, pruebas de presión para localizar fugas en la fundición, métodos radiográficos, pruebas de partículas magnéticas, uso de líquidos penetrantes fluorescentes y pruebas supersónicas para detectar defectos superficiales o internos en la fundición, ensayos mecánicos para determinar propiedades, tales como la resistencia a la tensión y dureza.

Si se descubren defectos, pero éstos no son serios, muchas veces es posible salvar la fundición por soldadura, esmerilado y otros métodos de recuperación que se hayan convenido con el cliente

## **4. PLANTEAMIENTO Y ALTERNATIVA**

### **4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

En la actualidad la empresa desea incursionar en el campo de colada continua de barras tubulares de bronce, ya que, los productos obtenidos son fabricados por métodos tradicionales como el moldeo en arena, generando en ocasiones, defectos y desperdicio de material lo que genera mayores gastos. Con base a lo antes

expuesto la empresa ve la necesidad de implantar un método de producción de tubos de bronce como un plan piloto con la máquina de colada continua vertical descendente ensamblada por Tecnika Saray, con la que cuenta ella.

#### 4.1.1. Sistema de alimentación

Uno de los inconvenientes del proceso de colada continua es conseguir mantener una alimentación controlada, es decir que el metal líquido siempre debe ingresar manteniendo un caudal constante, y así lograr que el volumen de la lingotera se mantenga siempre en el nivel apropiado; si esto no es considerado se va a tener un exceso de metal líquido lo que hará que este se desborde por la lingotera o viceversa, es decir que la falta de metal haga que se vacíe la lingotera y así dañe la barra tubular a obtener y consecuentemente todo el proceso.

#### 4.1.2. Sistema de extracción.

El principal inconveniente de la colada continua es lograr que el sistema empleado para mover o arrastrar la barra tubular mantenga siempre una velocidad constante de arrastre durante todo el proceso, de lo contrario si la velocidad varía durante el mismo se tendrá varios defectos (juntas frías, porosidades, propiedades mecánicas deficientes, se obtendrán barras macizas en lugar de tubulares, etc.) o incluso que llegue romperse la misma dañando así todo el proceso e incluso la pérdida de tiempo y dinero de la empresa.

### **4.2 PARÁMETROS FUNCIONALES Y DE DISEÑO**

#### 4.2.1 Parámetros Funcionales

A continuación, se puntualizan los principales parámetros funcionales que se requieren para que la obtención de estos productos se haga de la mejor manera.

- Control de Flujo.

La máquina de colada continua debe contar con un horno de sostenimiento o distribuidor que mantenga el metal líquido a temperaturas entre 900° y 950°, para que el flujo sea constante hacia la lingotera o molde.

- Funcionalidad.

La máquina debe mantener la velocidad de arrastre constante estableciéndola en 9 cm cada minuto, este parámetro es de gran importancia en el proceso de colada continua, ya que si la velocidad varía durante el proceso se pueden tener defectos en las barras.

- Refrigeración

Este proceso se lo hace por medio de coquilla refrigerada de forma tubular de cobre, con orificios por los cuales ingresa y sale el agua, por lo que se debe tener en cuenta

que el sistema de refrigeración de la misma debe garantizar la extracción del calor necesario, para que se pueda solidificar el metal líquido.

- Material de la lingotera y dispositivo.

El material de la lingotera y dispositivo debe ayudar a extraer el calor del metal líquido para que este pueda solidificarse rápidamente sin que haya una adherencia en ellos el más conveniente en este proceso es el grafito.

- Geometría de la Lingotera.

La geometría de la lingotera debe ser de tal forma que el metal pueda deslizarse con facilidad y evite la acumulación de tensiones residuales en el material de la pieza colada. Debe tener una forma cónica a lo largo de toda la longitud de la coquilla, la conicidad tiene el objeto de mejorar la disipación del calor en dirección de la colada mediante la adaptación del contorno interior.

## **5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

### **5.1. PRUEBAS DE COLADA CONTINUA EN LABORATORIO.**

Los experimentos que durante esta etapa se realizaron, fueron de gran ayuda al momento de realizar las pruebas en planta ya que con ellos se pudo establecer el comportamiento de diferentes materiales con los cuales se fabricó el molde y el dispositivo que le daría la forma de barra tubular simulando el procedimiento de colada continua y así determinar cuál sería el más adecuado para implementarlo en la empresa.

#### **5.1.1 Selección del mejor material para el molde interno y externo.**

Después de consultar diferentes bases de datos como Science engineering, EBSCO y Engineering Village; habiendo realizado pruebas con sonda de acero inoxidable refrigerada por agua; de solidificación dirigida con fundición gris y grafito; y considerando que la empresa ha trabajado en sus procesos de fabricación con un tipo especial de grafito, se establece seguir utilizando este material para la elaboración de barras tubulares.

Ahora debíamos enfocarnos en el tipo de grafito que debíamos utilizar, analizando varias características que dependen principalmente de la composición de la aleación a tratar ya que la colada de Hierro precisa un grafito resistente a la abrasión. La colada de Latón, un grafito relativamente denso con la suficiente porosidad que permita la evaporación del zinc en la zona de solidificación. Las aleaciones no ferrosas con contenidos de níquel o cobalto necesitan calidades de grafitos de alta densidad que reduzcan la acción de un ataque químico a la hilera.

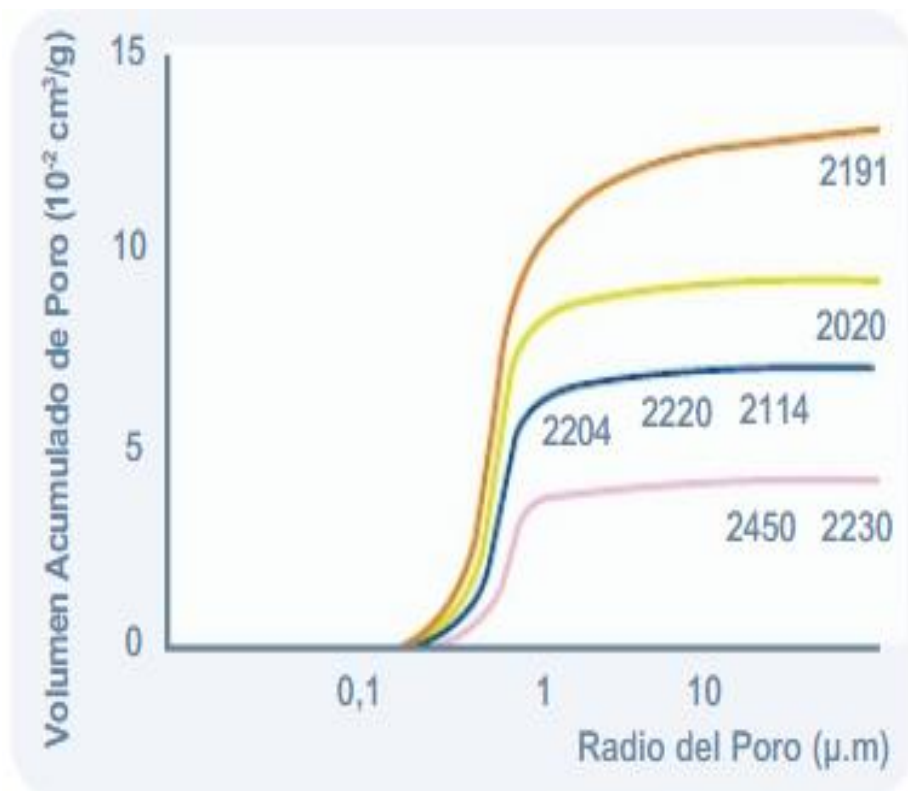
Otros parámetros importantes a la hora de decidir:

- La dimensión y forma de la sección a obtener,
- La velocidad de colada,
- La cantidad total de material a producir,
- La orientación de la colada (vertical u horizontal).

