



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**“CARACTERIZACIÓN DE ALEACIONES ALUMINIO-COBRE
PARA APLICACIONES EN PARTES Y PIEZAS
AUTOMOTRICES”**

Trabajo de Titulación

Tipo: Trabajo Experimental

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO AUTOMOTRIZ

AUTOR: DIEGO ROLANDO TIPANLUIZA BARAHONA

DIRECTOR: Ing. MILTON ISRAEL QUINGA MORALES

Riobamba – Ecuador

2020

©2020, Diego Rolando Tipanluz Barahona

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Diego Rolando Tipanluiza Barahona, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor/autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 30 de enero de 2020

Diego Rolando Tipanluiza Barahona

C. I. 150107028-6

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; tipo Trabajo Experimental, “CARACTERIZACIÓN DE ALEACIONES ALUMINIO-COBRE PARA APLICACIONES EN PARTES Y PIEZAS AUTOMOTRICES”, realizado por el señor: DIEGO ROLANDO TIPANLUIZA BARAHONA, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Juan Carlos Castelo Valdivieso PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2020-01-30
Ing. Milton Israel Quinga Morales DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN		2020-01-30
Ing. José Francisco Pérez Fiallos MIEMBRO DEL TRIBUNAL		2020-01-30

DEDICATORIA

A mis padres Segundo y Marcela quienes, con su apoyo, esfuerzo y sobre todo paciencia, me han permitido llegar a culminar esta meta, gracias por guiarme y hacerme llegar hasta donde estoy, a mis hermanas que han estado de una u otra manera a mi lado brindadme su apoyo.

Finalmente, a mis amigos los cuales estuvieron junto a mí durante este tiempo que me tomo llegar hasta estas instancias quienes se volvieron muy importantes en el transcurso de la carrera.

Diego Rolando Tipanluz Barahona

AGRADECIMIENTOS

Mi profundo agradecimiento, a quien es mi apoyo incondicional y ejemplo a seguir por saber educarme de la mejor manera, inculcándome valores fundamentales en mi vida, ya que gracias a su esfuerzo y paciencia he podido llegar hasta me encuentro actualmente. A mi madre por enseñarme buenos principios en todo momento y ser el complemento de mi vida.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y a la carrera de Ingeniería Automotriz por darme la oportunidad de ser un profesional de bien para la sociedad.

Finalmente quiero expresar mis agradecimientos a mi director de titulación Ing. Milton Quinga y miembro Ing. José Pérez, por los conocimientos impartidos durante mi formación profesional y desarrollo de este proyecto de titulación.

Diego Rolando Tipanluz Barahona

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiv
ÍNDICE DE ABREVIACIONES.....	xv
SIMBOLOGÍA.....	xvi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvii
RESUMEN.....	xviii
SUMMARY.....	xix
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1	MARCO TEÓRICO.....	4
1.1	Materiales para ingeniería.....	4
1.2	Cobre.....	5
1.3	El aluminio.....	6
1.3.1	<i>Propiedades del aluminio puro.....</i>	7
1.3.1.1	<i>Propiedades físicas.....</i>	7
1.3.1.2	<i>Propiedades químicas.....</i>	8
1.3.1.3	<i>Propiedades mecánicas.....</i>	8
1.3.2	<i>Obtención del aluminio.....</i>	9
1.3.3	<i>Envejecimiento de las aleaciones de aluminio.....</i>	11
1.4	Aleación.....	12
1.4.1	<i>Definiciones.....</i>	12
1.4.2	<i>Aleaciones de aluminio.....</i>	13
1.4.3	<i>Características de las aleaciones de aluminio.....</i>	14
1.4.4	<i>Clasificación de las aleaciones de aluminio.....</i>	15
1.4.5	<i>Denominación de las aleaciones de aluminio forjable.....</i>	15
1.4.6	<i>Denominación de las aleaciones de aluminio fundido.....</i>	17

1.4.7	<i>Denominación para tratamientos térmicos del aluminio y sus aleaciones</i>	17
1.4.8	<i>Diagrama de fases Al-Cu</i>	18
1.4.9	<i>La influencia de los elementos de aleación</i>	21
1.5	Fundición	22
1.5.1	<i>Proceso de fundición</i>	23
1.5.2	<i>Moldes para fundición en arena</i>	24
1.5.3	<i>Fundición en arena</i>	26
1.5.4	<i>Arena</i>	27
1.5.5	<i>Hornos para fusión</i>	28
1.5.6	<i>Tratamiento del metal en estado líquido</i>	29
1.5.7	<i>Desgasificado del metal líquido</i>	29
1.5.8	<i>Refinamiento del grano</i>	31
1.5.9	<i>Efecto del oxígeno en aleaciones de aluminio</i>	31
1.6	Aleación de Al-Cu	31
1.6.1	<i>Diagramas de fase de equilibrio de la aleación Al-Cu</i>	32
1.6.2	<i>Características y aplicaciones de la aleación Al-Cu</i>	33
1.6.3	<i>Aleación Al-Cu-Mg (Si)</i>	33
1.7	Ensayos de materiales	34
1.7.1	<i>Ensayos destructivos</i>	34
1.7.1.1	<i>Ensayo de tracción</i>	35
1.7.1.2	<i>Espectrometría</i>	36
1.7.1.3	<i>Ensayos metalográficos</i>	37
1.8	Caracterización del material	38
1.8.1	<i>Densidad</i>	39
1.8.2	<i>Deformación convencional</i>	39
1.8.3	<i>Esfuerzo de tensión</i>	40
1.8.4	<i>Módulo de elasticidad</i>	40
1.8.5	<i>Coefficiente de Poisson</i>	41
1.8.6	<i>Módulo de corte</i>	41
1.8.7	<i>Resistencia a la tracción</i>	42
1.8.8	<i>Limite elástico</i>	42
1.9	Hipótesis	42
1.9.1	<i>Variables de la hipótesis</i>	43
1.9.1.1	<i>Variable independiente</i>	43
1.9.1.2	<i>Variable dependiente</i>	43

CAPÍTULO II

2	MARCO METODOLÓGICO	44
2.1	Introducción	44
2.2	Nivel de la investigación	44
2.3	Enfoque de la investigación.....	45
2.4	Diseño de la investigación	45
2.5	Población y muestra	46
2.5.1	<i>Población.....</i>	<i>46</i>
2.5.2	<i>Muestra</i>	<i>46</i>
2.6	Operación de las variables	47
2.6.1	<i>Variables independientes</i>	<i>47</i>
2.6.1.1	<i>Pureza de los materiales reciclados</i>	<i>47</i>
2.6.1.2	<i>Concentración del Al y Cu.....</i>	<i>47</i>
2.6.2	<i>Variable dependiente</i>	<i>48</i>
2.7	Materiales y equipos.....	48
2.8	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	49
2.8.1	<i>Técnicas de recolección de datos.....</i>	<i>49</i>
2.8.2	<i>Instrumentos de recolección de datos</i>	<i>50</i>
2.9	Procesamiento de datos	51
2.9.1	<i>Herramienta para el procesamiento de datos</i>	<i>51</i>
2.10	Procedimiento experimental.....	51

CAPÍTULO III

3	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	52
3.1	Proceso de fundición.....	52
3.1.1	<i>Diseño del modelo</i>	<i>52</i>
3.1.2	<i>Moldeo.....</i>	<i>52</i>
3.1.2.1	<i>Diseño y fabricación de los moldes desechables</i>	<i>52</i>
3.1.3	<i>Fusión y colada.....</i>	<i>53</i>

3.1.4	<i>Vertido</i>	54
3.1.5	<i>Acabo y limpieza</i>	54
3.2	Ensayo de espectrometría	55
3.3	Ensayo de tracción	59
3.3.1	<i>Aleación Al 99% de Al y 1% Cu</i>	62
3.3.2	<i>Aleación Al 98% de Al y 2% Cu</i>	64
3.3.3	<i>Aleación Al 97% de Al y 3% Cu</i>	67
3.3.4	<i>Aleación Al 96% de Al y 4% Cu</i>	69
3.3.5	<i>Aleación Al 95% de Al y 5% Cu</i>	72
3.3.6	<i>Implementación de la base de datos</i>	74
3.4	Prueba de hipótesis	75
3.4.1	<i>Hipótesis</i>	75
3.4.2	<i>Modelo matemático</i>	75
3.4.3	<i>Nivel de significancia</i>	76
3.4.4	<i>Grados de libertad</i>	76
3.4.5	<i>Cálculo del valor estadístico y crítico Z</i>	76
3.4.6	<i>Toma de decisión y conclusión</i>	78
CONCLUSIONES		80
RECOMENDACIONES		81
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Clasificación de los materiales para ingeniería	4
Tabla 2-1:	Características y aplicaciones del cobre	5
Tabla 3-1:	Resumen de las características físicas del aluminio	7
Tabla 4-1:	Propiedades elásticas del aluminio	8
Tabla 5-1:	Aluminios y su denominación según The Aluminum Association (AA)	16
Tabla 6-1:	Clasificación de las aleaciones de aluminio fundido	17
Tabla 7-1:	Características del diagrama de fase eutéctico del aluminio	18
Tabla 8-1:	Efectos de los elementos en la aleación.....	22
Tabla 9-1:	Secuencia de precipitación del Al-Cu	32
Tabla 10-1:	Características y aplicaciones de la aleación Al-Cu	33
Tabla 1-2:	Muestras de Al-Cu.....	47
Tabla 2-2:	Composiciones de la Al-Cu.....	48
Tabla 2-3:	Materiales y equipos.....	48
Tabla 1-3:	Composición química de la aleación Al 1% Cu	56
Tabla 2-3:	Composición química de la aleación Al 2% Cu	57
Tabla 3-3:	Composición química de la aleación Al 3% Cu	57
Tabla 4-3:	Composición química de la aleación Al 4% Cu	58
Tabla 5-3:	Composición química de la aleación Al 5% Cu	58
Tabla 6-3:	Análisis ANOVA de las muestras con 1% Cu	63
Tabla 7-3:	Datos de la aleación Al 1% Cu.....	63
Tabla 8-3:	Base de datos de la aleación Al 1 % Cu	64
Tabla 9-3:	Análisis ANOVA de las muestras con 2% Cu	65
Tabla 10-3:	Datos de la aleación Al 2% Cu.....	66
Tabla 11-3:	Base de datos de la aleación Al 2 % Cu	66
Tabla 12-3:	Análisis ANOVA de las muestras con 3% Cu	68
Tabla 13-3:	Datos de la aleación Al 3% Cu.....	68
Tabla 14-3:	Base de datos de la aleación Al 3 % Cu	68
Tabla 15-3:	Análisis ANOVA de las muestras con 4% Cu	70
Tabla 16-3:	Datos de la aleación Al 4% Cu.....	70
Tabla 17-3:	Base de datos de la aleación Al 4 % Cu	71
Tabla 18-3:	Análisis ANOVA de las muestras con 5% Cu	72
Tabla 19-3:	Datos de la aleación Al 5% Cu.....	73
Tabla 20-3:	Base de datos de la aleación Al 5 % Cu	73
Tabla 21-3:	Comparación entre los valores críticos Z del σ_{max}	77

Tabla 22-3: Comparación entre los valores críticos Z del σ_y	78
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Alambre de cobre puro.....	6
Figura 2-1:	Bauxita	9
Figura 3-1:	Lingotes de aluminio.....	10
Figura 4-1:	Efecto de la velocidad de enfriamiento sobre la microestructura del Al-Cu	11
Figura 5-1:	Culata del motor de aleación de aluminio.....	14
Figura 6-1:	Aleaciones forjadas y de fundición.....	19
Figura 7-1:	Tipos de inestabilidad planar en una interfase liquido-solido.....	20
Figura 8-1:	Microestructura típica en aleaciones para pistón	20
Figura 9-1:	Microestructura típica en aleaciones 2xxx (molde metálico)	21
Figura 10-1:	Formas de molde: a) molde abierto, b) molde cerrado	23
Figura 11-1:	Tipos de modelos que se emplean en la fundición con moldes de arena	25
Figura 12-1:	Ubicación del núcleo dentro de la cavidad del molde.....	25
Figura 13-1:	Esquema de un molde arena.....	26
Figura 14-1:	Pieza fundida con arena (estructura-compresor-aire)	27
Figura 15-1:	Secuencia de pasos de una operación de fundición en arena	27
Figura 16-1:	Tipos de crisoles: a) crisol móvil, b) crisol estacionario y c) crisol basculante .	29
Figura 17-1:	Diagrama de equilibrio de fases binario aluminio-cobre	32
Figura 18-1:	Micrografía óptica -aleación Al-10%Cu (400X)	33
Figura 19-1:	Máquina universal de ensayos	35
Figura 20-1:	Espécimen antes y después del ensayo	35
Figura 1-21:	Secuencia de ensayo de tracción.....	36
Figura 22-1:	Curva esfuerzo-deformación para una aleación de aluminio	36
Figura 23-1:	Espectrómetro de emisión óptica para aleaciones.....	37
Figura 24-1:	Microscopio metalográfico	38
Figura 1-2:	Proceso para realización del estudio	51
Figura 1-3:	Soldadura de las platinas.....	51
Figura 2-3:	Moldes metálicos desechables	51
Figura 3-3:	Horno de crisol a 700°C.....	53
Figura 4-3:	Extracción de la colada del horno	53
Figura 5-3:	Deposición del fundido en los moldes	54
Figura 6-3:	Piezas extraídas de los moldes.....	54
Figura 7-3:	Muestras para el ensayo metalográfico	55
Figura 8-3:	Muestra montada en el espectrómetro	56
Figura 9-3:	Probetas ensayadas en el espectrómetro	59

