



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

AUTOR: NARVÁEZ CHEDIAK ANDRÉS MAURICIO

TEMA: DESARROLLO DE TECNOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE BRONCE FOSFÓRICO UNS C93700 PARA APLICACIONES EN CONSTRUCCIÓN DE PARTES Y ELEMENTOS DE MÁQUINA DE FORMA ARTESANAL

DIRECTOR: ING. ANDRADE VÍCTOR

CODIRECTOR: ING. QUEZADA PATRICIO

SANGOLQUÍ, DICIEMBRE 2013

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

Certificamos que el proyecto de grado titulado “DESARROLLO DE TECNOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE BRONCE FOSFÓRICO UNS C93700 PARA APLICACIONES EN CONSTRUCCIÓN DE PARTES Y ELEMENTOS DE MÁQUINA DE FORMA ARTESANAL” fue realizado en su totalidad por el señor Andrés Mauricio Narváez Chediak, como requerimiento parcial para la obtención de título de Ingeniero Mecánico.

.....

Ing. Víctor Andrade

DIRECTOR

.....

Ing. Patricio Quezada

CODIRECTOR

Sangolquí, Diciembre del 2013

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Andrés Mauricio Narváez Chediak, declaro bajo juramento que el contenido de la presente tesis, es de mí autoría; no ha sido presentado previamente para ningún grado o calificación profesional.

.....
Andrés Mauricio Narváez Chediak
CC. 171524860-3

Sangolquí, Diciembre del 2013

AUTORIZACIÓN

Yo, Andrés Mauricio Narváez Chediak, con CC. 1715248603, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE la publicación en la biblioteca virtual de la institución del proyecto de grado titulado “DESARROLLO DE TECNOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE BRONCE FOSFÓRICO UNS C93700 PARA APLICACIONES EN CONSTRUCCIÓN DE PARTES Y ELEMENTOS DE MÁQUINA DE FORMA ARTESANAL”

.....
Andrés Mauricio Narváez Chediak
CC. 171524860-3

Sangolquí, Diciembre del 2013

DEDICATORIA

Dedico el presente proyecto a mis padres, que han sido los pilares fundamentales en mi formación profesional y han sido un apoyo incondicional durante todos estos años.

A mi abuela, quien me acompaña en mí andar y que con su luz me ilumina siempre, guiándome por un buen camino.

Y a mi hermana, que más que hermana es una amiga.

Andrés

AGRADECIMIENTO

Agradezco a todos y cada uno de los que de cierta forma se vieron involucrados en el desarrollo del proyecto.

Agradezco a Fabián Peñaloza por su valiosa colaboración, experiencia y tiempo prestado.

Y agradezco también a mi Director y Codirector de tesis, Ing. Víctor Andrade e Ing. Patricio Quezada respectivamente, por su apoyo y conocimiento brindados.

Andrés

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1	1
GENERALIDADES DEL PROYECTO	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 ANTECEDENTES.....	3
1.2.1 Metales No Ferrosos, Aleaciones De Cobre Y Bronce.....	3
1.2.2 Fundición De Metales.....	7
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	9
1.4 ALCANCE	10
1.5 OBJETIVOS.....	11
1.5.1 Objetivo General	11
1.5.2 Objetivos Específicos	11
CAPÍTULO 2.....	13
MARCO TEÓRICO	13
2.1 DESCRIPCIÓN DE LA ALEACIÓN	13
2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA ALEACIÓN	15
2.2.1 Cobre	16
2.2.2 Estaño	17
2.2.3 Plomo.....	19
2.3 METALURGIA DE LA ALEACIÓN	22
2.4 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ALEACIÓN	26

2.5	IMPORTANCIA DE LA ALEACIÓN PARA APLICACIONES EN CONSTRUCCIÓN DE PARTES Y ELEMENTOS DE MÁQUINA	30
2.6	TECNOLOGÍA NACIONAL ACTUAL PARA LA OBTENCIÓN DE LA ALEACIÓN.....	31
2.6.1	Materia Prima Utilizada	32
2.6.2	Elementos mejoradores de fundición	32
2.6.3	Equipos necesarios	33
2.6.4	Procesos de fundición	33
2.6.5	Consideraciones y cuidados	35
2.6.6	Complicaciones al momento de fundir	36
2.6.7	Control de calidad que se debe realizar	37
2.7	ENSAYOS DE LABORATORIO.....	37
2.7.1	Ensayo De Análisis De Composición Química.....	38
2.7.2	Ensayo De Tracción	42
2.7.3	Ensayo De Dureza	52
2.7.4	Técnicas Metalográficas.....	60
2.8	RECICLAJE DE METALES	62
	CAPÍTULO 3.....	66
	METODOLOGÍA EN LABORATORIO	66
3.1	MATERIALES UTILIZADOS	66
3.1.1	Materia prima	66

3.1.2	Mejoradores de Fundición.....	70
3.2	EQUIPOS UTILIZADOS	71
3.3	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FUNDICIÓN	76
3.3.1	Preparación de la arena	76
3.3.2	Moldeado	77
3.3.3	Cálculo de Carga.....	78
3.3.4	Fundición.....	80
3.4	DISEÑO DE EXPERIMENTO	83
3.5	ENSAYOS PRELIMINARES.....	84
3.5.1	Análisis de composición química de la materia prima.....	84
3.5.2	Primer Ensayo.....	86
3.5.3	Segundo Ensayo	89
3.5.4	Tercer Ensayo	91
3.6	CARACTERIZACIÓN DE LAS ALEACIONES OBTENIDAS EN LOS ENSAYOS PRELIMINARES POR ENSAYOS DE LABORATORIO	94
3.6.1	Análisis Químico.....	94
3.6.2	Propiedades Mecánicas	95
3.7	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS CON LA NORMA ASTM B584.....	109
3.7.1	Composición Química	109
3.7.2	Propiedades Mecánicas	109

3.8	ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	109
	CAPÍTULO 4.....	112
	DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA.....	112
4.1	SELECCIÓN DE MATERIALES	112
4.2	SELECCIÓN DE EQUIPOS.....	113
4.3	DETERMINACIÓN DE LA PIEZA A FABRICAR.....	113
4.4	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	115
4.5	PIEZA FUNDIDA	116
4.6	COMPARACIÓN DE PROPIEDADES DE ELEMENTO COLADO EN MOLDE CON LAS DE UN ELEMENTO DE MÁQUINA PATRÓN YA EXISTENTE	117
4.7	ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	118
	CAPÍTULO 5.....	119
	ANÁLISIS ECONÓMICO	119
5.1	COSTOS DIRECTOS	119
5.2	COSTOS INDIRECTOS.....	121
5.3	COSTOS TOTALES	122
	CAPÍTULO 6.....	123
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	123
6.1	CONCLUSIONES	123
6.2	RECOMENDACIONES.....	126
	BIBLIOGRAFÍA.....	128

ÍNDICE DE TABLAS Y CUADROS

CAPÍTULO 2

<i>Tabla 2. 1 Fuerzas de Ensayo Estándar</i>	54
<i>Cuadro 2. 1 Margen de Dureza Brinell de Distintos Grupos Materiales</i>	55
<i>Cuadro 2. 2 Reactivos y procedimientos para ataque químico del cobre y sus aleaciones</i>	61

CAPÍTULO 3

<i>Tabla 3.1 Porcentaje de Quemado de Componentes Aleación de Cobre</i>	79
<i>Tabla 3. 2 Composición química de muestra de chatarra de cobre lingoteada</i>	84
<i>Tabla 3. 3 Composición química de muestra de estaño metálico</i>	85
<i>Tabla 3. 4 Composición química de muestra de plomo</i>	85
<i>Tabla 3.5 Rangos permitidos según la norma ASTM B584 para el</i>	86
<i>Tabla 3.6 Porcentajes para ensayo preliminar (Ensayo 1)</i>	86
<i>Tabla 3.7 Cálculo de quemado para cada elemento en kg (Ensayo 1)</i>	87
<i>Tabla 3.8 Cálculo de carga para 100 kg de aleación (Ensayo 1)</i>	87
<i>Tabla 3.9 Cálculo de carga para 3,8 kg de aleación (Ensayo 1)</i>	88
<i>Tabla 3. 10 Pesaje inicial de elementos de la aleación (Ensayo 1)</i>	88
<i>Tabla 3. 11 Porcentajes para ensayo preliminar (Ensayo 2)</i>	89
<i>Tabla 3.12 Cálculo de quemado para cada elemento en kg (Ensayo 2)</i>	89
<i>Tabla 3.13 Cálculo de carga para 100 kg de aleación (Ensayo 2)</i>	90
<i>Tabla 3.14 Cálculo de carga para 4 kg de aleación (Ensayo 2)</i>	90

<i>Tabla 3. 15 Pesaje inicial de elementos de la aleación (Ensayo 2)</i>	91
<i>Tabla 3. 16 Porcentajes para ensayo preliminar (Ensayo 3)</i>	91
<i>Tabla 3.17 Cálculo de quemado para cada elemento en kg (Ensayo 3)</i>	92
<i>Tabla 3.18 Cálculo de carga para 100 kg de aleación (Ensayo 3)</i>	92
<i>Tabla 3.19 Cálculo de carga para 4 kg de aleación (Ensayo 3)</i>	92
<i>Tabla 3. 20 Pesaje inicial de elementos de la aleación (Ensayo 3)</i>	93
<i>Tabla 3. 21 Composición Química de la Muestra del Primer Ensayo de Fundición Realizado</i>	94
<i>Tabla 3. 22 Composición Química de la Muestra del Segundo Ensayo de Fundición Realizado</i>	94
<i>Tabla 3. 23 Composición Química de la Muestra del Tercer Ensayo de Fundición Realizado</i>	95
<i>Tabla 3. 24 Propiedades mecánicas (Ensayo 1)</i>	98
<i>Tabla 3. 25 Propiedades mecánicas (Ensayo 2)</i>	103
<i>Tabla 3. 26 Propiedades mecánicas (Ensayo 3)</i>	107
<i>Tabla 3. 27 Comparación Composición Química con Norma</i>	109
<i>Tabla 3. 28 Comparación Propiedades mecánicas con Norma</i>	109

CAPÍTULO 4

<i>Tabla 4. 1 Comparación Propiedades con Material Existente en Mercado</i>	117
---	-----

CAPÍTULO 5

<i>Tabla 5. 1 Costos de Materia Prima</i>	119
<i>Tabla 5. 2 Costos de Mano de Obra Directa</i>	119

<i>Tabla 5. 3 Servicios Especiales</i>	120
<i>Tabla 5. 4 Ensayos de Laboratorio</i>	120
<i>Tabla 5. 5 Materiales e Insumos</i>	121
<i>Tabla 5. 6 Otros Costos Indirectos</i>	121
<i>Tabla 5. 7 Total Costos Directos</i>	122
<i>Tabla 5. 8 Total Costos Indirectos</i>	122
<i>Tabla 5. 9 Costo Total</i>	122

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

<i>Fig 2. 1 Composición Nominal de las Aleaciones</i>	14
<i>Fig 2. 2 Diagrama de fase cobre-estaño.....</i>	23
<i>Fig 2. 3 Bronce fosofroso (90/10) moldeado en arena.....</i>	24
<i>Fig 2. 4 Microestructura de Bronce Emplomado.....</i>	24
<i>Fig 2. 5 Requerimientos Químicos.....</i>	25
<i>Fig 2. 6 Requerimientos Mecánicos.....</i>	26
<i>Fig 2. 7 Propiedades mecánicas del C93700 a diferentes temperaturas.....</i>	27
<i>Fig 2. 8 Variación de la resistencia a la compresión con la temperatura para el C93700</i>	29
<i>Fig 2. 9 Variación módulo de elasticidad con temperatura para el C93700.....</i>	29
<i>Fig 2. 10 Principio del Ensayo de Tracción.....</i>	44
<i>Fig 2. 11 Diagrama de esfuerzo-deformación general.....</i>	46
<i>Fig 2. 12 Diagrama esfuerzo-deformación para material dúctil y frágil.....</i>	48
<i>Fig 2. 13 Diagrama esfuerzo-deformación para diferentes materiales.....</i>	48
<i>Fig 2. 14 Doble Probeta en sentido horizontal</i>	50
<i>Fig 2. 15 Probeta Redonda de 0.500 in Estándar para Pruebas de Tensión con 2 in de largo del calibre y Ejemplos de Probetas de menor tamaño proporcionales a la Estándar</i>	51
<i>Fig 2. 16 Principio del Ensayo de Dureza Brinell</i>	52
<i>Fig 2. 17 Designación del grado de dureza Brinell.....</i>	55
<i>Fig 2. 18 Principio del Ensayo de Dureza Vickers</i>	56
<i>Fig 2. 19 Designación del grado de dureza Vickers.....</i>	58

<i>Fig 2. 20 Principio del Ensayo de Dureza Rockwell.....</i>	59
---	----

CAPÍTULO 3

<i>Fig 3.1 Chatarra de cobre</i>	68
<i>Fig 3. 2 Chatarra de Cobre Brillante</i>	68
<i>Fig 3.3 Estaño Metálico</i>	69
<i>Fig 3. 4 Plomo Metálico</i>	70
<i>Fig 3. 5 Fosfuro de cobre.....</i>	71
<i>Fig 3. 6 Horno de crisol.....</i>	72
<i>Fig 3. 7 Microscopio electrónico de barrido</i>	73
<i>Fig 3. 8 Espectrómetro de Chispa.....</i>	74
<i>Fig 3. 9 Máquina de Ensayos Universales.....</i>	75
<i>Fig 3. 10 Microscopio Metalúrgico</i>	76
<i>Fig 3. 11 Metalografía Ensayo 1 a 50x</i>	99
<i>Fig 3. 12 Metalografía Ensayo 1 a 100x</i>	99
<i>Fig 3. 13 Metalografía Ensayo 2 a 50x</i>	103
<i>Fig 3. 14 Metalografía Ensayo 2 a 100x</i>	104
<i>Fig 3. 15 Metalografía Ensayo 3 a 100x</i>	108
<i>Fig 3. 16 Metalografía Ensayo 3 a 200x</i>	108

CAPÍTULO 4

<i>Fig 4. 1 Bujes con Pestaña</i>	114
<i>Fig 4. 2 Bujes en Barras de Bronce</i>	114
<i>Fig 4. 3 Bujes Punta de Eje</i>	115

Fig 4. 4 Bujes con Pestaña 116

Fig 4. 5 Bujes Punta de Eje 117

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1 Encuestas

ANEXO 2 Análisis Químicos

ANEXO 3 Ficha Técnica

ANEXO 4 Ensayo de Tracción

ANEXO 5 Respaldo Fotográfico

ANEXO 6 Catálogos de Bronce

RESUMEN

En los países desarrollados, la actividad de la fundición de metales tiene una gran importancia. Estos países se encuentran desarrollando tecnologías para impulsar y mejorar este sector industrial. La actividad de la fundición de metales es la base de la industria en general, ya que muchos sectores dependen de la fundición de metales como lo son el sector automotriz, metalmecánico, minería, agroindustria, petroquímico y otros. Por medio de los diferentes procesos de fundición se pueden obtener partes y elementos de máquinas que son fundamentales hoy en día. Sin embargo, en el Ecuador, la industria de la fundición de metales no se encuentra tan desarrollada. Es por ello que se ha visto como necesidad el afán de impulsar la tecnología nacional para poder elaborar los mismos materiales que son importados. Para ello, en el primer capítulo se habla de los antecedentes, justificación y objetivos del proyecto como tal, para beneficio del sector artesanal principalmente. En el segundo capítulo se desarrolla todo lo que es el marco teórico, que ayudará a comprender con mayor facilidad el desarrollo del proyecto. El capítulo de mayor importancia es el tercero, en el que se desarrolla los procedimientos a seguir y donde se demuestra que es factible la elaboración de este material de una forma artesanal. El cuarto capítulo es el desarrollo en sí de la tecnología y la comparación de los resultados obtenidos con un producto importado. Los últimos dos capítulos son costos, conclusiones y recomendaciones del proyecto.

Palabras clave: bronce, bronce fosfórico, UNS C93700, bronce SAE 64, bronce artesanal.

Abstract

In developed countries, the activity of metal casting is very important. These countries are developing technologies in order to promote and enhance this industrial sector. The activity of metal casting is the base of the industry in general. Many areas depend on the casting of metals such as automotive, petrochemical, metallurgical industry, mining, agribusiness, and others. With different casting processes, people can get parts and elements of machines that are essential today. However, in Ecuador, the industry of metal casting is not too developed. This is the reason why it is important to develop the national technology in order to make the same materials that are imported. In the first chapter, the background, the justification and the objectives of the project are established, primarily for the benefit of the artisanal sector. The second chapter it is developed the theoretical framework that will help to understand more easily the project. The most important chapter is the third one. In it, the procedures to be followed are developed. It also shows that it is feasible to make this material in a traditional way. The fourth chapter is the development of the technology itself and the comparison of results with an imported product. The last two chapters are the costs, conclusions and recommendations of the project.

Keywords: brass, phosphor bronze, UNS C93700, SAE 64 bronze, handmade brass

ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA

SAE	Society of Automotive Engineers (Sociedad de Ingenieros Automotores)
UNS	Unified Numbering System (Sistema de Numeración Unificado)
ASTM	American Society for Testing Materials (Sociedad Americana para Pruebas de Materiales)
AFME	Asociación de Fundidores de Metales del Ecuador
ASTM B584	Standard Specification for Copper Alloy Sand Castings for General Applications (Especificación Estándar para Aleación de Cobre de Fundición en Arena para Aplicaciones en General)
ASTM E 255	Standard Practice for Sampling Copper and Copper Alloys for the Determination of Chemical Composition (Práctica Estándar para Muestreo de Cobre y Aleaciones de Cobre para la Determinación de la Composición Química)
ASTM B 208	Standard Practice for Preparing Tension Test Specimens for Copper Alloy Sand, Permanent Mold, Centrifugal, and Continuous Castings (Práctica Estándar para la Preparación de Especímenes para Prueba de Tracción de Aleación de Cobre de Fundiciones en Arena, Molde Permanente, Centrífuga y Continua)

ASTM E 10	Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials (Método Estándar para Dureza Brinell de Materiales Metálicos)
ASM	American Society of Metals (Sociedad Americana de Metales)
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos
Cu	Cobre
Pb	Plomo
Sn	Estaño
Zn	Zinc
Ni	Níquel
Fe	Hierro
Sb	Antimonio
S	Azufre
P	Fósforo
Al	Aluminio
Si	Silicio
SnO ₂	Dióxido de Estaño
NH ₄ OH	Hidróxido de amonio
H ₂ O	Agua
H ₂ O ₂	Agua oxigenada
K ₂ Cr ₂ O ₇	Dicromato de potasio
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
PbS	Galena

PbCO_3	Cerusita
PbSO_4	Anglesita
$^{\circ}\text{C}$	Grados Centígrados
$^{\circ}\text{F}$	Grados Fahrenheit
MPa	Megapascal, unidad de presión del sistema internacional
ksi	kilolibras/pulgada cuadrada, unidad de presión del sistema inglés
g	gramos
kg	kilogramos
mm	milímetro
mL	mililitro
N	Newton, unidad de fuerza
kN	kilo newton
kgf	kilogramos fuerza
HB	grado de dureza Brinell
HBS	grado de dureza Brinell con penetrador de acero
HBW	grado de dureza Brinell con penetrador de tungsteno
HV	grado de dureza Vickers
HR	grado de dureza Rockwell
g/cm^3	gramos/centímetro cúbico, unidad de densidad
lb/in^3	libras/pulgada cúbica, unidad de densidad
F	fuerza o carga aplicada
σ	esfuerzo unitario
ΔL	alargamiento

L_0	longitud inicial
L_u	longitud final
ε	longitud unitaria o deformación
A	sección transversal
δ	alargamiento

TÉRMINOS

Pirometalúrgico:	proceso metalúrgico de alta temperatura.
Aluvión:	material residuo de sólido transportado y depositado transitoria o permanentemente por una corriente de agua, y puede estar compuesto por arena, grava o arcilla.
Galena:	mineral sulfuroso.
Cerusita:	carbonato de plomo.
Anglesita:	sulfato de plomo.
Proceso Parkes:	proceso de recuperación de oro y plata en el que se añade al plomo con impurezas fundido una pequeña cantidad de zinc, la cual flota, extrayendo el zinc de la plata o el oro por destilación.
Saturnismo o plumbosis:	envenenamiento que produce el plomo al entrar en el cuerpo humano.
Reacción Peritética:	reacción que ocurre cuando un líquido y un sólido reaccionan isotérmicamente para formar un nuevo sólido al enfriarse.
Reacción Eutectoide:	proceso metalúrgico que ocurre en aleaciones binarias, todas las fases involucradas son sólidas.
Línea Solvus:	indica temperaturas para las cuales una disolución sólida deja de ser soluble.

Fundireciclar:	Empresa de fundición localizada en la ciudad de Quito.
FUNSA:	Empresa de fundición localizada en la ciudad de Quito.
Intramet:	Empresa de fundición localizada en la ciudad de Guayaquil.
Galvano:	Industria metalquímica.
Reflexión especular:	cuando el ángulo de reflexión es igual al ángulo de frecuencia.
Reflexión difusa:	cuando el ángulo de reflexión es diferente al ángulo de frecuencia.
Bentonita:	arcilla de grano muy fino, utilizada como aglutinante de la arena para fabricar moldes para fundición.
Arena de contacto:	arena más fina cernida directamente sobre el molde con tamiz de arena fino

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 INTRODUCCIÓN

Existen diferentes métodos de obtención del bronce SAE 64 con equivalencia UNS C93700. El método directo para obtener la aleación consiste en fundir los componentes principales como materia prima pura, es decir cobre, estaño y plomo, sin aleantes; con un cálculo previo de carga, controlando las temperaturas y los tiempos de fusión. En este método hay que tener en cuenta la desoxidación de la aleación durante el proceso.

El otro método de obtención se da a partir de una aleación madre, la cual tiene una composición base de los componentes principales que es conocida. A esta aleación madre no es necesario desoxidarla, ya que la desoxidación se la puede realizar el rato de fundir la pieza requerida. Después de lingotear la aleación madre, tan solo es necesario añadir los porcentajes faltantes de los componentes y aquí sí desoxidar la mezcla para obtener un producto final.

La clave de la desoxidación de la mezcla radica en que, junto con la desgasificación de la misma, se logra mejores resultados en los elementos de máquina que se van a construir y se evita que el material tenga poros, mejorando sus propiedades tanto mecánicas como físicas.

Dentro de los procesos de fundición se pueden encontrar diferentes maneras de desoxidar una fundición de bronce para alcanzar la composición deseada, removiendo el contenido gaseoso y de impurezas que la mezcla

presenta al momento de fundirse. Una de las principales formas de desoxidar la fundición es añadiendo fósforo a la mezcla. El fósforo actúa como agente desoxidante previniendo la formación de óxido, el cual se forma especialmente cuando se añade estaño al cobre fundido. Hay diferentes formas de realizar esta desoxidación con ayuda del fósforo, pero en la mayoría de los procesos, sino es en todos, este elemento debe ser añadido al final, ya cuando todos los elementos se encuentren fundidos y la mezcla esté lista para colarse.

Uno de los métodos para añadir fósforo es utilizando una aleación madre de fosfuro de cobre, también conocido como cuprofósforo, que es una aleación de cobre con un cierto porcentaje de fósforo, el que se añade al final del proceso de fundición previo al colado. El fosfuro de cobre se lo sumerge hasta el fondo del crisol. Éste, por lo general, se lo utiliza en cantidades que van desde 0.2 a 0.35% de la masa de la aleación, ya que solo es usado como desoxidante y desgasificante, mas no para ser un elemento aleante, ni para ser parte de la composición química del producto final. (Wiesner Falconí, 2013)

Otro método que incluye fósforo como elemento desoxidante es el uso del mismo mezclado con litio. En este método se utilizan unas balas especiales que contienen fosfuro de litio, las cuales vienen herméticamente selladas para su uso. Estas balas vienen dosificadas para la cantidad de material a fundirse, que por lo general se las encuentra en el mercado para cantidades de 25 kg y 50 kg de aleación fundida. Éstas son usadas para procesos de gran producción, que pueden ser industrializados; fabricación de varias piezas, piezas en serie o piezas de mayor tamaño; porque se requiere fundir cantidades relativamente grandes de material; ya que estas balas no se las puede dividir para ser

utilizadas como desoxidantes en pequeñas fundiciones. De igual manera, las balas se las agrega al final de la fundición. (Orozco, 2013)

A parte del uso del fósforo como agente desoxidante, es importante la desgasificación de la mezcla, es por ello que en la industria se ha encontrado diferentes desgasificantes, que dependiendo de los elementos que se pretende fundir, se los puede utilizar.