El Grafito está especialmente adaptado para su uso como hilera para colada continua gracias a sus características físicas:

- Presenta baja porosidad, por esta razón una baja reactividad con otros metales. Estas características le permiten ser seleccionados para coladas de diferentes materiales.

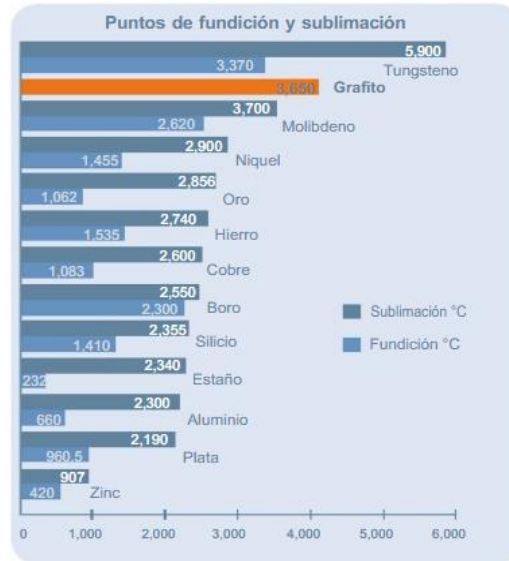
**Figura 20.** Porosidad de diferentes tipos de grafito.



**Fuente:** MERSEN, grafitos especiales para colada continua de metales.

- Capaz de resistir las temperaturas de fundición de los metales. El Grafito sublima a partir de  $3650^{\circ}\text{C}$ .
- Alta resistencia térmica y química.
- Muy elevada resistencia al choque térmico.
- Buenas propiedades lubricantes frente a la fricción.

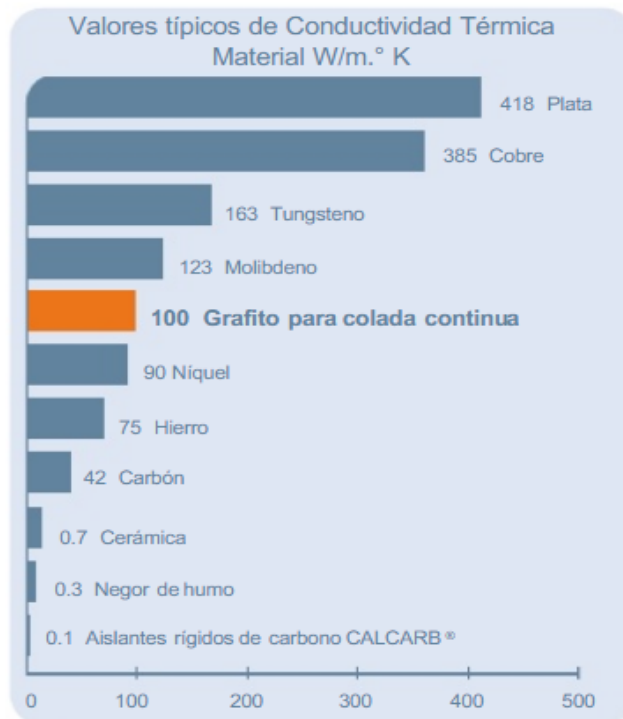
**Figura 21.** Puntos de fusión y sublimación de diferentes materiales.



**Fuente:** MERSEN, grafitos especiales para colada continua de metales.

- Alta conductividad térmica.

**Figura 22.** Valores de conductividad térmica de distintos materiales.



**Fuente:** MERSEN, grafitos especiales para colada continua de metales

**Figura 23.** Conductividad térmica de diferentes tipos de grafito.



**Fuente:** MERSEN, grafitos especiales para colada continua de metales.

- Bajo coeficiente de expansión térmica.
- Fácil de mecanizar y de pulir.

**Tabla 4.** Calidades de grafito dependiendo del producto a fabricar.

Aleación de colada	Colada de barra	Colada de tubo
Fundición gris	<b>2020,1940</b>	<b>2020,1940</b>
Latón	<b>2191,2114</b>	<b>2020,2191</b>
Bronce	<b>2191,2114</b>	<b>2191, 2220</b>
Bronce fosforado	<b>2191,2220</b>	<b>2191,2220</b>
Aluminio	<b>2191</b>	
Plata- Oro		<b>2191</b>

**Fuente:** MERSEN, grafitos especiales para colada continua de metales.

**Tabla 5.** Propiedades físicas de diferentes tipos de grafito.

Unidad Característica	Unidades	2191	2020	2114	2220	2204	2450	2230
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	1,75	1,77	1,81	1,84	1,85	1,86	1,90
Porosidad	%	12	9	10	8	8	8	4
Dureza	Rockwell	80 (L)	95 (L)	70 (H)	80 (H)	80 (H)	80 (H)	85 (H)
Módulo de elasticidad	GPa	10,1	9,2	11,4	11,4	10,1	9,2	11,4
Resistencia Flexión	MPa psi	44 6,400	45 6,500	52 7,500	58 8,400	44 6,400	45 6,500	58 8,500
Resistencia Compresión	MPa psi	97 14,100	99 14,300	103 15,000	124 18,000	97 14,100	99 14,300	124 18,000
Coeficiente de Expansión Térmica	x 10 <sup>-6</sup>							
	/°C	4,2	4,3	5,3	5,5	4,2	4,3	5,5
	/°F	2,3	2,4	3,0	3,1	2,3	2,4	3,1
Resistividad Eléctrica	μΩcm	1,090	1,550	1,240	1,140	1,090	1,550	1,140
	Ωin	0,00043	0,00061	0,00049	0,00045	0,00043	0,00061	0,00045
Conductividad Térmica	W/m°C	116	85	104	112	116	85	112
	BTU-Ft/Ft <sup>2</sup> Hr°F	67	49	60	65	67	49	65
Tamaño medio de grano	μm	15	15	13	13	15	15	13
	in	0,0006	0,0006	0,0005	0,0005	0,0006	0,0006	0,0005