Figura 10-3:	Maquina universal de ensayos para tracción.....	59
Figura 11-3:	Corte de las probetas	60
Figura 12-3:	Geometría de la probeta del ensayo de tracción.....	60
Figura 13-3:	Dimensiones de la probeta del ensayo de tracción.....	60
Figura 14-3:	Probetas preparadas para realizar el ensayo de tracción	61
Figura 15-3:	Condiciones iniciales del ensayo	62
Figura 16-3:	Probetas rotas con 1% Cu	64
Figura 17-3:	Probetas rotas con 2% Cu	67
Figura 18-3:	Probetas rotas con 3% Cu	69
Figura 19-3:	Probetas rotas con 4% Cu	71
Figura 20-3:	Probetas rotas con 4% Cu	74
Figura 21-3:	Creación del nuevo material en el software SolidWorks	74
Figura 22-3:	Datos ingresados en la planilla.....	75

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-1:	Solubilidad del hidrogeno en el aluminio.....	30
Gráfico 1-3:	Curva esfuerzo-deformación de las muestras con 1% Cu	62
Gráfico 2-3:	Curva esfuerzo-deformación de las muestras con 2% Cu	65
Gráfico 3-3:	Curva esfuerzo-deformación de las muestras con 3% Cu	67
Gráfico 4-3:	Curva esfuerzo-deformación de las muestras con 4% Cu	69
Gráfico 5-3:	Curva esfuerzo-deformación de las muestras con 5% Cu	72
Gráfico 6-3:	Comparación del σ_{max} y el σ_y de las muestras.....	78

ÍNDICE DE ABREVIACIONES

CAM	Manufactura asistida por computadora
CNC	Control numérico computarizado
INEN	Instituto Ecuatoriano de normalización
ISO	Organización Internacional de Estandarización
MEF	Método de elementos finitos
SAE	Sociedad de Ingenieros Automotrices
ASTM	Asociación Americana para Ensayos y Materiales
AISI	Instituto Americano del Hierro y el Acero
ANSI	Instituto Nacional Americano de Estándares
DIN	Normas Industriales de Alemania

SIMBOLOGÍA

A_0	Sección transversal original	mm^2
D_0	Diámetro inicial de la muestra	mm
D_f	Diámetro después de ser alargada por la fuerza uniaxial a tracción	mm
L_0	Longitud inicial de la muestra	mm
L_f	Longitud después de ser alargada por la fuerza uniaxial a tracción	mm
F	Fuerza de tracción uniaxial	N
W_A	Peso elemento A aleación	%
W_B	Peso elemento B aleación	%
X_A	% Atómico elemento A	%
X_B	% Atómico elemento B	%
ρ	Densidad del material	Kg/m^3
m	Masa del objeto	Kg
V	Volumen del objeto	mm^3
ϵ_L	Deformación convencional longitudinal	
ϵ_w	Deformación transversal	
σ	Esfuerzo de tensión	MPa
σ_y	Esfuerzo de fluencia	MPa
σ_{max}	Esfuerzo máximo	MPa
E	Módulo de elasticidad o módulo de Young	MPa
ν	Coefficiente de Poisson	
G	Módulo de corte	MPa
m	Número de filas	
n	Número de columnas	
GL	Grados de libertad	
Z_c	Valor estadístico calculado	
Z_{α}	Valor crítico de tabla	
\bar{x}	Promedio	
u	Media	
σ	Desviación estándar	
α	Nivel de significancia	

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN NORMAL Z (0.05)

ANEXO B: MECANIZADO DE LAS PROBETAS EN EL TORNO CONVENCIONAL

ANEXO C: PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS PARA LOS ENSAYOS

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tuvo como objetivo caracterizar las aleaciones de aluminio-cobre por medio de ensayos destructivos y un análisis estadístico, que permita generar una base de datos con las principales propiedades mecánicas de las aleaciones y se puedan emplear en la creación de nuevos materiales en las librerías de programas de diseño asistido por computador que se utilizan para la fabricación de partes y piezas automotrices. Las probetas con diferentes aleaciones de aluminio-cobre (Al-Cu) se obtuvieron mediante el proceso de fundición en un horno de crisol fijo y molde permanente. Las diferentes composiciones de las probetas se consiguen variando la carga de los materiales en el horno, así se obtuvo las aleaciones de Al-Cu desde un 99% de aluminio y 1 % de cobre hasta el 95% de aluminio y 5% de cobre, sucesivamente entre las 5 probetas. Cada una de las probetas debe cumplir la geometría establecida en la Norma ASTM E8/E8M-13 para ensayos de tracción, las cuales se mecanizaron mediante un torno convencional. Por último, se realizó un análisis estadístico de los datos obtenidos luego se calculó las propiedades mecánicas necesarias para generar las bases de datos de cada aleación resultante. Por tanto, se concluyó que el porcentaje de cobre aumenta la resistencia mecánica de la aleación de aluminio-cobre y se recomienda utilizar las bases de datos en software de diseño y/o simulación para la fabricación de partes y piezas automotrices.

Palabras clave: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERA>, <CARACTERIZACIÓN>, <ALEACIÓN ALUMINIO-COBRE>, <FUNDICIÓN>, <ENSAYOS DESTRUCTIVOS>, <COMPOSICIÓN QUÍMICA>. <PROPIEDADES MECÁNICAS>, <BASE DE DATOS>, <SOLIDWORKS (Software)>, <EXPERIMENTAL>.

REVISADO

27 ENE 2020

Ing. Jhonatan Parreño Uquillas, MBA
(ANALISTA DE BIBLIOTECA 1)

SUMMARY

The purpose of this degree work is to characterize aluminum-copper alloys employing destructive test and a statistical analysis that allows generating a database with the main mechanical properties of the combinations and can be used in the creation of new materials in the libraries of computer-aided design programs used for the manufacture of automotive pieces and components. The specimens with different aluminum-copper (Al-Cu) alloys were obtained by melting in a fixed. Crucible and permanent mold furnace. The different compositions of the specimens are achieved by varying the load of the materials in the oven, therefore obtaining Al-Cu combinations from 99% aluminum, 1% copper to 95% aluminum, and 5% copper, successively between the five specimens. Each of the specimens must comply with the geometry established in ASTM E8/E8M-13 for tensile tests, which were manufactured using a conventional volume. Finally, a statistical analysis of the data obtained was performed, after the mechanical properties necessary to generate the databases of each resulting alloy were calculated. Therefore, it was concluded that the percentage of copper increases the mechanical strength of the aluminum-copper alloy, and it is recommended to use the databases in design or simulation software for the manufacture of automotive pieces and components.

Keywords: <ENGINEERING TECHNOLOGY AND SCIENCES, <CHARACTERIZATION >, <ALUMINUM-COPPER ALLOY>, <FOUNDRY>, <DESTRUCTIVE TESTS >, <CHEMICAL COMPOSITION>, <MECHANICAL PROPERTIES>, <DATABASE>, <SOLIDWORKS (software)>. <EXPERIMENTAL>.



INTRODUCCIÓN

Antecedentes

La importancia de los materiales en nuestro medio es mayor de lo que habitualmente se cree, cada parte de nuestra vida cotidiana está influenciada en mayor o menor grado por los mismos, por ejemplo: transporte, vivienda, vestimenta, comunicación, recreación y alimentación.

Históricamente, el desarrollo y la evolución de las sociedades han estado íntimamente vinculados a la capacidad de sus miembros para producir y conformar los materiales necesarios para satisfacer sus necesidades.

El aluminio fue aislado de su óxido (alúmina) por primera vez en el año de 1825 en Dinamarca por el farmacéutico Hans Christian Oersted, aunque no 100% puro, usando corrientes eléctricas. (De la Cruz, 2015)

El descubrimiento del aluminio como elemento químico se atribuye al científico alemán Friedrich Wöhler. En 1827, fue el primero que consiguió aislar el aluminio en forma pura obteniendo como resultado “polvo de aluminio” y en 1854 comenzó su producción. (VISALCA, 2019)

El cobre fue uno de los primeros metales en descubrirse y usarse por el ser humano hace unos 10.000 A.C. Junto al aluminio y el hierro, el cobre es uno de los metales que más se usan en la industria. (CODELCO, 2019)

Las propiedades del cobre, bronce y latón, para resistir a la corrosión, hizo que metales permanecieran no solo como decorativos, sino también como funcionales, durante su apogeo en la edad del bronce y media, hasta llegar a nuestros días. (EL ESQUIÚ, 2013)

El aluminio, así como el magnesio, cobre y el titanio, hacen parte de la familia de los “metales ligeros” que se caracterizan por tener una baja densidad y por sustituir materiales como el acero en estructuras y componentes, ya que ayudan a reducir su peso.

El aluminio y sus aleaciones tiene un amplio número de aplicaciones en diversos sectores industriales (construcción, automotriz, empaques/envases, maquinaria y la aeronáutica), debido a su alta resistencia a la corrosión y ligereza. De ahí su utilización en el campo automotriz para reducir el peso de los vehículos y en consecuencia el consumo de combustible, pues por cada kilogramo de acero sustituido se genera un ahorro de dos galones de combustible.

Planteamiento del problema

Hoy en día, existen bases de datos de las características de los materiales en software de diseño para estudios por elementos finitos, pero no existen bases de datos de dichos materiales aplicables a nuestro medio. Por otra parte, tenemos el secreto de las empresas manufactureras, lo cual es complicado conseguir esa información para realizar un estudio local.

Con el desarrollo del presente trabajo experimental se pretende generar una base de datos confiable de las características físicas y mecánicas de la aleación de aluminio – cobre mediante ensayos normalizados según la normativa ASTM, de tal manera que esta pueda ser usada como base en análisis por elementos finitos, aplicado específicamente al campo automotriz.

Justificación

Justificación teórica

En el presente trabajo de titulación se estudiará y aplicará conceptos relacionados con el área automotriz acerca de las aleaciones de aluminio y sus aplicaciones. Por lo que, sé aportará conocimiento sobre la metalurgia de estas aleaciones y la caracterización de sus propiedades para evaluar su rendimiento como una pieza automotriz, mediante software de elementos finitos.

Justificación metodológica

El presente trabajo experimental, se sustenta con una revisión documental desde una perspectiva deductiva. Después se realizó la fundición con materiales reciclables a través de un molde permanente y horno de crisol fijo para adquirir las probetas de Al-Cu. Luego se pasó a la preparación de las mismas para hacer la respectiva caracterización de sus propiedades, mediante el ensayo de tracción y espectrometría tomando como referencia la norma ASTM, con lo cual se garantizó que los datos obtenidos sean fiables. Así se creó una base de datos confiable y aplicable a la realidad de nuestro medio y válida para usarse en la librería de un software de diseño y/o simulación los cuales se emplean en la fabricación de partes y piezas automotrices. Durante el desarrollo del proceso práctico y teórico de esta investigación se realizó la aplicación de conocimientos científicos válidos y comprobados que dan validez al estudio.

Justificación práctica

Este trabajo de investigación aporta información relevante respecto a la metalurgia y su efecto en las propiedades físicas y mecánicas de aleaciones de aluminio-cobre. En la actualidad, la industria

automotriz está exigiendo la selección de materiales de bajo peso específico para lograr mayores eficiencias y mejores comportamientos en las diferentes aplicaciones que así lo requieran, en donde se evalúan constantemente el desempeño de sus productos para el mejoramiento continuo. Esto ha incrementado el uso de materiales más ligeros como las aleaciones de aluminio ya que proveen características de resistencia y baja densidad traduciéndolo en un ahorro de peso y energía, además de poseer un óptimo rendimiento ante la corrosión.

Objetivos

Objetivo general

- Caracterizar las aleaciones de aluminio – cobre, que se emplearán en la fabricación de partes y piezas automotrices por medio de ensayos destructivos para generar una base de datos aplicable a un software de diseño.

Objetivos específicos

- Revisión bibliográfica acerca de la caracterización de materiales Al, Cu, para evaluar los criterios del experimento.
- Obtención de las probetas por medio de fundición y mecanizado, en función de la norma correspondiente, para evaluar las propiedades mecánicas.
- Analizar la composición química de las aleaciones obtenidas en la fundición, para relacionar el contenido de cobre con cada una de las propiedades mecánicas encontradas.
- Elaborar una base de datos de las aleaciones de Al-Cu las cuales se puedan implementar en un software de diseño como un nuevo material.

CAPÍTULO I

1 MARCO TEÓRICO

1.1 Materiales para ingeniería

El material es la sustancia de la que está constituido un producto y está estrictamente relacionando con la capacidad de realizar el trabajo al que se encuentre sometido. Por lo que, en la actualidad los ingenieros de materiales se dedican a investigar nuevos materiales o trabajan en modificar las propiedades de los existentes, los cuales se utilizan para diseñar o crear nuevos productos o sistemas con el fin de satisfacer las necesidades.