Otra de las formas de obtener este material y evitar el óxido es la práctica que realizan en Fudireciclar. Ésta es una empresa dedicada a la fundición que se encuentra en la ciudad de Quito. Aquí se produce el bronce SAE 64 bajo pedido exclusivo de los clientes. En la práctica, esta empresa no utiliza fósforo para desoxidar la aleación, sino que emplea otro método diferente. Este método consiste en introducir argón a la mezcla a base de cobre, estaño y plomo de forma manual y directa. Lo que permite el argón, al ser un gas inerte, es aumentar la fluidez y movimiento de las partículas al momento de fundirse, desgasificándola y evitando la formación de óxido. De esta manera se logra obtener resultados que de igual forma concuerdan con normas y estándares internacionales, rigiéndose principalmente a normas ASTM. (Loachamin Quinga, 2013)

1.2 ANTECEDENTES

1.2.1 Metales No Ferrosos, Aleaciones De Cobre Y Bronce

Los materiales metálicos se dividen en ferrosos y no ferrosos, los cuales encierran a todos los metales en dos grandes grupos. Los metales ferrosos tienen como base principal el hierro; por el contrario, los no ferrosos contienen

un elemento diferente al hierro como base principal del material. En general, los materiales no ferrosos están formados por aleaciones de cobre, aluminio, magnesio, níquel, plomo, estaño y zinc. Otros metales que se utilizan en una menor proporción están constituidos por cadmio, molibdeno, cobalto, zirconio, titanio, oro, plata y platino.

Entre las aleaciones no ferrosas más importantes se encuentran las de cobre. Las aleaciones de cobre más importantes son:

- I. Latones-aleaciones de cobre y zinc
 - A. Latones alfa-aleaciones que contienen hasta 36% de zinc
 1. Latones amarillos alfa-20 a 36% de zinc
 2. Latones rojos-5 a 20% de zinc
 - B. Latones alfa más beta-54 a 62% de cobre
- II. Bronces-hasta 12% de elemento de aleación
 - A. Bronces al estaño
 - B. Bronces al silicio
 - C. Bronces al aluminio
 - D. Bronces al berilio
- III. Cuproniqueles-aleaciones de cobre y níquel
- IV. Platas níquel-aleaciones de cobre, níquel y zinc

(Avner, 1988)

1.2.1.1 Bronces en general

Originalmente se utilizó el término Bronce a las aleaciones de cobre con estaño, pero hoy en día, este término es utilizado para nombrar cualquier

aleación que tenga como elemento principal el cobre. Existe una excepción que son las aleaciones de cobre con zinc, que son conocidas como latones y que poseen hasta un 12% del principal elemento de aleación. Los broncees comerciales principales son aleaciones de cobre con estaño, silicio, aluminio o berilio; además pueden tener fósforo, plomo, níquel o zinc, para brindar diferentes propiedades mecánicas y físicas al material. (Avner, 1988)

1.2.1.2 Bronces al estaño y broncees al estaño emplomadas

Las aleaciones de cobre-estaño se denominan broncees al estaño. Se refieren a los broncees al fósforo, ya que siempre está presente como agente desoxidante en la fundición. (Avner, 1988). Al añadir estaño en una aleación de cobre, lo que se pretende es ir aumentando la resistencia del material, la cual llega a su punto máximo al 20% de Sn. Si se supera este valor, la resistencia se verá afectada y disminuirá. De todas maneras es difícil llegar a un contenido del 20% de Sn, ya que la solubilidad máxima del mismo en cobre es alrededor del 15% en peso. Los broncees que contienen entre el 9 y el 11% de estaño presentan una gran resistencia mecánica y tenacidad, pero moderada ductilidad. Comparados a los latones, los broncees al estaño son más resistentes a la corrosión y al agrietamiento por corrosión con esfuerzo. (Mangonon, 1999)

Como la estabilidad química de los broncees es alta, se utilizan para ser accesorios para tuberías (de vapor, de agua, etc.). Así, pues, las aplicaciones principales de los broncees son para piezas de fundición complejas, para casquillos de cojinetes y para accesorios de tuberías.

En ciertas ocasiones, se utiliza zinc para sustituir una parte del estaño, logrando una mejora en las propiedades y en la tenacidad, casi sin afectar su resistencia al desgaste. (Avner, 1988). Una ventaja de utilizar zinc es un abaratamiento en la producción de bronce industriales.

Con el fin de mejorar la maquinabilidad y la resistencia al desgaste de los bronce al estaño, se añade a esta aleación plomo, obteniéndose aleaciones conocidas como bronce al estaño emplomadas. El bronce al estaño al alto plomo contiene hasta un 25% de plomo. Estas aleaciones se utilizan para la producción de bujes y cojinetes que estarán sometidos a cargas ligeras o moderadas. (Avner, 1988)

En la producción de bronce al estaño es necesario evitar la oxidación del estaño en SnO_2 . Si se llega a formar este elemento, aparecerá como manchas en la superficie, debilitando al material y volviéndolo frágil. Por ello es necesario el uso de fósforo, para desoxidar la mezcla al momento de fundir. El contenido normal de fósforo en los bronce al estaño está entre 0.01 y 0.5%. A parte de evitar la oxidación de estaño, el fósforo mejora las propiedades del material. Este tipo de bronce se caracterizan por una buena tenacidad, alta resistencia a la corrosión y un bajo coeficiente de fricción. Sus usos principales son en diafragmas, arandelas de sujeción, seguros, bujes, discos de embrague y resortes. (Mangonon, 1999)

El más común de los bronce no tratables al calor es el bronce fosfórico que es una aleación de cobre y estaño desoxidada con fósforo. Esta aleación sobresale por su elevada resistencia, buena elasticidad y buena resistencia al

desgaste y a la fatiga. Se lo usa principalmente para resortes, ejes, bujes y bocines.

1.2.2 Fundición De Metales

En los países conocidos como del primer mundo o industrializados, se da una gran importancia a la fundición de metales, ya que es un aspecto que da un alto valor a estos países para que los mismos puedan desarrollarse eficientemente e integralmente. Uno de los índices que establecen el desarrollo técnico-económico de los países se lo mide a través de las toneladas de metales que funden cada año. Entre los países de mayor productividad y calidad de fundición de metales se encuentran Estados Unidos, Japón, Rusia, China, India, Alemania, Suecia y Brasil, siendo éste último el único país representante de América Latina.

Como antecedente histórico, en el Ecuador, extranjeros que participaron en la construcción del ferrocarril instalaron centros de fundición de hierro y bronce en Durán y Quito, con técnicos, en un principio, extranjeros, pero con mano de obra nacional, es decir, obreros ecuatorianos que no poseían, en un principio, conocimiento alguno sobre el tema. Estos obreros, al jubilarse, instalaron los primeros talleres de fundición en las ciudades de Quito y Guayaquil. Sus actividades productivas tenían una tecnología muy insipiente, pero sus ganas de superación fueron mayores. Con el pasar de los años, las ganas de superación les ha permitido mantener e incrementar los talleres de fundición del país, sin embargo la producción se mantiene carente de

tecnología, con poco o casi ningún síntoma de evolución desde los tiempos en los que se iniciaron.

El desarrollo industrial de un país depende de varios factores, entre los cuales se encuentran la mano de obra calificada, técnicos y expertos capaces de desarrollar tecnología, respetando la conservación del medio ambiente; instalaciones e infraestructura industrial apropiada y plazas de trabajo. Con esto, es de vital importancia el desarrollo de una industria básica, basada en la fundición de metales, ya que de ésta depende el desarrollo de los demás sectores industriales del país, como son el sector automotriz, metalmecánico, minería, agroindustria, petroquímico, entre otros; ya que a través del proceso de fundición se obtienen elementos y piezas que son parte integral de la maquinaria que se utiliza en las diferentes áreas de la industria.

Como datos estadísticos se puede mencionar que el Ecuador importó más de mil quinientos millones de dólares en el 2010 en productos de aleaciones metálicas ferrosas y no ferrosas. La producción nacional de dichos materiales no supera las cuarenta mil toneladas de aleaciones metálicas, que equivalen a unos cien millones de dólares, que demuestra claramente la gran demanda no satisfecha por la producción nacional que existe en el mercado ecuatoriano. Es por ello que la AFME cree conveniente emprender proyectos de capacitación de mano de obra dedicada a esta actividad, formando obreros calificados, ingenieros y técnicos en la rama de la metalurgia, fundición de metales, defectología de metales, y diseño y construcción de maquinaria con tecnologías de punta. Las investigaciones realizadas demuestran que el Ecuador cuenta con una considerable materia prima como chatarra de acero,

hierro fundido, aluminio, cobre, etc., que puede ser procesada en el país generando fuentes de empleo y a su vez aportar con el desarrollo general del mismo. (Campoverde, 2011)

Sin embargo, la fundición está considerada por el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito como una actividad de alto impacto, lo que ha ido generando el cierre de varios talleres y empresas dedicadas a la fundición dentro de la ciudad por las altas exigencias que se han mantenido y se han ido aumentando durante los años. Para el 2000, dentro del Distrito Metropolitano se encontraban alrededor de 450 talleres y empresas de fundición, siendo éstos talleres artesanales, pequeñas, medianas y grandes empresas. Para el 2003 este número bajó a unos 250 y para el 2005 a unos 180. En la actualidad se encuentra aproximadamente 120, de los cuales tan solo 15 son medianas o grandes empresas, los demás son considerados como talleres artesanales o pequeñas empresas que funden menos de una tonelada al mes. (Orozco, 2013)

Para evitar cierres de este tipo de empresas es necesario mejorar el sistema de producción, convirtiendo la fundición artesanal en métodos tecnológicos que sean controlados y que den como resultados productos de alta calidad capaces de competir con los importados, para ahorrar en importaciones e invertir en la producción nacional.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Para la producción de piezas fundidas para aplicaciones en construcción de partes y elementos de máquina, todavía es una novedad el uso de normas, sobre todo en el sector de la fundición artesanal. Al no existir un estudio para la

obtención de bronce fosfórico en este medio, lo que se pretende con este proyecto es el desarrollo de la tecnología para la elaboración de este tipo de bronce, el cual será obtenido bajo norma para aplicaciones específicas, y se lo conseguirá en base a pruebas que se desarrollarán con una muestra patrón de un elemento de máquina ya existente, con el fin de obtener las mismas o mejores propiedades.

Además, el bronce fosfórico es un bronce muy demandado en el sector industrial para todo tipo de elementos de máquina. En la actualidad, el bronce SAE 64 es uno de los más pedidos en el mercado nacional cuando se demanda grandes exigencias al momento de trabajar con piezas fabricadas en bronce fosfórico, por su principal característica autolubrificante, que le permite trabajar durante un periodo más extenso con poco o ningún tipo de lubricación. El problema radica en poder encontrar este material, ya que casi ningún taller artesanal se dedica a la producción de bronce especiales y es necesario acudir a empresas grandes o a empresas importadoras de materiales y productos de este tipo. (Wiesner, 2013)

1.4 ALCANCE

Este proyecto se enfoca en la obtención de bronce SAE 64 con equivalencia UNS C93700 en base a materiales en su mayoría de reciclaje para aplicaciones en construcción de partes y elementos de máquina de forma artesanal. El tipo de fundición es básicamente fundición en arena en horno de crisol. Los ensayos preliminares se realizan en laboratorio con pequeñas coladas. Las probetas obtenidas son analizadas químicamente para determinar

su composición y si es necesario, hacer las respectivas correcciones previo a la fundición del elemento de máquina. Después de haber logrado la composición química que se ajusta a la norma ASTM B584, se procede con los demás ensayos de laboratorio para realizar la caracterización de la aleación obtenida. Entre los ensayos de laboratorio a realizarse están: ensayo de tracción, dureza y microscopía; para establecer las demás propiedades del material y homologar con la misma norma.

Los ensayos y el diseño de la tecnología servirán para dar un cambio a la producción de forma artesanal, que por lo general tiene poco o ningún control sobre los parámetros en el momento de la producción. El procedimiento que aquí se recomienda tiene la garantía de que los resultados finales obtenidos cumplen con las propiedades que la norma demanda.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo General

Desarrollar la tecnología para la obtención de bronce fosfórico SAE 64 con equivalencia UNS C93700 para la producción de probetas que serán analizadas química y mecánicamente, y construir elementos de máquina de forma artesanal.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Usar la mayor cantidad de materia prima reciclada para la obtención de bronce fosfórico.
- Usar técnicas de bajo costo.

- Introducir un material normalizado según estándares internacionales al sector de la fundición artesanal.
- Desarrollar la tecnología para la construcción artesanal de un elemento de máquina estándar existente.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA ALEACIÓN

El bronce SAE 64 tiene como equivalencia UNS C93700. Es parte de los bronce especiales y pertenece al grupo de Bronces al Estaño Emplomados. Tiene una designación comercial 80-10-10 por el contenido nominal de los elementos principales que forman la aleación, como se muestra en la fig. 2.1.

Es conocido como Bronce al Estaño de Alto Plomo, por su alto contenido de ambos elementos; o también como Bronce Fosforoso al Plomo. 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 alto 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. Todo esto le brinda a esta

aleación características físicas primordiales para el trabajo pesado. (Ivan Bohman C.A., 2006). Además, posee una excelente maquinabilidad.

Classification	Copper Alloy UNS No.	Previous Designation	Commercial Designation	Copper	Tin	Lead	Zinc	Nickel	Iron	Alum- inum	Man- ganese	Sili- con	Nio- bium	Bis- muth
Leaded red brass	C83450	...	...	88	2½	2	6½	1	...	...	...	...	...	...
	C83600	B 145-4A	85-5-5-5 or No. 1 composition	85	5	5	5	...	...	...	...	...	...	...
	C83800	B 145-4B	commercial red brass, 83-4-6-7	83	4	6	7	...	...	...	...	...	...	...
Leaded semi-red brass	C84400	B 145-5A	valve composition, 81-3-7-9	81	3	7	9	...	...	...	...	...	...	...
	C84800	B 145-5B	semi-red brass, 76-2½-6½-15	76	2½	6½	15	...	...	...	...	...	...	...
Leaded yellow brass	C85200	B 146-6A	high-copper yellow brass	72	1	3	24	...	...	...	...	...	...	...
	C85400	B 146-6B	commercial No. 1 yellow brass	67	1	3	29	...	...	...	...	...	...	...
	C85700	B 146-6C	leaded naval brass	61	1	1	37	...	...	...	...	...	...	...
	C86200	B 147-8B	high-strength manganese bronze	63	...	...	27	...	3	4	3	...	...	...
High-strength yellow brass	C86300	B 147-8C	high-strength manganese bronze	61	...	...	27	...	3	6	3	...	...	...
	C86400	B 147-7A	leaded manganese bronze	58	1	1	38	...	1	½	½	...	...	...
	C86400	B 132-A	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	C86500	B 147-8A	No. 1 manganese bronze	58	...	...	39	...	1	1	1	...	...	...
	C86700	B 132-B	leaded manganese bronze	58	1	1	34	...	2	2	2	...	...	...
	C87300	B 198-12A	silicon bronze	95	...	...	...	...	...	...	1	4	...	...
Silicon bronze + silicon brass	C87400	B 198-13A	silicon brass	82	...	½	14	...	...	...	...	3½	...	...
	C87500	B 198-13B	silicon brass	82	...	...	14	...	...	...	...	4	...	...
	C87600	B 198-13C	silicon bronze	91	...	...	5	...	...	...	...	4	...	...
	C87610	B 198-12A	silicon bronze	92	...	...	4	...	...	...	...	4	...	...
	C89510 ^A	...	sebiloy I	87	5	...	5	...	...	...	...	...	...	1.0
Bismuth selenium brass	C89520 ^B	...	sebiloy II	86	5½	...	5	...	...	...	...	...	...	1.9
	C89844	...	bismuth brass	84½	4	...	8	...	...	...	...	...	...	3
Bismuth semi-red brass	C90300	B 143-1B	modified "G" bronze, 88-8-0-4	88	8	...	4	...	...	...	...	...	...	...
	C90500	B 143-1A	"G" bronze, 88-10-0-2	88	10	...	2	...	...	...	...	...	...	...
Tin bronze + leaded tin bronze	C92200	B 143-2A	steam or valve bronze-Navy "M"	88	6	1½	4½	...	...	...	...	...	...	...
	C92210	...	...	88	5	2	4	1	...	...	...	...	...	...
	C92300	B 143-2B	87-5-1-4, Navy PC	87	8	1	4	...	...	...	...	...	...	...
	C92600	...	87-10-1-2	87	10	1	2	...	...	...	...	...	...	...
	C93200	B 144-3B	83-7-7-3	83	7	7	3	...	...	...	...	...	...	...
	C93500	B 144-3C	85-5-9-1	85	5	9	1	...	...	...	...	...	...	...
	C93700	B 144-3A	80-10-10	80	10	10	...	...	...	...	...	...	...	...
	C93800	B 144-3D	78-7-15	78	7	15	...	...	...	...	...	...	...	...
	C94300	B 144-3E	71-5-24	71	5	24	...	...	...	...	...	...	...	...
	C94700	B 292-A	nickel-tin bronze Grade "A"	88	5	...	2	5	...	...	...	...	...	...
Nickel-tin bronze + leaded nickel-tin bronze	C94800	B 292-B	leaded nickel-tin bronze Grade "B"	87	5	1	2	5	...	...	...	...	...	...
	C94900	...	leaded nickel-tin bronze Grade "C"	80	5	5	5	5	...	...	...	...	...	...
	C96800	...	...	82	8	...	...	10	...	...	...	...	0.2	...
Spinodal alloy	C97300	B 149-10A	12 % leaded nickel silver	57	2	9	20	12	...	...	...	...	...	...
	C97600	B 149-11A	20 % leaded nickel silver	64	4	4	8	20	...	...	...	...	...	...
	C97800	B 149-11B	25 % leaded nickel silver	66	5	2	2	25	...	...	...	...	...	...

Fig 2. 1 Composición Nominal de las Aleaciones

Fuente: (ASTM, 2000)

Descripción: La aleación de cobre UNS C93700 tiene una designación previa B 144-3A, y una designación comercial 80-10-10. Esto quiere decir que el contenido de nominal de cobre es del 80%, de estaño 10% y de plomo 10%.

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.

El bronce fosfórico tiene un contenido entre 0.01% y 0.5% de fósforo. 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 C93700 es de 0.15%. Solo para el caso de piezas obtenidas por colada continua el valor máximo permitido no debe sobrepasar el 1.5%. (ASTM, 2000). 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.

2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA ALEACIÓN

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. (ASTM, 2000)

A continuación se presenta una descripción de los tres principales componentes de la aleación.

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. (Arlandis Rubio)

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. (Askeland, 1998)

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. (Avner, 1988). Su punto de fusión está en 1084.62°C y el de ebullición 2927°C.

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.

El consumo 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. (Arlandis Rubio)

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. (MINSUR)

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 (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 contagiarse al metal sano. 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. (Kalpakjian, 2002)

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. (USGS, 2011)

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. (Kalpakjian, 2002)

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. (Muñoz)

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. (LDA International, 2007)

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 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. (IESS)

2.3 METALURGIA DE LA ALEACIÓN

La aleación descrita es parte de los bronce al estaño. En la fig. 2.2 se puede apreciar la porción rica en cobre de esta aleación. La base β se forma como resultado de una reacción peritética a 798°C. A 586°C, la fase β tiene una reacción eutectoide para formar la mezcla ($\alpha + \gamma$). A 520°C, γ también sufre una transformación eutectoide a ($\alpha + \delta$). El diagrama indica la descomposición de la fase δ , la que se da por una reacción eutectoide a 350°C, formando ($\alpha + \varepsilon$). Esta reacción es muy lenta, haciendo que la fase ε 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 α . La precipitación de la fase δ o ε 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 α sólida). Pero en la mayor parte de las aleaciones que poseen más del 7% de estaño, se puede encontrar algo de la fase δ . (Avner, 1988)

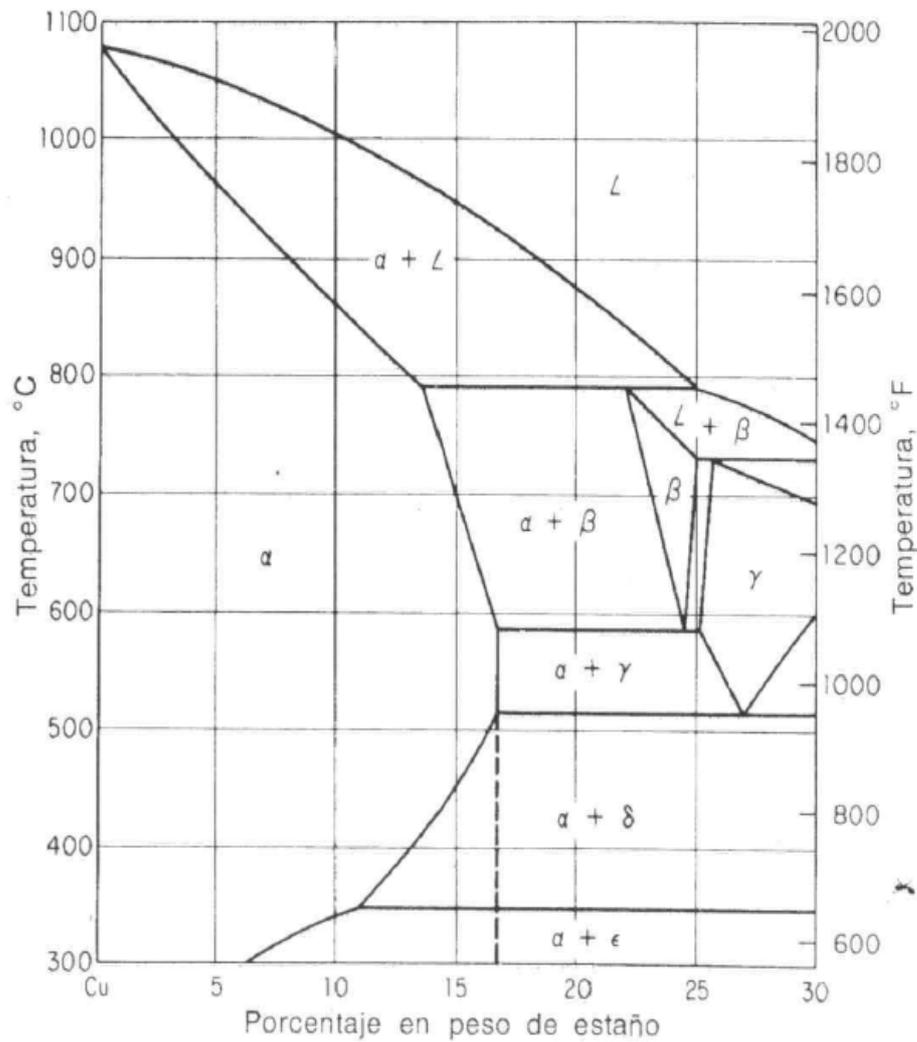


Fig 2. 2 Diagrama de fase cobre-estaño

Fuente: (Avner, 1988)

Descripción: Porción rica en cobre del diagrama de fase cobre-estaño, en el cual la línea punteada representa la línea solvus.

La metalografía que presenta un bronce especial de estaño en general es la siguiente:

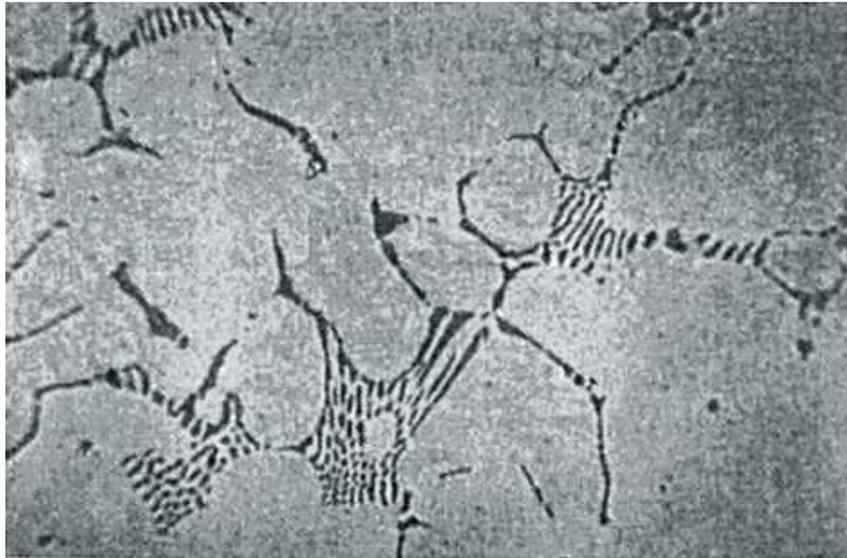


Fig 2. 3 Bronce fosforoso (90/10) moldeado en arena

Fuente: (Morrall, Jimeno, & Molera, 1985)

Descripción: Metalografía de bronce fosforoso con una composición química de 90% de cobre y 10% de estaño moldeado en arena.