**Fuente:** MERSEN, grafitos especiales para colada continua de metales.

### 5.1.2 Selección del mejor grafito para la aplicación.

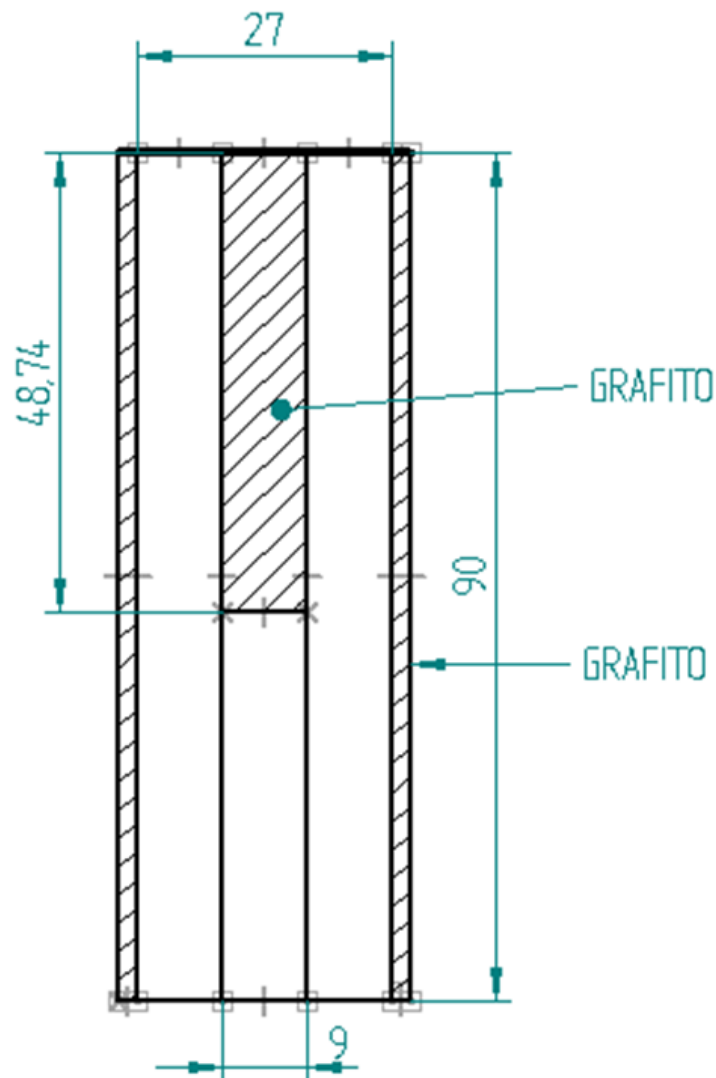
Existe una gran gama de grafitos que ha sido desarrollada en colaboración con fundidores y productores para la obtención de las mejores características para los diferentes tipos de colada continua. De acuerdo con las propiedades físicas y mecánicas de los diferentes tipos de grafitos se pudo realizar la mejor elección para el trabajo que se iba a desarrollar. Conociendo que el tipo de material que se iba a fundir era bronce fosforado SAE 65, y que el producto final sería un tubo, se encontró que el mejor tipo de grafito para este procedimiento era el grafito 2220 el cual tiene unas mejores propiedades mecánicas que el 2191 que también cuenta con características necesarias para la producción de dichas piezas.

### 5.1.3 Fabricación del molde y dispositivo interno.

Debido a que el grafito especial 2220 tiene un costo elevado, se realiza una prueba con un grafito de calidad inferior, y dependiendo de los resultados se cambiaría a una mejor.

Para la construcción del molde a escala fue necesario la utilización del laboratorio de metalurgia mecánica de la Universidad Pedagógica Y Tecnológica de Colombia, que con la colaboración de expertos en el manejo de torno se obtuvo un molde con diámetro interno de una pulgada y una pared de 1/8 de pulgada de una longitud de 10 cm. Para el dispositivo interno se mecanizó un grafito de 5/16 de pulgada.

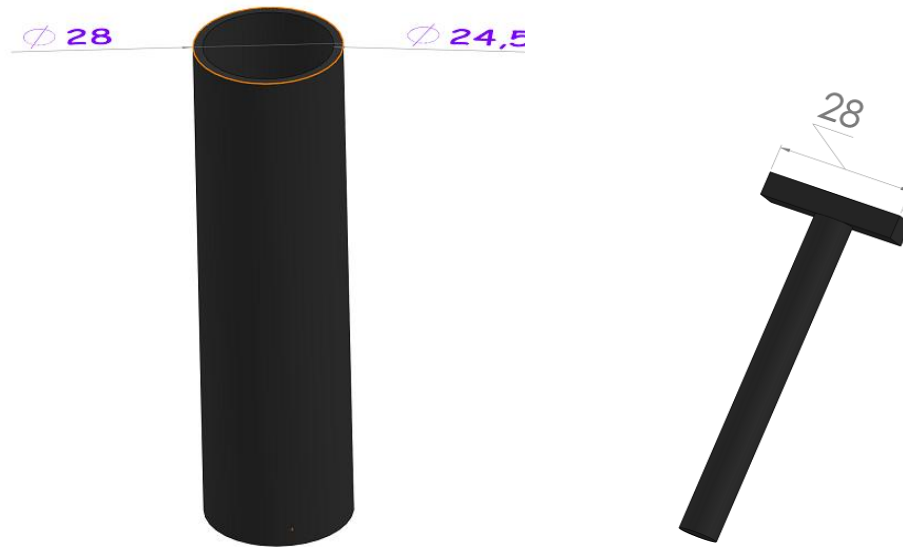
**Figura 24.** Molde en grafito 2D, prueba horno de inducción UPTC



**Fuente:** autor



**Figura 25.** Molde y dispositivo interno (3D) utilizado en las pruebas de laboratorio.



**Fuente:** Autor, dibujado en solidworks.

**Figura 26.** Molde y dispositivo interno ensamblados (vista inferior)



**Fuente:** Autor, dibujado en solidworks.

#### 5.1.4 Fusión y colada del material.

Teniendo el molde y el dispositivo interno se procede a la fusión y posterior colada del material bronce SAE 65, el cual provenía de la empresa para que así trabajáramos con la composición química que ellos trabajan, 88% de cobre y 12% de estaño.

La fusión se realizó en un horno de inducción de alta frecuencia que se encuentra en los laboratorios de metalurgia de la Universidad Pedagógica Y Tecnológica De Colombia, al material se le adiciona cuprofosforo, cuya finalidad es desoxidar el bronce, y a su vez incorporar el fósforo necesario al mismo, facilitando la soldadura y mejorando sus cualidades mecánicas de cara a su posterior deformación en frío.

**Figura 27.** Montaje de la prueba realizada en el laboratorio



**Fuente:** autor.

Terminada la fusión, se procede a la colada del material en el molde de grafito, ensamblado con el dispositivo interno que le da la forma de tubo, desplazándolo hacia arriba, simulando una colada continua ascendente, cuando el metal está solidificado. Ocurrieron varios inconvenientes a la hora de la extracción del molde, entre los cuales encontramos que el metal no tenía la temperatura suficiente para que fluyera a través de este sin que se solidificara rápidamente, la temperatura se midió con un pirómetro de inmersión y se iba controlando también con un pirómetro láser, otro inconveniente fue que no se desplazó el molde antes de que empezara a solidificarse, quedando adherido al molde.

Después de corregir estos errores se obtuvo una barra tubular de 12 cm de largo, aunque el recorrido no fue muy largo, fue suficiente para comprobar que el grafito era el material indicado con el cual debíamos trabajar para realizar las pruebas en planta.

**Figura 28.** Realización de la prueba de simulación de colada continua.



**Fuente:** autor.

**Figura 29.** Resultado pruebas de laboratorio.



**Fuente:** autor.

## 5.2 PRUEBAS DE COLADA CONTINUA EN PLANTA

Terminadas las pruebas en laboratorio se decidió realizar las pruebas en la empresa con los componentes de la máquina de colada continua que esta tenía, insertando el mecanismo que le daría la forma de tubo en el molde de grafito

Se realizó un análisis detallado de las partes de la máquina, para determinar que defectos tenían, el diagnóstico dió como resultado que algunas funciones del tablero de control no servían, el refractario del horno de retención estaba muy deteriorado, la rosca del agujero de salida del agua de la coquilla estaba un poco lisa, los rodillos extractores estaban anclados con el sistema de corte y la barra falsa se encontraba en mal estado. Los moldes de grafito deben ser lustrados con una crema bituminosa que le dan un mejor acabado superficial al molde y a los productos finales.