La mayoría de los componentes de ingeniería están fabricados con metales y aleaciones, más que con ningún otro tipo de material. En la tabla 1-1 se hace un resumen de los materiales para ingeniería más empleados. (Ashby & Jones, 2008, p. 3)

Tabla 1-1: Clasificación de los materiales para ingeniería

Metales y aleaciones	Hierro y aceros Aluminio y sus aleaciones Cobre y sus aleaciones Níquel y sus aleaciones Titanio y sus aleaciones
Polímeros	Polietileno (PE) Poliámidas- nailon- (PA) Poliestireno (PS) Poliuretano (PU) Policloruro de vinilo (PVC) Politereftalato de etilenglicol (PET) Resina epoxi (EP) Elastómeros, con el caucho natural (NA)
Cerámicos y vidrios	Alúmina -esmeril, zafiro- (Al_2O_3) Magnesia (MgO) Sílice (SiO_2), vidrio y silicatos Carburo de silicio (SiC) Nitruro de silicio (Si_3N_4) Cemento y hormigón
Materiales compuestos	Polímeros reforzados con fibra de vidrios (GFRP) Polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) Polímeros cargados, cermets

Materiales naturales	Madera
	Algodón, lana, seda
	Piel, hueso

Fuente: (Ashby & Jones, 2008, p. 3)

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

1.2 Cobre

El cobre alcanzo su real dimensión de metal imprescindible para el desarrollo industrial en 1831, cuando Faraday descubrió el generador eléctrico y desde entonces la demanda ha crecido en forma notable. (EL ESQUIÚ, 2013)

La palabra “cobre” proviene del griego “kypros” de donde tomó el latín como “cuprum”, haciendo alusión a la isla de Chipre, donde existían muchas minas de cobre en la antigüedad. La palabra cobre designa un metal que conduce muy bien la electricidad. (DeConceptos, 2015)

A continuación, se expone las principales características de este material metálico:

Tabla 2-1: Características y aplicaciones del cobre

Características	Aplicaciones
<ul style="list-style-type: none"> - Se identifica con un número atómico de 29, valencia 1,2 y su símbolo es (Cu). - Apariencia metálica con un color pardo rojizo. - Se encuentra presente en varias estructuras orgánicas. - Es resistente a la corrosión. - Es un metal pesado ($d = 8,9 \text{ kg/dm}^3$) - Las aleaciones con otros metales contribuyen a su endurecimiento. - El punto de fusión es de 1085,62 °C. - El punto de ebullición es de 2562 °C. - Elevada conductividad del calor y la electricidad. - Maleable, dúctil y fácil de galvanizar. - Es blando en su estado fundamental. - Presenta fragilidad al ser sometido a temperaturas bajas extremas. - Más pesado que el Níquel y más duro que el Oro y la Plata. - Presenta alta toxicidad para el cuerpo humano. - Se deforma con facilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> - El cobre es un metal multifacético, se puede utilizar en insecticidas, suplementos alimenticios, utensilios de cocina, monedas, tuberías, adornos y joyería. - Es un excelente catalizador por eso es utilizado en varios procesos químicos y hasta se puede usar como convertidor catalítico de los autos, conductos hidráulicos, cables y líneas de alta tensión y soldadura. - Es un material esencial en innovaciones tecnológicas, como en la fabricación de piezas eléctricas y electrónicas, motores

Continúa tabla 2-1

<ul style="list-style-type: none">- No es un material magnético.- Es 100% reciclable, y no pierde sus propiedades en el reproceso. Una buena parte de la demanda se cubre a través del reciclaje.	<ul style="list-style-type: none">- electromagnéticos, vehículos eléctricos, energías renovables y edificios inteligentes.
--	--

Fuente: (Máxima, 2019)

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

En la naturaleza, es frecuente hallarlo en estado puro o en minerales como la calcopirita sulfuro de hierro y cobre, se encuentra en Chile, México, Estados Unidos y la antigua URSS; la azurita, carbonato de cobre, en Francia y Australia, y la malaquita, otro carbonato de cobre, la cuprita, un óxido de cobre que se encuentra en España. (Torres, 2015)

Para la obtención del cobre en su estado bruto se tritura, y se separa por flotación y se concentra en barras. Los concentrados se funden en un horno de reverbero que produce cobre metálico con una pureza aproximada del 98% (figura 1-1). Este cobre en bruto se enriquece por electrólisis, hasta alcanzar una pureza que supera el 99,9%. Los óxidos y carbonatos se reducen con carbono. Las minas más importantes, las formadas por sulfuros, no contienen más de un 12% de cobre. (Torres, 2015)



Figura 1-1: Alambre de cobre puro

Fuente: (EO Copper, 2019)

1.3 El aluminio

El aluminio es el metal más abundante en la corteza terrestre en una proporción aproximada del 8%. En un principio, se consideró un metal precioso y la primera presentación pública fue en 1855 en la Exposición Universal de París. En aquel entonces se le conocía como “arcilla de plata”. (Gil Mur, et al., 2001, p. 13)

La palabra ‘aluminio’ proviene del latín ‘alumen’, que significa alum o alumbre. Este nombre fue sugerido por Humphrey Davy, el cual obtuvo una aleación de hierro-aluminio en 1809. En la

época antigua, los griegos y romanos lo empleaban como astringente y mordiente en tintorería. (Visalca, 2019)

No fue hasta la aparición de la aleación “duraluminio” que experimentaba un envejecimiento natural a temperatura ambiente que producía un aumento considerable de la resistencia mecánica. Esta aleación era la base para construcción de aviones y dirigibles. A partir de ese momento el empleo del aluminio ha ido en auge. Llegando a ser en la actualidad el segundo material más usado por las industrias, superado por el acero. (Gil Mur, et al., 2001, p. 13)

1.3.1 Propiedades del aluminio puro

A continuación, se detalla las características más importantes del aluminio puro.

1.3.1.1 Propiedades físicas

Las propiedades físicas más destacables del aluminio y sus aleaciones son: poco peso, buena resistencia a la corrosión, y conductividad elevada, tanto térmica como eléctrica. En la tabla 3-1 se presenta un resumen de las propiedades físicas más características del aluminio puro. Aunque algunas de estas propiedades varían según el contenido en impurezas. (Gil Mur, et al., 2001, p. 13)

Tabla 3-1: Resumen de las características físicas del aluminio

Propiedades	Valor
Color	Blanco-plateado-brillante
Estructura cristalográfica	Cúbica centrada en las caras
Parámetro reticular a (25 °C)	0.40414 nm
Densidad a 20°C	2.699 g/cc
Cambio volumétrico durante la solidificación	6,7%
Calor de combustión	200Kcal/at-gr
Punto de fusión	660,2°C
Punto de ebullición	2057°C / 2480°C
Calor específico (20°C)	930 J
Coefficiente lineal de expansión térmico x 10 ⁶	23,0 (20-100 °C)
Conductividad térmica a 0°C	0,50 cal/s/cm ² /cm°C
Conductividad térmica a 100°C	0,51 cal/s/cm ² /cm°C
Resistividad eléctrica a 20°C	2,69 μΩcm
Susceptibilidad magnética 18°C x 10 ⁶	0,63

Fuente: (Gil Mur, et al., 2001, p. 14)

1.3.1.2 Propiedades químicas

Tanto el aluminio puro como las aleaciones de este presenta gran resistencia a la corrosión debido a la formación de una capa fina (4 y 5 μm de espesor) y adherente de óxido de aluminio sobre la superficie del metal. (Gil Mur, et al., 2001, p. 14)

Esta capa de óxido constituye una película impermeable que impide la difusión del oxígeno hacia el metal base. Si en determinadas aplicaciones industriales se necesita una mayor resistencia a la corrosión, ésta se puede conseguir aumentando el espesor de la capa de forma artificial. (Gil Mur, et al., 2001, p. 14)

La resistencia química del aluminio depende de la composición química y concentración de la solución, así como de la pureza del metal, mientras que en aleaciones de elevado número atómico, como el cobre, variaciones del 0,1%, afectan fuertemente a la resistencia. (Gil Mur, et al., 2001, p. 14)

Según el efecto que tienen los aleantes sobre la resistencia a la corrosión, se pueden clasificar en:

- Elementos que mejoran la resistencia a la corrosión: cromo, magnesio y manganeso.
- Elementos que empeoran la resistencia: cobre, hierro, níquel, estaño, plomo y cobalto.
- Elementos que tienen poca influencia: silicio, titanio, zinc, antimonio, cadmio y circonio.

1.3.1.3 Propiedades mecánicas

El principal problema del aluminio es su baja resistencia mecánica. Por ese motivo el aluminio y sus aleaciones se tratan térmicamente o se someten a procesos de forja para mejorar sus propiedades mecánicas. (Gil Mur, et al., 2001, p. 15)

El módulo de elasticidad del aluminio es relativamente bajo y sensible al grado de impurezas de este como se observa en la tabla 4-1. (Gil Mur, et al., 2001, p. 15)

Tabla 4-1: Propiedades elásticas del aluminio

Propiedades	Valor
Módulo de elasticidad - Al (99,997%)	64,000 N/mm ²
Módulo de elasticidad - Al (99,950%)	69,000 N/mm ²
Módulo de rigidez	64,000 N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0,32-0,36

Fuente: (Gil Mur, et al., 2001, p. 15)

1.3.2 Obtención del aluminio

Es uno de los metales que se obtiene en mayor escala. El aluminio se obtiene principalmente de la bauxita (mineral de óxido de aluminio natural impurificado con Fe_2O_3 y SiO_2) véase la figura 2-1, donde se aprovechan las propiedades anfóteras del Al_2O_3 (Alúmina). (Gil Mur, et al., 2001, p. 15)

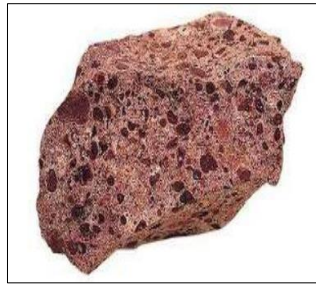


Figura 2-1: Bauxita

Fuente: (Cpga, 2014)

La metalurgia extractiva más común del aluminio consta de dos etapas:

1. **Transformación de la bauxita en alúmina lo más pura posible.** El procedimiento más corriente que se emplea es un método químico de vía humedad conocido como proceso Bayer. (Gil Mur, et al., 2001, p. 15)
2. **Electrolisis de esta alúmina disuelta en criolita fundida.** Esta etapa consiste en la electrolisis del óxido de aluminio purificado, con criolita Na_3AlF_6 , este último para rebajar el punto de fusión del Al_2O_3 , que es muy alto (2.000°C). (Gil Mur, et al., 2001, p. 16)
Actualmente el proceso de obtención del aluminio es rentable si se parte de minas entre un 50 y 60 % de óxido aluminico hidratado. (Gil Mur, et al., 2001, p. 16)

El aluminio producido por electrolisis en un baño de criolita tiene una pureza entre 99,5 y 99,7% (figura 3-1), siendo las impurezas más usuales el hierro y el silicio. Para obtener un metal con pureza mayor del 99,9%, el metal procedente del baño de criolita debe ser sometido a procesos de refinado. El metal refinado tiene una gran ductilidad, alta conductividad eléctrica y excelente resistencia a la corrosión, propiedades muy importantes para ciertas aplicaciones que justifican el coste extra del proceso. (Gil Mur, et al., 2001, p. 17)

Uno de los métodos usados para el refinado del aluminio se basa en la diferencia de solubilidades de las impurezas entre el sólido y el aluminio fundido (fusión por zonas). Con este método se puede rebajar las impurezas hasta un valor de 10 ppm o 0,001%. Otro método de refinado es el electrolítico. (Gil Mur, et al., 2001, p. 17)



Figura 3-1: Lingotes de aluminio

Fuente: (CLERINS Y FERNÁNDEZ S.L. , 2002)

Características generales del aluminio:

- Se identifica con un número atómico de 13 y su símbolo es (Al).
- No es ferromagnético, ni produce chispas.
- Es blando y uno de los materiales más maleables.
- Tiene larga vida útil y bajo costo de reciclado.
- Precio estable y económico.
- El aluminio es muy reactivo y se puede diluir fácilmente en ácido clorhídrico o en hidróxido sodico, así como en numerosos ácidos y bases. (Máxima Uriarte, 2017)
- *Grado de toxicidad bajo y si se digiere en pequeñas cantidades no produce malestar. Sin embargo, la inhalación de polvillos de aluminio o la saturación del elemento en la comida pueden conducir a daños hepáticos y renales, o a síntomas de neurotoxicidad. También se ha vinculado la presencia abundante del aluminio con la incidencia de la enfermedad de Alzheimer.* (Máxima Uriarte, 2017)
- Se puede reciclarse perfectamente sin mayor pérdida de sus propiedades físicas, lo cual es una ventaja económica sobre otros metales. Además, este proceso consume poca energía (5% del proceso de obtención original). Este aluminio refundido se conoce como ‘aluminio secundario’. (Máxima Uriarte, 2017)
- *El aluminio es un elemento muy versátil por lo que sus aplicaciones van desde la fabricación de piezas metálicas y componentes de mecanismos, ya sea en estado puro o en aleaciones para automóviles, aviones, barcos, espejos, contenedores de diversa índole, papel aluminio, envases, tetrabriks, telescopio, cables eléctricos y como componente de soldaduras.* (Máxima Uriarte, 2017)

1.3.3 Envejecimiento de las aleaciones de aluminio

En la figura 4-1 se representa una porción del diagrama de equilibrio aluminio-cobre donde se muestra un esquema de como varia la microestructura en función de la velocidad de enfriamiento y posterior tratamiento térmico. (Gil Mur, et al., 2001, p. 19)

También se observa como la solubilidad del cobre en la matriz α disminuye con la temperatura del 5,7% al 0,2%. Este hecho permite los tratamientos de solubilización por encima de la curva de transformación, enfriado rápido o temple y posterior precipitación del CuAl_2 mediante recocidos a bajas temperaturas. (Gil Mur, et al., 2001, p. 19)