La microestructura de un bronce emplomado muestra incrustaciones en color negro que son el plomo y la parte blanca de la misma es el cobre. Estos dos elementos son inmiscibles, es decir, no se mezclan entre sí.

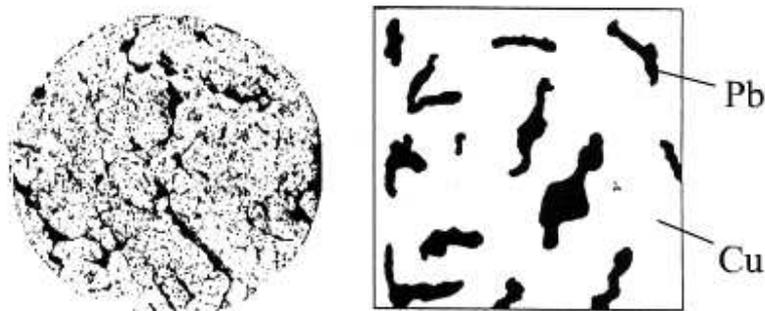


Fig 2. 4 Microestructura de Bronce Emplomado

Fuente: (msun, 2006)

Descripción: Microestructura de bronce emplomada y su representación esquemática en donde se muestran las incrustaciones de plomo en el cobre.

Este bronce en específico tiene una composición química que está entre los límites de: 78 a 82 Cu, 9 a 11 Sn, 8 a 11 Pb, 0.8 Zn max, 1.0 Ni max, 0.15 Fe max, 0.5 Sb max, 0.08 S max, 0.15 P max, 0.005 Al max, 0.005 Si max; según la norma ASTM B584, como se muestra en la fig. 2.5:

Copper Alloy UNS No.	Composition, % Max Except as Indicated																			
	Major Elements										Residual Elements									
	Copper	Tin	Lead	Zinc	Iron	Nickel Incl. Cobalt	Aluminum	Manganese	Silicon	Bismuth	Selenium	Iron	Antimony	Nickel incl. Cobalt	Sulfur	Phosphorus	Aluminum	Manganese	Silicon	Lead
C83450	87.0-89.0	2.0-3.5	1.5-3.0	5.5-7.5	...	0.75-2.0	...	...	...	...	0.30	0.25	...	0.08	0.05	0.005	...	0.005	...
C83600	84.0-86.0	4.0-6.0	4.0-6.0	4.0-6.0	...	1.0 ^A	...	...	...	...	0.30	0.25	...	0.08	0.05	0.005	...	0.005	...
C83800	82.0-83.8	3.3-4.2	5.0-7.0	5.0-8.0	...	1.0 ^A	...	...	...	...	0.30	0.25	...	0.08	0.03	0.005	...	0.005	...
C84400	78.0-82.0	2.3-3.5	6.0-8.0	7.0-10.0	...	1.0 ^A	...	...	...	...	0.40	0.25	...	0.08	0.02	0.005	...	0.005	...
C84800	75.0-77.0	2.0-3.0	5.5-7.0	13.0-17.0	...	1.0 ^A	...	...	...	...	0.40	0.25	...	0.08	0.02	0.005	...	0.005	...
C85200	70.0-74.0	0.7-2.0	1.5-3.8	20.0-27.0	...	...	...	...	...	...	0.6	0.20	1.0	0.05	0.02	0.005	...	0.05	...
C85400	65.0-70.0	0.50-1.5	1.5-3.8	24.0-32.0	...	...	...	...	...	...	0.7	...	1.0	...	...	0.35	...	0.05	...
C85700	58.0-64.0	0.50-1.5	0.8-1.5	32.0-40.0	...	...	...	...	...	...	0.7	...	1.0	...	...	0.80	...	0.05	...
C86200	60.0-66.0	0.20	0.20	22.0-28.0	2.0-4.0	...	3.0-4.9	2.5-5.0	...	...	...	...	1.0	...	...	...	...	...	...
C86300	60.0-66.0	0.20	0.20	22.0-28.0	2.0-4.0	...	5.0-7.5	2.5-5.0	...	...	...	...	1.0	...	...	...	...	...	...
C86400	56.0-62.0	0.50-1.5	0.50-1.5	34.0-42.0	0.40-2.0	...	0.50-1.5	0.10-1.0	...	...	...	...	1.0	...	...	...	...	...	...
C86500	55.0-60.0	1.0	0.40	36.0-42.0	0.40-2.0	...	0.50-1.5	0.10-1.5	...	...	...	...	1.0	...	...	...	...	...	...
C86700	55.0-60.0	1.5	0.50-1.5	30.0-38.0	1.0-3.0	...	1.0-3.0	1.0-3.5	...	...	...	...	1.0	...	...	...	...	...	...
C87300	94.0 min	0.20	0.25	...	...	...	...	0.8-1.5	3.6-5.0	...	0.20	...	...	...	...	...	...	...	...
C87400	79.0 min	...	1.0	12.0-16.0	...	...	...	...	2.5-4.0	...	...	...	...	...	...	0.80	...	...	...
C87500	79.0 min	...	0.50	12.0-16.0	...	...	...	...	3.0-5.0	...	...	...	...	...	...	0.50	...	...	...
C87600	88.0 min	...	0.50	4.0-7.0	...	...	...	...	3.5-5.5	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
C87610	90.0 min	...	0.20	3.0-5.0	...	...	...	...	3.0-5.0	...	0.20	...	...	...	...	...	0.25	...	...
C89510	86.0-88.0	4.0-6.0	0.25	4.0-6.0	0.30	1.0	...	...	...	0.5-1.5	0.35-0.70	...	0.25	...	0.08	0.05	0.005	...	0.005
C89520	85.0-87.0	5.0-6.0	0.25	4.0-6.0	0.20	1.0	...	...	...	1.6-2.2	0.8-1.1	...	0.25	...	0.08	0.05	0.005	...	0.005
C89844	83.0-86.0	3.0-5.0	...	7.0-10.0	...	1.0 ^A	2.0-4.0	...	0.30	0.25	...	0.08	0.05	0.005	...	0.005	0.2
C90300	86.0-89.0	7.5-9.0	0.30	3.0-5.0	...	1.0 ^A	...	...	...	...	0.20	0.20	...	0.05	0.05	0.005	...	0.005	...
C90500	86.0-89.0	9.0-11.0	0.30	1.0-3.0	...	1.0 ^A	...	...	...	...	0.20	0.20	...	0.05	0.05	0.005	...	0.005	...
C92200	86.0-90.0	5.5-6.5	1.0-2.0	3.0-5.0	...	1.0 ^A	...	...	...	...	0.25	0.25	...	0.05	0.05	0.005	...	0.005	...
C92210	86.0-89.0	4.5-5.5	1.7-2.5	3.0-4.5	...	0.7-1.0	...	...	...	...	0.25	0.20	...	0.05	0.03	0.005	...	0.005	...
C92300	85.0-89.0	7.5-9.0	0.30-1.0	2.5-5.0	...	1.0 ^A	...	...	...	...	0.25	0.25	...	0.05	0.05	0.005	...	0.005	...
C92600	86.0-88.5	9.3-10.5	0.8-1.5	1.3-2.5	...	0.7 ^A	...	...	...	...	0.20	0.25	...	0.05	0.03	0.005	...	0.005	...
C93200	81.0-85.0	6.3-7.5	6.0-8.0	2.0-4.0	...	1.0 ^A	...	...	...	...	0.20	0.35	...	0.08	0.15	0.005	...	0.005	...
C93500	83.0-86.0	4.3-6.0	8.0-10.0	2.0	...	1.0 ^A	...	...	...	...	0.20	0.30	...	0.08	0.05	0.005	...	0.005	...
C93700	78.0-82.0	9.0-11.0	8.0-11.0	0.8	...	1.0 ^A	...	...	...	...	0.15	0.50	...	0.08	0.15	0.005	...	0.005	...
C93800	75.0-79.0	6.3-7.5	13.0-16.0	0.8	...	1.0 ^A	...	...	...	...	0.15	0.80	...	0.08	0.05	0.005	...	0.005	...
C94300	67.0-72.0	4.5-6.0	23.0-27.0	0.8	...	1.0 ^{ABC}	...	...	...	...	0.15	0.80	...	0.08	0.05	0.005	...	0.005	...
C94700	85.0-90.0	4.5-6.0	0.10	1.0-2.5	...	4.5-6.0	...	...	...	...	0.25	0.15	...	0.05	0.05	0.005	0.20	0.005	...
C94800	84.0-89.0	4.5-6.0	0.30-1.0	1.0-2.5	...	4.5-6.0	...	...	...	...	0.25	0.15	...	0.05	0.05	0.005	0.20	0.005	...
C94900	79.0-81.0	4.0-6.0	4.0-6.0	4.0-6.0	...	4.0-6.0	...	...	...	...	0.30	0.25	...	0.08	0.05	0.005	0.10	0.005	...
C96800	remainder	...	0.005	1.0	0.50	9.5-10.5	0.10	0.05-0.30	...	...	...	0.02	...	0.0025	0.005	...	...	...	...
C97300	53.0-58.0	1.5-3.0	8.0-11.0	17.0-25.0	1.5	11.0-14.0	...	...	...	...	...	0.35	...	0.08	0.05	0.005	0.50	0.15	...

Fig 2. 5 Requerimientos Químicos

Fuente: (ASTM, 2000)

Descripción: se presenta la composición química según la norma con los porcentajes máximos y mínimos de cada uno de los componentes de la aleación de cobre UNS C93700.

2.4 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ALEACIÓN

Las propiedades mecánicas vienen dadas por la composición química de la aleación. Para determinar estas propiedades, se deben realizar pruebas de forma separada en barras fundidas y los resultados de las mismas deben cumplir con los requisitos que la norma ASTM B584 presenta en la siguiente figura:

Copper Alloy UNS No.	Tensile Strength, min		Yield Strength, ^A min		Elongation in 2 in. or 50 mm, min, %
	ksi ^B	MPa ^C	ksi ^B	MPa ^C	
C83450	30	207	14	97	25
C83600	30	207	14	97	20
C83800	30	207	13	90	20
C84400	29	200	13	90	18
C84800	28	193	12	83	16
C85200	35	241	12	83	25
C85400	30	207	11	76	20
C85700	40	276	14	97	15
C86200	90	621	45	310	18
C86300	110	758	60	414	12
C86400	60	414	20	138	15
C86500	65	448	25	172	20
C86700	80	552	32	221	15
C87300	45	310	18	124	20
C87400	50	345	21	145	18
C87500	60	414	24	165	16
C87600	60	414	30	207	16
C87610	45	310	18	124	20
C89510	26	184	17	120	8
C89520	25	176	17	120	6
C89844	28	193	13	90	15
C90300	40	276	18	124	20
C90500	40	276	18	124	20
C92200	34	234	16	110	22
C92210	32	225	15	103	20
C92300	36	248	16	110	18
C92600	40	276	18	124	20
C93200	30	207	14	97	15
C93500	28	193	12	83	15
C93700	30	207	12	83	15
C93800	26	179	14	97	12
C94300	24	165	...	...	10

Fig 2. 6 Requerimientos Mecánicos

Fuente: (ASTM, 2000)

Descripción: en esta tabla se presenta los valores de la resistencia a la tracción, de la resistencia a la fluencia y la elongación de diferentes aleaciones de cobre fundidas en arena, incluyendo la aleación UNS C93700.

La resistencia a la tracción es de 207 MPa (30 ksi), la resistencia a la fluencia es de 83 MPa (12 ksi), y la elongación en 2 pulgadas o 50 mm es del 15% mínimo. La dureza no es un factor determinante para esta norma, pero según la ASM la dureza del C93700 es de 60 HB.

Estas propiedades varían según la temperatura a la que el material esté sometido y se ven reflejadas de mejor manera en las siguientes gráficas:

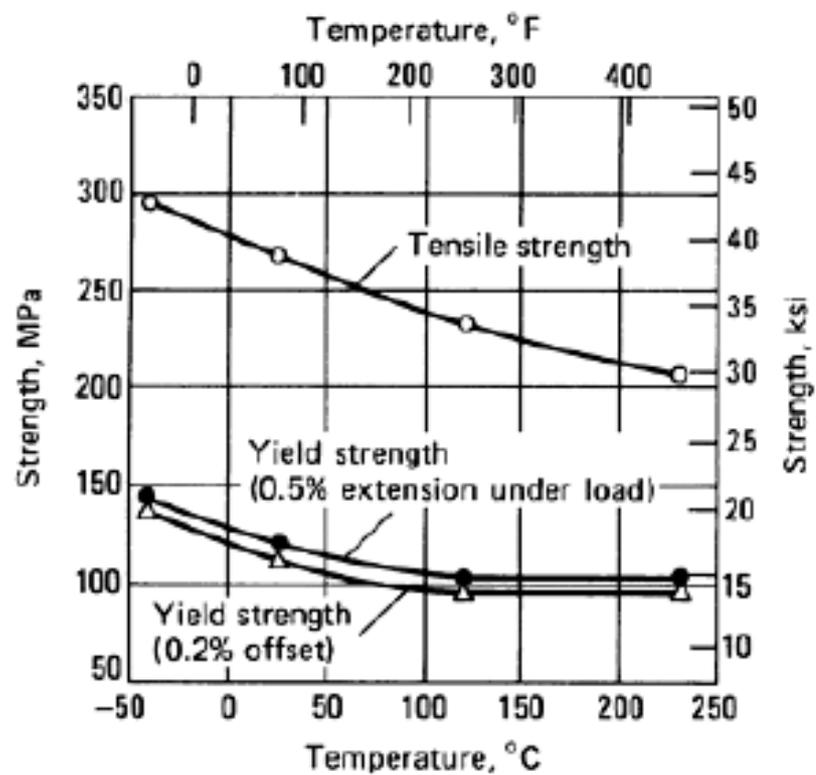


Fig 2. 7 Propiedades mecánicas típicas del C93700 a diferentes temperaturas

Continua

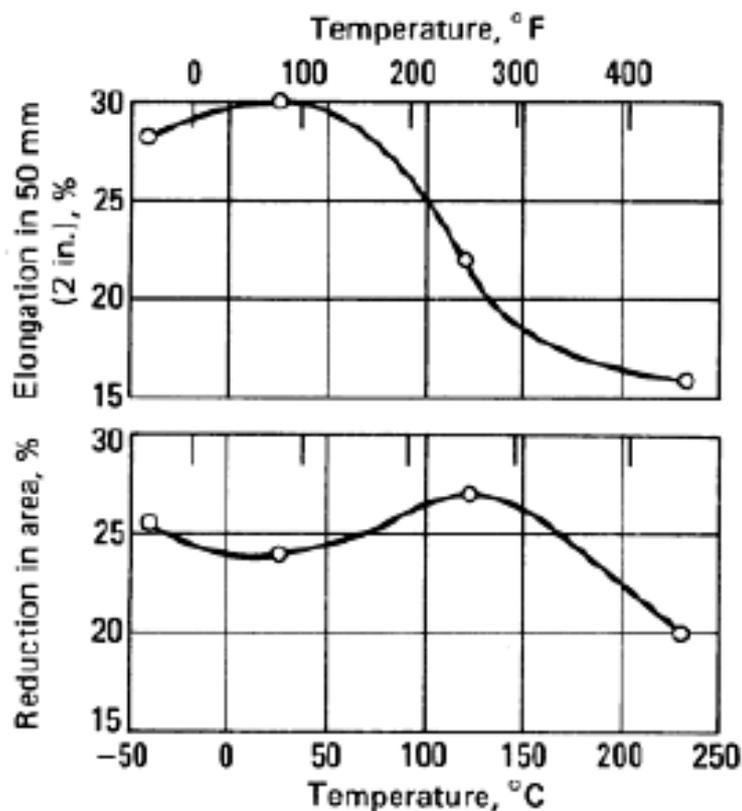


Fig 2.7 Propiedades mecánicas típicas del C93700 a diferentes temperaturas (continuación)

Fuente: (ASM, 1992)

Descripción: la primera gráfica muestra el comportamiento del material tanto para la resistencia a la tracción como para la resistencia a la fluencia. La segunda gráfica representa la elongación y la reducción de área. Todo esto según la ASM.

Otra de las propiedades mecánicas de esta aleación es la resistencia a la compresión, que es de 90 MPa (13 ksi) en un conjunto permanente de 0.1%; 325 MPa (47 ksi) en un conjunto permanente de 10%. (ASM, 1992)

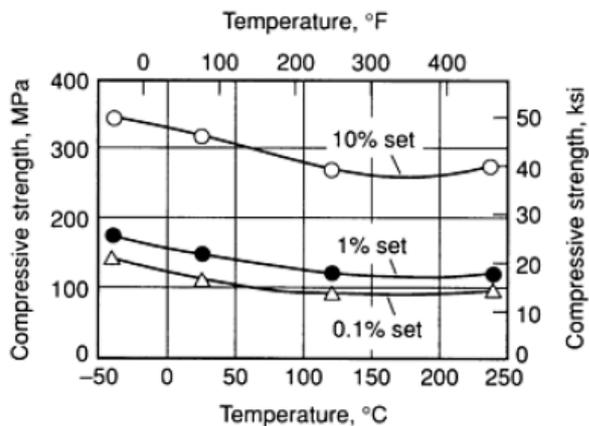


Fig 2. 8 Variación de la resistencia a la compresión con la temperatura para el C93700

Fuente: (ASM, 1992)

Descripción: representa la variación de la resistencia a la compresión de esta aleación con variación de temperatura en diferentes conjuntos permanentes.

El módulo de elasticidad de este material también se ve afectado conforme varía la temperatura.

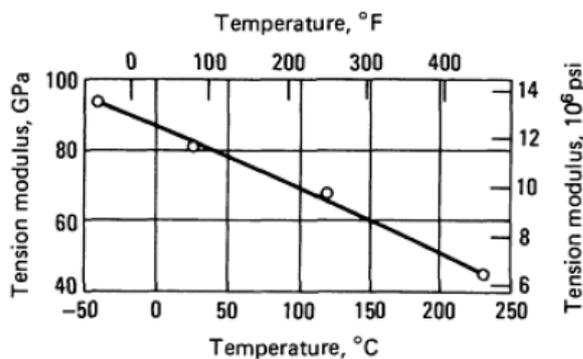


Fig 2. 9 Variación del módulo de elasticidad con la temperatura para el C93700

Fuente: (ASM, 1992)

Descripción: representa la variación del módulo de elasticidad de la aleación con variación de temperatura, la cual disminuye mientras aumenta la temperatura de forma proporcional.

En cuanto a las características de la masa de este material, la densidad del bronce UNS C93700 a una temperatura de 20°C (68 °F) es de 8.95 g/cm³ (0.323 lb/in³).

Es un material que puede maquinarse con gran facilidad. Es decir, tiene un 80% de maquinabilidad en comparación al latón UNS C36000. Con respecto a su soldabilidad, tiene una buena característica de soldadura, pero las partes no deben ser tensadas durante el proceso de soldadura o el enfriamiento posterior a este proceso, porque la soldadura se lleva a cabo en rangos cortos de alta temperatura. No se recomienda el proceso de soldadura por oxicorte y todo tipo de soldadura por arco. (ASM, 1992)

2.5 IMPORTANCIA DE LA ALEACIÓN PARA APLICACIONES EN CONSTRUCCIÓN DE PARTES Y ELEMENTOS DE MÁQUINA

Al seleccionar una aleación para un trabajo en específico, es necesario tomar en cuenta las propiedades, la adaptabilidad de la fundición y el costo. Esta aleación forma un bronce con las características ideales para el trabajo pesado con una excelente antifricción por su alto 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 bocines con lubricación pobre, ya que son capaces de absorber desalineamientos menores. Estos normalmente trabajan como elementos de sacrificio en las máquinas para evitar el desgaste de otros

componentes más caros. (Ivan Bohman C.A., 2006). 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.

En el ámbito industrial también es encontrada esta aleación en cigüeñales, placas de apoyo, guías de deslizamiento para molinos, arandelas para motores, rodamientos para la mayoría de tipos de máquina, rodamientos para tornos y para locomotores eléctricos. (Industrial Okendo S.A., 2012). Se utiliza también este material para la fabricación de piezas de uso severo para aplicaciones como en los casos de equipos camineros, prensas, máquinas herramientas, entre otros. Puede estar en contacto con aceros bonificados (705-709), pero no con materiales de alta dureza.

2.6 TECNOLOGÍA NACIONAL ACTUAL PARA LA OBTENCIÓN DE LA ALEACIÓN

Como se mencionó en un principio, existen diferentes métodos para la obtención del bronce fosfórico y en este particular caso, del bronce SAE 64, que es uno de los bronce especiales más solicitados en la industria. Los diferentes métodos de obtención investigados se encuentran en encuestas realizadas a diferentes expertos en la materia y se resumen en el Anexo 1.

2.6.1 Materia Prima Utilizada

El proceso comienza con la obtención y selección de materia prima que se va a necesitar. Se utiliza principalmente chatarra de cobre que se la consigue en las diferentes chatarrerías, estaño metálico que viene por lo general en lingotes y plomo que se lo encuentra en forma de chatarra o de igual manera que el estaño, en metal puro en lingotes. El plomo utilizado debe ser plomo blando, no el plomo que se obtiene de las baterías de los autos, ya que este viene mezclado con molibdeno y es un plomo duro. También se puede obtener el plomo mezclado con el estaño en las barras de estaño que son utilizadas para soldadura eléctrica, pero hay que tener en cuenta la composición química de las barras y el porcentaje exacto de los componentes para un buen manejo de cantidades al momento de fundir.

2.6.2 Elementos mejoradores de fundición

Estos elementos mejoradores de la fundición dependerán del proceso que se va a seguir y el método que cada empresa se haya planteado para la obtención del bronce.

En el caso de Fundireciclar, utilizan gas argón como desgasificador y desoxidante de la aleación y brassfundex como pastillas fundentes que se utiliza en peso de 0,5% del material de carga. (Loachamin Quinga, 2013)

En cambio, en la empresa FUNSA, utilizan pastillas que son a la vez fundentes y escoriantes, las que se pueden conseguir en Galvano. Como elemento desoxidante se utiliza balas de fosforo de litio. (Orozco, 2013)

Como elementos fundentes se puede utilizar bórax o vidrio ámbar, si es necesaria una cobertura de la fundición, se utiliza grafito cuando se va a fundir por periodos extensos, y como elemento desoxidante y desgasificante interviene fosforo de cobre. Esta es la práctica que se realiza en Intramet. (Wiesner Falconí, Gerente General Intramet, 2013)

2.6.3 Equipos necesarios

Este tipo de bronce se lo puede fundir en cualquier tipo de horno, como por ejemplo horno de crisol, inducción, basculante. Las fuentes de energía de estos hornos también pueden variar, se puede utilizar gas, coque, petróleo, glp, diesel, dependiendo de la que el horno disponga. Es decir, el horno y su fuente de energía no son específicos para la obtención de dicho material.

Como equipos y tecnología utilizada aparte del horno, son los quemadores para los diferentes combustibles, balanzas electrónicas, termocuplas de inmersión o pirómetros para un control de temperatura, crisol de grafito que resista temperaturas de 1300°C, máquinas y herramientas para corte y maquinado de materia prima y piezas fundidas, elementos básicos para fundición en arena, es decir, cajas, arena, espátulas, herramientas, etc.

2.6.4 Procesos de fundición

Los procesos de fundición para la obtención del bronce fosfórico son muy similares entre las diferentes empresas, lo que varía entre ellos es el uso de los diferentes mejoradores de fundición. A continuación se detallan 3 procesos para la producción de este bronce:

Proceso de fundición de empresa Intramet:

1. Colocar pedazos de vidrio ámbar o bórax en el fondo del crisol.
2. Llenar el crisol con chatarra de cobre.
3. Fundir y lingotear el cobre.
4. Llenar un nuevo crisol con lingotes de cobre.
5. Prender horno y fundir completamente el cobre.
6. Añadir estaño y fundirlo completamente.
7. Añadir plomo y fundirlo completamente.
8. Agregar 0,35% en peso de aleación fosfuro de cobre en el fondo del crisol.
9. Colar.

(Wiesner Falconí, Gerente General Intramet, 2013)

Para evitar el quemado del estaño, se puede añadir en primer lugar el plomo y después el estaño, es decir alternar los pasos 6 y 7 antes descritos.