**Figura 29.** Coquilla de la empresa, vista frontal y superior



**Fuente:** autor



**Figura 30.** Control máquina de colada continua de la empresa.



**Fuente:** autor

**Figura 31.** Máquina de colada continua de la empresa.



**Fuente:** autor.

Después de realizado el análisis correspondiente se decide diseñar el mecanismo que dará forma al orificio interno de las barras tubulares por colada continua, posterior a esto se analizarán las variables esenciales para establecer los demás parámetros fundamentales que intervendrán en la colada continua, buscando que no haya pérdidas materiales y económicas.

De igual manera se va trabajando en el ensamble de las demás partes de la máquina de colada continua, como en el distribuidor, modificándolo de cierta manera que no haya ningún escape de material fundido a la hora de colar y para no fundir gran cantidad de material, ya que son pruebas las que se van a realizar.

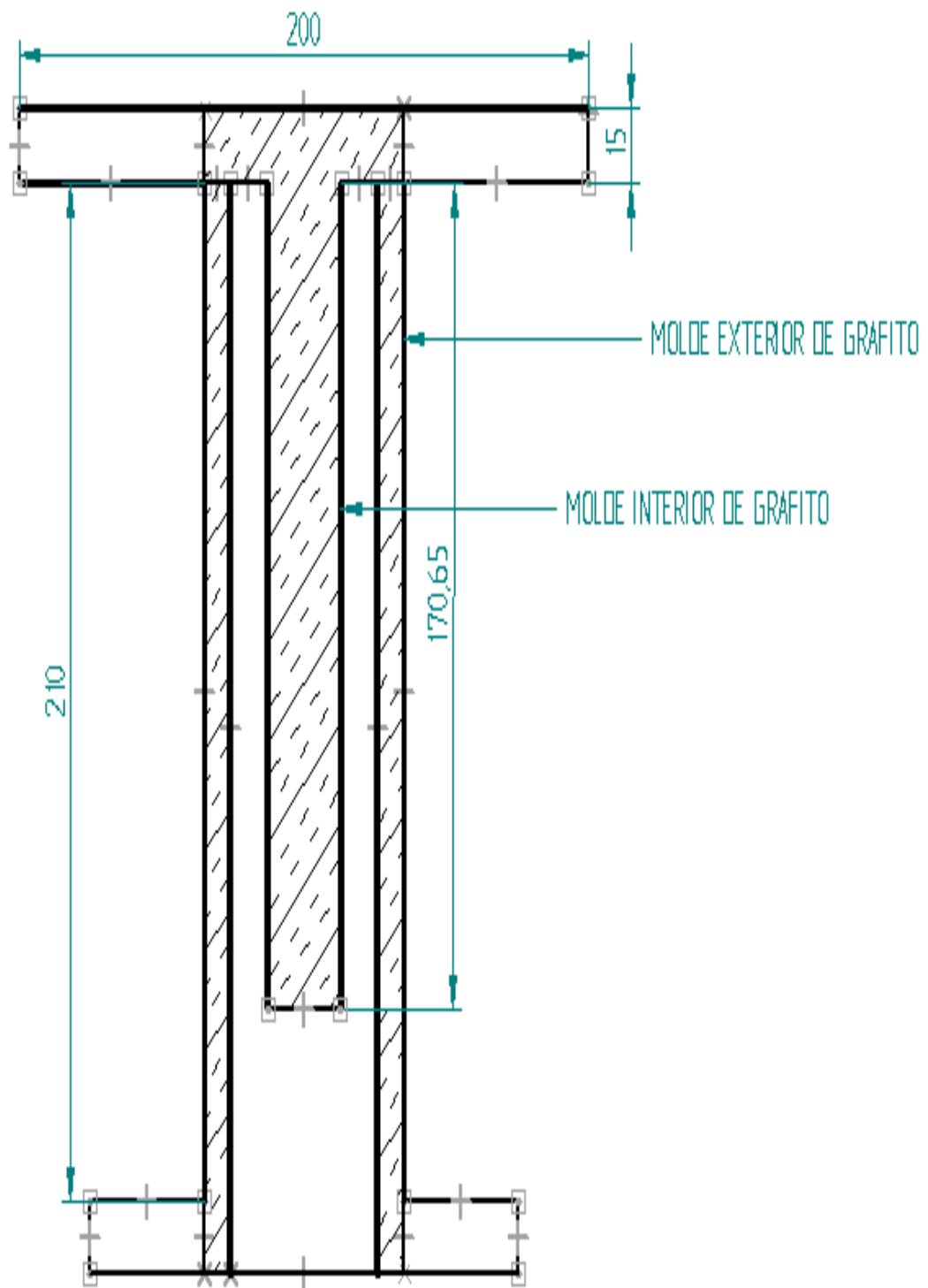
**Figura 32.** Modificación del distribuidor con un crisol de carburo de silicio



**Fuente:** autor

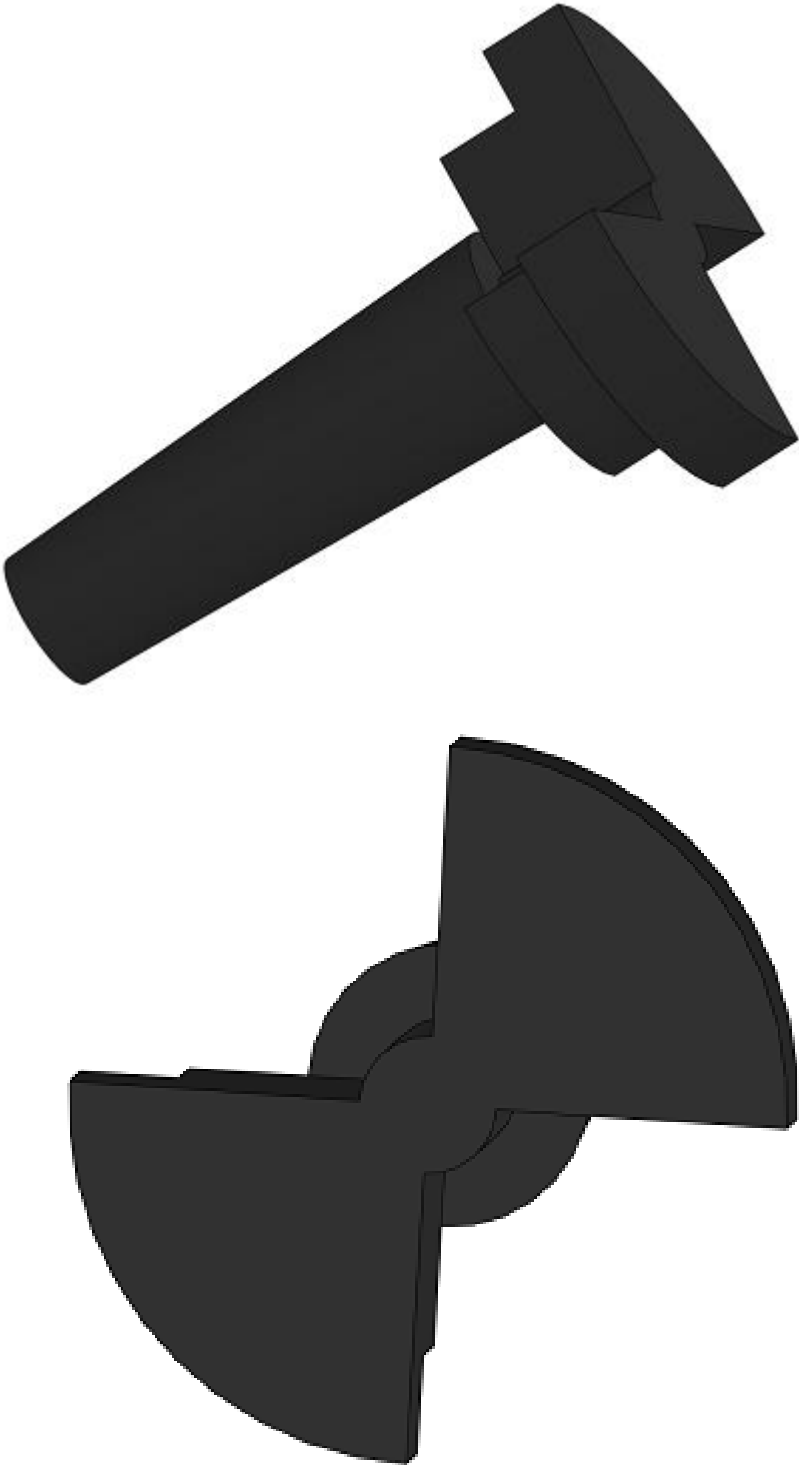
Para poder realizar un diseño del dispositivo interno se debió tener en cuenta las características de la coquilla y pensar la forma en que se sujetaría a esta, además de considerar que el mejor material para construirlo sería grafito. Este material es de fácil mecanizado y aprovechando los técnicos en torno de la empresa se obtuvo un diseño de la siguiente forma.