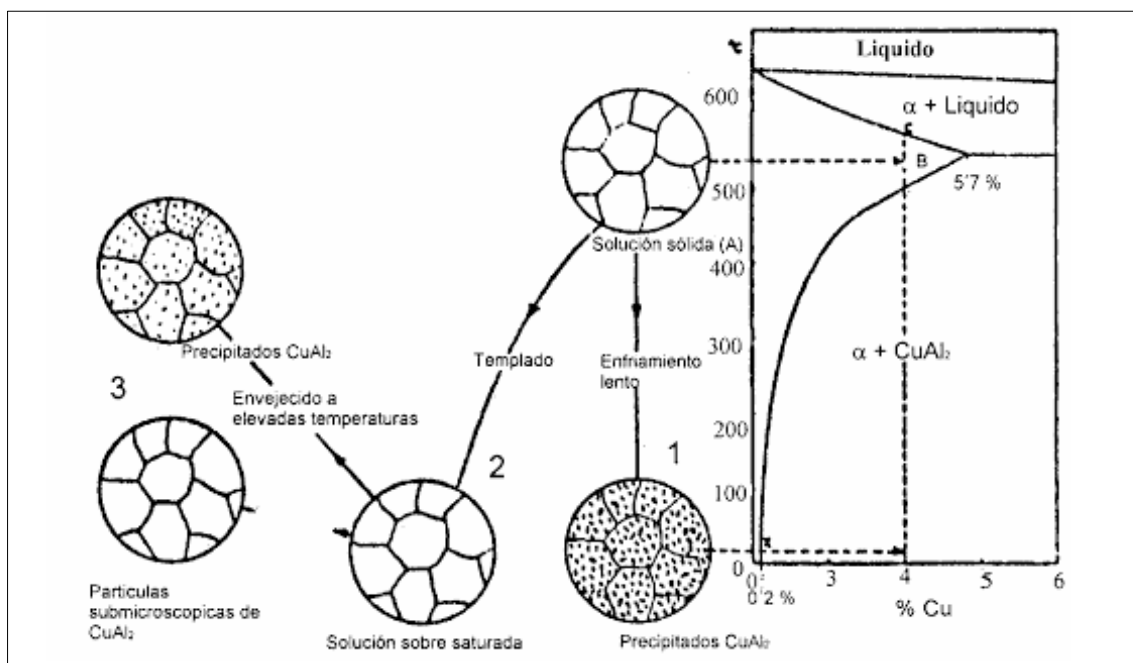


Figura 4-1: Efecto de la velocidad de enfriamiento sobre la microestructura del Al-Cu

Fuente: (Gil Mur, et al., 2001, p. 19)

A temperatura ambiente, hay sistemas que tienden espontáneamente a la situación de equilibrio, es decir, que existe suficiente movilidad atómica para que el sistema vaya expulsando poco a poco el exceso de cobre mediante la formación de pequeños precipitados de CuAl_2 . Este fenómeno se conoce como envejecimiento natural. (Gil Mur, et al., 2001, p. 19)

Existen otros sistemas en que es necesario forzar esta reacción precipitación mediante tratamientos térmicos. Estos sistemas se someten a temperaturas por debajo de la curva de transformación (recocido) para inducir la precipitación conocido como envejecimiento artificial. (Gil Mur, et al., 2001, p. 19)

La primera aleación endurecida por envejecimiento fue una aleación de Al-4,5%Cu conocida comercialmente como “duraaluminio”. Esta aleación envejece a temperaturas por debajo de la

temperatura ambiente. Si al sistema Al-Cu se le añade magnesio se conoce comercialmente como “superduraluminio” ya que el magnesio, aumenta la velocidad de precipitación. (Gil Mur, et al., 2001, p. 19)

1.4 Aleación

Antes de hablar sobre las aleaciones de aluminio es necesario conocer algunas definiciones.

1.4.1 Definiciones

Una *aleación* es un metal puro al cual se han añadido otros elementos (los “elementos de aleación”). Ejemplos: Latón (Cu+Zn) y monel (Ni+Cu). (Ashby & Jones, 2009, p. 28)

Los *componentes* de una aleación son los elementos que la constituyen. En el latón son el cobre y el zinc. Los componentes se designan con sus símbolos químicos, por ejemplo, Cu, Zn. (Ashby & Jones, 2009, p. 28)

Un *sistema de aleación* consiste en todas las aleaciones que se pueden obtener con unos determinados componentes. Una aleación *binaria* tiene dos componentes; una aleación *ternaria* tiene tres. (Ashby & Jones, 2009, p. 28)

Una *fase* es una región del material que tiene propiedades físicas y químicas homogéneas. Las fases se designan con letras griegas, como α o β . Pero cuando una fase es una solución sólida de un elemento aleante en una matriz metálica se puede usar los símbolos químicos. (Ashby & Jones, 2009, p. 28)

La *composición* de una aleación, o de una fase, normalmente se mide en porcentaje de peso y se designa con el símbolo W. (Ashby & Jones, 2009, p. 28)

De modo que, en un sistema de aleación A-B:

$$W_A = \frac{\text{Peso de A}}{\text{Peso de A} + \text{Peso de B}} \times 100\% \quad (1-1)$$

$$W_B = \frac{\text{Peso de B}}{\text{Peso de B} + \text{Peso de A}} \times 100\% \quad (2-1)$$

$$W_A + W_B = 100\% \quad (3-1)$$

A veces es muy útil definir el porcentaje atómico (o molar), dado por:

$$X_A = \frac{\text{Átomos de A}}{\text{Átomos de A} + \text{Átomos de B}} \times 100\% \quad (4-1)$$

La *constitución* de una aleación se describe por:

- La composición total.
- El número de fases.
- La composición de cada fase.
- El porcentaje en peso de cada fase.

Una aleación está en *equilibrio* cuando los parámetros indicados anteriormente no tienen a cambiar con el tiempo. (Ashby & Jones, 2009, p. 29)

El diagrama de equilibrio o el *diagrama de fases* resume la constitución de equilibrio de un sistema de aleación. (Ashby & Jones, 2009, p. 29)

1.4.2 Aleaciones de aluminio

El aluminio puro como tal es un material blando y de baja resistencia mecánica. Por tanto, uno de los objetivos a la hora de diseñar aleaciones es mejorar sus propiedades tales como la resistencia mecánica y dureza aleándolo con diferentes metales. (Gil Mur, et al., 2001, p. 23)

Entre los elementos más utilizados para formar aleaciones con el aluminio están el Fe, Mg, Zn, Si, Cu, Ti, Cr, Li, B, W, Ni, Zr, S. Las propiedades finales dependen principalmente cuál sea el fin específico de la aleación y así poder modificarlas según sus requerimientos. (De la Cruz, 2015, p. 16)

Una vez aleado el aluminio se puede aumentar su resistencia mecánica por medio de deformación o de un tratamiento térmico. (Martínez, 2017, p. 5)

En la mayoría de los casos sólo se usan cuatro elementos: magnesio, cinc, cobre y silicio. Se llama a estos elementos básicos o principales ya que se introducen dentro de las aleaciones de aluminio en grandes cantidades y definen la microestructura y propiedades. (Esmeralda, 2012, p. 6)

Se sabe que la solubilidad máxima en aluminio excede al 1% sólo en los siguientes siete elementos; magnesio, cobre, silicio, litio, manganeso, germanio y plata, el resto de los elementos químicos poseen una baja solubilidad en el aluminio, por el orden de 0.1-0.01%. De estos siete elementos apenas el silicio y el cobre, pueden utilizarse como elementos de aleación principales, en gran parte por los factores económicos. (Esmeralda, 2012, p. 6)

Estas aleaciones son comúnmente conocidas como ligeras, ya que poseen una menor densidad comparadas con el acero. Esta ligereza ha llevado a la industria a emplearlas principalmente a la del transporte, ya que proporciona un menor peso en vehículos (figura 5-1), brindando ventajas adicionales como la reducción en el consumo de combustible y una disminución notable de los gases contaminantes que causan daños graves e irreparables a la atmósfera. (De la Cruz, 2015, p. 16)



Figura 5-1: Culata del motor de aleación de aluminio

Fuente: (Desguace S.L, 2017)

1.4.3 Características de las aleaciones de aluminio

Las principales características de las aleaciones de aluminio son:

- Son ligeros, su densidad es únicamente la tercera parte del acero.
- Las aleaciones de aluminio están disponibles en un amplio rango de resistencia desde altamente dúctil-baja resistencia y comercialmente puros muy resistentes con un elevado esfuerzo y aleaciones con un esfuerzo-tensión aproximado de 690 MPa (100Ksi). (Martínez, 2017, p. 6)
- Las aleaciones tienen una alta resistencia a la proporción de peso y conserva su resistencia a bajas temperaturas y, a menudo se utiliza para aplicaciones criogénicas. (Martínez, 2017, p. 6)
- Tiene una alta resistencia a la corrosión en la mayoría de condiciones y servicios, y no se forman sales de color para teñir la superficie adyacente o decolorar los productos con los que entra en contacto. (Martínez, 2017, p. 6)
- Son altamente reflectante, excelente conductor del calor y electricidad, además de no ser ferromagnético, una propiedad de importancia en las industrias eléctrica y electrónica. (Martínez, 2017, p. 6)
- No son pirofóricos lo cual es importante en aplicaciones que involucren materiales inflamables o explosivos. (Martínez, 2017, p. 6)

- No son tóxicos y se usa rutinariamente en recipientes para alimentos y bebidas.
- Son reciclables debido a que la chatarra tiene un valor sustancial y un mercado bien establecido para el reciclaje, proporcionando beneficios tanto económicos como ambientales. (Martínez, 2017, p. 6)
- Fáciles de fabricar, pueden ser formados y elaborados por metalurgia común y métodos de unión. (Esmeralda, 2012, p. 6)
- Las aleaciones del aluminio dan lugar a un uso generalizado que incluyen piezas resistentes, estructuralmente seguras y rígidas, usadas en fuselajes, motores, y en última instancia para los cuerpos de misiles, pilas de combustibles y componentes de satélites. (Martínez, 2017, p. 5)

1.4.4 Clasificación de las aleaciones de aluminio

Según el modelo de transformación de las aleaciones de aluminio, estas se pueden clasificar en:

- Aleaciones de aluminio para moldeo.
- Aleaciones de aluminio para conformado.

Una mayor diferenciación en cada una de las categorías arriba mencionadas se puede lograr teniendo en cuenta los mecanismos involucrados en la obtención de las propiedades mecánicas finales. Por ejemplo, los tratamientos térmicos (solubilizado, temple y endurecimiento por precipitación). Tanto las aleaciones para colar como las aleaciones para conformar, pueden ser descritas como termotratables. (Gustavo , 2013)

Otro gran número de aleaciones poseen composiciones tales que responden al endurecimiento por trabajado mecánico. Algunas aleaciones de fundición son esencialmente no tratables térmicamente y se utilizan sólo en bruto de colada o con alguna condición de modificación térmica no vinculados a los efectos de endurecimiento por solución o precipitación. (Gustavo , 2013)

1.4.5 Denominación de las aleaciones de aluminio forjable

En la mayoría de los países se usa un sistema Cuatro dígitos para clasificar e identificar los productos del aluminio puro y sus aleaciones, los cuales están establecidas por el ANSI (American National Standard Institute). (De la Cruz, 2015, p. 16)

En la tabla 5-1 se hace un resumen de los aluminios más utilizados, designación y usos.

Tabla 5-1: Aluminios y su denominación según The Aluminum Association (AA)

Designación	Serie	Descripción	Admite tratamiento térmico	Usos	Aluminios más comunes
1XXX	1000	Puro Al (99%)	No	Industria eléctrica y química	1100-1350
2XXX	2000	Al+Cu*+Mg, Al+Cu*+Mg+Si	Si	Aviación, suspensión de los camiones, estructuras que requieran buena dureza a temperaturas superiores a 150 °C	2011-2014-2017-2024-2219
3XXX	3000	Al+Mn*	No	Intercambiadores de calor, mobiliario, señales de tráfico, tejados y otras aplicaciones arquitectónicas.	3003-3004-3105
4XXX	4000	Al+Si*	Si	Varillas de soldadura y las hojas para soldadura fuerte	
5XXX	5000	Al+Mg*	No	Cascos de barcos, pasarelas y productos expuestos ambientes marinos	5005-5052-5056-5083-5086-5454-5456-5657
6XXX	6000	Al+Mg*+Si*	Si	Aplicaciones arquitectónicas, cuadros de bicicletas, pasamanos de los puentes, equipo de transporte y estructuras soldadas.	6061-6063
7XXX	7000	Al+Zn*+Mg+Zr+Cu+Cr	Si	Componentes estructurales de aviones y aplicaciones de alta resistencia	7050-7075
8XXX	8000	Al+Sn*+Li/ Fe	En estudio		
9XXX	9000			Futuros usos	
* Principal elemento de la aleación					

Fuente: (De la Cruz, 2015, p. 7)

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

De acuerdo a la tabla 5-1 en la designación el tercer y cuarto dígito (xxXX) representan el número consecutivo de la aleación o indican la pureza como es en el caso de la serie 1xxx, pero no en otras series. En las aleaciones 1xxx, la pureza mínima del aluminio se muestra por esos dígitos, la muestra la 1150 simboliza una pureza del aluminio del 99.50 %, otra muestra es la 1300, simboliza una pureza de aluminio del 99.00 %. En las series del 2xxx al 8xxx, el tercer y cuatro significa el número consecutivo de la aleación, por estándar las aleaciones 3003, 3004, 3005, son completamente diferentes, así mismo las aleaciones 6061, 6063. (Martínez, 2017, p. 8)

El segundo dígito (xXxx) en la designación indica modificación a la aleación o límites de impurezas, si es cero significa que es una aleación original, si es entre el 1 y el 9 indica modificaciones menores a la primera, por ejemplo, las aleaciones 5053 y 5453 varían muy poco en su composición, así como también la 7073 y 7473. El primer dígito (Xxxx) se refiere al principal elemento de aleación por ejemplo en la serie 2xxx es el cobre. (Martínez, 2017, p. 8)

En la actualidad, la mayoría de las investigaciones están enfocadas en las aleaciones de la serie 6xxx, pues en la industria automotriz se requiere del uso de placas que resistan la alta deformabilidad de modo que los paneles puedan ser estampados y se retengan e incluso aumenten su resistencia después de que se aplique el proceso de pintura por curado térmico; esto se logra debido a que ésta serie tiene contenidos de magnesio y silicio que propician la precipitación de precursores de equilibrio metaestables tales como el Mg_2Si . (De la Cruz, 2015, p. 24)

1.4.6 Denominación de las aleaciones de aluminio fundido

Las denominaciones para las aleaciones de aluminio fundido también constan Cuatro dígitos, como se muestra en la tabla 6-1.