(Wiesner, 2013)

Proceso de fundición de empresa Fundireciclar:

1. Colocar pastilla fundente (Brassfundex) en el fondo del crisol.
2. Cubrir de chatarra de cobre
3. Prender horno y si es necesario agregar más fundente
4. Fundir completamente y retirar la escoria
5. Añadir estaño y plomo (puede ser a la vez o por separado) y fundir completamente.
6. Añadir escoriante y retirar escoria

7. Desoxidar la mezcla añadiendo argón de forma manual en el fondo del crisol con manguera de acero inoxidable.
8. Colar a una temperatura de alrededor de 1200 °C.

(Loachamin Quinga, 2013)

Proceso de fundición de empresa FUNSA

1. Fundir el cobre.
2. Agregar fundente y 80% de escoriante.
3. Eliminar la escoria.
4. Introducir plomo y luego estaño.
5. Desgasificar y desoxidar con balas de fósforo de litio sumergiéndolas al fondo del crisol.
6. Descargar a una temperatura de 1050 – 1100°C.

(Orozco, 2013)

2.6.5 Consideraciones y cuidados

Si el proceso de fundición es largo, se debe utilizar grafito como cobertura para proteger la mezcla de una atmósfera oxidante, de lo contrario no se la utiliza ya que el proceso puede durar hasta 20 minutos. El equipo de protección personal se lo debe utilizar en todo momento. (Wiesner Falconí, Gerente General Intramet, 2013)

Los lingotes deben estar secos y no oxidados, y se los debe limpiar antes de fundirlos, sobre todo de aceites y grasas. (Loachamin Quinga, 2013)

El contenido de fósforo como componente de la aleación no debe ser mayor al 0,04 % o lo que indique la norma, porque de lo contrario el material se fragiliza. (Orozco, 2013)

2.6.6 Complicaciones al momento de fundir

Para evitar complicaciones al momento de desoxidar la mezcla, se cambió de zinc como elemento desoxidante al uso de fosforo de cobre, ya que este último es el más efectivo. Se debe controlar el tipo de llama que debe ser preferiblemente neutra o ligeramente oxidante, para no contaminar la aleación. (Wiesner Falconí, Gerente General Intramet, 2013)

Es necesario determinar la contracción lineal del material y para evitar rechupes en moldes abiertos, es necesario extender la longitud de la pieza a fundir para dejar hasta un 10% de longitud como aleación con rechupe que debe ser eliminada de la pieza. (Wiesner, 2013)

La desgasificación es uno de los mayores problemas que se han encontrado al momento de fundir este tipo de material, es por ello que en Fundireciclar se vieron obligados a cambiar el método anterior de desgasificación por medio de pastillas al uso de gas argón. (Loachamin Quinga, 2013)

Al momento de seleccionar la materia prima adecuada se vuelve una complicación por lo que se trabaja con chatarra principalmente, que es un material que parece ser el necesario, pero que a fin de cuentas no es. También, si la chatarra viene con muchas impurezas, el material fundido tiende a cortarse, siendo necesaria una fundición de corrección, y esto se logra quitando

el 50% de material fundido y añadiendo materia prima de mejor calidad. Si se ve que el factor de viscosidad aumenta, es decir, la mezcla no está tan líquida como se espera, es necesario aumentar pequeñas cantidades de aluminio como elemento fluidificador. (Orozco, 2013)

2.6.7 Control de calidad que se debe realizar

Para un control de calidad propio de la empresa, Intramet ha diseñado un ensayo de planta propio a base de golpe con martillo para determinar ductilidad, resistencia mecánica y color de la aleación. Si las exigencias lo demanda, se determina también tamaño de grano, análisis químico, ensayo de dureza, rayos x, entre otros. (Wiesner Falconí, Gerente General Intramet, 2013)

Se realizan ensayos mecánicos bajo pedido del comprador. Para la determinación de la composición química, se envía muestras de la aleación para que se realice espectrometría de plasma en la Escuela Politécnica Nacional por parte de Fundireciclar. (Loachamin Quinga, 2013)

En FUNSA, de igual manera los ensayos de composición química, pruebas de impacto y doblado se los realiza solo bajo pedido. (Orozco, 2013)

2.7 ENSAYOS DE LABORATORIO

Para realizar los diferentes ensayos de laboratorio es necesario tomar una muestra por lote, pero para ello se requiere determinar en primera instancia los lotes por separado. Según las normas ASTM es necesario un ensayo de análisis químico y un ensayo de tracción por cada lote de fundición.

En el caso de que alguna de las pruebas fallara y no cumplan con lo especificado en la norma, dos nuevas pruebas sobre el mismo lote deben ser realizadas. Si alguna de ellas falla, se descarta el lote por completo.

Los lotes están formados de distintas maneras:

- Por todo el metal que se vierte de un solo horno o crisol de fundición
- Por todo el metal que se vierte a partir de dos o más hornos en un solo cucharón
- Por todo el metal vertido de un horno de fundición continua entre cargas
- Por todo el metal vertido desde un horno de fusión individual o un grupo de hornos de fusión que tienen un punto de fusión uniforme

2.7.1 Ensayo De Análisis De Composición Química

La muestra para el análisis químico debe ser tomada de acuerdo a la norma ASTM E 255. La forma directa de obtener dicha muestra es tomándola del producto final de las piezas seleccionadas de cada lote y combinadas en una muestra compuesta, la cual debe pesar mínimo 150 gramos.

En lugar de tomar una muestra de forma directa de las piezas terminadas, se puede tomar la muestra al mismo tiempo en que la fundición está siendo vertida o del producto semiterminado. Si la muestra es tomada en estas instancias, ya no es necesario tomarla de los productos terminados. Cuando la muestra es tomada en el momento en que la fundición está siendo vertida, al menos una debe ser obtenida para cada grupo de piezas de fundición de la misma fuente de metal fundido.

Un análisis químico para cada elemento con un valor límite específico debe ser realizado en cada lote. El análisis químico para los elementos residuales no es necesario, a menos que se lo especifique en la orden de compra.

La muestra debe ser tomada de tal manera que se evite todo tipo de contaminación posible, y que sea una muestra representativa del lote. La preparación analítica de la muestra es responsabilidad del laboratorio que va a estar encargado del análisis químico. De igual manera, el método utilizado para realizar el ensayo de análisis químico queda a discreción del mismo laboratorio.

Muestreo

La broca, sierra, cortador o cualquier otra herramienta utilizada para extraer la muestra debe ser limpiada apropiadamente y con anterioridad. La velocidad de corte debe ser regulada para evitar calentamiento excesivo y cualquier tipo de oxidación consecuente al calor generado. Las herramientas comúnmente recomendadas son aquellas que tengan punta de carburo. En el caso de usarse herramientas de acero, deben ser magnetizables para ayudar con la extracción de partículas extrañas de hierro. Solo si el metal tuviese una fase magnética, las herramientas a utilizarse son las de punta de carburo.

En el caso especial de que fuera necesario el uso de lubricante para realizar el corte, éste debe ser uno que no reaccione con el metal. El lubricante debe ser removido inmediatamente después de que se realice el corte de la muestra, lavándola con un solvente que tampoco haga reacción con el metal.

Las piezas de ensayo deben estar limpias y libres de escala, suciedad, aceite, grasa, o cualquier contaminante extraño antes del muestreo.

Diferentes partes de una fundición pueden variar en su composición. Es por ello que una muestra de una única fundición debe ser tomada con precaución. Si es posible, dependiendo del tamaño y configuración de la fundición, la muestra debe ser tomada perforando cinco agujeros igualmente espaciados en forma circular o a lo largo de la misma. La perforación se la debe realizar en seco y el tamaño debe ser la mayor a $\frac{1}{4}$ de pulgada. Si el tamaño o la forma es una limitación, la muestra debe ser tomada fresando la fundición a lo largo de su sección transversal o perforando la fundición en diferentes puntos.

Preparación de la Muestra

La muestra para el ensayo debe ser una mezcla de masas iguales de las perforaciones, fresadas o cortes que se le realizó a la fundición. El material que se oxida con rapidez o que varía su composición con cambios atmosféricos, debe ser almacenado con gases de protección, como con nitrógeno.

La preparación de la porción de muestra para el ensayo varía según el método que se vaya a utilizar y es responsabilidad del laboratorio que reporte dicho método.

Métodos de Análisis Químico

- **Espectrometría de absorción:** es una variedad de técnicas que emplean la interacción de la radiación electromagnética con la materia. En este

tipo de espectrometría, se compara un haz de luz previamente medido con el mismo medido después de interactuar con un objeto o una muestra. La transmisión se refiere a la dirección de viaje del haz de luz medido antes de la absorción; y remisión se refiere al haz de luz medido después de la absorción. En la transmisión, el haz se dispersa desde la muestra hacia un detector que se encuentra en el lado opuesto de ésta. En cambio, en la remisión, el haz se dispersa desde la muestra hacia un detector que se encuentra en el mismo lado de la muestra. La radiación que se remite puede estar formada por dos clases: reflexión especular y reflexión difusa. Técnicamente, se basa en la absorción de fotones por una o más sustancias presentes en una muestra, que puede ser sólida, líquida o gaseosa, y la promoción subsiguiente del electrón o electrones desde un nivel de energía a otro. La espectrometría de absorción se utiliza no solo para determinar la composición química de la muestra, sino también las concentraciones relativas de los componentes de la misma. (Espectrometría)

- **Espectrometría de emisión óptica:** con la aplicación de esta técnica se puede determinar con exactitud la composición química de distintos metales, entre ellos aceros, fundiciones de hierro, metales no ferrosos como aluminio y cobre. Con la espectrometría se logra obtener todos los elementos que forman parte de la aleación y el porcentaje de cada uno de ellos, permitiendo un control de calidad de precisión. El método consiste en evaporizar la muestra y analizar las chispas que se forman en este proceso. Se desprenden átomos e iones que emiten luz, la cual es transmitida al sistema óptico del espectrómetro. Esta luz se mide mediante detectores eléctricos fotosensibles, que convierten la luz en

cargas eléctricas. Mediante esta chispa, los electrones de cada elemento son excitados y generan una determina longitud de onda que es medida. Es considerado uno de los métodos más exactos. (Espectrometria)

- **Difractometría de Rayos X:** este método permite determinar la composición química de materiales cristalinos, que pueden ser metálicos o cerámicos. Esta es una técnica cualitativa con la que se puede saber con exactitud el tipo de compuesto y el estado cristalino que posee. Es un método que se emplea con frecuencia para composición de minerales, productos de corrosión, productos industriales cristalinos, etc. (Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (ICMA))

- **Fluorescencia de Rayos X:** cuenta con un equipo portátil que determina, con bastante aproximación, la composición de aleaciones metálicas. La ventaja de este método es la rapidez con la que se efectúa el ensayo y es posible realizarlo en el área de trabajo, no específicamente en un laboratorio. En este método se detecta los rayos X característicos de cada elemento, que son producidos por distintas fuentes de energía. Los estándares utilizados para este método son varios, los cuales depende de la fuente de energía que se va a utilizar. (UNED)

2.7.2 Ensayo De Tracción

El ensayo de tracción es el ensayo más importante para determinar las propiedades mecánicas de un material. Se lo realiza para conocer el

comportamiento que van a tener las diferentes partes o elementos de máquina, contruidos con el material a ensayarse, cuando van a soportar fuerzas o cargas estáticas.

Esta práctica se la realiza en la Máquina Universal de Ensayos. El ensayo consiste en someter un esfuerzo creciente hasta provocar la ruptura de probetas normalizadas, hechas del material que se requiere realizar el estudio. Se lo puede realizar a temperatura ambiente o en caliente. Lo que provoca la carga aplicada sobre la probeta es un alargamiento axial de la misma hasta provocar que se rompa. A su vez hay una disminución de la sección transversal en la zona cercana a la ruptura. (Kerguignas & Caignaert, 1980)

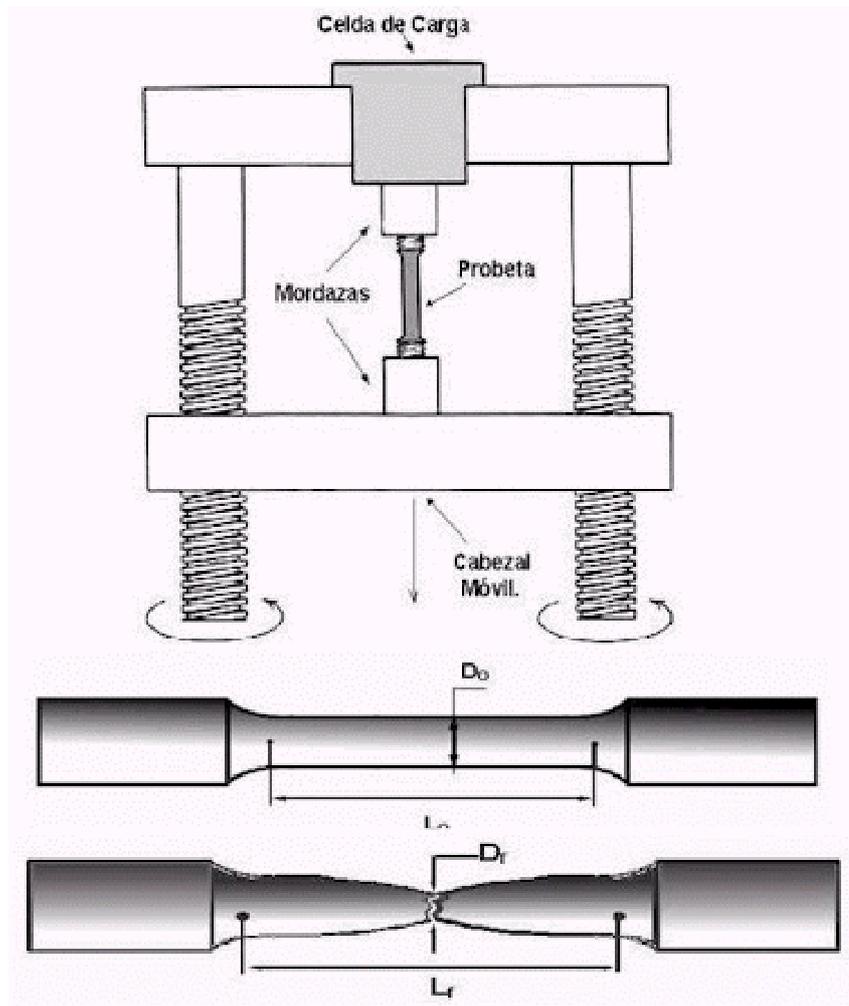


Fig 2. 10 Principio del Ensayo de Tracción

Fuente: (Automoción, 2012)

Descripción: dos mordazas sujetan la probeta mientras aplican cargas axiales apuestas hasta lograr la ruptura de la misma, obteniendo un alargamiento y reducción de la sección transversal de la muestra.

Esta máquina somete esfuerzos longitudinales a la probeta por medio de dos mordazas, que la sujetan de los extremos. Por lo general, estas máquinas trazan simultáneamente el diagrama de tracción mientras se va ejerciendo la carga.

Estos diagramas son la representación gráfica del comportamiento del material en coordenadas cartesianas, que relacionan las cargas o fuerzas (F), o las tensiones o esfuerzos unitarios (σ) y el alargamiento (ΔL) o el incremento de longitud unitaria (ε) que se provoca en la probeta. (Kerguignas & Caignaert, 1980)

El esfuerzo unitario es el esfuerzo que soporta el material por unidad de área:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Ec. 2.1

Donde:

σ = esfuerzo unitario

F = carga aplicada

A = sección transversal

El alargamiento unitario es la relación entre el alargamiento de la probeta y la longitud inicial:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0} * 100 = \frac{L_u - L_0}{L_0} * 100$$

Ec. 2.2

Donde:

ε = alargamiento unitario

δ = alargamiento de la probeta

L_o = longitud inicial

L_u = longitud final

Un diagrama de esfuerzo vs deformación viene a ser la curva resultante con valores de esfuerzo y la correspondiente deformación unitaria que sufre la probeta durante el ensayo.

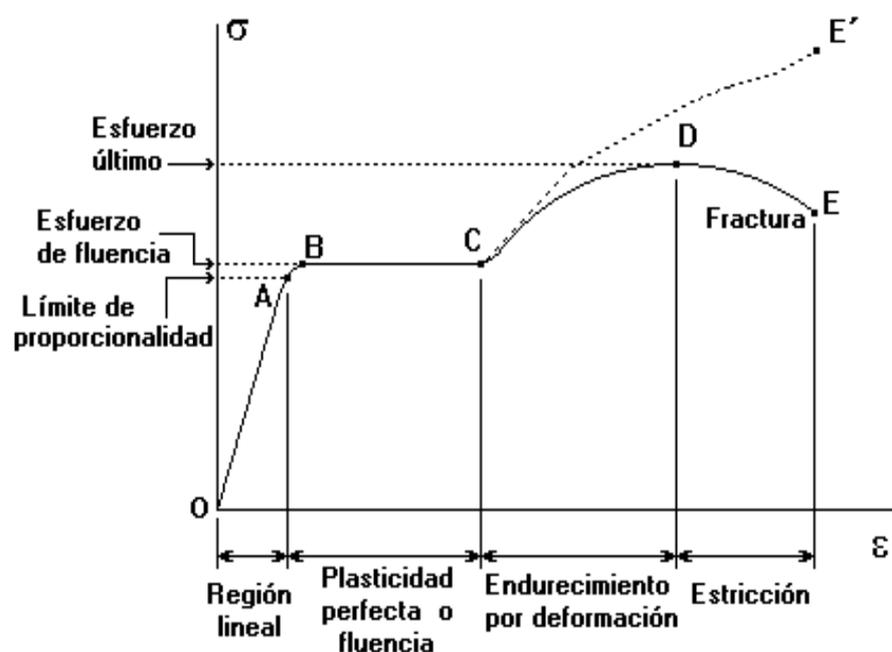


Fig 2. 11 Diagrama de esfuerzo deformación general

Fuente: (Automoción, 2012)

Descripción: representación gráfica del comportamiento de un material sometido a un ensayo de tracción.

A. El límite de proporcionalidad: va desde el origen hasta el punto: Límite de Proporcionalidad. Este es un segmento rectilíneo. Llegado a este punto, la deformación deja de ser proporcional a la tensión. Esta línea permite

obtener la relación de proporcionalidad entre la tensión y la deformación, conocida como la Ley de Hooke. La pendiente de esta recta permite calcular el módulo de elasticidad de un material o módulo de Young. Para el cobre y sus aleaciones, esta línea no es una recta, ya que va disminuyendo la pendiente conforme aumenta el esfuerzo. Es por ello que el módulo de elasticidad para estos materiales no está bien definido.

- B. Límite de elasticidad o límite elástico: a partir de este punto, el material no recupera totalmente su forma original cuando la carga es retirada. Si se sigue aplicando carga sobre la probeta, se da paso a la etapa de fluencia.
 - C. Esfuerzo de fluencia: aparece un alargamiento considerable de la probeta sin que varíe mayormente el esfuerzo aplicado, que en ciertas ocasiones puede disminuir mientras continua la fluencia. La fluencia es una característica esencial de los aceros, que no siempre aparece en otros materiales.
 - D. Esfuerzo último: es el esfuerzo máximo que llega a soportar la probeta. Desde el punto anterior hasta este, se genera un endurecimiento del material por deformación hasta llegar a su punto más alto.
 - E. Esfuerzo de ruptura: es el esfuerzo que se genera el momento en que ocurre la ruptura del material. (Appold, Feiler, Reinhard, & Schmidt, 1985)
- Un diagrama de esfuerzo deformación varía su forma según el material y su naturaleza, es decir si es dúctil o frágil.



Fig 2. 12 Diagrama esfuerzo-deformación para material dúctil y frágil

Fuente: (Metalografía Universidad Tecnológica de Pereira, 2012)

Descripción: curvas de tensión alargamiento de materiales con distinta naturaleza (material frágil y dúctil)

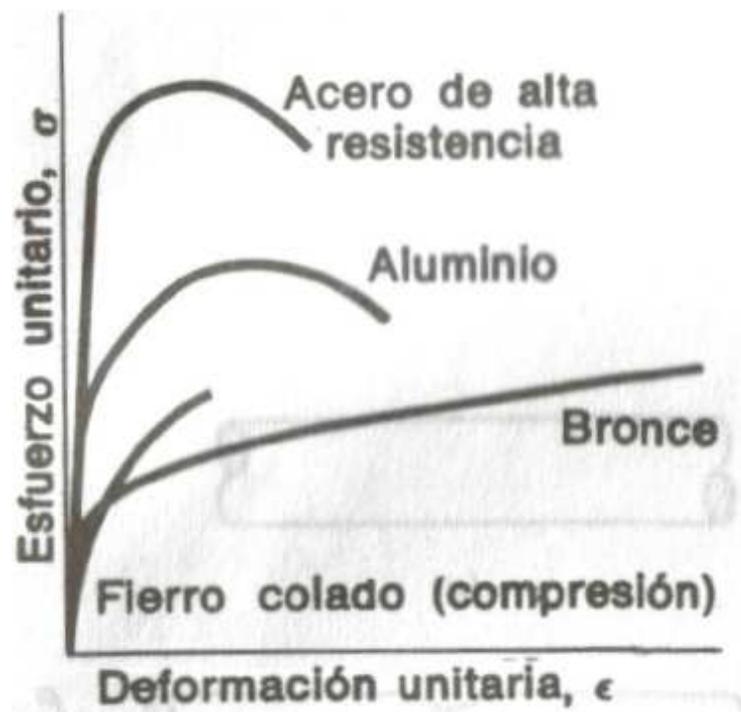


Fig 2. 13 Diagrama esfuerzo-deformación para diferentes materiales

Fuente: (Metalografía Universidad Tecnológica de Pereira, 2012)

Descripción: curvas representativas del diagrama esfuerzo deformación de distintos materiales.

Las probetas deben cumplir los parámetros de la norma ASTM B208. Éstas están formadas por una parte central circular y dos extremos de mayores dimensiones que el cuerpo central, los cuales sirven para ser sujetados por las mordazas de la máquina y evitar que se deslicen sobre la probeta.

Estas probetas se deben realizar, siempre que sea posible, con el mismo procedimiento de fundición con el que las piezas o elementos de máquina son fabricados. Las probetas pueden ser fundidas en las formas y dimensiones que se muestran en la fig. 2.14, que es uno de los diferentes diseños que recomienda la misma norma para ensayos de tracción para aleaciones de cobre.

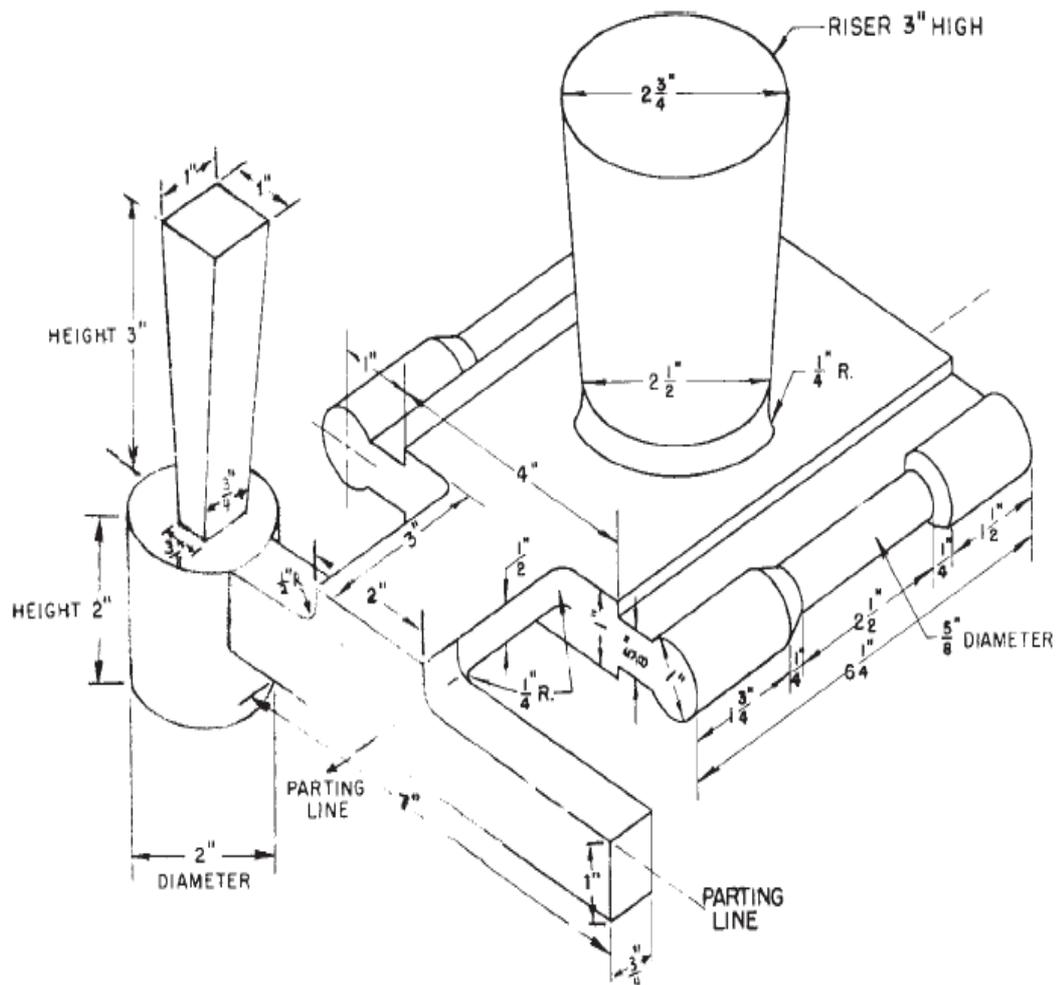


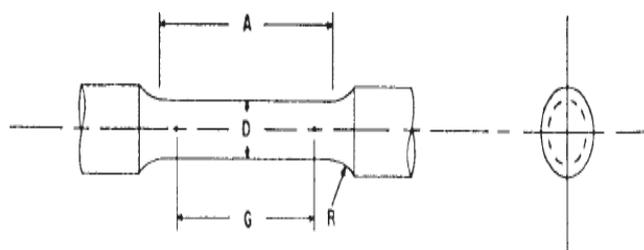
Fig 2. 14 Doble Probeta en sentido horizontal

Fuente: (ASTM, 2000)

Descripción: distribución del molde de probetas para ensayos de tracción con sus respectivas dimensiones en sentido horizontal.