Figura 33. Molde para colada continua de tubos de bronce



Fuente: auto

**Figura 34.** Diseño del dispositivo interno vista frontal y superior 3D.



**Fuente:** Autor. Dibujado en Solid Works.



Después de diseñado el dispositivo se procede a la fabricación del mismo partiendo de un cilindro de grafito y mecanizado en el torno de la empresa obteniendo la forma que se requería en el diseño.

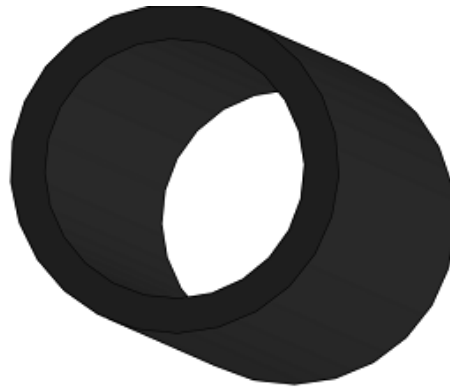
**Figura 35.** Dispositivo interno después de ser mecanizado vista frontal y superior.



**Fuente:** autor.

Después de terminado el dispositivo interno se construye el molde que va a estar en la coquilla, también se realiza de grafito con dimensiones para obtener una barra tubular de dos pulgadas de diámetro externo y de una pulgada de diámetro interno.

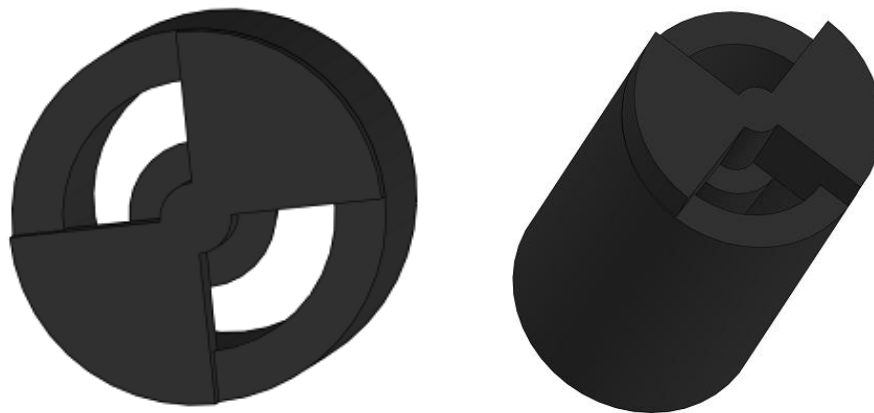
**Figura 36.** Molde externo de grafito



**Fuente:** autor.

Terminado el molde externo se procede al ensamble con la coquilla metálica, esto se logra calentándola para que el metal se dilate y así el molde de grafito ingrese con facilidad sin que se fracture, después de enfriado queda bien ajustado.

**Figura 37.** Dispositivo interno ensamblado dentro del molde



**Fuente:** autor.

Terminado de ensamblar el dispositivo interno dentro del molde y este conjunto en la coquilla, se ubica en la máquina de colada continua, en la parte inmediatamente después del distribuidor modificado por debajo, esta es sujeta por un anillo y unas cuñas que la sostienen, después de ubicada la coquilla se procede a la instalación

de las mangueras de refrigeración, adicionalmente se ubica la barra falsa en el centro de la coquilla, ayudada por los rodillos extractores.

**Figura 38.** Coquilla ubicada en la máquina de colada continua con el dispositivo interno.



**Fuente:** autor

Terminado de ubicar todo en su lugar y con las correspondientes consideraciones se procede a la fusión del material en la parte superior de la máquina de colada continua, el material es desoxidado con cuprofosforo y se procede a la colada a una temperatura de 1100°C, se extrae el crisol del horno y se lleva el material fundido al distribuidor, el cual se ha calentado con un quemador acoplado a este y tiene una temperatura promedio de 800°C, con el fin de que no haya una diferencia de temperaturas y el material se solidifique rápidamente, formando una costra en el distribuidor.

El sistema de refrigeración es ajustado previamente con ayuda de un flujometro y ajustando la motobomba que ayudará a la circulación del agua con el caudal requerido, el cual fue ajustado en 0,6 y 1 L/min. Antes de iniciar el proceso se ajusta la velocidad de extracción de las barras perforadas, con la ayuda del panel de control se establece una velocidad de 9 cm cada minuto.

Se debe estar muy pendiente que no haya derramamiento de material por culpa de la velocidad de extracción o del caudal de refrigeración, ajustando estos parámetros para que no haya ningún accidente.

**Figura 39.** Barra falsa y rodillos extractores.



**Fuente:** autor.



**Figura 40.** Fusión del bronce SAE 65



**Fuente:** autor

Controladas todas las variables esenciales del proceso se realiza la extracción de la barra con la velocidad ya determinada para que la solidificación del metal líquido con el molde de grafito y refrigerado sea adecuada y no haya ningún inconveniente a la hora de que el metal se disipe por cualquier orificio causando accidentes. Se observa que la barra sale al rojo con una temperatura promedio entre los 300 y 400°C, esta fue medida con un pirometro laser con una emisividad de 0,96.

**Figura 41.** Extracción de la barra perforada



**Fuente:** autor.

Terminado el proceso de extracción se puede observar el resultado final, obteniendo un tramo de barra perforada con un diámetro exterior de 2 pulgadas y un diámetro interno de 1 pulgada. Para que tanto la superficie interna como externa sea obtenida sin defectos y con una rugosidad adecuada, es indispensable lustrar el molde y el dispositivo interno con una crema bituminosa especial y así disminuir los costos de maquinado.