Tabla 6-1: Clasificación de las aleaciones de aluminio fundido

Aleación	Principal elemento de aleación
Serie 1xxx	Aluminio sin alear
Serie 2xxx	Aluminio-cobre
Serie 3xxx	Aluminio - silicio (con cobre y/o magnesio)
Serie 4xxx	Aluminio - Silicio
Serie 5xxx	Aluminio - Magnesio
Serie 6xxx	Serie no utilizada
Serie 7xxx	Aluminio - Zinc
Serie 8xxx	Aluminio - Estaño

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 173)

Realizado por: Tipanluiza D, 2019

El primer dígito indica el grupo principal de la aleación. En la serie 1xx.x, el segundo y tercer dígitos indican el contenido mínimo de aluminio, al igual que el tercero y cuarto dígitos en el aluminio forjable. Para las otras series, el segundo y tercer dígitos no tienen importancia numérica. El cuarto dígito (a la derecha del punto decimal) indica la forma del producto. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 173)

1.4.7 Denominación para tratamientos térmicos del aluminio y sus aleaciones

Los aluminios en la industria son clasificados mediante códigos de letras establecidos para indicar e identificar qué procesos físicos y térmicos han intervenido en la elaboración del material final. (De la Cruz, 2015, p. 20)

El sistema de designación para los tratamientos del aluminio y sus aleaciones usado en los Estados Unidos es empleado para todas las formas de producto ya sea vaciado o trabajado (con excepción del vaciado en lingote). El sistema está basado en la secuencia de tratamientos mecánicos, térmicos o la combinación de ambos. La designación del tratamiento sigue a la de la aleación separada con un guion. (Martínez, 2017, p. 8)

Las denominaciones principales tanto para el aluminio forjable como para el fundido son las siguientes:

- F—Como se fabrica (mediante trabajo en frío o en caliente, o por fundición).
- O—Recocido (desde el estado de trabajado en frío o fundido).
- H—Endurecido por deformación mediante trabajo en frío (sólo para productos forjados).
- T—Tratado térmicamente.
- W—Sólo tratado con soluciones (temple inestable).

La designación de un tratamiento básico consiste en una letra individual mayúscula. La subdivisión de los tratamientos básicos se indica con uno o más dígitos siguiendo a la letra, esos dígitos designan una secuencia específica de tratamientos que producen una combinación de propiedades en el producto. Por ejemplo, el tratamiento H2 indica que ha sido endurecido por deformación y recocido parcialmente. (Martínez, 2017, p. 8)

1.4.8 Diagrama de fases Al-Cu

Todos los elementos principales de aleación forman diagramas de fase eutécticos con el aluminio, los parámetros correspondientes de estos eutécticos binarios son mostrados en la Tabla 7-1. (Esmeralda, 2012, p. 7)

Tabla 7-1: Características del diagrama de fase eutéctico del aluminio

No.	Elementos de Aleación	C_a^a		C_e^b		T_e^c (°C)	Fases en equilibrio con (Al) (Contenido del 2do componente en % masa)
		%Masa	%At.	%Masa	% At.		
1	Cu	5.7	2.5	33.2	17.5	547	$CuAl_2$ (52%Cu)
2	Mg	17.4	18.5	35	36	450	Mn_5Al_8 (35%)
3	Zn	82	49.3	94.9	75	382	(Zn) (99%Zn)
4	Si	1.65	1.59	12	12	5.77	(Si) (99,5%Si)

^a Límite de solubilidad a temperatura eutéctica.
^b Concentración en punto eutéctico.
^c Temperatura de solidificación en eutéctico binario.

Fuente: (Esmeralda, 2012, p. 7)

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

Las aleaciones industriales de fundición, en condiciones de vaciado se clasifican en cuatro grupos:

1. Aleaciones del tipo solución sólida (por ejemplo, aleaciones (Al-Cu y Al-Mg); estas aleaciones se caracterizan por la presencia en estado de no equilibrio degenerado de la

reacción eutéctica, que desaparece después del tratamiento térmico T6. (Esmeralda, 2012, p. 7)

2. Aleaciones hipoeutécticas, en ellas la regla es que el componente eutéctico tenga dos estructuras de fase (por ejemplo, Al-Si con 7%Si). (Esmeralda, 2012, p. 7)
3. Aleaciones eutécticas, en ellas la mezcla eutéctica es el principal componente de la microestructura (por ejemplo, Al-Si con 12%Si). (Esmeralda, 2012)
4. Aleaciones con cristales primarios de fases excesivas, por ejemplo, aleaciones hipereutécticas Al-Si. (Esmeralda, 2012, p. 7)

Esta clasificación puede ser aplicable a las aleaciones que cuentan con la estructura descrita en el diagrama de fase correspondiente (figura 6-1). (Esmeralda, 2012, p. 8)

Esquema de diagrama de fases binario Al- (2do componente) de tipo eutéctico:

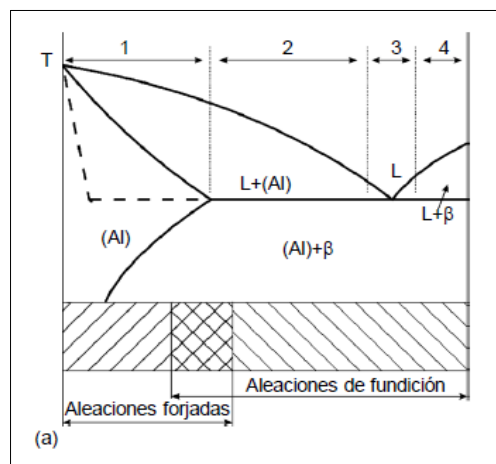


Figura 6-1: Aleaciones forjadas y de fundición

Fuente: (Esmeralda, 2012, p. 8)

Una aleación eutéctica es una composición particular de un sistema de aleación para el que el solidus y el liquidus están a la misma temperatura. (Groover, 2007, p. 205)

En la figura 7-1 se muestran dos tipos de morfologías inestables, a) inestabilidad en una sola fase que conduce a la aparición de dendritas de una sola fase, b) inestabilidad en dos fases que conduce a la aparición de células eutécticas o colonias en la presencia de un tercer elemento de aleación. (Esmeralda, 2012, p. 8)

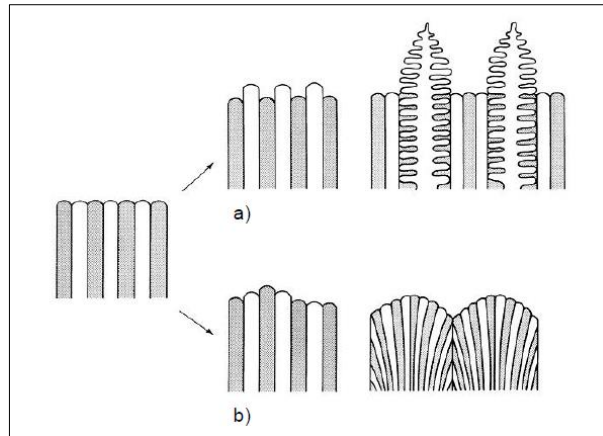


Figura 7-1: Tipos de inestabilidad planar en una interfase líquido-sólido

Fuente: (Esmeralda, 2012, p. 9)

Inestabilidad en una fase (figura 7-1a), se lleva a cabo la solidificación de una de las fases, en forma de dendritas primarias con interdendrítico eutéctico (figura 8-1). Esto se observa en aleaciones eutécticas porque una fase se sobre enfría más que otras. Por ejemplo, durante la solidificación de las aleaciones hipoeutécticas, la fase α se enfría más rápido porque la temperatura de líquidus de esta composición es mucho mayor que la temperatura eutéctica T_E . Por lo tanto, la fase T_E puede crecer rápidamente en el eutéctico. (Esmeralda, 2012, p. 9)

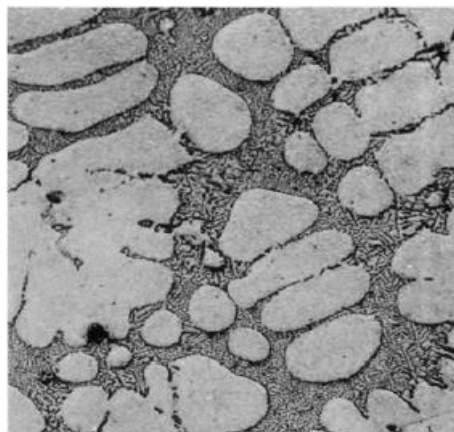


Figura 8-1: Microestructura típica en aleaciones de pistón

Fuente: (Esmeralda, 2012, p. 9)

Inestabilidad de dos fases (figura 7-1b), se caracteriza por crecimiento celular y tiene la apariencia de colonias eutécticas (figura 9-1). Esta situación se observa cuando un tercer elemento de aleación participa simultáneamente en interfases α -L y β -L, produciendo un amplio rango de difusión del límite de borde delante de la interfase líquido-sólido, esto origina el

crecimiento de la interfase eutéctica sobre enfriada con respecto a este elemento. (Esmeralda, 2012, p. 10)

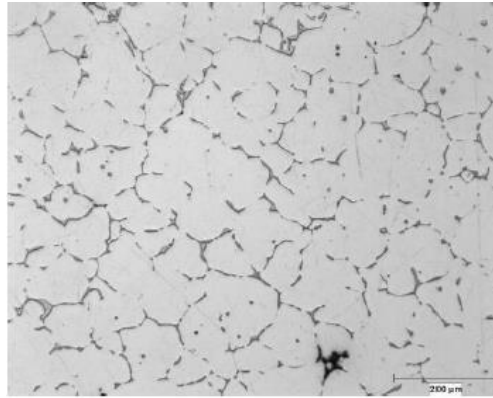


Figura 9-1: Microestructura típica en aleaciones 2xxx (molde metálico)

Fuente: (Esmeralda, 2012, p. 10)

Los factores más importantes que influyen en las propiedades de una aleación son:

- Composición química (influida por elementos de aleación, elementos adicionales de aleación y elementos residuales). (Esmeralda, 2012, p. 10)
- Tratamiento del metal al estado líquido (desgasificación, desoxidación, refinamiento de grano y modificación). (Esmeralda, 2012, p. 10)
- Solidificación.
- Tratamiento térmico.

1.4.9 La influencia de los elementos de aleación

Los elementos en contenidos mayores de 1% en peso son considerados impurezas indeseadas. Estos elementos son conocidos como elementos residuales, los cuales no tienen efectos benéficos en las propiedades mecánicas del aluminio y los fabricantes intentan eliminar de sus productos. (De la Cruz, 2015, p. 19)

En la siguiente tabla 8-1 se resumen los principales efectos de los elementos de la aleación:

Tabla 8-1: Efectos de los elementos en la aleación.

Elementos de aleación	Efectos en la aleación
Magnesio	Incrementa la resistencia por medio de la precipitación de soluciones sólidas y mejora la dureza por trabajado en frío
Manganeso	Incrementa la resistencia por medio de solubilidad y precipitación de la solución sólida
Cobre	Mejora la resistencia a la tracción y dureza, por la formación de precipitados intermetálicos Al_2Cu , mejora la maquinabilidad y la fluidez. Las aleaciones que contienen de 4 a 6% Cu tienen una respuesta más efectiva al tratamiento térmico. Permite el endurecimiento por precipitación, reduce la resistencia a la corrosión, la soldabilidad y la colabilidad.
Silicio	Incrementa la resistencia y la ductilidad, en combinación con el magnesio produce endurecimiento por precipitación
Zinc	Incrementa la resistencia, permite el endurecimiento por precipitación, puede causar corrosión por esfuerzos
Hierro	Incrementa la resistencia del aluminio puro, generalmente es un elemento residual. Este elemento en contenidos elevados favorece la formación de intermetálicos en forma de aguja
Cromo	Incrementa la resistencia a la corrosión por esfuerzos
Níquel	Mejora la resistencia a temperaturas elevadas
Titanio	Se usa para refinar el tamaño de grano, particularmente en los metales de aporte
Zirconio	Se emplea para refinar el grano microestructural.
Escandio	Incrementa substancialmente la resistencia mediante endurecimiento por envejecido, elemento refinador de grano particularmente en el metal de soldadura
Plomo y Bismuto	Propician la formación de rebaba en las aleaciones para maquinados

Fuente: (De la Cruz, 2015, p. 19)

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

1.5 Fundición

La fundición es un proceso en el que metal derretido fluye por gravedad u otra fuerza hacia un molde en el que se solidifica con la forma de la cavidad de éste. El término fundición también se aplica al objeto que se fabrica por medio de este proceso. (Groover, 2007, p. 194)

El principio de la fundición parece sencillo: se derrite metal, se vierte en un molde y se deja enfriar y solidificar; no obstante, hay muchos factores y variables que deben considerarse a fin de lograr una operación de fundido exitosa. La fundición incluye la obtención tanto de lingotes como de formas. (Groover, 2007, p. 194)

Los factores más importantes que se debe considerar en las operaciones de fundición son:

- El flujo del metal fundido dentro de la cavidad del molde.
- La solidificación y el enfriamiento del metal dentro del molde.
- La influencia del tipo de material del molde.