Sin embargo, no es estrictamente necesario fundir las probetas de acuerdo al diseño anterior, siempre y cuando las probetas cumplan con las medidas especificadas; es por ello que después de fundir las probetas, estas deben ser maquinadas para que cumplan las dimensiones establecidas por la

norma para poder realizar el ensayo de tracción sobre ellas. Estas dimensiones, según la norma ASTM B208, se presentan en la siguiente figura:



	Dimensions				
	Standard Specimen		Small-Size Specimens Proportional to Standard		
	in.	in.	in.	in.	in.
Nominal Diameter	0.500	0.350	0.250	0.160	0.113
G—Gage length	2.000 ± 0.005	1.400 ± 0.005	1.000 ± 0.005	0.640 ± 0.005	0.450 ± 0.005
D—Diameter (Note 1)	0.500 ± 0.010	0.350 ± 0.007	0.250 ± 0.005	0.160 ± 0.003	0.113 ± 0.002
R—Radius of fillet, min	3/8	1/4	3/16	5/32	3/32
A—Length of reduced section, min Note 2)	2 1/4	1 3/4	1 1/4	3/4	5/8

Fig 2. 15 Probeta Redonda de 0.500 in Estándar para Pruebas de Tensión con 2 in de largo del calibre y Ejemplos de Probetas de menor tamaño proporcionales a la Estándar

Fuente: (ASTM, 2000)

Descripción: parámetros dimensionales de las probetas para ensayos de tracción con sección transversal redonda.

La probeta, que es una barra cilíndrica, normalmente esta rectificada y maquinada previo al ensayo. La sección transversal reducida debe ser rigurosamente constante, con un diámetro (D) de 0.5 pulgadas y una longitud (A) mínima de 2 1/4 de pulgada, pudiendo ser de mayor longitud si fuera necesario. La longitud calibrada (G) debe ser estrictamente de 2 pulgadas, así la longitud (A) sea mayor que el mínimo especificado.

2.7.3 Ensayo De Dureza

La dureza de un material es la resistencia superficial a ser deformado, es decir la resistencia que tiene un material a ser penetrado por otro más duro. Es una propiedad compleja y está determinada por la estructura cristalina. Los métodos más utilizados en la actualidad para determinar esta propiedad son los métodos Brinell, Vickers y Rockwell, los cuales se diferencian por la forma del penetrador.

Método Brinell:

Para determinar la dureza del material a obtenerse se pretende utilizar el ensayo de dureza Brinell bajo la norma ASTM E10. Este es un método utilizado para materiales blandos y semiduros, como aceros no endurecidos y materiales no ferrosos.

El penetrador es una bola de acero endurecido o una bola de carburo de tungsteno con un diámetro (D) conocido, que es forzado sobre la superficie de un material de ensayo y el diámetro de indentación (d) que deja la esfera después de que se ejerció la fuerza (F) es el que debe ser medido, como se muestra en la fig. 2.16:

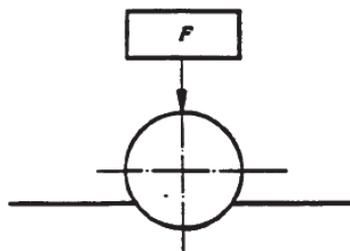


Fig 2. 16 Principio del Ensayo de Dureza Brinell

Continua

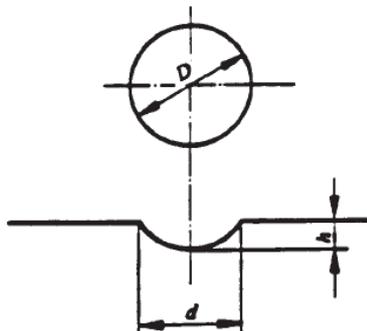


Fig 2.16 Principio del Ensayo de Dureza Brinell (Continuación)

Fuente: (ASTM, 2000)

Descripción: el penetrador es forzado sobre la superficie de un material de ensayo.

El grado de dureza Brinell (HB) se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$HBS \text{ o } HBW = 0.102 * \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Ec 2.3

Donde:

HBS = grado de dureza Brinell con penetrador de acero

HBW = grado de dureza Brinell con penetrador de carburo de tungsteno

D = diámetro de la bola (mm)

F = fuerza del ensayo (N)

d = diámetro de indentación (mm)

El diámetro D de los penetradores están normalizados y son de: 10, 5, 2.5 o 1 mm. La fuerza aplicada durante el ensayo debe ser una fuerza capaz de generar un diámetro de la indentación $d = 0.2D$ a $0.7D$.

No existe una forma o tamaño estandarizados para las probetas de prueba para los ensayos de dureza. Lo único que estas probetas deben cumplir es con un espesor suficiente como para que la indentación no llegue al lado opuesto, por lo menos debe ser 10 veces mayor que la profundidad de la huella.

Según la ASM, la dureza del C93700 es de 60HB. De acuerdo a la norma ASTM E10, se debe utilizar una bola de diámetro de 10mm y aplicar una fuerza de 14.7 kN (1500 kgf); o una fuerza de 4.9 kN (500 kgf).

Tabla 2. 1 Fuerzas de Ensayo Estándar

Diámetro de la Bola (mm)	Fuerza	Rango Recomendado (HB)
10	29.42 kN (3000 kgf)	96 a 600
10	14.7 kN (1500 kgf)	48 a 300
10	4.9 kN (500 kgf)	16 a 100

Fuente: (ASTM, 2000)

Descripción: en esta tabla se presenta los rangos de durezas Brinell recomendados por la norma y las fuerzas que se deben aplicar en el ensayo con un penetrador de diámetro 10 mm.

Los materiales no ferrosos en su mayoría se los puede considerar como materiales blandos, y en ciertos casos como semiduros, llegándose a obtener valores de dureza grado Brinell que van desde 3 a 315, como se muestra en el siguiente cuadro:

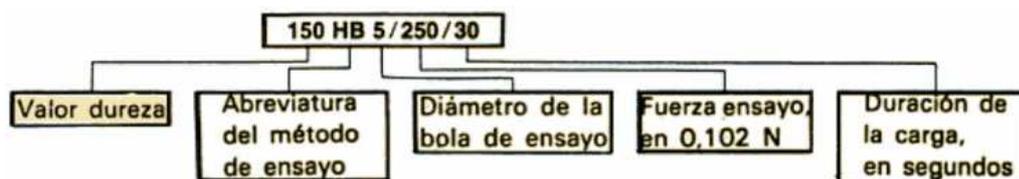
Cuadro 2. 1 Margen de Dureza Brinell de Distintos Grupos Materiales

Margen de durezas HB alcanzables	67 hasta 450	22 hasta 315	11 hasta 158	6 hasta 78	3 hasta 39
Preferible para ensayar la dureza de	Materiales de hierro y aleaciones de alta resistencia				
	Hierro blando Acero moldeado Fund. maleable Fund. de hierro Aleac. de titanio Aleaciones muy resistentes al calor, de níquel y cobalto	Aleac. metales ligeros, para fund. y forj. Aleac. fund. inyectada Cobre Latón Bronce Níquel	Aluminio puro Magnesio Zinc Latón fundido	Metal de antifricción	Plomo Estaño Metal blando

Fuente: (Gockel, 1986)

Descripción: se presenta el margen de dureza de grado HB para distintos grupos de materiales ferrosos, no ferrosos y sus aleaciones.

Normalmente se coloca el grado de la dureza seguido por el símbolo HB que es la abreviación del método, pero si se amerita el caso, la designación de la dureza Brinell se compone de:

**Fig 2. 17 Designación del grado de dureza Brinell**

Fuente: (Caro, 2013)

Descripción: designación de dureza grado Brinell con todos sus parámetros.

Método Vickers:

Otro de los ensayos que actualmente se utiliza para determinar la dureza de un material es el método Vickers, que tiene como símbolo HV. Aquí se utiliza un penetrador en forma de pirámide cuadrada hecha de diamante. La vista superior de la indentación es un cuadrado. Este método es utilizado normalmente con aceros nitrurados y cementados exteriormente, o para piezas de paredes delgadas de materiales ferrosos y no ferrosos. (Appold, Feiler, Reinhard, & Schmidt, 1985)

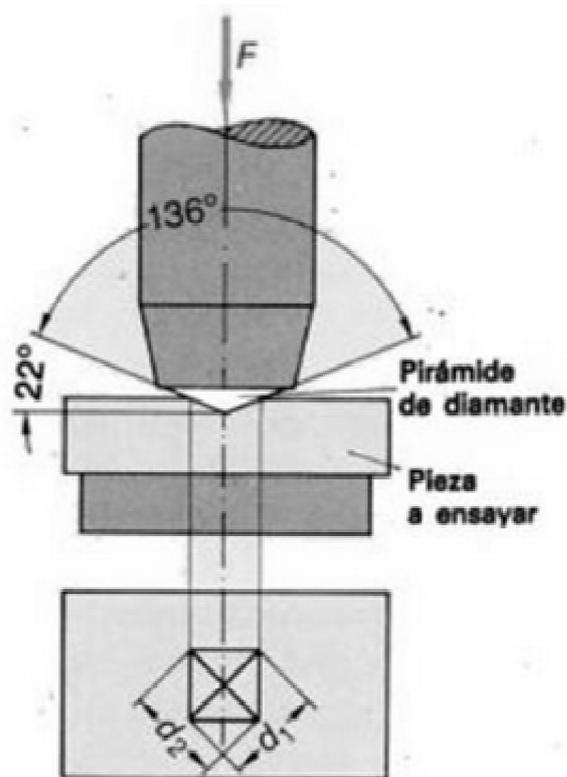


Fig 2. 18 Principio del Ensayo de Dureza Vickers

Fuente: (Gockel, 1986)

Descripción: el penetrador de diamante en forma de pirámide es forzado sobre la superficie de un material de ensayo, dejando una huella vista desde arriba como un cuadrado.

La dureza Vickers se calcula a partir de la fuerza aplicada y el área que deja la huella del penetrador, utilizando la siguiente fórmula:

$$HV = \frac{0.102 * F}{A} = \frac{0.189 * F}{d^2}$$

Ec 2.4

Donde:

HV = dureza Vickers

F = fuerza del ensayo (N)

A = superficie de la huella (mm²)

d = valor medio de las diagonales de la huella d₁ y d₂ (mm)

El valor de las diagonales debe ser medido con una tolerancia de ±0.002 mm, aumentándolas ópticamente para una mayor precisión. Según la Norma DIN 50 133, las fuerzas de ensayo van desde 49N a 980N, normalizadas en: 49, 98, 196, 294, 490 y 980N.

La designación de dureza Vickers, al igual que la Brinell, se la puede realizar colocando únicamente el número de dureza seguido por HV, que es la abreviación de este método; pero si es necesario especificar la dureza a detalle se realiza de la siguiente manera:

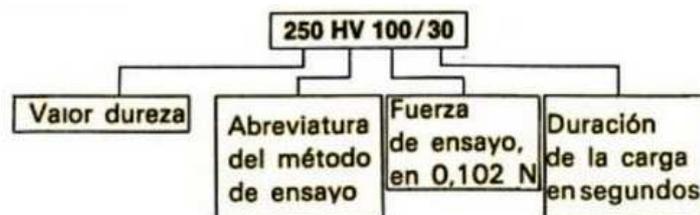


Fig 2. 19 Designación del grado de dureza Vickers

Fuente: (Caro, 2013)

Descripción: designación de dureza grado Vickers con todos sus parámetros.

Cuando la duración de la carga es de 10 a 15 segundos, no es necesario colocarla en la designación.

Método Rockwell:

La diferencia de este método con los demás es su penetrador, que es un cono de diamante de 120°. Es utilizado principalmente para medir la dureza de aceros templados. Su símbolo es HR. Se utiliza una fuerza previa de 98N para comprimir el cono de diamante sobre una superficie plana y lisa. Transcurrido esto, se coloca el reloj comparador en la marca 100 y se carga el cono con una fuerza adicional de 1371N. En el reloj comparador puede leerse el valor de la fuerza. Después de aplicar carga, queda sobre la superficie una huella permanente. Si la profundidad de la huella es 0.2 mm, se toma HR = 0. El valor de la dureza es 100 cuando la profundidad es 0 mm. Cada 0.002 mm son una unidad Rockwell. (Appold, Feiler, Reinhard, & Schmidt, 1985)

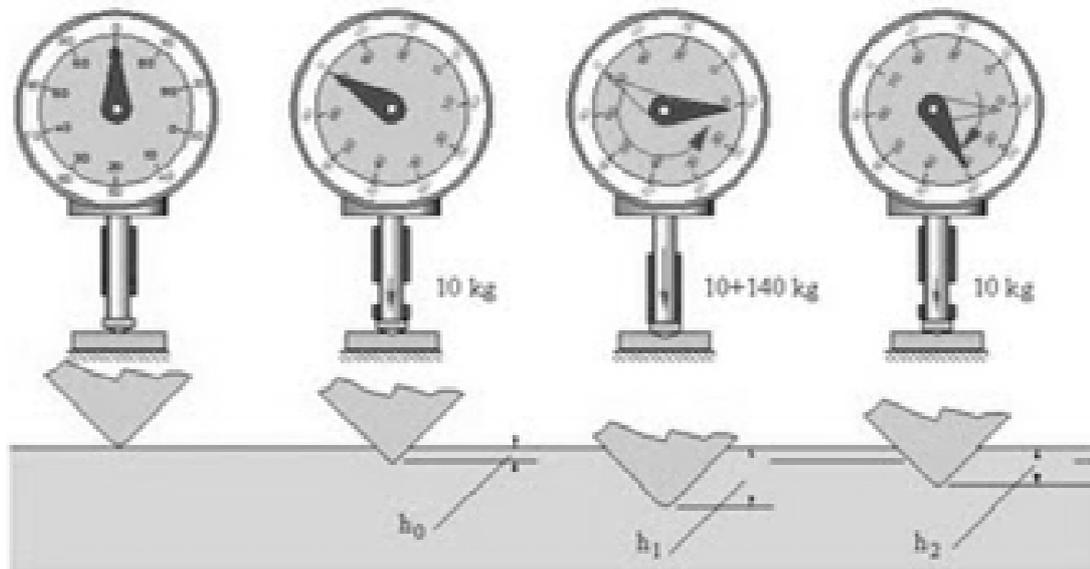


Fig 2. 20 Principio del Ensayo de Dureza Rockwell

Fuente: (Appold, Feiler, Reinhard, & Schmidt, 1985)

Descripción: Una fuerza inicial F_0 es cargada sobre el penetrador, luego se marca el reloj comparador en 100, se carga con la fuerza de ensayo F_1 y se hace lectura de la dureza.

Para la designación de este método solo es necesario el grado de dureza Rockwell seguido por HR.

No existe un método general apropiado para convertir el grado de dureza Brinell a otras escalas de dureza. Dichas conversiones son aproximaciones las cuales deben ser evitadas salvo el caso en el cual se haga los diferentes métodos para el mismo material.

2.7.4 Técnicas Metalográficas

La metalografía permite conocer las características estructurales y cómo está constituido un metal y sus aleaciones, y poder relacionarlas con las propiedades mecánicas, físicas y químicas del mismo. Por medio de este ensayo se puede determinar el tamaño de grano, distribución de fases, inclusiones, cavidades, escorias, entre otros factores que de cierta forma llegan a modificar las propiedades mecánicas de la aleación.

Los procedimientos que se realizan en un ensayo metalográfico son la extracción, preparación y ataque químico de la muestra, antes de observarla en un microscopio. Las probetas para análisis metalográfico deben ser extraídas de grandes masas preferentemente con sierra metalográfica, que tiene gran caudal de refrigerante para evitar el sobrecalentamiento de la muestra, o simplemente con herramientas de corte como sierra manual o máquina con lubricación, disco abrasivo o cizalla. Estas herramientas se las debe mantener lo más afiladas posibles, para evitar el trabajo en frío del material y una posible modificación en su estructura cristalina.

Los tamaños por conveniencia de las muestras a ser pulidas son cuadrados de 12 a 25 mm de lado, o de 12 a 25 mm de diámetro si la muestra es cilíndrica; y la altura no tiene relevancia siempre y cuando sea cómoda para sostenerla durante el pulido que es normalmente de forma manual.

Las aleaciones de cobre son extremadamente susceptibles al endurecimiento por trabajo, es por ello que en lo posible, la cara que se va a usar para ser examinada debe ser la que menos ha sufrido cortes. Para el cobre y sus aleaciones es preferible realizar un lijado húmedo. La práctica

común consiste en realizar un desbastado superficial grueso para remover el metal que ha sufrido trabajo en frío, y progresivamente afinar el desbastado. El desbastado por lo general se realiza con lijas de agua con tamaño de grano de 100, 240, 320, 400 y 600. Hay veces que se utiliza las ultrafinas de 800, 1200 y 1500. Se finaliza con un pulido con alúmina sobre un paño para pulir.

Después del pulido metalográfico es necesario un ataque químico, el cual depende del tipo de material principalmente. Se lo hace por inmersión o con algodón con el líquido escogido por la región pulida a ser observada.

Cuadro 2. 2 Reactivos y procedimientos para ataque químico del cobre y sus aleaciones

Composición	Procedimiento	Cobre o Aleación de Cobre
20 mL NH_4OH , 0-20 mL H_2O , 8-20 mL 3% H_2O_2	Inmersión o hisopado 1 min; contenido de H_2O_2 varía con el contenido de cobre de la aleación a grabar; usar H_2O_2 fresco para mejores resultados	Usar fresco para cobre y aleaciones de cobre; preferible para latones
1g $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, 4 mL H_2SO_4 , 50 mL H_2O	Añadir dos gotas de HCl antes de usar. Fregar con un algodón entre unos pocos segundos a 1 minuto	Usar para cobre y aleaciones en base de cobre

Fuente: (ASM, 1992)

Descripción: muestra el reactivo más comúnmente usado para el ataque químico en ensayos metalográficos para el cobre y aleaciones de cobre

Después del ataque químico, se lleva la muestra al microscopio, que es el principal instrumento para la realización de un ensayo metalográfico. Es posible observar la muestra con aumentos que van desde 5x hasta 2000x, dependiendo su capacidad. (ASM, 1992)

2.8 RECICLAJE DE METALES

En el mundo, el ser humano genera millones de toneladas al día de basura, pero sin embargo, gran parte de estos desperdicios se los vuelven a usar gracias al reciclaje de los mismos. Los metales son parte de estos residuos, que representan alrededor del 10% de los desperdicios generados a diario en el mundo.

En la vida cotidiana la gente está rodeada de metales que pueden ser reciclados y vueltos a utilizar. La mayor parte de ellos se los puede fundir y volver a procesar, produciendo nuevos materiales. (twenergy, 2013)

El reciclaje de metales es el proceso secundario de obtención del mismo, básicamente de la fusión del metal usado, es decir de chatarra de metal. Además de evitar la etapa del proceso primario que incluye la extracción y reducción del mineral a un metal en específico, tiene el valor económico propio del metal. En especial en metales como el plomo, cobre, aluminio, es un valor significativo, es por ello que el reciclaje de materiales no ferrosos es el de mayor interés debido al mayor valor de su chatarra, sin embargo, la demanda de metales ferrosos en el sector industrial obliga al reciclaje de los mismos. El único inconveniente de reciclar metales, es su separación y clasificación, ya que normalmente están mezclados con otros materiales. Por la complejidad de

los productos de hoy en día, es difícil la extracción y utilización de todos los metales valiosos. Los metales se pueden reciclar casi indefinidamente, por lo que es beneficio para evitar la degradación del medio ambiente.

Para producir una tonelada de cobre desde las minas, es necesario procesar 497 toneladas de materiales sólidos, 147 toneladas de mena y 350 toneladas de escombros, es decir tierra fértil, bosques y vegetación que tienen que ser removidos para acceder a los yacimientos. (CARLOS ZORILLA, 2012)

El reciclaje de metal conserva entre el 60% y 80% de energía en comparación con la minería, según estadísticas de la Universidad de Cambridge. (Taylor, 2012)

Metales como el cobre, bronce y latón requieren gran cantidad de electricidad para volver a ser utilizados, pero este consumo energético representa apenas el 5% del que se necesitaría para producirlo desde las minas donde se extraen. Además, es necesario tener en cuenta, que para la obtención de dichos metales, se precisan materias primas limitadas como la piedra caliza o el carbón. (twenergy, 2013)

Científicos, como Thomas Graedel, que estudian los suministros de metales, manifiestan que existe la preocupación de quedarse sin fuentes de algunos metales no ferrosos muy utilizados como el cobre y zinc en el suelo para finales del siglo XXI. Otros científicos piensan que algunos metales no durarán mucho tiempo. (Taylor, 2012)

Abastecer a la industria ecuatoriana de metales es tarea de las empresas que se encargan del reciclaje de metales ferrosos y no ferrosos. Estas empresas obtienen la materia prima por medio de una cadena tradicional de

reciclaje, directamente de fábricas o por recolección de diferentes sectores industriales como es el de la construcción, petrolero, automotriz, y otros.

Los metales ferrosos utilizados para ser reciclados son los que se generan principalmente de la industria de la construcción, es decir todo lo referente a chatarra de hierro, varillas, etc. Los materiales no ferrosos son los metales que contienen cobre, bronce, aluminio y demás metales diferentes del hierro, que por lo general son desechos de grifería, perfiles, cables eléctrico y demás componentes metálicos que se los recolecta directamente de fábricas o por medio de pequeños recolectores de chatarra metálica.

En el Censo Nacional Económico del 2010 realizado por el INEC, se muestra que existen 24 establecimientos que se dedican a procesar chatarra de metales, siendo parte de un total de 40 establecimientos dedicados al procesamiento de chatarra de plástico o metales que superan las ventas anuales de 25,8 millones de dólares.

Es importante fomentar el reciclaje de metales en el país, ya que esto evitará que sea necesaria la dependencia de la extracción. Además, la ventaja de reciclar metal es que el consumo de energía es del 40% de la que se necesitaría para producir metal desde su extracción en minas. (Revista Líderes, 2012)

Durante el 2006, el país generó 240.000 toneladas de chatarra metálica. Con el reciclaje de chatarra hay menos contaminación, reduciendo la sobreexplotación de los recursos naturales, disminuyendo residuos sólidos que genera el país y evitando la creación de áreas para disposición de chatarra. El material entregado a la industria seguirá siendo de alta calidad y valor; y no

será necesario recurrir a la importación de metales. Utilizar material reciclado reduce el costo final del metal, ya que se evita gastos del proceso primario de producción. Desde la perspectiva económica, el Ecuador retiene divisas por un monto aproximado de 120 millones de dólares al año al eliminarse la importación de materia prima; y desde un punto de vista social, más de 5000 familias ecuatorianas se ven beneficiadas con la actividad de reciclaje de chatarra de metales, ya que se generan fuentes de trabajo directas e indirectas, que están relacionadas con la recolección primaria, acopio y transporte de la chatarra. (Adelca, 2011)

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA EN LABORATORIO

El proceso de laboratorio empieza con el cálculo de carga que se realiza de acuerdo a los porcentajes establecidos en la norma ASTM B584 y los rangos de aceptación permitidos para la obtención del bronce UNS C93700. Después de tener los porcentajes calculados de los elementos, hay que pesarlos de acuerdo a la cantidad necesaria a fundirse, tomando en cuenta el porcentaje de pérdida o de quemado de cada uno de los elementos que intervienen como aleantes de dicho bronce. A continuación se prosigue con el proceso de fundición de los elementos, para luego someter al bronce obtenido a los diferentes ensayos de laboratorio para su caracterización y homologación con la norma.