**Figura 42.** Barra perforada obtenida por el sistema de colada continua, vista lateral.



**Fuente:** autor.

## 6 SIMULACIÓN NUMÉRICA.

### 6.1 GENERALIDADES

En los procesos de solidificación del bronce, se extrae calor ya sea por convección radiación o conducción. La manera de cómo y qué tan rápido ocurra es de gran importancia para controlar el crecimiento de grano desde la generación del producto. Para poder entender dicho proceso en la colada continua del bronce, es necesario conocer cómo es que este se lleva a cabo, siendo que es un fenómeno físico que puede ser expresado matemáticamente para su estudio

Se realizó un análisis del proceso de solidificación por medio de la simulación numérica, mediante el elemento finito, utilizando el software comercial COMSOL. Esta, servirá en primera instancia, para comprobar los resultados obtenidos en planta y laboratorio, en seguida se realizarán predicciones con experimentos diseñados con diferentes variables de proceso para sugerir condiciones de operación óptimas de solidificación.

En el modelo matemático los puntos de estudio son: el molde y el enfriamiento secundario, haciendo un balance térmico a lo largo de la barra tubular. La transferencia de calor de la línea de centro hacia la superficie está en función de las condiciones límite y las propiedades termo físicas del metal.

### 6.2 ASPECTOS MATEMÁTICOS A CONSIDERAR PARA LA DEFINICIÓN DEL SISTEMA.

La siguiente ecuación describe la conducción de calor en un medio en movimiento a velocidad U y asume que:

$$\text{Acumulación de calor (n)} + \text{Calor extraído por el agua de enfriamiento} - \text{Conducción en la barra} = 0$$

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\delta T}{\delta t} + \rho \cdot U \cdot \frac{\delta T}{\delta x} - \left[ K \frac{\delta T}{\delta x} + \frac{\delta}{\delta x} \left( K \frac{\delta T}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta x} \left( K \frac{\delta T}{\delta zy} \right) \right] = 0$$

1. El calor latente de fusión involucrado durante la solidificación de metal puede ser tomado en cuenta por el ajuste del calor específico sobre el rango de solidificación.
2. La transferencia de calor por convección puede ser tomada en cuenta, por la conductividad térmica del bronce líquido. Si el calor desciende a la velocidad de colada, la velocidad relativa sería cero y el término de transferencia de calor masiva desaparece; reduciéndose la ecuación a:



$$\rho \cdot c \cdot \frac{\delta T}{\delta t} - \frac{\delta}{\delta x} \left( K \frac{\delta T}{\delta x} \right) = 0$$

Esta ecuación describe el estado inestable de la sección de la barra en estudio, que es considerando la colada a una condición límite dada. La variación de conducción térmica puede ser tomada en cuenta por la expansión del segundo término de la ecuación, resultando:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\delta T}{\delta t} - \left( K \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} \right) - b \left( \frac{\delta T}{\delta x} \right)^2 = 0$$

Donde b es la razón de cambio de la conductividad térmica con la temperatura. Las condiciones límite por considerar en la ecuación son:

- Tiempo, línea de centro de la barra, y la superficie exterior de la barra

### 6.3 DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA.

La generación de la geometría está realizada en base a la forma de la barra tubular que se desea obtener; en este caso en 3D, misma que esta con relación a las dos zonas del sistema de enfriamiento, que en principio se consideran las condiciones reales de operación en FormaQ, y en seguida se analiza el cambio de coeficientes de transferencia de calor y de dimensiones en el molde.

**Figura 43.** Figura del producto final dibujada con el programa.



**Fuente:** autor.

#### 6.4 GENERACIÓN DEL MALLADO.

El punto de partida para el método del elemento finito es una malla, que es la partición de la geometría en pequeñas unidades a una forma simple. En el método 1D, las particiones de los subdominios (intervalos) es en pequeños intervalos de malla o de malla de elementos y a los extremos de la malla se les llama intervalos de malla de vértices.

Del mismo modo, en el método 3D, a las particiones en subdominios tetraédricos o triangulares, cuyas caras, bordes y esquinas se les denomina como caras de malla, malla de bordes o vértices de malla, respectivamente.

Estrictamente hablando, los vértices de malla son solo un subconjunto de los puntos de nodo; en ocasiones el término "elemento de malla", significa cualquiera de los elementos, tales como: caras, de bordes o vértices.

Por su parte, existen diferentes tipos de mallas, las cuales pueden generar elementos de diferentes formas y arreglos, como pueden ser: Mallas estructuradas; en este tipo los puntos están acomodados de manera regular y están constituidas por familias de líneas con la propiedad de que los miembros de una familia no se crucen entre sí. Por su parte, las mallas no estructuradas constan de celdas de diferentes formas, pero generalmente se emplean triángulos o cuadriláteros en 2D y tetraedros y hexaedros en 3D. Generalmente este tipo es conveniente para geometrías complejas, sin embargo, las mallas no estructuradas generan mayor número de celdas, lo cual incrementa el tiempo de cómputo.

Una vez que se genera una malla, se pueden introducir aproximaciones a las variables dependientes. Para este debate, se concentran en el caso de una variable  $u$ , aproximándola con una función que describa con un número finito de parámetros, denominado grados de libertad (GDL). La inserción de esta aproximación a la forma débil de la ecuación genera un sistema de ecuaciones para los grados de libertad.

**Tabla 6.** Información de malla obtenida del programa.

<b>Tipo de malla</b>	Malla sólida
<b>Mallador utilizado:</b>	Malla estándar
<b>Puntos jacobianos</b>	4 Puntos
<b>Tamaño de elementos</b>	24.7358 mm
<b>Tolerancia</b>	1.23679 mm
<b>Calidad de malla</b>	Elementos cuadráticos de alto orden

**Fuente:** Autor.

**Figura 44.** Generación de mallado del producto final y del molde.



**Fuente:** Autor

**Tabla 7.** Información de malla y Detalles

<b>Número total de nodos</b>	13776
<b>Número total de elementos</b>	7864
<b>Cociente máximo de aspecto</b>	12.619
<b>% de elementos cuyo cociente de aspecto es &lt; 3</b>	99.4
<b>% de elementos cuyo cociente de aspecto es &gt; 10</b>	0.0509

**Fuente:** autor.

### 6.5. Establecimiento de condiciones de frontera.

Las condiciones de frontera son muy importantes, ya que estas le proporcionan al método numérico la información necesaria para iniciar el cálculo de las diferentes variables por analizar.