1.5.1 *Proceso de fundición*

Para llevar a cabo la operación de fundido, primero se calienta el metal a una temperatura suficientemente alta que lo transforme por completo al estado líquido. Después se vierte, o se dirige, hacia la cavidad del molde obsérvase la figura 10-1. (Groover, 2007, p. 197)

En un *molde abierto*, figura 10-1 a), el metal líquido simplemente se vierte hasta que llena la cavidad abierta. En un molde cerrado, figura 10-1 b), se adapta un pasaje denominado sistema de paso, que permite que el metal derretido fluya desde el exterior del molde hasta la cavidad. (Groover, 2007, p. 197)

El molde contiene una cavidad cuya configuración geométrica determina la forma de la pieza fundida (el tamaño de la cavidad debe sobredimensionarse para permitir la contracción de metal que ocurre durante la solidificación y enfriamiento). (Groover, 2007, p. 197)

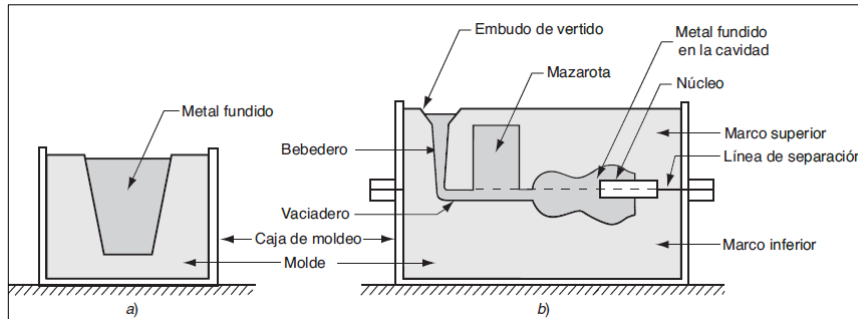


Figura 10-1: Formas de molde: a) molde abierto, b) molde cerrado

Fuente: (Groover, 2007, p. 197)

Las características del metal fundido que afectan a la fluidez son:

- Viscosidad.
- Tensión superficial (película de moléculas superficiales que se comporta como una membrana elástica). (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 271)
- Inclusiones (no son solubles).
- Patrón de solidificación de la aleación.

Los parámetros de fundición que pueden afectar la fluidez, el flujo del fluido y las características térmicas del sistema son:

- Diseño del molde.
- Material del molde y sus características superficiales.
- Grado de sobrecalentamiento.
- Velocidad de vaciado.
- Transferencia de calor (afecta directamente la viscosidad del metal líquido).

Una vez que el fundido se ha enfriado lo suficiente, se retira del molde. En función del método de fundido y el metal empleado, podría requerirse un procesamiento adicional. Esto incluye cortar el exceso de metal de la pieza fundida real, limpiar la superficie, inspeccionar el producto y dar tratamiento térmico para mejorar sus propiedades. Además, quizá se requiera maquinarse, con objeto de lograr tolerancias más estrechas para ciertas características de las piezas. (Groover, 2007, p. 198)

Los procesos de fundición se dividen en dos categorías amplias, de acuerdo con el tipo de molde que se emplea: la fundición con molde desechable y la fundición con molde permanente. Molde desechable significa que el molde en que se solidifica el metal derretido debe destruirse para retirar el fundido. Estos moldes están hechos de arena, yeso o materiales similares, cuya forma se mantiene con el uso de aglutinantes de varias clases. (Groover, 2007, p. 198)

La fundición con arena es el ejemplo más destacado de los procesos con moldes desechables. En la fundición con arena, se vierte metal derretido en un molde de arena. Una vez que el metal se endurece, debe destruirse el molde a fin de recuperar el fundido. Un molde permanente es el que se utiliza una vez y otra para producir muchos fundidos. (Groover, 2007, p. 198)

1.5.2 Moldes para fundición en arena

La figura 11-1b muestra la sección transversal de un molde común de fundición de arena, en la que se indica parte de la terminología. La caja de moldeo contiene al marco superior y marco inferior del molde. (Groover, 2007, p. 198)

La cavidad del molde se forma por medio de un modelo, hecho de madera, metal, plástico u otro material y la cavidad se forma apisonando arena alrededor del modelo, sobre las mitades del marco superior y el inferior. (Groover, 2007, p. 198)

El modelo por lo general está sobredimensionado para compensar la contracción del metal cuando éste se solidifica y se enfría. La arena del molde está húmeda y contiene un aglutinante para que conserve su forma. (Groover, 2007, p. 198)

Los tipos de modelos (figura 11-1) que se emplean en la fundición con moldes de arena son: a) sólido, b) de deslizamiento, c) de placas ajustadas y d) de capucha y base. (Groover, 2007, p. 217)

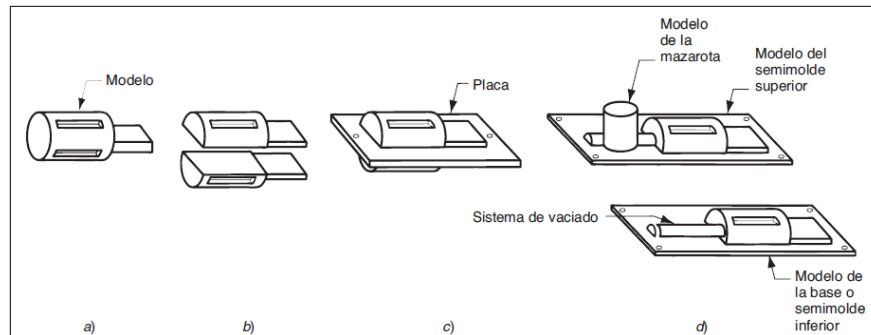


Figura 11-1: Tipos de modelos que se emplean en la fundición con moldes de arena

Fuente: (Groover, 2007, p. 217)

Para aquellos fundidos que tengan superficies internas, estas quedan determinadas por medio de un núcleo (corazón), forma que se coloca dentro de la cavidad del molde para definir la forma interior de la pieza. Los núcleos por lo general están hechos también de arena, aunque pueden emplearse otros materiales tales como metales, yeso y cerámicos. Los mismos a su vez se sujetan a la cavidad del molde por medio de coronas como se muestra en la figura 12-1. (Groover, 2007, p. 198)

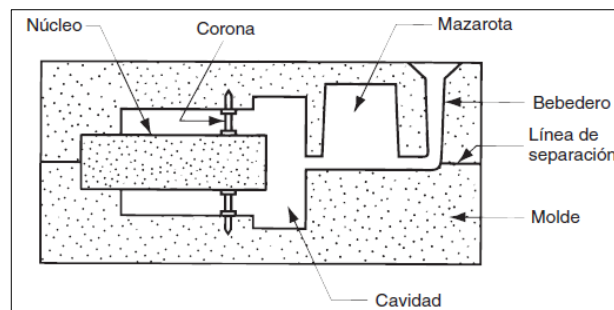


Figura 12-1: Ubicación del núcleo dentro de la cavidad del molde

Fuente: (Groover, 2007, p. 217)

El sistema de paso consiste en el canal, o red de canales, por los que fluye el metal derretido desde el exterior hacia la cavidad. El sistema de paso consta de un bebedero, después un vaciadero que conduce el metal fundido a la cavidad principal. En la parte superior del bebedero, se usa un embudo de vertido para minimizar las salpicaduras y turbulencia conforme el metal fluye en el bebedero véase la figura 13-1. (Groover, 2007, p. 198)

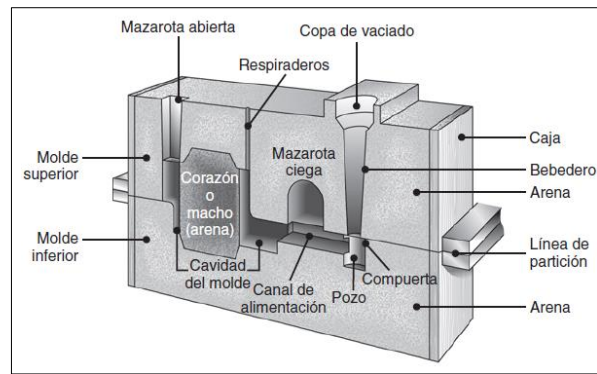


Figura 13-1: Esquema de un molde arena

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 290)

En el diagrama aparece como un embudo sencillo en forma de cono. Algunos embudos de vertido están diseñados en forma de tazón, con un canal abierto que lleva al bebedero. (Groover, 2007, p. 199)

La mazarota es un almacenamiento en el molde que sirve como fuente de metal líquido para que el fundido compense la contracción durante la solidificación. También debe estar diseñada para que se solidifique después del fundido principal a fin de que cumpla su función. (Groover, 2007, p. 199)

Conforme el metal pasa al molde, el aire que ocupaba en forma previa la cavidad, o bien los gases calientes que se forman por las reacciones del metal fundido, deben ser evacuados de modo que el metal llene por completo el espacio vacío. (Groover, 2007, p. 198)

La porosidad natural de la arena permite que el aire y los gases escapen a través de las paredes de la cavidad cuando el metal pasa al molde. (Groover, 2007, p. 198)

1.5.3 Fundición en arena

La fundición con arena es, por mucho, el proceso que se usa con más amplitud, pues es responsable de la mayoría del total del peso de los fundidos. Casi todas las aleaciones de fundición pueden fundirse con arena (figura 14-1; de hecho, es uno de los pocos procesos que pueden usarse para metales con temperaturas de fusión elevadas. (Groover, 2007, p. 215)

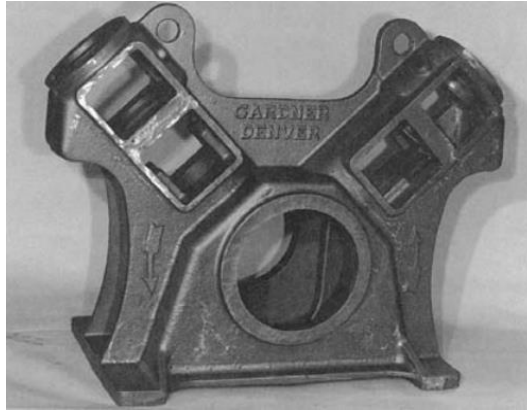


Figura 14-1: Pieza fundida con arena (estructura-compresor-aire)

Fuente: (Groover, 2007, p. 215)

1.5.4 Arena

En la mayoría de las operaciones de fundición en arena se utiliza arena sílice (SiO_2) como material para el molde, porque es barata y resulta adecuada debido a sus características de alta temperatura y elevado punto de fusión. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 289)

Existen dos tipos generales de arena: aglutinada naturalmente (banco de arena) y sintética (arena de lago). La mayoría de los talleres de fundición prefiere esta última porque puede controlar su composición con mayor facilidad. Para una fundición apropiada, la arena debe estar limpia y de preferencia ser nueva. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 289)

Por tanto, en la figura 15-1 se indica los pasos necesarios para realizar una fundición con arena.

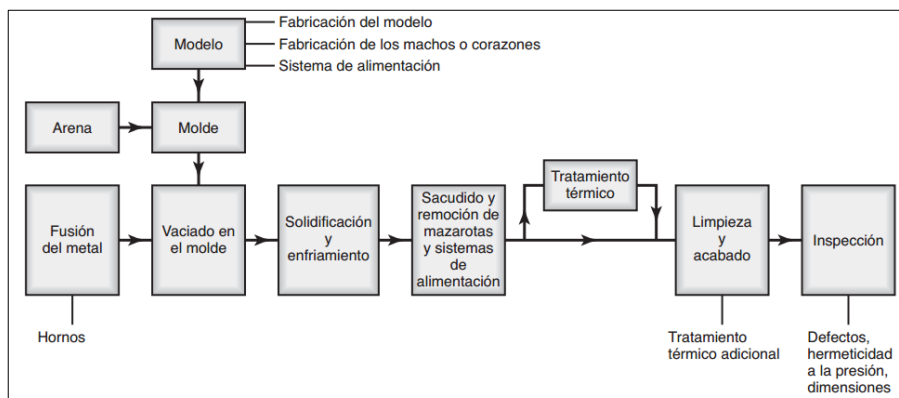


Figura 15-1: Secuencia de pasos de una operación de fundición en arena

Fuente: (Groover, 2007, p. 215)

Los moldes de arena se caracterizan por los tipos de arena que los componen y por los métodos utilizados para producirlos. Existen tres tipos básicos de moldes de arena: de arena verde, de caja fría y sin cocción. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 289)

El material más común es la arena verde para moldeo, que es una mezcla de arena, arcilla y agua. El término “verde” indica que la arena dentro del molde está húmeda o mojada mientras se vacía el metal en su interior. Éste es el método menos costoso para fabricar moldes y la arena se recicla fácilmente para su uso posterior. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 290)

Para determinar la calidad del molde de arena se emplean diferentes indicadores

- Resistencia (mantiene su forma y resiste la erosión,).
- Permeabilidad (permite el paso del aire y los gases a través de los vacíos de la arena).
- Estabilidad térmica (resiste el agrietamiento y deformación - contacto con metal fundido).
- Colapsibilidad (permite que el fundido se contraiga).
- Reutilización (la arena se puede utilizar en otros modelos).