Previo a todo esto, se seleccionan los materiales y equipos que van a intervenir. Se realizan también los diferentes procesos inmersos en un proceso de fundición, es decir, preparación de arena, moldes, cajas y moldeo.

3.1 MATERIALES UTILIZADOS

3.1.1 Materia prima

La materia prima utilizada básicamente para la obtención del bronce fosfórico SAE 64 es cobre, plomo y estaño. A continuación se detallan cada uno de ellos:

Chatarra de cobre:

La chatarra de cobre se la puede obtener de chatarreras o de empresas dedicadas al reciclaje de materiales que incluyen metales. Este tipo de chatarra se lo clasifica en diferentes grupos. El grupo más valioso de chatarra de cobre es el que se conoce como “chatarra pesada número 1”, con una pureza de 99,9%. Aquí se encuentra todo lo que es barras colectoras, recortes, punzones y cableado con un grosor mínimo de 1/16 de pulgada. Todas estas piezas o desperdicios de cobre están hechos de cobre no aleado y sin recubrimiento, por lo que generan menor pérdida al momento de fundir, pero a su vez es la chatarra de cobre más cara.

Existe un segundo grupo de chatarra de cobre denominado “alambre de cobre de desecho número 2 o de segunda”, con una pureza ligeramente inferior al grupo anterior. De igual manera, los desechos que pertenecen a este grupo son de cobre no aleado, pero que en ocasiones vienen recubiertos u oxidados, lo que genera más escoria al momento de fundir. El cableado de bajo calibre, variantes recubiertas de barras colectoras, cortes, segmentos de conmutador y punzones son los que pertenecen a este grupo de chatarra (Export).

Existen otros grupos de clasificación pertenecientes a los desperdicios de cobre que son menos valiosos que los mencionados anteriormente, y eso incluye tuberías con soldadura de cobre, cobre de berilio, chatarra ligera de cobre y piezas varias.

El tipo de chatarra de cobre utilizado en este proyecto se muestra en las siguientes figuras:



Fig 3.1 Chatarra de cobre

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Chatarra de cobre de segunda que comprende en su mayoría alambre de cobre.



Fig 3. 2 Chatarra de Cobre Brillante

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Chatarra de cobre de primera, conocida también como alambre de cobre brillante.

Estaño Metálico:

El estaño metálico es el metal más difícil de conseguir de los 3 utilizados como materia prima de la aleación. Se lo puede encontrar en las chatarreras o empresas de reciclaje, pero es escaso; y por ello su elevado costo en comparación a los demás materiales. Normalmente las empresas grandes importan este material en lingotes, pero también se puede encontrar en el mercado nacional en menor escala o se lo puede conseguir en forma de barras utilizadas para soldadura eléctrica.



Fig 3.3 Estaño Metálico

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Estaño metálico en lingote.

Plomo Metálico:

El plomo metálico se lo obtiene en chatarreras y es la materia prima más económica que interviene en la obtención de este tipo de bronce fosfórico. Por

lo general proviene de material utilizado originalmente en fontanería y maquinaria de imprenta, o de los contrapesos que se encuentran en las ruedas de los vehículos y de las demás aplicaciones que tiene este material en la industria automotriz. Para que sea de una alta pureza, la chatarra de plomo debe constituir recortes de plomo blando y limpio, libre de escorias, placas de baterías, aluminio, plomo químico sucio y otros.



Fig 3. 4 Plomo Metálico

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Chatarra de plomo blando.

3.1.2 Mejoradores de Fundición

Fosfuro de cobre:

Utilizado como desoxidante para el cobre y sus aleaciones. Viene en una presentación en forma de granalla entre 5 a 8 mm de diámetro. Se lo conoce también como cupro fósforo o cobre fosforado. Se lo encuentra con diferentes concentraciones de fósforo. El fosfuro de cobre utilizado para este proyecto es

cobre al 15% de fósforo. Según el análisis químico proporcionado por la empresa distribuidora de este material, su concentración exacta es de 14,6 % de fósforo, como se muestra en el Anexo 2. Este mejorador de fundición es el más efectivo para desoxidar la fundición de bronce a base de estaño.



Fig 3. 5 Fosforo de cobre

Fuente: Metalbarcas Ltda.

Descripción: Cupro fósforo o fosforo de cobre como desoxidante para aleaciones en base de cobre de la empresa Metal Barcas.

3.2 EQUIPOS UTILIZADOS

Horno de crisol:

Horno fijo de crisol. Tiene una capacidad de hasta 60 kg, que sirve para producciones relativamente grandes. Su combustible es diesel y alcanza una temperatura de llama de 1300°C, suficiente para fundir cobre, que es el elemento componente de la aleación que se pretende obtener con el más alto punto de fusión. Este horno fijo de crisol se encuentra en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional.



Fig 3. 6 Horno de crisol

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Horno fijo de crisol del laboratorio de fundición de la Escuela Politécnica Nacional

Microscopio electrónico de barrido:

Microscopio utilizado para el análisis de la composición química de la materia prima y aleaciones de bronce obtenidas en los diferentes ensayos de fundición. Este microscopio electrónico de barrido se encuentra en el Centro de Microscopía Electrónica de la Escuela Politécnica del Ejército en el Departamento de Ciencias de la Vida, con ficha técnica en el Anexo 3.



Fig 3. 7 Microscopio electrónico de barrido

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Microscopio de barrido electrónico del Centro de Microscopía Electrónica de la Escuela Politécnica del Ejército

Espectrómetro de Chispa:

El espectrómetro de chispa es un equipo utilizado también para la realización de los ensayos de análisis de composición química de las muestras de bronce obtenidas en los diferentes ensayos de fundición del proyecto. El Espectrómetro de Chispa de marca BURKER modelo Q4TASMAN se encuentra en los laboratorios del Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional.



Fig 3. 8 Espectrómetro de Chispa

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Espectrómetro de Chispa del Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional

Máquina de Ensayos Universales:

La máquina de ensayos universales es utilizada en este caso para la realización de ensayos de tracción y de dureza Brinell de las probetas de las diferentes coladas realizadas. Con los ensayos de tracción se puede determinar la resistencia a la tracción, el límite elástico y la elongación del material sometido al ensayo. Con el ensayo de dureza Brinell se puede determinar el grado de dureza Brinell del material a estudiarse.

Esta máquina de ensayos universales se encuentra en el Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Escuela Politécnica del Ejército. Tiene una capacidad máxima de tracción de 10 toneladas y de compresión de 200 toneladas.



Fig 3. 9 Máquina de Ensayos Universales

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Máquina de Ensayos Universales del laboratorio de Mecánica de Materiales de la Escuela Politécnica del Ejército

Microscopio Metalúrgico:

El microscopio metalúrgico es un microscopio utilizado para observar la metalografía y microestructura de las diferentes muestras de metales ferrosos y no ferrosos. Este microscopio se encuentra en el laboratorio de Metalurgia de la Escuela Politécnica del Ejército.



Fig 3. 10 Microscopio Metalúrgico

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Microscopio Metalúrgico del laboratorio de Metalurgia de la Escuela Politécnica del Ejército

3.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FUNDICIÓN

3.3.1 Preparación de la arena

La cantidad de arena dependerá de lo que se quiera fundir, es decir, del tamaño de la pieza a fundir y por ende del tamaño de la caja de fundición. Para preparar 10 kg de arena se detalla el siguiente procedimiento:

1. Pesar 10 kg de arena de sílice.
2. Tamizar la arena si es necesario con un tamiz relativamente grande.

3. Añadir bentonita en un peso equivalente a la décima parte en peso de la arena (1kg).
4. Añadir agua en litros equivalente a la décima parte aproximadamente del peso de la arena (1 litro).
5. Mezclar bien hasta formar aglomeración.
6. Hacer pruebas para determinar estado de arena, pueden ser de forma experimental o por medio de un durómetro.
7. Si es necesario añadir más agua.

3.3.2 Moldeado

1. Cubrir la superficie de los moldes de madera con grafito para dar un mejor acabado superficial.
2. Colocar la caja hembra boca abajo sobre una superficie plana (mesa de trabajo).
3. Colocar boca abajo los moldes hembra en el centro de la caja hembra.
4. Llenar la caja hembra con arena de contacto hasta cubrir por completo los moldes y la superficie vista de la mesa de trabajo, puede ser hasta la mitad de la caja.
5. Apisonar manualmente la arena con apisonador en forma de cuña de forma normal sin utilizar fuerza.
6. Llenar el resto de la caja con arena no tamizada.
7. Apisonar la arena fuertemente con apisonador plano.
8. Alisar y nivelar la arena al borde de la caja.
9. Verificar la compactación de la arena con durómetro o de forma manual.

10. Hacer huecos la arena con punzadores para permitir la salida de gases al momento de fundir.
11. Alisar la arena con espátula
12. Dar la vuelta a la caja hembra y colocarla boca arriba sobre la mesa de trabajo.
13. Unir la caja macho con la caja hembra en la posición adecuada.
14. Colocar los moldes macho sobre los moldes hembra según correspondan.
15. Colocar bebederos
16. Cubrir la superficie de la arena con una fina capa de arena de sílice seca, no tratada, para evitar que se pegue la arena de la una caja con la de la otra (no cubrir los moldes).
17. Realizar nuevamente los pasos 4 - 11 sobre la caja macho.
18. Retirar los bebederos
19. Con una cuchara agrandar los vertederos de alimentación.
20. Abrir las cajas y retirar los moldes con cuidado.
21. Con cuchara abrir el camino de entrada y salida del fluido hacia los bebederos
22. Coger fallas y limpiar
23. Unir y cerrar las cajas nuevamente

3.3.3 Cálculo de Carga

El cálculo de la carga permite determinar la correlación de la masa de los distintos materiales de carga que serán empleados e introducidos al horno de

fusión para lograr una composición química prefijada con anterioridad. El cálculo se lo realiza para 100 kg de aleación y con una simple regla de 3 se obtiene el peso necesario para la cantidad de aleación que se pretende obtener. Una vez determinado el peso del material correspondiente al porcentaje de composición química, se debe elevar su cantidad en el valor de las pérdidas que no se pueden recuperar debido al quemado que sufren los materiales.

Las pérdidas comprenden la evaporación de los componentes de la aleación, la formación de óxidos, pérdidas por la interacción de la aleación y el revestimiento del horno de fusión. Estas pérdidas van a depender del tipo de carga a utilizarse, el tipo de horno de fusión, el régimen de fusión, entre otras. (Titov & Stepánov, 1981)

Un término medio del quemado de los componentes de las aleaciones de cobre es:

Tabla 3.1 Porcentaje de Quemado de Componentes Aleación de Cobre

Componente	Cu	Al	Zn	Pb	Si	Mn	Sn	Ni
% de quemado	1,0 - 1,5	2,0 - 3,0	2,0 - 5,0	1,0 - 2,0	4,0 - 8,0	2,0 - 3,0	1,5	1,2

Fuente: (Titov & Stepánov, 1981)

Descripción: Porcentaje en término medio de los principales componentes de una aleación de cobre.

Con estos porcentajes de quemado se realiza el cálculo previo de carga que debe ser corregido posteriormente al primer ensayo de fundición que

ayudará a determinar el porcentaje real de pérdida según las condiciones con las que se trabaja; y de esta forma poder lograr los porcentajes que la norma lo determina.

3.3.4 Fundición

3.3.4.1 Lingoteo de chatarra de cobre

1. Limpiar el horno y el crisol minuciosamente de escorias y residuos de metales.
2. Si es necesario, realizar un lavado de fusión.
3. Cargar toda la chatarra de cobre que avance en el crisol y colocarlo en el horno.
4. Prender el horno.
5. Calentar a 1200°C y esperar a que se funda el cobre.
6. Mientras se funde el material, secar la arena de la caja con soplete si es necesario.
7. Remover la colada y añadir más chatarra de cobre a la colada y esperar a que se funda el cobre.
8. Remover la colada para verificar el estado de la misma.
9. Dejar reposar la colada para que se siga fundiendo y obtener una mejor fusión y que la colada este más líquida.
10. Remover para verificar que el estado del cobre fundido esté listo para ser colado.
11. Aproximadamente 10 minutos después, apagar el horno.
12. Descargar y escoriar la colada con sal.

13. Colar en moldes de arena.

3.3.4.2 Fundición de Bronce (Opción 1)

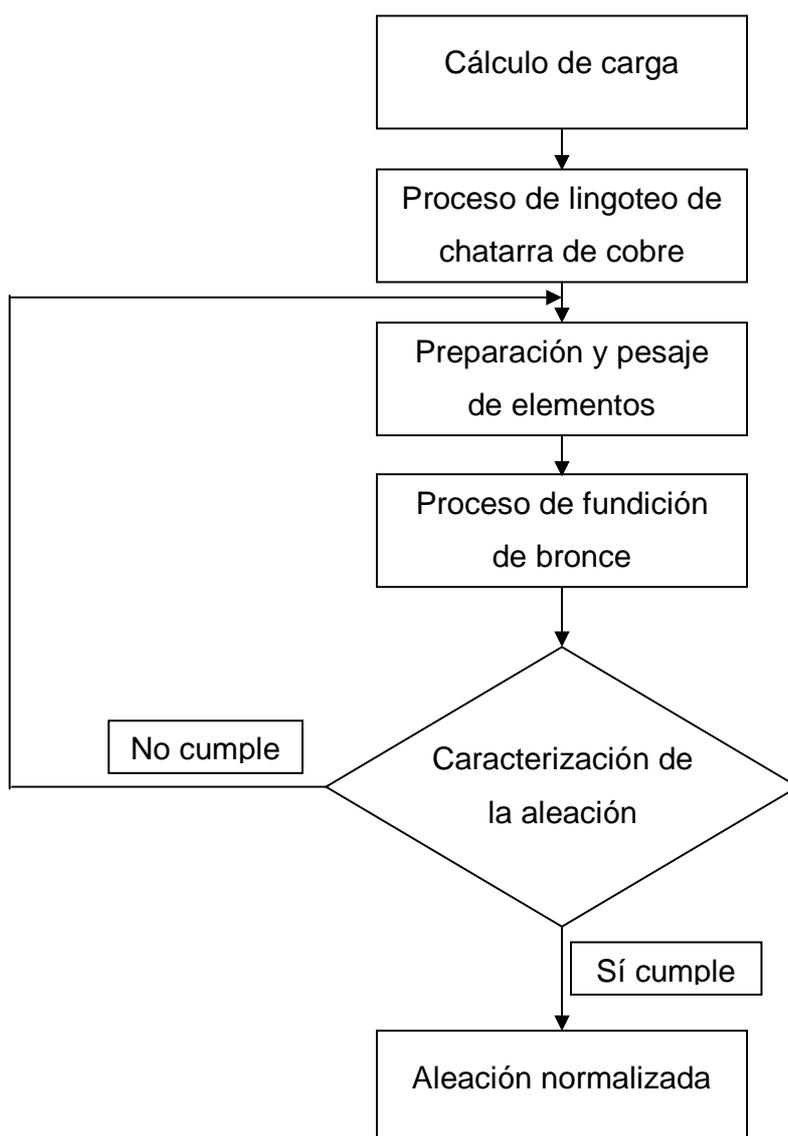
1. Limpiar el horno y el crisol minuciosamente de escorias y residuos de metales.
2. Si es necesario, realizar un lavado de fusión.
3. Cargar el plomo al fondo del crisol.
4. Cargar todo el cobre sobre el plomo y colocar el crisol en el horno.
5. Prender el horno.
6. Calentar a 1200°C y esperar a que se funda completamente el cobre y el plomo.
7. Verificar y remover la colada.
8. Esperar a que se forme la colada por completo.
9. Añadir estaño y esperar 10 minutos que se funda.
10. Verificar y remover la colada.
11. Añadir fosforo de cobre en la cantidad de 0,35% - 0,40% de la masa de material cargado y remover la colada para que haya una mejor desoxidación.
12. Apagar el horno y retirar el crisol.
13. Eliminar la escoria.
14. Colar en molde de arena.

3.3.4.3 Fundición de Bronce (Opción 2)

1. Limpiar el horno y el crisol minuciosamente de escorias y residuos de metales.
2. Si es necesario, realizar un lavado de fusión.
3. Cargar el crisol con vidrio ámbar como fundente en un 10% en peso de la masa de cobre a fundir.
4. Cargar todo el cobre sobre el vidrio y colocar el crisol en el horno.
5. Prender el horno.
6. Calentar a 1200°C y esperar a que se funda completamente el cobre.
7. Verificar y remover la colada varias veces hasta que esté lista la colada.
8. Añadir plomo y remover la colada.
9. Esperar a que se funda completamente el plomo.
10. Añadir fosforo de cobre en un 0,2% de la masa de material a fundir, añadir estaño y remover la colada.
11. Verificar y remover la colada.
12. Añadir fosforo de cobre en la cantidad de 0,2% de la masa de material cargado y remover la colada para que haya una mejor desoxidación.
13. Apagar el horno y retirar el crisol.
14. Eliminar la escoria.
15. Colar en molde de arena.

3.4 DISEÑO DE EXPERIMENTO

Elaboración de la Aleación



3.5 ENSAYOS PRELIMINARES

3.5.1 Análisis de composición química de la materia prima

Una práctica necesaria para poder comenzar con los ensayos preliminares es conocer la composición química de la materia prima que va a intervenir en el proceso, y para ello se realiza el análisis de composición química (Anexo 2) en el microscopio de barrido, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 3. 2 Composición química de muestra de chatarra de cobre lingoteada

PROMEDIO	
Elemt.	Element %
Al K	1,53
Si K	0,18
Cu K	98,33
Zn K	0,52
Pb M	0,04

Fuente: Centro de Microscopía Electrónica de la Escuela Politécnica del Ejército

Descripción: Análisis de composición química en microscopio electrónico de barrido en promedio de 10 diferentes puntos de la muestra de chatarra de cobre después de ser lingoteada.

Tabla 3. 3 Composición química de muestra de estaño metálico

PROMEDIO	
Elemnt.	Element %
Si K	0,46
P K	0,01
Fe K	0,31
Ni K	0,01
Cu K	0,10
Sn L	95,33
Sb L	4,74
Pb M	0,20

Fuente: Centro de Microscopía Electrónica de la Escuela Politécnica del Ejército

Descripción: Análisis de composición química en microscopio electrónico de barrido en promedio de 10 diferentes puntos de la muestra de estaño metálico.

Tabla 3. 4 Composición química de muestra de plomo

PROMEDIO	
Elemnt.	Element %
Al K	0,66
Si K	0,90
P K	0,15
S K	2,88
Fe K	0,20
Cu K	0,25
Sn L	1,08
Sb L	0,55
Pb M	93,57

Fuente: Centro de Microscopía Electrónica de la Escuela Politécnica del Ejército

Descripción: Análisis de composición química en microscopio electrónico de barrido en promedio de 10 diferentes puntos de la muestra de plomo metálico.

3.5.2 Primer Ensayo

3.5.2.1 Cálculo de carga (Ensayo 1)

Una vez conocida la composición química exacta de la materia prima se prosigue con el cálculo de carga, que se lleva a cabo en base a los rangos permitidos para la composición química del bronce.

Tabla 3.5 Rangos permitidos según la norma ASTM B584 para el Bronce UNS C93700

BRONCE	COMPOSICIÓN QUÍMICA %										
	Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Fe	Sb	S	P	Al	Si
UNS C93700	79 - 82	9 - 11	8 - 11	≤ 0,8	≤ 1	≤ 0,15	≤ 0,5	≤ 0,08	≤ 0,15	≤ 0,005	≤ 0,005

Fuente: (ASTM, 2000)

Descripción: Rango de los porcentajes permitidos de los componentes principales y secundarios del bronce UNS C93700

Teniendo en cuenta estos rangos permitidos y la designación comercial del bronce como 80-10-10, se escogen los valores porcentuales para cada elemento de la aleación para hacer la prueba.

Tabla 3.6 Porcentajes para ensayo preliminar (Ensayo 1)

	Elemento	Composición %	Quemado
Componentes Principales	Cu	80	1,00%
	Sn	10	1,50%
	Pb	10	1,50%
	Zn	0	3,50%
	Ni	0	1,20%

Fuente: (Titov & Stepánov, 1981)

Descripción: Valores tomados de acuerdo al rango de aceptación y según la designación de dicho bronce, con sus respectivos porcentajes de quemado

Con los porcentajes ya determinados se realiza el cálculo de carga para 100 kg, y a partir de dicho cálculo, se realiza el cálculo para la cantidad necesaria a fundirse en los ensayos preliminares.

Tabla 3.7 Cálculo de quemado para cada elemento en kg (Ensayo 1)

Quemado Elementos Principales (kg)	
Cu	0,8
Sn	0,15
Pb	0,15

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Peso de pérdidas de los componentes que intervienen en la fusión.

Tabla 3.8 Cálculo de carga para 100 kg de aleación (Ensayo 1)

Contenido Calculado Para 100 kg	
Cu (kg)	80,8
Sn (kg)	10,15
Pb (kg)	10,15
TOTAL (kg)	101,1

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Cálculo de carga incluido el porcentaje de pérdidas de cada elemento para 100 kg de aleación

Tabla 3.9 Cálculo de carga para 3,8 kg de aleación (Ensayo 1)

Contenido Calculado Para 3,8 kg	
Cu (kg)	3,070
Sn (kg)	0,386
Pb (kg)	0,386
TOTAL (kg)	3,8418

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Cálculo de carga incluido el porcentaje de pérdidas de cada elemento para 3,8 kg de aleación para primer ensayo preliminar

3.5.2.2 Pesaje de la materia prima (Ensayo 1)

Se lleva a cabo el pesaje inicial de los componentes de la aleación con el cálculo de carga realizado.

Tabla 3. 10 Pesaje inicial de elementos de la aleación (Ensayo 1)

Ensayo #1	Pesaje Inicial (gramos)		%
Componentes de Aleación	Chatarra de Cobre	3073,42	79,30%
	Estaño Metálico	396,14	10,22%
	Plomo Metálico	406,05	10,48%
Peso Total		3875,61	100,00%
Desoxidante	Fosfuro de Cobre	15,00	

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Pesaje inicial para el primer ensayo de fundición, con un pequeño excedente de cada elemento referente al cálculo de carga por la composición química de cada uno de ellos.

3.5.2.3 Prueba de fusión (Ensayo 1)

Se realiza la fusión de la materia prima para la obtención de la aleación según la descripción de fundición de bronce (opción 1). La aleación obtenida se cola en un molde de arena para obtener probetas para ensayo de tracción, análisis de dureza, metalografía y composición química.

3.5.3 Segundo Ensayo

3.5.3.1 Cálculo de carga (Ensayo 2)

Tabla 3. 11 Porcentajes para ensayo preliminar (Ensayo 2)

	Elemento	Composición %	Quemado
Componentes Principales	Cu	81	1,00%
	Sn	11	1,50%
	Pb	8	1,50%
	Zn	0	3,50%
	Ni	0	1,20%

Fuente: (Titov & Stepánov, 1981)

Descripción: Valores tomados de acuerdo al rango de aceptación, con sus respectivos porcentajes de quemado

Tabla 3.12 Cálculo de quemado para cada elemento en kg (Ensayo 2)

Quemado Elementos Principales (kg)	
Cu	0,81
Sn	0,165
Pb	0,12

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Peso de pérdidas de los componentes que intervienen en la fusión.

Tabla 3.13 Cálculo de carga para 100 kg de aleación (Ensayo 2)

Contenido Calculado Para 100 kg	
Cu (kg)	81,81
Sn (kg)	11,165
Pb (kg)	8,12
TOTAL (kg)	101,095

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Cálculo de carga incluido el porcentaje de pérdidas de cada elemento para 100 kg de aleación

Tabla 3.14 Cálculo de carga para 4 kg de aleación (Ensayo 2)

Contenido Calculado Para 4 kg	
Cu (kg)	3,272
Sn (kg)	0,447
Pb (kg)	0,325
TOTAL (kg)	4,0438

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Cálculo de carga incluido el porcentaje de pérdidas de cada elemento para 4 kg de aleación para el segundo ensayo

3.5.3.2 Pesaje de la materia prima (Ensayo 2)

Se lleva a cabo el pesaje inicial de los componentes de la aleación con el cálculo de carga realizado.