Así mismo, es necesario estimar el coeficiente de transferencia de calor en el molde. Para ello primero, se utiliza la ecuación que se muestra a continuación y se evalúa a partir de los datos que se muestran en la siguiente tabla

$$Nu = \frac{h \cdot Lc}{k}$$

**Tabla 8.** Características del agua usada para la refrigeración del molde

Cantidad	Símbolo	Valor numérico	Unidades
Flujo volumétrico	Q	0.028	m <sup>3</sup> /s
Densidad del agua	ρ	1000	kg/m <sup>3</sup>
Diámetro del orificio de entrada de agua al molde	D	0.01	m
Área transversal del orificio de entrada de agua al molde	A	7.85 X 10 <sup>-5</sup>	m <sup>2</sup>
Viscosidad del agua	μ	9.79 X 10 <sup>-4</sup>	kg/m/s
Número de Prandtl	Pr	5.83	
Longitud del canal de enfriamiento del molde	L	0.6	m
Conductividad térmica del agua	k	0.600	W/m/K

**Fuente:** autor.

Para calcular la conductividad térmica del fluido  $k$  es necesario calcular el número de Nusselt, el cual hallaremos teniendo en relación el número de Reynolds y el número de Prandtl, utilizando la siguiente ecuación:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^b \cdot Pr^c$$

Las constante  $b$  tiene un valor de 0,8 y la constante  $c$  sabiendo que el líquido se va a calentar debido a la circulación por el molde y tiene un valor de 0,4. Para poder calcular el número de Nusselt primero debemos calcular el número de Reynolds usando los datos que tenemos en la tabla.

$$Re = \frac{L \cdot v \cdot \rho}{\mu}$$

$$Re = \frac{0,6 \text{ m} \cdot (0,03 \frac{\text{m}}{\text{s}}) \cdot (1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3})}{(9,79 \times 10^{-4} \frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}})}$$

$$Re = 1838,61$$

Teniendo el número de Reynolds podemos calcular el número de Nusselt:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^b \cdot Pr^c$$

$$Nu = 0,023 \cdot 1838,61^{0,8} \cdot 5,83^{0,4}$$

$$Nu = 19,036$$

Ahora si podemos hallar la conductividad térmica del fluido a partir de la ecuación:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D}$$

$$h = 114,216 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

se obtiene que el coeficiente de transferencia de calor en el molde es de  $114,216 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ .

Además de estos coeficientes, se alimentan al software diferentes parámetros de operación mismos que se describen en la siguiente tabla.

**Tabla 9.** Parámetros en la colada continua de bronce en la empresa.

Parámetro	Valor	Unidad
<b>Velocidad de colada</b>	10	<b>cm/min</b>
<b>Temperatura de colada</b>	1000	<b>°C</b>
<b>Densidad de bronce</b>	8900	<b>kg/m<sup>3</sup></b>
<b>Capacidad calorífica del bronce</b>	360	<b>J/kg/K</b>
<b>Conductividad térmica del bronce</b>	180	<b>W/m/K</b>
<b>Coeficiente de transferencia de calor en el molde</b>	<b>115</b>	<b>W/m<sup>2</sup>/K</b>

**Fuente:** autor.

También se alimentó el programa como ya se indicó, con las dimensiones del molde y de la barra por procesar. Una geometría se conforma por contornos, que son dominios, y consisten en diversas conexiones, tales como volúmenes, superficies, curvas, o puntos; y el subdominio es parte del modelado en el espacio en un modelo geométrico y su representación es una línea, área o volumen.

## **6.5 SIMULACION NUMÉRICA CON CONDICIONES DE LA EMPRESA.**

El modelo numérico que se construyó tomó en cuenta los parámetros de operación de la empresa. La primera etapa en la construcción del modelo numérico, consistió en generar una geometría con las dimensiones de la barra tubular. Una vez generada esta geometría, se procedió a dividir esta en subregiones para poder realizar en estas los cálculos que permitan conocer los campos de temperaturas dentro de la barra conforme la solidificación procede. Una vez dadas las condiciones de procesamiento, se realizan los cálculos necesarios.

Para realizar los cálculos de extracción de calor en una barra tubular de la empresa Formaq, se resolvieron de manera simultánea el flujo de fluido en el molde, así como la transferencia de calor en el mismo.

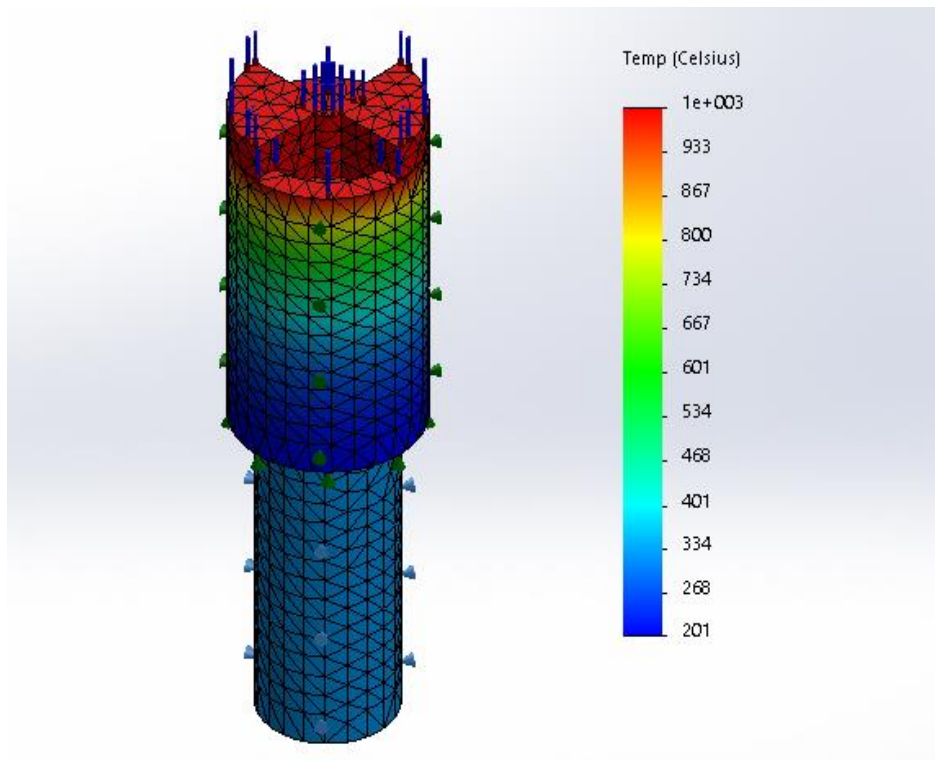
Para simplificación de los cálculos; se consideró al sistema de colada como no transitorio, es decir, se considera que tanto la temperatura como la velocidad de colada del bronce líquido en el molde no varían con el tiempo.

Los resultados de la simulación se muestran en la figura 46, en donde la mayor extracción de calor ocurre en el molde, y a lo largo de la barra el flujo de calor es menor; corroborando que, a lo largo del molde, el bronce no presenta resistencia térmica significativa; si se sobreponen las curvas de enfriamiento éstas son constantes definiendo que el modelo se puede estudiar como estacionario.

Como se puede apreciar en los resultados, prácticamente toda la extracción de calor se lleva a cabo en el molde, una vez por debajo de éste, la barra sufre un enfriamiento menos severo.

De acuerdo a las temperaturas medidas, y las estimadas, se puede establecer que hay concordancia entre ambos datos, por lo que se puede decir que las simulaciones numéricas describen adecuadamente el proceso de solidificación.

**Figura 45.** Temperaturas generadas y vectores de flujo de calor generados durante la simulación.



**Fuente:** autor.

Como se puede ver, el efecto del agua en el molde es significativo, ya que un incremento en el valor del coeficiente de transferencia de calor significa que las condiciones hidrodinámicas han aumentado, es decir, se puede utilizar el mismo volumen de agua, pero con una mayor velocidad a través del molde, lo cual resultará en un efecto convectivo mayor, cuya capacidad para remover calor sea potenciada. Por otro lado, se puede aplicar el mismo flujo volumétrico, pero la cantidad de agua empleada para la solidificación del metal si debe aumentar.