1.5.5 Hornos para fusión

La práctica de la fusión es un aspecto importante de las operaciones de fundición, ya que tiene un impacto directo en su calidad. Los hornos se alimentan con material fundible, que consiste en metal, elementos de aleación y otros materiales (como fundente y constituyentes formadores de escoria). (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 315)

Los fundentes son compuestos inorgánicos que refinan el metal fundido eliminando los gases disueltos y diferentes impurezas. Se pueden agregar manualmente o inyectar de modo automático en el metal fundido. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 315)

Los hornos de fusión que más se utilizan en los talleres de fundición son los hornos de arco eléctrico, de inducción, de crisol y cubilotes. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 315)

Los hornos de crisol (figura 16-1), se han utilizado ampliamente a lo largo de la historia, se calientan con combustibles como los gases comerciales, gasóleo y combustible fósil, además de la electricidad. Pueden ser estacionarios, basculantes o móviles. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 316)

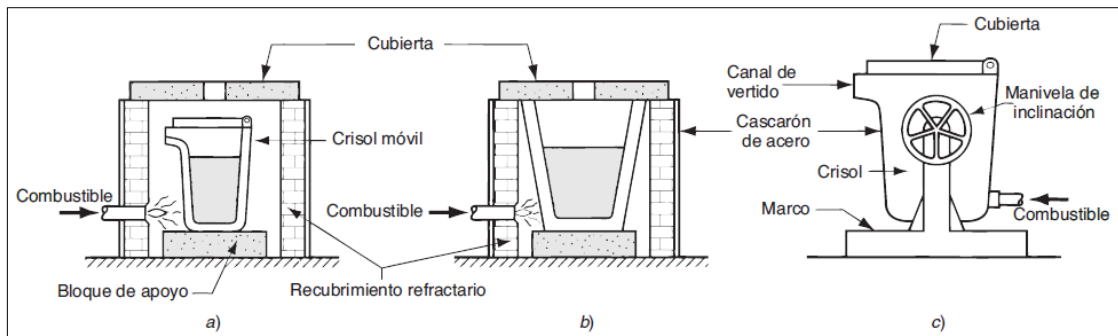


Figura 16-1: Tipos de crisoles: a) crisol móvil, b) crisol estacionario y c) crisol basculante

Fuente: (Groover, 2007, p. 236)

Emplean un contenedor (el crisol) hecho de material refractario apropiado (por ejemplo, una mezcla de arcilla y grafito) o una aleación de acero de alta temperatura, para contener la carga. En el crisol móvil, cuando el metal se derrite, el crisol se eleva fuera del horno y se usa como cuenco de vertido. (Groover, 2007, p. 236)

Los crisoles se emplean para metales no ferrosos tales como bronce, latón y aleaciones de zinc y aluminio. Las capacidades de los hornos por lo general están limitadas a varios cientos de libras. (Groover, 2007, p. 236)

1.5.6 Tratamiento del metal en estado líquido

Cada proceso requiere características específicas del metal, el uso que la pieza tendrá, es de gran importancia e influye en la selección de la aleación, ya que se establecen los requerimientos de resistencia mecánica, ductilidad, resistencia a la corrosión, susceptibilidad a tratamientos térmicos y de superficie. (Esmeralda, 2012, p. 13)

Es por ello que se realizan tratamientos al metal en estado líquido para asegurarnos Cumplir con la demanda en productos de calidad con propiedades y características específicas para cada sistema. (Esmeralda, 2012, p. 13)

1.5.7 Desgasificado del metal líquido

Tratamiento que consiste en eliminar el gas (hidrógeno) que esta disuelto en el aluminio. La importancia del desgasificado radica en efectuar un barrido del gas contenido en el metal, ya que de no ser así provocaría un alto porcentaje de porosidad en las piezas. El hidrógeno, es el único elemento gaseoso que tiene solubilidad en el aluminio líquido. (Esmeralda, 2012, p. 21)

La contaminación por hidrógeno puede originarse debido a una deficiente combustión en el horno o por utilizar herramientas con humedad presente en el manejo del metal y alta humedad ambiental, esto puede suceder tanto dentro y fuera del horno. (Esmeralda, 2012, p. 21)

Otra de las causas es por sobrecalentamiento del metal ya que a mayor temperatura del metal fundido aumenta la solubilidad y la cantidad de hidrógeno absorbida en el baño, como se observa en el diagrama de solubilidad de hidrógeno en aluminio con respecto a la temperatura (gráfico 1-1). El hidrógeno absorbido en el metal líquido es expulsado durante la solidificación debido a la reducción de solubilidad. (Esmeralda, 2012, p. 21)

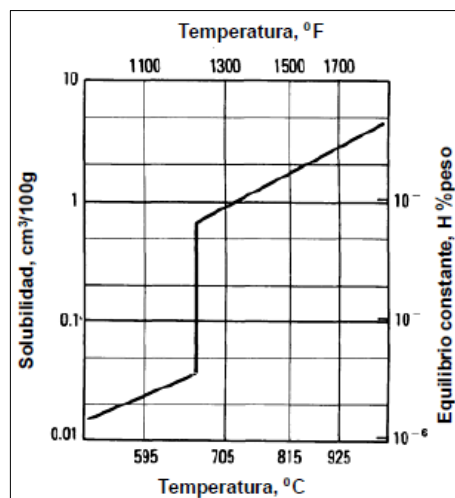


Gráfico 1-1: Solubilidad del hidrógeno en el aluminio

Fuente: (Esmeralda, 2012, p. 21)

Entre los elementos que existen para remover el hidrógeno del metal líquido se puede mencionar al cloro y al nitrógeno que son los más ampliamente utilizados en la industria, los cuales son inyectados al baño metálico en forma de burbujas pequeñas creando un mecanismo de arrastre que elimina impurezas y reduce el contenido de hidrógeno presente en el metal. (Esmeralda, 2012, p. 22)

La porosidad reduce la ductilidad e incrementa la susceptibilidad de iniciación de fracturas de fatiga. La porosidad puede surgir ya sea por contracción durante la solidificación o por hidrógeno. Los poros por hidrógeno son usualmente de forma esférica, mientras que la porosidad de contracción es más alargada y por consecuencia afectan más las propiedades mecánicas que los poros de hidrógeno. (De la Cruz, 2015, p. 50)

1.5.8 Refinamiento del grano

El refinamiento de grano es un proceso que consiste en agregar al metal un agente refinador que contenga titanio y boro los cuales actúan como agentes que propician la nucleación, disminuyendo el tamaño de grano de la aleación. (Esmeralda, 2012, p. 22)

Las aleaciones de aluminio tienden a poseer un tamaño de grano grueso a causa de sobrecalentamientos, fusiones sucesivas, mantenimientos prolongados en estado líquido. Este factor disminuye las propiedades mecánicas de las aleaciones aumentando la tendencia a la formación de grietas además de perjudicar la apariencia de las piezas. (Esmeralda, 2012, p. 22)

1.5.9 Efecto del oxígeno en aleaciones de aluminio

El aluminio tiene una fuerte afinidad al oxígeno y se oxida inmediatamente cuando se expone al aire. Los tratamientos térmicos y el almacenamiento en ambientes húmedos van a incrementar la capa de óxido, así como los tratamientos electroquímicos como el anodizado que es aplicado con fines decorativos, arquitectónicos o para resistencia al desgaste. (De la Cruz, 2015, p. 22)

1.6 Aleación de Al-Cu

En estas aleaciones, el endurecimiento se observa a temperatura ambiente, esto atribuido a la localizada concentración de átomos de cobre que forman zonas de Guinier-Preston, llamadas GP (1). (Esmeralda, 2012, p. 34)

Esto consiste en dos regiones dimensionales ricas en cobre en forma de disco, orientadas paralelamente al plano {100}. El diámetro de las zonas es estimado de 3 a 5 nm (30 a 50 Å) y este no varía con el tiempo de envejecido a temperatura ambiente. (Esmeralda, 2012, p. 34)

La secuencia de estructura en aleaciones aluminio-cobre es la siguiente:



A temperaturas superiores a 100° C (212° F), las zonas GP (1) se disipan y son remplazadas por estructuras designadas GP (2) o θ'' aunque sólo unas pocas capas atómicas de espesor, se consideran ordenados con arreglo atómico tridimensional. (Esmeralda, 2012, p. 34)

La fase de transición θ' , es una fase estable que tiene la misma composición y exhibe coherencia con la solución sólida de la red, se forma después de la zona GP (2), pero coexiste con ella en cierto rango de tiempo y temperatura. La etapa final en la secuencia es la transformación de θ' en la fase no coherente de equilibrio θ (CuAl_2). (Esmeralda, 2012, p. 34)

Tabla 9-1: Secuencia de precipitación del Al-Cu

Sistema	Precipitado	Característica
Al-Cu	Zona GP (1)	Coherente, metaestable en forma de discos.
	θ'' o GP (2)	Coherente, metaestable.
	θ' Al_2Cu	Semicoherente, metaestable, estructura tetragonal.
	θ Al_2Cu	Incoherente, estable, estructura tetragonal centrada en el cuerpo.

Fuente: (Esmeralda, 2012, p. 37)

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

1.6.1 Diagramas de fase de equilibrio de la aleación Al-Cu

El diagrama de equilibrio de fases del Al-Cu (figura 17-1), es una herramienta esencial que mejora la comprensión de la microestructura de una aleación.

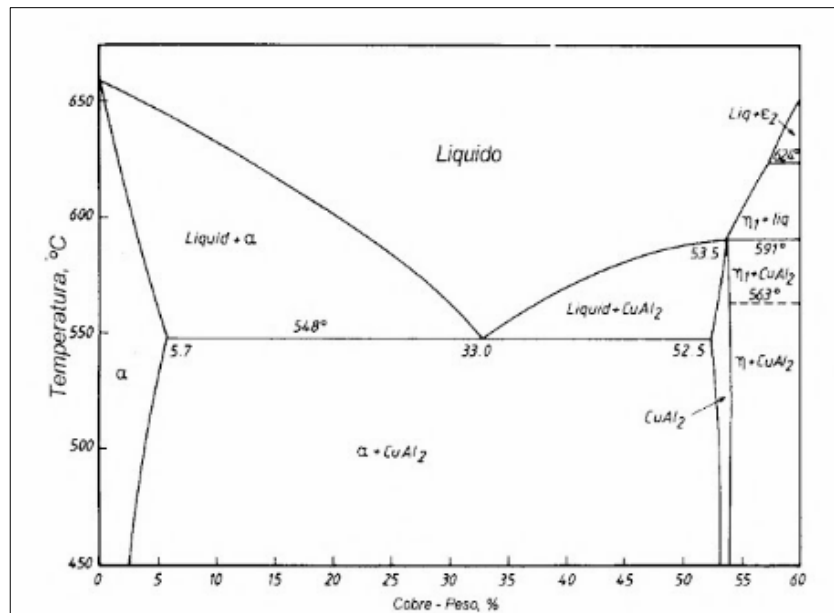


Figura 17-1: Diagrama de equilibrio de fases binario aluminio-cobre

Fuente: (Gil Mur, et al., 2001, p. 32)

Aleaciones con contenido mayor del 14% no existen comercialmente, ya que presentan una gran fragilidad debido al alto porcentaje del intermetálico CuAl_2 presente en la matriz para mayor compresión véase la figura 18-1. (Gil Mur, et al., 2001, p. 32)

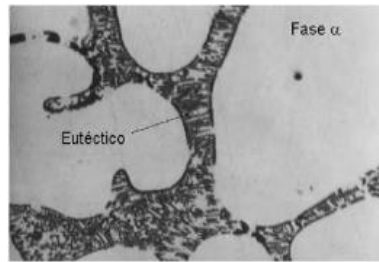


Figura 18-1: Micrografía óptica -aleación Al-10%Cu (400X)

Fuente: (Gil Mur, et al., 2001, p. 32)

1.6.2 Características y aplicaciones de la aleación Al-Cu

En la tabla 10-1 se menciona las características generales de una aleación aluminio-cobre:

Tabla 10-1: Características y aplicaciones de la aleación Al-Cu

Características	Aplicaciones
<ul style="list-style-type: none"> - Elevada resistencia mecánica. - Baja resistencia a la corrosión. - Baja resistencia a la soldabilidad. - Excelentes propiedades de moldeo. - Elevada colabilidad y compacidad. - Dificultades de mecanización. - Mayor resistencia a las temperaturas elevadas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fabricación de estructuras de aviones. - En pistones de motores. - En la fabricación de bloque motor. - En cárteres de motores y cajas de velocidades. - Piezas para aparellaje eléctrico. - En tanques y otros vehículos militares.

Fuente: (Universidad Politécnica de València, 2020)

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

1.6.3 Aleación Al-Cu-Mg (Si)

Aleaciones comerciales, donde la reacción de endurecimiento por precipitación principal está influenciada por el sistema ternario aluminio-cobre-magnesio ya que el silicio se agrega en cantidades muy pequeñas que no llegan a influir para considerarlo como un sistema cuaternario. (Esmeralda, 2012, p. 35)

Las aleaciones más importantes contienen cobre en mayor cantidad, la reacción de fase ocurre entre la solución sólida de aluminio y las fases intermetálicas Cu_2Al y Cu_2AlMg . (Esmeralda, 2012, p. 35)

1.7 Ensayos de materiales

Cuando seleccionamos un material para que cumpla una función determinada, es imprescindible saber las características que posee. Así también, conocer a que esfuerzos y cargas va encontrarse sometido, para elegir el material adecuado. capaz de soportar estas situaciones sin sufrir deformaciones y roturas. (CATEDU, 2016)

Ahí radica la importancia de los ensayos de materiales en todas las actividades relacionadas con la construcción y el funcionamiento de equipos. Además, su realización está normalizada por organismos nacionales e internacionales como las AISI, ANSI, ASTM, DIN y SAE. (Applus+, 2018)

Los ensayos de materiales son pruebas que se realizan a los materiales con la finalidad de conocer sus propiedades mecánicas y características físicas. De esta manera se intenta simular las condiciones a las que van a estar expuestas cuando entren en servicio. Los ensayos de materiales pueden ser de dos tipos, ensayos destructivos y ensayos no destructivos. (Briceño, et al., 2017)

1.7.1 Ensayos destructivos

Los ensayos destructivos son aquellos que producen daños o roturas a la pieza sometida al ensayo, para tratar de averiguar el comportamiento del material, frente a un requerimiento tipo físico. (Briceño, et al., 2017)

Los ensayos destructivos de materiales se utilizan para verificar que las propiedades de los materiales cumplan estas especificaciones de diseño, que a su vez suelen venir determinadas por las normas y los organismos reguladores. (Applus+, 2018)