Tabla 3. 15 Pesaje inicial de elementos de la aleación (Ensayo 2)

Ensayo #2	Pesaje Inicial (gramos)		%
Componentes de Aleación	Chatarra de Cobre	3290,00	80,84%
	Estaño Metálico	450,00	11,06%
	Plomo Metálico	330,00	8,11%
Peso Total		4070,00	100,00%
Desoxidante	Fosforo de Cobre	16,00	

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Pesaje inicial para el segundo ensayo de fundición.

3.5.3.3 Prueba de fusión (Ensayo 2)

Se realiza la fusión de la materia prima para la obtención de la aleación según la descripción de fundición de bronce (opción 1). La aleación obtenida se cola en un molde de arena para obtener probetas para ensayo de tracción, análisis de dureza, metalografía y composición química.

3.5.4 Tercer Ensayo

3.5.4.1 Cálculo de carga (Ensayo 3)

Tabla 3. 16 Porcentajes para ensayo preliminar (Ensayo 3)

	Elemento	Composición %	Quemado
Componentes Principales	Cu	80	1,00%
	Sn	11	1,50%
	Pb	9	1,50%
	Zn	0	3,50%
	Ni	0	1,20%

Fuente: (Titov & Stepánov, 1981)

Descripción: Valores tomados de acuerdo al rango de aceptación, con sus respectivos porcentajes de quemado

Tabla 3.17 Cálculo de quemado para cada elemento en kg (Ensayo 3)

Quemado Elementos Principales (kg)	
Cu	0,8
Sn	0,165
Pb	0,135

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Peso de pérdidas de los componentes que intervienen en la fusión.

Tabla 3.18 Cálculo de carga para 100 kg de aleación (Ensayo 3)

Contenido Calculado Para 100 kg	
Cu (kg)	80,8
Sn (kg)	11,165
Pb (kg)	9,135
TOTAL (kg)	101,1

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Cálculo de carga incluido el porcentaje de pérdidas de cada elemento para 100 kg de aleación

Tabla 3.19 Cálculo de carga para 4 kg de aleación (Ensayo 3)

Contenido Calculado Para 4 kg	
Cu (kg)	3,232
Sn (kg)	0,447
Pb (kg)	0,365
TOTAL (kg)	4,044

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Cálculo de carga incluido el porcentaje de pérdidas de cada elemento para 4 kg de aleación para el tercer ensayo

3.5.4.2 Pesaje de la materia prima (Ensayo 3)

Se lleva a cabo el pesaje inicial de los componentes de la aleación con el cálculo de carga realizado.

Tabla 3. 20 Pesaje inicial de elementos de la aleación (Ensayo 3)

Ensayo #3	Pesaje Inicial (gramos)		%
Componentes de Aleación	Chatarra de Cobre	3235,00	79,88%
	Estaño Metálico	445,00	10,99%
	Plomo Metálico	370,00	9,14%
Peso Total		4050,00	100,00%
Desoxidante antes de Sn	Fosfuro de Cobre	8,00	
Desoxidante después de Sn	Fosfuro de Cobre	8,00	
Peso Total		16,00	

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Pesaje inicial para el tercer ensayo de fundición.

3.5.4.3 Prueba de fusión (Ensayo 3)

Se realiza la fusión de la materia prima para la obtención de la aleación según la descripción de fundición de bronce (opción 2). La aleación obtenida se cola en un molde de arena para obtener probetas para ensayo de tracción, análisis de dureza, metalografía y composición química.

3.6 CARACTERIZACIÓN DE LAS ALEACIONES OBTENIDAS EN LOS ENSAYOS PRELIMINARES POR MEDIO DE ENSAYOS DE LABORATORIO

3.6.1 Análisis Químico

Se realiza el análisis químico a cada uno de los ensayos preliminares, tomando una muestra de las coladas fundidas, para determinar la composición química obtenida en cada uno de los ensayos de fundición para poder ir mejorando el proceso. De las muestras obtenidas se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 3. 21 Composición Química de la Muestra del Primer Ensayo de Fundición Realizado

Ensayo #1	COMPOSICIÓN QUÍMICA %										
	Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Fe	Sb	S	P	Al	Si
Aleación	78,06	8,44	10,33	0,141	0,008	0,021	0,030	-	0,005	2,587	0,024

Fuente: Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional

Descripción: Resultado de análisis químico por espectrometría de chispa de la muestra del ensayo 1.

Tabla 3. 22 Composición Química de la Muestra del Segundo Ensayo de Fundición Realizado

Ensayo #2	COMPOSICIÓN QUÍMICA %										
	Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Fe	Sb	S	P	Al	Si
Aleación	84,45	9,887	5,484	<0,002	0,003	<0,005	0,021	<0,005	<0,006	<0,005	<0,005

Fuente: Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional

Descripción: Resultado de análisis químico por espectrometría de chispa de la muestra del ensayo 2.

Tabla 3. 23 Composición Química de la Muestra del Tercer Ensayo de Fundición Realizado

Ensayo #3	COMPOSICIÓN QUÍMICA %										
	Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Fe	Sb	S	P	Al	Si
Aleación	81,97	9,217	8,391	<0,005	0,003	<0,005	0,027	<0,005	0,006	<0,005	<0,005

Fuente: Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional

Descripción: Resultado de análisis químico por espectrometría de chispa de la muestra del ensayo 3.

3.6.2 Propiedades Mecánicas

Ensayo 1

Ensayo de Tracción: (Anexo 4)

Datos:

$$D = 12,66 \text{ mm}$$

$$L_o = 50,00 \text{ mm}$$

$$P_c = 135 \text{ kg}$$

$$F = 750 \text{ kg} - P_c$$

$$L_u = 51,05 \text{ mm}$$

$$F_{le} = 700 \text{ kg} - P_c$$

D: diámetro de la probeta

L_o: longitud inicial entre marcas

P_c: peso del cabezal de la máquina universal

F: carga aplicada

L_u: longitud final entre marcas

F_{le}: carga límite elástico

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi(12,66 \text{ mm})^2}{4}$$

$$A = 125,88 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$\sigma = \frac{750 - 135 \text{ kg}}{125,88 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma = 4,89 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma = 47,92 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma = 47,92 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{le} = \frac{F_{le}}{A}$$

$$\sigma_{le} = \frac{700 - 135 \text{ kg}}{125,88 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_{le} = 4,49 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_{le} = 44,00 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{le} = 44,00 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = \frac{L_u - L_o}{L_o} * 100$$

$$\varepsilon = \frac{51,05 - 50,00 \text{ mm}}{50,00 \text{ mm}} * 100$$

$$\varepsilon = 2,1\%$$

Ensayo de Dureza:

Datos:

$$D = 10 \text{ mm}$$

$$d_1 = 2,861 \text{ mm}$$

$$d_2 = 3,153 \text{ mm}$$

$$d_3 = 2,757 \text{ mm}$$

$$F = 500 \text{ kg}$$

D: diámetro de la bola (mm)

d₁: diámetro de indentación 1 (mm)

d₂: diámetro de indentación 2 (mm)

d₃: diámetro de indentación 3 (mm)

F: fuerza del ensayo (N)

$$HB = 0.102 * \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

$$HB_1 = 0.102 * \frac{2(500)(9,8)}{\pi 10 (10 - \sqrt{10^2 - 2,861^2})}$$

$$HB_1 = 76,12 \text{ HB}$$

$$HB_2 = 0.102 * \frac{2(500)(9,8)}{\pi 10 \left(10 - \sqrt{10^2 - 3,153^2}\right)}$$

$$HB_2 = 62,38 \text{ HB}$$

$$HB_3 = 0.102 * \frac{2(500)(9,8)}{\pi 10 \left(10 - \sqrt{10^2 - 2,757^2}\right)}$$

$$HB_3 = 82,10 \text{ HB}$$

$$HB = \frac{HB_1 + HB_2 + HB_3}{3}$$

$$HB = \frac{76,12 + 62,38 + 82,1}{3}$$

$$HB = 73,53 \text{ HB}$$

Tabla 3. 24 Propiedades mecánicas (Ensayo 1)

	Resistencia a la Tracción		Límite Elástico		Elongación en 2 in. o 50 mm.	Dureza
	ksi	MPa	ksi	MPa	min %	HB
Ensayo 1	6,94	47,92	6,36	44	2,1	73,53

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Propiedades mecánicas del primer ensayo de fundición

Metalografía

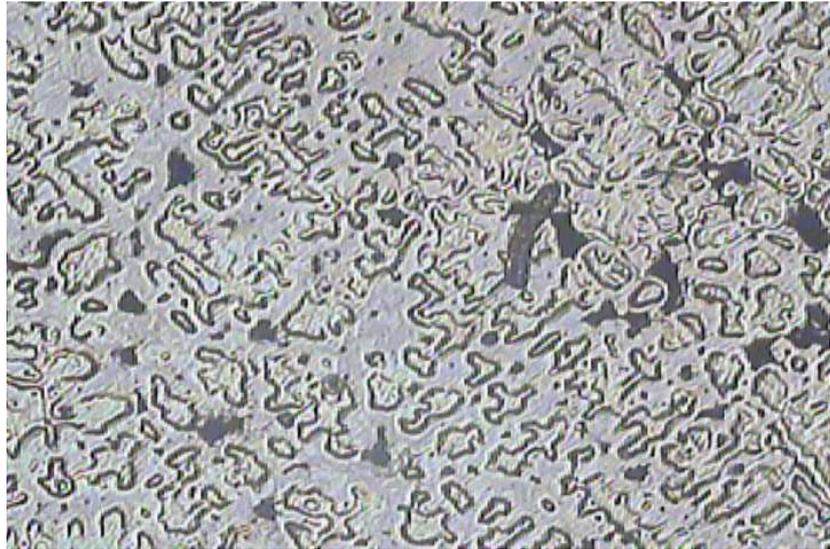


Fig 3. 11 Metalografía Ensayo 1 a 50x

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Metalografía de la muestra del primer ensayo a 50X con reactivo en base de NH_4OH

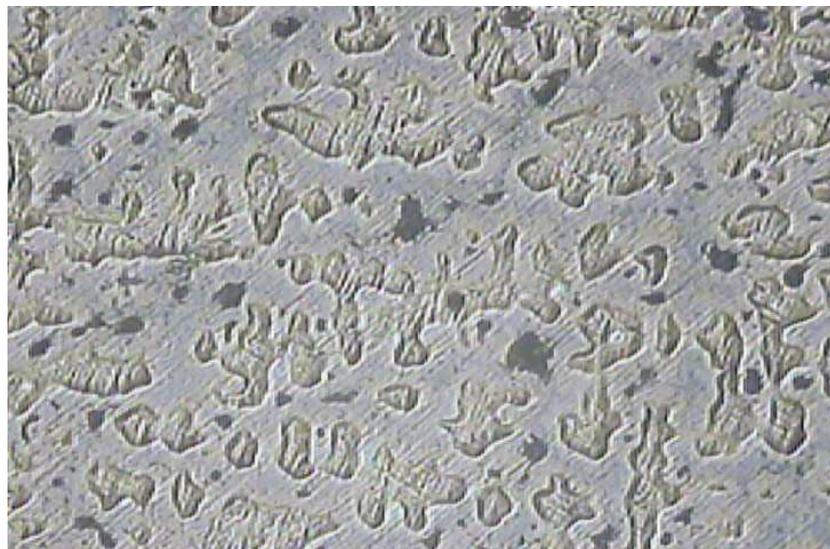


Fig 3. 12 Metalografía Ensayo 1 a 100x

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Metalografía de la muestra del primer ensayo a 50X con reactivo en base de NH_4OH

Ensayo 2

Ensayo de Tracción: (Anexo 4)

Datos:

$$D = 12,45 \text{ mm}$$

$$L_o = 50,00 \text{ mm}$$

$$P_c = 135 \text{ kg}$$

$$F = 2310 \text{ kg} - P_c$$

$$L_u = 55,05 \text{ mm}$$

$$F_{le} = 1800 \text{ kg} - P_c$$

D: diámetro de la probeta

L_o: longitud inicial entre marcas

P_c: peso del cabezal de la máquina universal

F: carga aplicada

L_u: longitud final entre marcas

F_{le}: carga límite elástico

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi(12,45 \text{ mm})^2}{4}$$

$$A = 121,74 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$\sigma = \frac{2310 - 135 \text{ kg}}{121,74 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma = 17,87 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma = 175,13 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma = 175,13 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{le} = \frac{F_{le}}{A}$$

$$\sigma_{le} = \frac{1800 - 135 \text{ kg}}{121,74 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_{le} = 13,68 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_{le} = 134,06 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{le} = 134,06 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = \frac{L_u - L_o}{L_o} * 100$$

$$\varepsilon = \frac{55,05 - 50,00 \text{ mm}}{50,00 \text{ mm}} * 100$$

$$\varepsilon = 10,1\%$$

Ensayo de Dureza:

Datos:

$$D = 10 \text{ mm}$$

$$d_1 = 3,170 \text{ mm}$$

$$d_2 = 3,369 \text{ mm}$$

$$d_3 = 3,343 \text{ mm}$$

$$F = 500 \text{ kg}$$

D : diámetro de la bola (mm)

d_1 : diámetro de indentación 1 (mm)

d_2 : diámetro de indentación 2 (mm)

d_3 : diámetro de indentación 3 (mm)

F : fuerza del ensayo (N)

$$HB = 0.102 * \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

$$HB_1 = 0.102 * \frac{2(500)(9,8)}{\pi 10 (10 - \sqrt{10^2 - 3,17^2})}$$

$$HB_1 = 61,69 \text{ HB}$$

$$HB_2 = 0.102 * \frac{2(500)(9,8)}{\pi 10 (10 - \sqrt{10^2 - 3,369^2})}$$

$$HB_2 = 54,43 \text{ HB}$$

$$HB_3 = 0.102 * \frac{2(500)(9,8)}{\pi 10 (10 - \sqrt{10^2 - 3,343^2})}$$

$$HB_3 = 55,30 \text{ HB}$$

$$HB = \frac{HB_1 + HB_2 + HB_3}{3}$$

$$HB = \frac{61,69 + 54,43 + 55,3}{3}$$

$$HB = 57,14 \text{ HB}$$

Tabla 3. 25 Propiedades mecánicas (Ensayo 2)

	Resistencia a la Tracción		Límite Elástico		Elongación en 2 in. o 50 mm.	Dureza
	ksi	MPa	ksi	MPa	min %	HB
Ensayo 2	25,38	175,13	19,38	134,06	10,1	57,14

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Propiedades mecánicas del segundo ensayo de fundición

Metalografía

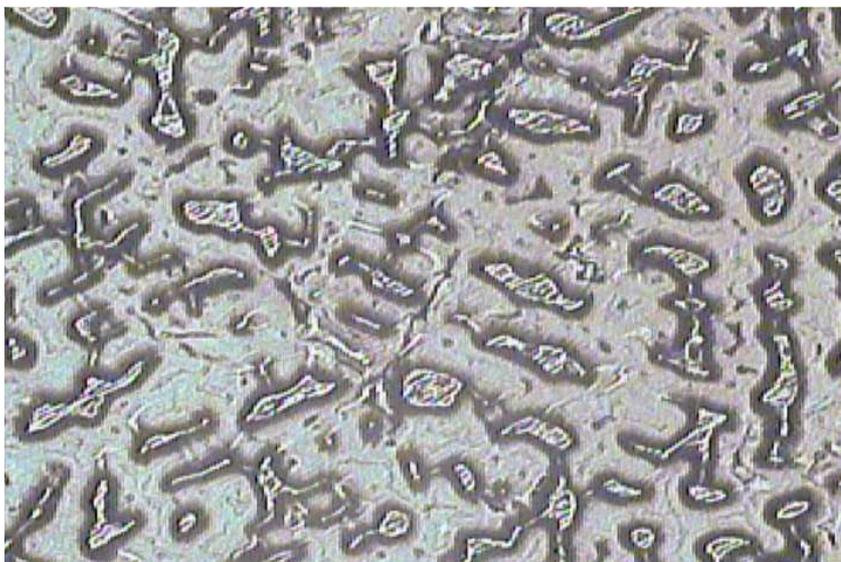


Fig 3. 13 Metalografía Ensayo 2 a 50x

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Metalografía de la muestra del segundo ensayo a 50X con reactivo en base de NH_4OH



Fig 3. 14 Metalografía Ensayo 2 a 100x

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Metalografía de la muestra del segundo ensayo a 100X con reactivo en base de NH_4OH

Ensayo 3

Ensayo de Tracción: (Anexo 4)

Datos:

$$D = 12,67 \text{ mm}$$

$$L_o = 50,00 \text{ mm}$$

$$P_c = 135 \text{ kg}$$

$$F = 3060 \text{ kg} - P_c$$

$$F_{te} = 2375 \text{ kg} - P_c$$

$$L_u = 59,50 \text{ mm}$$

D: diámetro de la probeta

L_o: longitud inicial entre marcas

P_c : peso del cabezal de la máquina universal

F : carga aplicada

L_u : longitud final entre marcas

F_{le} : carga límite elástico

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi(12,67 \text{ mm})^2}{4}$$

$$A = 126,08 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$\sigma = \frac{3060 - 135 \text{ kg}}{126,08 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma = 23,20 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma = 227,36 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma = 227,36 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{le} = \frac{F_{le}}{A}$$

$$\sigma_{le} = \frac{2375 - 135 \text{ kg}}{121,74 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_{le} = 18,40 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_{le} = 180,32 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{le} = \mathbf{180,32 \text{ MPa}}$$

$$\varepsilon = \frac{L_u - L_o}{L_o} * 100$$

$$\varepsilon = \frac{59,50 - 50,00 \text{ mm}}{50,00 \text{ mm}} * 100$$

$$\varepsilon = \mathbf{19\%}$$

Ensayo de Dureza:

Datos:

$$D = 10 \text{ mm}$$

$$d_1 = 2,928 \text{ mm}$$

$$d_2 = 3,069 \text{ mm}$$

$$d_3 = 2,980 \text{ mm}$$

$$F = 500 \text{ kg}$$

D: diámetro de la bola (mm)

d₁: diámetro de indentación 1 (mm)

d₂: diámetro de indentación 2 (mm)

d₃: diámetro de indentación 3 (mm)

F: fuerza del ensayo (N)

$$HB = 0.102 * \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

$$HB_1 = 0.102 * \frac{2(500)(9,8)}{\pi 10 (10 - \sqrt{10^2 - 2,928^2})}$$

$$HB_1 = 72,60 \text{ HB}$$

$$HB_2 = 0.102 * \frac{2(500)(9,8)}{\pi 10 \left(10 - \sqrt{10^2 - 3,069^2}\right)}$$

$$HB_2 = 65,93 \text{ HB}$$

$$HB_3 = 0.102 * \frac{2(500)(9,8)}{\pi 10 \left(10 - \sqrt{10^2 - 2,98^2}\right)}$$

$$HB_3 = 70,03 \text{ HB}$$

$$HB = \frac{HB_1 + HB_2 + HB_3}{3}$$

$$HB = \frac{72,6 + 65,93 + 70,03}{3}$$

$$HB = 69,52 \text{ HB}$$

Tabla 3. 26 Propiedades mecánicas (Ensayo 3)

	Resistencia a la Tracción		Límite Elástico		Elongación en 2 in. o 50 mm.	Dureza
	ksi	MPa	ksi	MPa	min %	HB
Ensayo 3	32,95	227,36	26,07	180,32	19	69,52

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Propiedades mecánicas del tercer ensayo de fundición

Metalografía

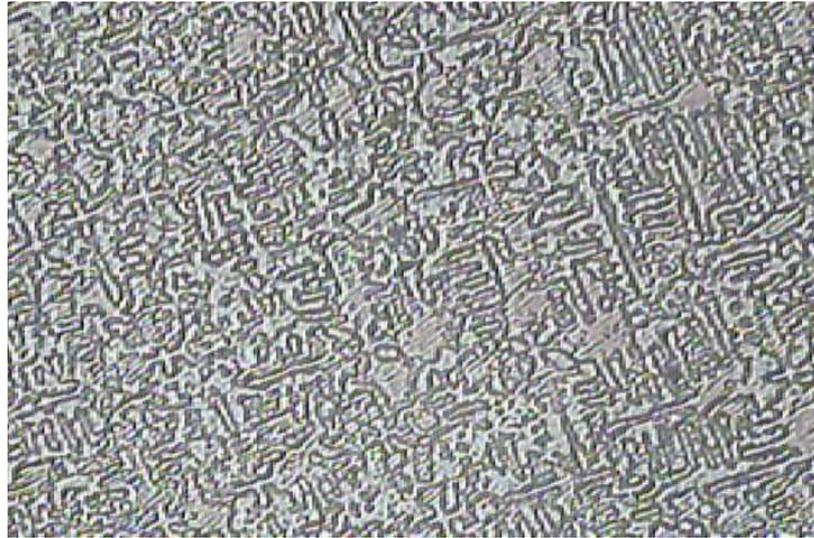


Fig 3. 15 Metalografía Ensayo 3 a 100x

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Metalografía de la muestra del tercer ensayo a 100X con reactivo en base de NH_4OH

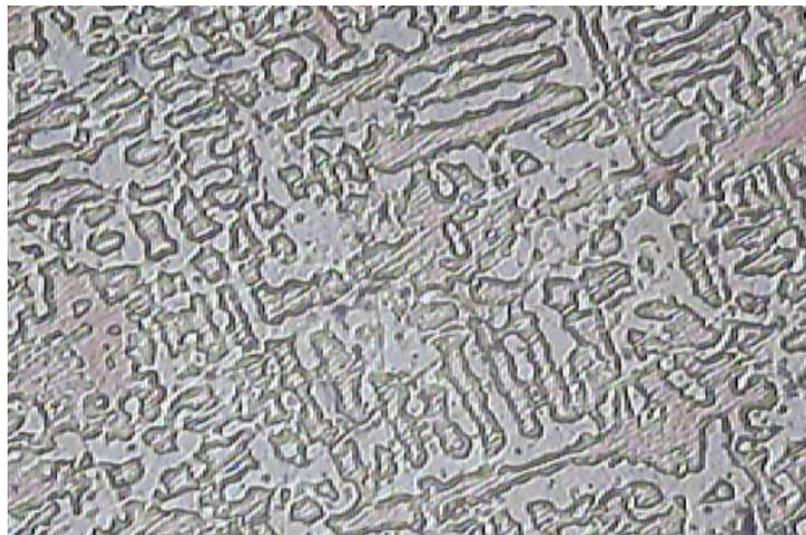


Fig 3. 16 Metalografía Ensayo 3 a 200x

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Metalografía de la muestra del tercer ensayo a 200X con reactivo en base de NH_4OH

3.7 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS CON LA NORMA ASTM B584

3.7.1 Composición Química

Tabla 3. 27 Comparación Composición Química con Norma

BRONCE	COMPOSICIÓN QUÍMICA %										
	Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Fe	Sb	S	P	Al	Si
UNS C93700	79 - 82	9 - 11	8 - 11	≤ 0,8	≤ 1	≤ 0,15	≤ 0,5	≤ 0,08	≤ 0,15	≤ 0,005	≤ 0,005
Ensayo 1	78,06	8,44	10,33	0,141	0,008	0,021	0,030	-	0,005	2,587	0,024
Ensayo 2	84,45	9,887	5,484	<0,002	0,003	<0,005	0,021	<0,005	<0,006	<0,005	<0,005
Ensayo 3	81,97	9,217	8,391	<0,005	0,003	<0,005	0,027	<0,005	0,006	<0,005	<0,005

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Comparación de composición química de los ensayos de fundición realizados con la norma ASTM B584

3.7.2 Propiedades Mecánicas

Tabla 3. 28 Comparación Propiedades mecánicas con Norma

BRONCE	Resistencia a la Tracción		Límite Elástico		Elongación en 2 in. o 50 mm.	Dureza
	ksi	MPa	ksi	MPa	min %	HB
UNS C93700	30	207	12	83	15	60
Ensayo 1	6,94	47,92	6,36	44	2,1	73,53
Ensayo 2	25,38	175,13	19,38	134,06	10,1	57,14
Ensayo 3	32,95	227,36	26,07	180,32	19	69,52

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Comparación de las propiedades mecánicas de los ensayos de fundición realizados con la norma ASTM B584

3.8 ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

En el primer ensayo de fundición realizado se obtuvo una composición química relativamente similar a la permitida en la norma ASTM B584. Sin embargo se pudo observar que esta aleación tenía un 2,6% de aluminio en su

composición, siendo aceptado tan solo hasta un 0,005%. Se realizaron los diferentes ensayos mecánicos para determinar sus propiedades y se obtuvo que era un material muy frágil. Su resistencia a la tracción y su límite elástico estaban en un punto muy cercano y casi no sufrió deformación a pesar de que se supone debe ser un material dúctil. Existen diferentes variables que pudieron haber afectado para obtener los resultados que se obtuvieron. Uno de los factores que afectó las propiedades del material es el contenido de aluminio en su composición, ya que este elemento proporciona fragilidad a la aleación. El aluminio pudo haber entrado como “contaminante” al momento de lingotear la chatarra de cobre por no haber realizado una limpieza adecuada del crisol utilizado. Otro factor influyente pudo haber sido el proceso de desoxidación que se realizó en este ensayo, ya que en la metalografía se observan puntos negros que son formaciones de óxido en la estructura o porosidades.