Cualquiera de estas combinaciones, definitivamente impactan la capacidad de extracción de calor en el molde, por lo que se puede enfriar más rápidamente al metal, reduciendo así los tiempos de residencia en el molde y aprovechar de mejor forma la cantidad de agua utilizada para solidificar y enfriar la barra. Por otra parte, al hacer más severo el enfriamiento, necesariamente, la cantidad de calor extraída disminuye, por lo que se requiere un menor volumen de agua para el enfriamiento secundario. Esto a su vez reduce los costos de procesamiento en la colada del bronce. La mejor utilización del agua para el enfriamiento impacta de manera definitiva a la capacidad de extracción de calor en el molde.

Por otra parte, un análisis a los datos presentados, demuestra de manera numérica la asimetría térmica que existe en el sistema de enfriamiento durante la formación de la barra tubular en la empresa.

Esta serie de análisis numéricos da lugar a considerar posibles mejoras al diseño del sistema de enfriamiento y con ello mejorar las condiciones de procesamiento del sistema de colada.



## 7. CONCLUSIONES

- Se logró diseñar el dispositivo interno que le da la forma de barra tubular a los productos finales por el procedimiento de colada continua en la empresa Formaq S.A.S, escogiendo el mejor material para esta operación y analizando sus características. Luego del diseño se procede a su construcción y posterior utilización en el procedimiento.
- Se realizó el análisis correspondiente de todas las partes de la máquina de colada continua, determinando que algunas se encontraban en funcionamiento y otras no, además del deterioro presente en el horno de retención y de la barra falsa del equipo.
- El bronce SAE 65 se comporta de una manera adecuada en el proceso de colada continua, solidificando completamente en la coquilla refrigerada con un caudal de agua de 0,6 litros cada minuto
- El dispositivo una vez que ha sido ensamblado en su totalidad cumple con las medidas, parámetros y solicitaciones que fueron especificadas durante el diseño del mismo. Debido a que la construcción y montaje del dispositivo no es complicada, posee una gran versatilidad.
- Se corroboró que en el proceso de colada continua las curvas de enfriamiento no cambian a través del tiempo. Las diferencias encontradas con los experimentos en las diferentes condiciones de operación, muestran ser semejantes entre sí, con lo cual se demuestra que el material no opone resistencia térmica.
- Con respecto a la simulación y la información obtenida en la empresa, los coeficientes de transferencia de calor establecieron una concordancia, por lo que se puede decir que las simulaciones numéricas describen adecuadamente el proceso de solidificación, es decir, que la cantidad de calor que se extrajo es mayor en el molde, por ser en éste donde sucede la solidificación y donde se tiene el enfriamiento primario, demostrando que el enfriamiento secundario no es tan severo, lo que hace innecesario utilizar tanta agua en la práctica real.

- Se tuvieron varios inconvenientes a la hora de realizar el procedimiento de colada continua en la empresa, por la poca experiencia que se tenía del mecanismo, ajustando el proceso y mejorando las variables esenciales como el sistema de refrigeración, la velocidad de arrastre, la temperatura de colada y la composición química del material.
- Las barras obtenidas en cada prueba poseen diferentes longitudes y acabados superficiales, debido a que se hicieron variar los parámetros fundamentales de trabajo, principalmente el molde y el dispositivo interno.
- Se observó que, dependiendo del tiempo de activación del mecanismo de arrastre, se puede originar en las barras juntas frías si el tiempo de espera es demasiado provocando así un rompimiento del dispositivo, haciendo que el orificio de la barra tubular se llene, produciendo una barra maciza, o en el peor de los casos que la barra no se forme completamente y se derrame el metal líquido si el tiempo de espera es muy corto.
- Con las pruebas realizadas se dedujo que el contenido de fósforo es muy importante en la colabilidad del bronce, dándole una mayor facilidad al material al momento de extraerlo, determinando que para colada continua el porcentaje debe ser de más de 1,5% en contenido de material.
- La velocidad de descenso del mecanismo de arrastre es esencial para obtener una barra tubular con un buen acabado superficial.
- El control de calidad del producto terminado es realizado por los técnicos especializados, quienes determinan los defectos superficiales. Debido a que se parte de materia prima de primera calidad, no es necesario un análisis de composición química, aunque en ocasiones se realiza un ensayo de espectroscopia electrónica para garantizar la composición exacta.

## 8. RECOMENDACIONES

- Para obtener un mejor producto se recomienda emplear la composición de bronce adecuada para la cual se realizó el estudio, con un contenido de cobre del 88% de cobre y 12 % de estaño.
- Mantener la temperatura del horno de retención, para que el material no se solidifique antes de ingresar al molde y así obtener un mejor resultado al poner en funcionamiento la máquina de colada continua.
- Revisar el correcto funcionamiento del distribuidor antes de acoplar el dispositivo en el molde, ya que se puede romper.
- Controlar el tiempo de permanencia del bronce en la lingotera, antes de poner en marcha el sistema de arrastre.
- Revisar que la bomba de agua esté cargada antes de poner en marcha la máquina, analizando cuidadosamente que las mangueras de entrada y de salida de agua en el molde estén bien acopladas, para no tener problemas durante el proceso. Por eso es mejor encenderla antes de poner en funcionamiento la operación.
- Se debe ser muy cuidadoso con el sistema de arrastre de las barras tubulares, estableciendo el patrón de automático si es posible, que tiene el sistema de control de la máquina, para que la velocidad de extracción sea constante.
- Es importante controlar el buen funcionamiento del sistema de refrigeración del molde, ya que al no hacerlo se puede producir deformidades o hasta destrucción de las barras.
- Para que las barras sean uniformes se debe controlar la alimentación de las mismas, esto se lo hace teniendo la temperatura adecuada en el distribuidor y haciendo una extracción constante.

## BIBLIOGRAFIA

- Askeland, D. Ciencia e ingeniería de los materiales. International Thomson Editores. México. 1998, p 193.
- ASM Handbook. Properties and selection: nonferrous alloys and special- purpose materials. Estados Unidos. 1992, p 752.
- ASTM B584 Standard Specification for Copper Alloy Sand Castings for General Applications. Estados Unidos. 2000.
- ASTM B505 / B505M – 18 Especificación estándar para colada continua de aleaciones de cobre. Estados Unidos. 2010.
- AVNER, S. Introducción a la metalurgia física. McGraw Hill. México. 1988
- BILONI, Prates. Métodos de Análisis de Extracción Calórica Durante la Solidificación. Argentina. 2000.
- CAPELLO Edoardo. Tecnología de la Fundición. México. 1981.
- ENRIQUEZ J. y colaboradores. Monografías Sobre la Tecnología del Acero. México. 2009.
- IESS. Norma de salud y seguridad para la exposición laboral al plomo. 2013
- KALPAKJIAN, S. Manufactura, ingeniería y tecnología. Pearson Education. México. 2002.
- LDA International. Technical Notes., Primary extraction of lead. 2013.
- MERSEN, grafitos especiales para colada continua de metales. Perú. 2006
- MINSUR. El Estaño. Perú. 2013.
- MULLER, H. Proceedings of the international conference on continuous casting of nonferrous metals. 2006.
- MUÑOZ, H. Riesgos Ambientales. Obtención de Plomo. Perú. 2012.
- RUBIO, Arlandis. Metalurgia del cobre. Asociación de ingenieros industriales. España. 2009.
- The AISE steel Foundation. The making shaping and treating of steel. 2003
- VALADEZ C. Estudio Físico del Flujo de Acero Líquido. España. 2010