En el segundo ensayo se trató de mejorar el proceso realizado en el primer ensayo. Para esta ocasión se cambió de chatarra de cobre de segunda a una chatarra de cobre de primera o cobre brillante. Se tuvo un mejor cuidado al momento de realizar la limpieza del crisol a utilizarse para que no exista contaminación de metales extraños. Se hizo una variación en los porcentajes iniciales de materia prima y se aumentó el desoxidante a un 0,40% en peso de aleación. La composición química no fue la esperada ya que hubo una gran pérdida de plomo. Sin embargo ya no se obtuvo aluminio en la composición, o muy poco. Con todo ello se logró una notable mejora en las propiedades mecánicas, cumpliéndose con el límite elástico, pero no se obtuvo la ductilidad

exigida por la norma, es decir no se logró alcanzar la resistencia a la tracción que debería tener. La dureza disminuyó en comparación con el primer ensayo y esto pudo deberse a que aumento su ductilidad.

En un tercer ensayo se hicieron cambios en el proceso de fundición. Este nuevo proceso utilizado dio buenos resultados, siendo este el método óptimo a utilizarse, es decir la opción 2 de la fundición de bronce. En este proceso se utiliza vidrio ámbar como fundente de cobre, pero a más de eso, el vidrio proporcionó una protección a la aleación para evitar una atmosfera oxidante, ya que el vidrio fundido se mantenía en la parte superior de la aleación sin generar reacciones con los metales. Se cambiaron de igual manera los porcentajes iniciales de materia prima y se mantuvo el uso del cobre brillante como chatarra de cobre. En este nuevo proceso se mejoro la parte de la desoxidación. Lo que se hizo fue desoxidar la aleación el instante previo a introducir estaño metálico y desoxidar la colada previo a colar. De esta manera se logró una composición química que encaja en los rangos permitidos por la norma ASTM B584 y las propiedades mecánicas mejoran de cierta manera a las establecidas en la misma norma.

CAPÍTULO 4

DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA

4.1 SELECCIÓN DE MATERIALES

Para el desarrollo de aplicaciones en construcción de partes y elementos de máquinas es necesario realizar una selección adecuada de los materiales que van a intervenir en el proceso de fundición como lo es la materia prima y los mejoradores de fundición. Estos materiales fueron descritos con anterioridad en el capítulo 3.

Materia Prima:

- Chatarra de cobre de primera o también conocido como alambre de cobre brillante
- Estaño metálico en lingote
- Chatarra de plomo metálico blando

Mejorador de Fundición:

- Fosfuro de cobre (cobre al 15% de fósforo)

Fundente:

- Vidrio ámbar

4.2 SELECCIÓN DE EQUIPOS

Los equipos que van a intervenir en los procesos de fundición y caracterización de los elementos y partes de máquina a fabricarse son los mismos que fueron utilizados y descritos en el capítulo anterior y se los lista a continuación:

- Horno Fijo de Crisol
- Espectrómetro de Chispa / Microscopio Electrónico de Barrido
- Máquina de Ensayos Universales
- Microscopio Metalográfico

4.3 DETERMINACIÓN DE LA PIEZA A FABRICAR

El bronce al estaño plomado se lo utiliza principalmente en la industria para la fabricación de bujes, cojinetes y bocines de usos severos y que van a estar sometidos a altas velocidades y fuertes presiones como: equipo caminero, prensas, máquinas herramientas, laminadoras, bombas, impulsores, molinos, hornos de cemento, troqueladoras, compresores, etc. El plomo contenido en su composición le confiere una excelente resistencia al desgaste, al ser el plomo un lubricante sólido.

Por todo ello, los elementos y partes de máquinas que se van a fabricar con el material normalizado obtenido serán bujes y bocines de diferentes medidas para diferentes aplicaciones; ya que son elementos específicos de cada máquina.



Fig 4. 1 Bujes con Pestaña

Fuente: (Fabubron, 2013)

Descripción: Bujes de bronce SAE 64 con pestaña



Fig 4. 2 Bujes en Barras de Bronce

Fuente: (Fabubron, 2013)

Descripción: Bujes en barras de bronce SAE 64



Fig 4. 3 Bujes Punta de Eje

Fuente: (Fabubron, 2013)

Descripción: Bujes de bronce SAE 64 para puntas de eje

4.4 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

1. Limpiar el horno y el crisol minuciosamente de escorias y residuos de metales.
2. Si es necesario, realizar un lavado de fusión.
3. Cargar el crisol con vidrio ámbar como fundente en un 10% en peso de la masa de cobre a fundir.
4. Cargar todo el cobre sobre el vidrio y colocar el crisol en el horno.
5. Prender el horno.
6. Calentar a 1200°C y esperar a que se funda completamente el cobre.
7. Verificar y remover la colada varias veces hasta que esté lista la colada.
8. Añadir plomo y remover la colada.
9. Esperar a que se funda completamente el plomo.

10. Añadir fosforo de cobre en un 0,2% de la masa de material a fundir, añadir estaño y remover la colada.
11. Verificar y remover la colada.
12. Añadir fosforo de cobre en la cantidad de 0,2% de la masa de material cargado y remover la colada para que haya una mejor desoxidación.
13. Apagar el horno y retirar el crisol.
14. Eliminar la escoria.
15. Colar en molde de arena.

4.5 PIEZA FUNDIDA



Fig 4. 4Bujes con Pestaña

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Bujes con pestaña maquinado a partir del bronce fundido



Fig 4. 5 Bujes Punta de Eje

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Bujes para puntas de eje maquinado a partir del bronce fundido

4.6 COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL ELEMENTO COLADO EN MOLDE CON LAS DE UN ELEMENTO DE MÁQUINA PATRÓN YA EXISTENTE

Tabla 4. 1 Comparación de Propiedades con Material Existente en el Mercado

BRONCE	Resistencia a la Tracción		Límite Elástico		Elongación en 2 in. o 50 mm.	Dureza
	ksi	MPa	ksi	MPa	min %	HB
UNS C93700	30	207	12	83	15	60
Bronce SAE 64 BOHLER	35	240	18	125	20	65
Ensayo de Fundición	32,95	227,36	26,07	180,32	19	69,52

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Comparación de las propiedades de los elementos fundidos con el bronce SAE 64 de la empresa Bohler

4.7 ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

La resistencia a la tracción obtenida en los elementos fundidos es un poco menor que el mismo bronce proporcionado por Bohler. Sin embargo, el límite elástico y la dureza obtenidas en el ensayo de fundición son mayores que las del material que se encuentra en el mercado. En cuanto a la elongación que es capaz de soportar dicho material, el bronce de Bohler se deforma en 1% más que el bronce fundido para este proyecto.

De todas maneras, ambos bronce, el que se encuentra en Bohler o el bronce fundido para el proyecto, ofrecen las características que son exigidas por la norma, y hasta un poco mejores. El producto que ofrece Bohler es un bronce SAE 64 importado de Sudáfrica y viene en barras cilíndricas macizas. El limitante en el material importado por Bohler es el diámetro de las barras que ofrecen, ya que se encuentran en diámetros de 12,70 mm hasta 101,60 mm en barras macizas de material. Es por ello de que en el caso de que el precio de producción del bronce SAE 64 en un taller artesanal no se justifique con el precio de venta en Bohler, lo puede justificar los requerimientos de la forma y medidas de la pieza a fabricarse.

Para poder establecer un precio a una pieza o elemento de máquina en base al bronce fundido en un taller artesanal hay que tomar en cuenta la cantidad de material requerida, el uso de energía y combustible, la complejidad de la pieza para su fundición y maquinado.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS ECONÓMICO

5.1 COSTOS DIRECTOS

Tabla 5. 1 Costos de Materia Prima

ITEM	RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	Chatarra de Cobre	kg	9,60	\$ 6,40	\$ 61,44
2	Plomo metálico	kg	1,30	\$ 2,25	\$ 2,93
3	Estaño metálico	kg	1,10	\$ 50,00	\$ 55,00
4	Fosforo de Cobre	kg	0,047	\$ 25,00	\$ 1,18
TOTAL					\$ 120,55

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Costos directos de materia prima utilizada para los 3 ensayos de fundición.

Tabla 5. 2 Costos de Mano de Obra Directa

ITEM	RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	Fundidor	hr.	20	\$ 7,50	\$ 150,00
2	Asistente de fundición	hr.	20	\$ 5,00	\$ 100,00
3	Tesista	hr.	350	\$ 5,00	\$ 1750,00
TOTAL					\$ 2000,00

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Costos de mano de obra directa.

Tabla 5. 3 Servicios Especiales

ITEM	RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	Maquinado de probetas de tracción	u	4	\$ 15,00	\$ 60,00
2	Maquinado Bocines	u	4	\$ 5,00	\$ 20,00
3	Moldes de madera para probetas	u	2	\$ 6,00	\$ 12,00
4	Molde de madera para lingotes de chatarra de cobre	u	3	\$ 6,00	\$ 18,00
5	Caja de madera pequeña	u	1	\$ 15,00	\$ 15,00
6	Caja de madera grande	u	1	\$ 25,00	\$ 25,00
TOTAL					\$ 150,00

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Costos directos de servicios especiales contratados.

Tabla 5. 4 Ensayos de Laboratorio

ITEM	RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	Ensayo de chispa para determinación de composición química	u	3	\$ 56,00	\$ 168,00
2	Ensayo de composición química en microscopio electrónico de barrido	u	3	\$ 80,00	\$ 240,00
3	Ensayo de tracción	u	4	\$ 12,00	\$ 48,00
4	Ensayo de dureza	u	3	\$ 5,00	\$ 15,00
TOTAL					\$ 471,00

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Costos directos de servicios especiales contratados.

5.2 COSTOS INDIRECTOS

Tabla 5. 5 Materiales e Insumos

ITEM	RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	Diesel	gl	20	\$ 1,00	\$ 20,00
2	Mascarilla para gases tóxicos	u	2	\$ 6,82	\$ 13,64
3	Filtro de mascarilla para gases	u	2	\$ 4,07	\$ 8,14
4	Guantes largos de cuero	u	2	\$ 4,67	\$ 9,34
5	Gafas de seguridad	u	2	\$ 1,12	\$ 2,24
6	Lijas de agua	u	14	\$ 0,75	\$ 10,50
TOTAL					\$ 63,86

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Costos de materiales indirectos inmersos en el proceso de fundición y ensayos de laboratorio.

Tabla 5. 6 Otros Costos Indirectos

ITEM	RUBRO	VALOR
1	Transporte	\$ 80,00
2	Impresiones	\$ 50,00
3	Material de Oficina	\$ 25,00
4	Imprevistos	\$ 202,00
TOTAL		\$ 357,00

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Otros costos indirectos necesarios para el desarrollo del proyecto

5.3 COSTOS TOTALES

Tabla 5. 7 Total Costos Directos

Costos Directos	VALOR
C. Materia Prima	\$ 120,55
C. Mano de Obra	\$ 2000,00
Servicios Especiales	\$ 150,00
Ensayos de Laboratorio	\$ 471,00
TOTAL	\$ 2741,55

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Costos Directos totales

Tabla 5. 8 Total Costos Indirectos

Costos Indirectos	VALOR
Materiales e Insumos	\$ 63,86
Otros costos indirectos	\$ 357,00
TOTAL	\$ 420,86

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Costos Indirectos totales

Tabla 5. 9 Costo Total

Costo Total	VALOR
Costos Directos	\$ 2741,55
Costos Indirectos	\$ 420,86
TOTAL	\$ 3162,41

Fuente: Narváez Chediak, Andrés

Descripción: Costo Total del proyecto

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Con la realización del proyecto se pudo comprobar que es factible realizar, en el ámbito artesanal nacional, un material normalizado que cumpla estándares internacionales y que sea capaz de competir con productos importados.
- El uso de materia prima reciclada es un factor delicado, ya que la pureza de la materia prima es primordial para la obtención de las características requeridas por la norma. Sin embargo, entre más pura es la materia prima de reciclaje, mayor será su costo. Es por ello que se debe sacrificar en costos para no escatimar en propiedades mecánicas de las piezas a elaborarse. Por lo que se pudo concluir en el caso de la chatarra de cobre, que la chatarra de cobre brillante o de primera da mejores resultados y menos pérdidas que la chatarra de cobre de segunda.
- Los elementos aleantes como el estaño y plomo se utilizan para mejorar las propiedades del cobre. El estaño es utilizado para aumentar la resistencia mecánica de la aleación y el plomo brinda una mayor resistencia al desgaste, lo que le da la especial característica a este bronce que es la de autolubricante.
- El uso del vidrio ámbar, más que como fundente, se pudo apreciar que fue un elemento protector de la colada. Éste al no mezclarse con los metales

fundidos y por su densidad, estaba siempre en la parte superior de la colada, protegiéndola de la formación de una atmósfera oxidante. De esta manera se redujo notablemente la formación de óxidos en la aleación.

- Las técnicas de bajo costo utilizadas para la elaboración de este bronce fosfórico incluyen las de la fundición en arena, que es el tipo de fundición más común y en el que los costos de inversión son bajos. Fundición en horno de crisol fijo, ya que este tipo de horno comparado a otros hornos tiene un menor costo fabricación y mantenimiento. El combustible utilizado fue el diesel, que es un combustible económicamente asequible.
- Los elementos de máquinas de mayor uso en base a este bronce son los bocines, los cuales se pudieron fabricar con el procedimiento descrito en el proyecto. Las propiedades obtenidas de este material fueron muy similares a las propiedades de los bocines importados que se encuentran en el mercado.
- El uso de la sal como escoriante del cobre es un método económico, sin embargo hay que tener mucho cuidado el momento de utilizar la sal para escoriar, porque se genera mucha emisión de gases y contaminación en la atmósfera de trabajo. Es por ello que se debe realizar en un lugar bien ventilado y tan solo al momento de lingotear el cobre que proviene de la chatarra de segunda, ya que esta es la que contiene mayores impurezas. Para el uso de chatarra de cobre brillante, no es necesario el paso de lingoteo, ya que este material tiene muy pocas impurezas, y por ende,

tampoco es necesario utilizar la sal como escoriante. De esta manera se evita la contaminación de la atmósfera con gases de emisión.

- La arena del molde debe estar bien seca antes de realizar el colado. Para ello se puede utilizar un soplete si es que el moldeado se realizó el mismo día o el día anterior. De lo contrario se puede dejar secar al sol o de 3 a 4 días dentro del laboratorio, siempre con las cajas abiertas. Otro detalle fundamental en el proceso de fundición en arena es el punzonado que se realiza a las cajas el momento de moldear. El punzonado de la arena permitirá la salida de vapores y gases que se generan al momento de colar el metal caliente y así evitar mal formaciones en los elementos fundidos.
- Se colocan pesos sobre las cajas antes de colar para evitar que la presión metalostática levante la caja superior y el metal salga por la unión de las dos caras de la caja de moldeo. Esta presión depende de la altura de la columna de metal y de la densidad del metal líquido.
- La opción 2 de la fundición de bronce en sí fue la que dio los resultados requeridos y exigidos por la norma. Es por ello que se descarta la opción 1 y se mantiene la opción 2 para el desarrollo de la tecnología para la elaboración de bronce fosfórico. Las ventajas de la opción 2 sobre la 1 fueron básicamente el uso del vidrio ámbar como fundente y protector de la colada y la doble desoxidación con fósforo de cobre antes y después de introducir el estaño a la mezcla, ya que este elemento es el que genera mayor oxidación al momento de fundir.

6.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda seguir paso a paso con el procedimiento descrito para obtener las propiedades requeridas por la norma, es decir, realizar adecuadamente el cálculo de carga, para luego continuar con el proceso de fundición.
- En cuanto a la materia prima de reciclaje, se recomienda utilizar cobre brillante o cobre de primera. Este tipo de material de reciclaje es de un cobre más puro, el cual casi no genera escoria y pérdidas el momento de fundir. También se puede estar seguro con este material que no se está añadiendo materiales desconocidos a la colada. En cuanto al plomo, es recomendable el uso de plomo blando el cual es de muy alta pureza y no utilizar el plomo de las baterías de los autos, ya que este plomo viene mezclado con otros metales como el molibdeno. Para el estaño, se recomienda adquirir estaño metálico ya sea en lingotes o en barras de estaño puras.
- La desoxidación de la colada es la parte fundamental para obtener las propiedades demandadas. Es por ello que en el proceso de fundición se recomienda realizar una doble desoxidación de la colada, una antes de la introducción del estaño para evitar una atmosfera oxidante y una después de la introducción del estaño, el momento previo a la colada.
- Se recomienda el proceso de fundición en arena por su facilidad de producción y la versatilidad que tiene el proceso, siendo este un proceso de bajo costo.

- Es recomendable fundir uno mismo el material cuando las exigencias de la pieza lo demande. Es decir, si en el mercado no se encuentran las medidas necesarias para la pieza que se desea fabricar, es ahí cuando se debe acudir a la producción del material. Ya que económicamente hablando, no existe un ahorro significativo en la producción del material respecto al importado.
- Se recomienda el uso de equipo de protección personal durante todo el proceso de fundición en sí, el cual debe constar principalmente de guantes de cuero largos, botas de puntas de acero de seguridad industrial, mascarilla para gases tóxicos para el caso de los gases de plomo, mandil, pantalón jean, gafas de seguridad industrial. Para el momento de extracción del crisol y colar, existen trajes especiales que protegen de la radiación y del calor, pero si no se cuenta con ellos, se puede utilizar capucha de jean o cuero y delantal de cuero.
- Se recomienda realizar el proceso de fundición entre mínimo tres personas, sobre todo para el momento de colar, ya que dos personas son las que colan en el molde de arena, mientras la tercera persona retira o detiene la escoria de la colada para que ésta no llegue a los moldes.

BIBLIOGRAFÍA

- Adelca. (2011). *Acería del Ecuador C.A.* Recuperado el Mayo de 2013, de Reciclaje:
<http://www.adelca.com/sitio/esp/reciclaje.php>
- Appold, H., Feiler, K., Reinhard, A., & Schmidt, P. (1985). *Tecnología de los metales.* (F. Besante, Trad.) Barcelona, España: Reverté S.A.
- Arlandis Rubio, J. (s.f.). *Asociación de ingenieros industriales de Madrid.* Recuperado el Julio de 2013, de Metalurgia del cobre:
http://www.aiim.es/publicaciones/bol2/13_Metalurgia_Cobre.pdf
- Askeland, D. (1998). *Ciencia e ingeniería de los materiales.* México: International Thomson Editores.
- ASM. (1992). ASM Handbook. En *Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials* (Vol. II, págs. 759-1275).
- ASM. (1992). ASM Handbook. En *Metallography and microstructures* (Vol. IX, págs. 13-35).
- ASTM. (2000). ASTM B584 Standard Specification for Copper Alloy Sand Castings for General Applications.
- Automoción, J. (2012). *Uniones móviles y fijas.* Obtenido de
http://eafjimpereda2012.blogspot.com/2012_10_01_archive.html
- Avner, S. (1988). *Introducción a la metalurgia física.* México: McGraw Hill.
- Campoverde, P. (2011). *Importancia de la fundición de metales.* *Emprendedores.*
- Caro, J. (2013). *Scribd.* Obtenido de Ensayo de Dureza:
<http://es.scribd.com/doc/2469674/Ensayos-de-Dureza>
- Espectrometría. (s.f.). *Espectrometría de absorción.* Recuperado el Junio de 2013, de
http://www.espectrometria.com/espectrometra_de_absorcin
- Espectrometría. (s.f.). *Espectrometría de emisión.* Recuperado el Junio de 2013, de
http://www.espectrometria.com/espectrometra_de_emisin
- Export, M. I. (s.f.). *Chatarra de Cobre.* Obtenido de <http://menachoimportexport.com/chatarra-de-cobre/>
- Fabubron. (2013). *Bujes de Bronce.* Obtenido de <http://www.fabubron.com.ar/productos.php>
- Gockel, F. (1986). *Metalotecnia Fundamental.* España: Reverté.

- IESS. (s.f.). *Norma de salud y seguridad para la exposición laboral al plomo*. Recuperado el Junio de 2013, de <http://www.grusam.com/leyes%20seguridad%20ecuador/NORMA%20PLOMO.pdf>
- Industrial Okendo S.A. (2012). *Bronce UNS C93700*. Recuperado el Abril de 2013, de <http://www.okendo.mx/bronze-uns-c93700.html>
- Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (ICMA). (s.f.). *Difracción con rayos x*. Recuperado el Junio de 2013, de <http://www.unizar.es/icma/divulgacion/pdf/pdfdifraccionrayos.pdf>
- Ivan Bohman C.A. (2006). *IBCA*. Recuperado el Mayo-Julio de 2013, de <http://centraltrust.net/ivanbohman/productopdf/BRONCES%20ESPECIALES.pdf>
- Kalpakjian, S. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Education.
- Kerguignas, M., & Caignaert, G. (1980). *Resistencia de materiales*. (A. Rodríguez de Torres, Trad.) Barcelona, España: Reverté S.A.
- LDA International. (2007). *Technical Notes*. Recuperado el Abril de 2013, de Primary extraction of lead: <http://web.archive.org/web/20070322231927/http://www.ldaint.org/technotes1.htm>
- Loachamin Quinga, O. G. (29 de Julio de 2013). Coordinador de diseño, desarrollo y producción de Fundirecicar. (A. M. Narváez Chediak, Entrevistador) Quito.
- Mangonon, P. (1999). *Ciencia de materiales selección y diseño*. México: Pearson.
- Metalografía Universidad Tecnológica de Pereira*. (2012). Obtenido de Propiedades Mecánicas de los Materiales: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/2012/07/31/2-propiedades-mecanicas-de-los-materiales/>
- MINSUR. (s.f.). *El Estano*. Recuperado el Julio de 2013, de <http://www.minsur.com.pe/estano.htm>
- Morral, F., Jimeno, E., & Molera, P. (1985). *Metalurgia general* (Vol. II). Barcelona, España: Reverté S.A.
- msun. (s.f.). *Laborator_15*. Obtenido de http://tm.msun.ru/tm/educate/Eumk/Mado1/Mal_tar/Labor15/Lab_15.htm
- Muñoz, H. (s.f.). *Riesgos Ambientales*. Obtenido de Plomo: http://riesgosambientalespm.blogspot.com/2012/10/plomo_7259.html
- Orozco, G. (29 de Julio de 2013). Gerente general Funsá. (A. M. Narváez Chediak, Entrevistador) Quito.

- Revista Líderes. (2012). El metal reciclado pesa en la industria.
- Taylor, S. (2012). *eHow*. Recuperado el Mayo de 2013, de Reciclado de metal no ferroso: http://www.ehowenespanol.com/reciclado-metal-ferroso-info_144739/
- Titov, N., & Stepánov, Y. A. (1981). *Tecnología del proceso de fundición*. (D. U. Okulik, Trad.) Moscú, Rusia: Mir.
- twenergy*. (11 de Febrero de 2013). Recuperado el Mayo de 2013, de Reciclar metales: <http://twenergy.com/reciclaje/reciclar-metales-775>
- UNED. (s.f.). *Espectrometría de fluorescencia de rayos x*. Obtenido de http://imaisd.usc.es/riaidt/raiosx/formularios/UNED_Curso_Fluorescencia.pdf
- USGS. (2011). *United States Geological Survey*. Recuperado el Junio de 2013, de Minerals Information: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/tin/>
- Wiesner Falconí, I. V. (1 de Agosto de 2013). Gerente General Intramet. (A. M. Narváez Chediak, Entrevistador) Guayaquil.
- Wiesner Falconí, I. V. (1 de Agosto de 2013). Gerente General Intramet. (A. M. Narváez Chediak, Entrevistador) Guayaquil.
- Wiesner, R. (1 de Agosto de 2013). Intramet. (A. M. Narváez Chediak, Entrevistador) Guayaquil.

ANEXO 1

Encuestas

ANEXO 2

Análisis Químicos

ANEXO 3

Ficha Técnica

ANEXO 4

Ensayo de Tracción

ANEXO 5
Respaldo
Fotográfico

ANEXO 6
Catálogos de
Bronce