Los ensayos pueden llevarse a cabo en el momento en que se fabrican los materiales o más adelante puede ser necesario realizar nuevas pruebas para asegurarse de que no se hayan alterado las propiedades del material durante la fabricación del equipo o de la estructura. (Applus+, 2018)

Los ensayos destructivos se pueden clasificar en:

- Estáticos (tracción, compresión, fatiga, cizalladura, flexión, torsión, pandeo, dureza)
- Dinámicos (desgaste, fatiga, resiliencia)

1.7.1.1 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción es el más común para determinar propiedades mecánicas de los materiales, como resistencia, ductilidad, tenacidad, módulos elásticos, coeficiente de Poisson y capacidad de endurecimiento por deformación. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 65)

Para el ensayo se requiere la preparación de un espécimen de prueba (probeta) normalizado, el cual se monta entre las mordazas de una máquina de ensayo de tracción obsérvese la figura 19-1. Estas máquinas están equipadas con diversos accesorios y controles para probar el espécimen a diferentes temperaturas y velocidades de deformación. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 65)

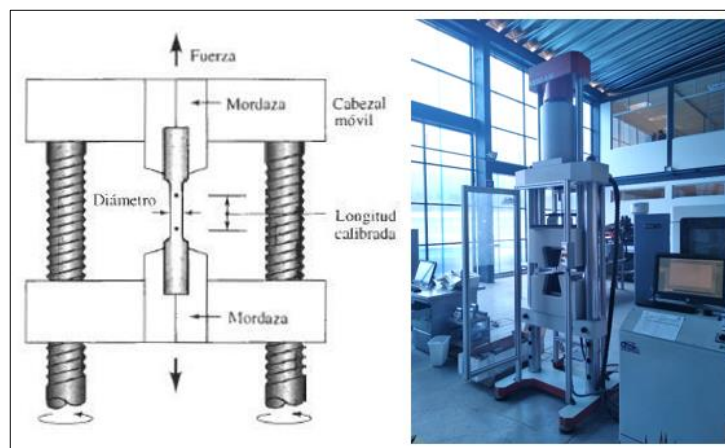


Figura 19-1: Máquina universal de ensayos

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 66)

El ensayo de tracción de un material consiste en someter a una probeta mediante la aplicación de una carga de tracción axial que aumenta progresivamente hasta producir la rotura o deformación de la probeta como se muestra en las figuras 20-1 y 21-1. (Briceño, et al., 2017)

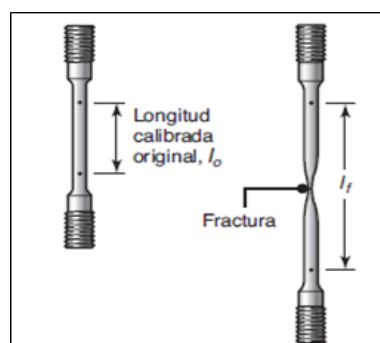


Figura 20-1: Especimen antes y después del ensayo

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 66)

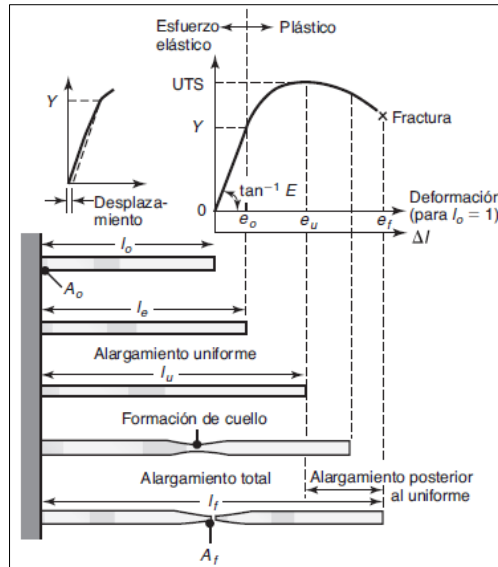


Figura 21-2: Secuencia de ensayo de tracción

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 66)

Cuando se llega a la carga máxima la probeta se fractura, entonces la prueba ha finalizado. Con los datos obtenidos durante el ensayo se puede realizar la curva esfuerzo-deformación como se muestra en la figura 22-1.

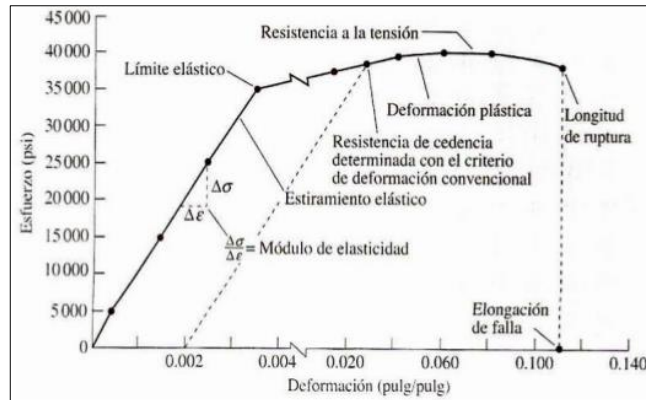


Figura 22-1: Curva esfuerzo-deformación para una aleación de aluminio

Fuente: (Díaz, 2014)

1.7.1.2 Espectrometría

La espectrometría es la técnica espectroscópica para tasar la concentración o la cantidad de especies determinadas. El instrumento que realiza tales medidas es un espectrómetro. (Pérez, 2019)

El espectrómetro (figura 23-1) es un instrumento óptico que se usa para medir las propiedades de la luz sobre una porción específica del espectro electromagnético. La variable medida es generalmente la intensidad de la luz, pero también podría ser, por ejemplo, el estado de polarización. (Peréz, 2019)

La espectrometría de emisión óptica es la metodología empleada en la identificación de porcentajes de elementos metálicos como el carbono, silicio, fósforo, azufre, manganeso, cromo que forman parte de una muestra. Cuenta con algunos elementos como el plasma conformado por el gas argón que al pasar por una corriente de aire de alta frecuencia genera un campo magnético. (Soria, 2017)

El sistema de inducción permite el eficaz aporte de la muestra en el plasma durante un cierto tiempo y un sistema óptico que separa el espectro emitido en varias longitudes de onda, para luego realizar un análisis a partir de las radiaciones. (Soria, 2017)

La preparación de las probetas para el ensayo de espectrometría debe estar normalizadas en función de la norma empleada, las cuales especifican los criterios que deben cumplir.



Figura 23-1: Espectrómetro de emisión óptica para aleaciones

Fuente: (VirtualExpo SAS, 2019)

1.7.1.3 Ensayos metalográficos

La metalografía es la ciencia que se encarga del estudio de las características estructurales de los metales y sus aleaciones, para relacionarlo con las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los mismos. (Oposinet, 2019)

Los metales están organizados en tres estructuras, las cuales están relacionadas entre sí; la estructura cristalina, cuyo elemento es el cristal, la estructura micrográfica constituida por los granos y la estructura micrográfica formada por las fibras. (Oposinet, 2019)

El ensayo metalográfico consiste en analizar los constituyentes presentes en el metal, distribución de las fases, tamaño de grano inclusiones no metálicas, impurezas, orientación de las fibras y las deformaciones mecánicas presentes. (Oposinet, 2019)

El ensayo metalográfico puede realizarse antes de que la pieza sea destinada a un fin, o bien puede ser practicado sobre piezas que han fallado en su servicio, es decir, piezas que se han deformado, fracturado o desgastado. Este estudio se puede aplicar a cualquier tipo de material. (Oposinet, 2019)

Un ensayo metalográfico requiere la ejecución de las siguientes etapas:

- Extracción de la muestra.
- Preparación de las probetas (según normativa).
- Desbaste y pulido.
- Ataque químico.
- Observación microscópica

El principal instrumento para la realización del ensayo metalográfico lo constituye el microscopio metalográfico obsérvese la figura 24-1, con el cual es posible examinar una probeta con aumentos que varían entre 50 y 2000.



Figura 24-1: Microscopio metalográfico

Fuente: (Quimilab, 2017)

1.8 Caracterización del material

La caracterización del material forma parte de la ciencia de los materiales que permite estudiar, clasificar y analizar las propiedades físicas, químicas, térmicas, magnéticas y mecánicas bajo ciertas condiciones.

Es decir, es un método que consiste en obtener información sobre las propiedades del material mediante equipos y/o maquinas estandarizadas.

1.8.1 Densidad

Es una magnitud que describe la masa por unidad de volumen de un material. Se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5-1)$$

Donde:

ρ : Densidad del material

m : Masa del objeto

V : Volumen del objeto

1.8.2 Deformación convencional

Es una magnitud adimensional que describe la relación entre el cambio en la longitud de una muestra en la dirección en que se aplica la fuerza y la longitud original de la probeta. (Smith & Hashemi, 2006, p. 258). Por tanto, esta se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_L = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (6-1)$$

Donde:

ε_L : Deformación convencional longitudinal

L_0 : Longitud inicial de la muestra

L_f : Longitud después de ser alargada por la fuerza uniaxial a tracción

En muchos casos, la deformación convencional se determina sobre una pequeña longitud llamada longitud entre marcas o calibrada, normalmente 2 pulgadas. (Smith & Hashemi, 2006, p. 258)

En la práctica industrial es frecuente convertir la deformación convencional en porcentaje de deformación o porcentaje de alargamiento (Smith & Hashemi, 2006, p. 258):

% deformación = deformación convencional \times 100% alargamiento

1.8.3 Esfuerzo de tensión

La tensión de ingeniería σ sobre la barra es igual a la fuerza media de fracción de tracción uniaxial F sobre la barra dividida por el área de su sección transversal A_0 (Smith & Hashemi, 2006, p. 256). Por tanto, se expresa de la siguiente forma:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (7-1)$$

Donde:

σ : Esfuerzo de tensión

F : Fuerza de tracción uniaxial

A_0 : Sección transversal original

1.8.4 Módulo de elasticidad

En la primera parte del ensayo de tracción, el metal se deforma elásticamente. Es decir, si la fuerza que actúa sobre la muestra desaparece, la probeta volverá a su longitud inicial. (Smith & Hashemi, 2006, p. 266)

Para metales, la máxima deformación elástica suele ser inferior a 0.5 por ciento. En general, los metales y aleaciones muestran una relación lineal entre la tensión aplicada y la deformación producida en la región elástica del diagrama convencional que se describe por la ley de Hooke (Smith & Hashemi, 2006, p. 266):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_L} \quad (8-1)$$

Donde:

E : Módulo de elasticidad o módulo de Young

1.8.5 Coeficiente de Poisson

Es una magnitud que describe cuanto un material se estrecha al estirarse longitudinalmente y adelgazarse en el sentido perpendicular al estiramiento (Mangonon, 2001, p. 129). Se expresa a través de la siguiente ecuación:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_L} \quad (9-1)$$

Donde:

ν : Coeficiente de Poisson

ε_w : Deformación transversal

ε_L : Deformación convencional longitudinal

Deformación transversal:

$$\varepsilon_w = \frac{D_f - D_0}{D_0} \quad (10-1)$$

Donde:

D_0 : Diámetro inicial de la muestra

D_f : Diámetro después de ser alargada por la fuerza uniaxial a tracción

1.8.6 Módulo de corte

Es la resistencia que tiene un material ante la presencia de una deformación por corte. Se determina por la siguiente expresión (Mangonon, 2001, p. 130):

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (11-1)$$

Donde:

G : Módulo de corte

1.8.7 Resistencia a la tracción

La resistencia a la tracción es la máxima tensión que se alcanza en la curva tensión-deformación convencional. Si la probeta desarrolla un decrecimiento localizado de la sección transversal (estricción), la tensión convencional decrecerá con el incremento de la deformación hasta producirse la fractura. (Smith & Hashemi, 2006, p. 268)

Cuanto más dúctil es el metal, mayor es la estricción antes de la fractura y más descendente la tensión alejándose del valor de resistencia a la tracción. La resistencia a la tracción de un metal se determina trazando una línea horizontal desde el punto máximo de la curva tensión-deformación hasta el eje de tensiones. El valor de tensión donde esa línea interseca al eje de tensiones se denomina resistencia máxima o resistencia a la tracción. (Smith & Hashemi, 2006, p. 268)

1.8.8 Limite elástico

Es el nivel de tensión al que un metal o aleación muestran una deformación plástica significativa. Debido a que no hay un punto definido de la curva tensión-deformación donde acaba la deformación elástica y empieza la deformación plástica. (Smith & Hashemi, 2006, p. 267)

En muchas ocasiones se determina el límite cuando se produce una deformación de 0.2 por ciento, también denominado límite elástico convencional de 0.2 por ciento, el cual se determina a partir del diagrama convencional. Primero se traza una línea paralela a una deformación de 0.002 mm después se traza una línea horizontal sobre la parte superior de la curva tensión-deformación. El valor de tensión será donde la línea horizontal interseca el eje de tensión. (Smith & Hashemi, 2006, p. 267)

1.9 Hipótesis

Hipótesis nula (H_0): Se acepta que el porcentaje de cobre no genera un aumento de la resistencia de las aleaciones Al-Cu.

Hipótesis alternativa (H_1): Se acepta que el porcentaje de cobre genera un aumento de la resistencia de las aleaciones Al-Cu.

1.9.1 Variables de la hipótesis

Las variables que presenta la hipótesis de este experimento, se indican a continuación.

1.9.1.1 Variable independiente

La pureza de los materiales reciclables y el porcentaje de Al y Cu para obtener las diferentes aleaciones de Al-Cu.

1.9.1.2 Variable dependiente

El porcentaje de cobre presente en la aleación de Al-Cu.

CAPÍTULO II

2 MARCO METODOLÓGICO

2.1 Introducción

Según Balestrini (2006, p. 125) señala que el marco metodológico “es el conjunto de procedimientos lógicos, tecno operacionales implícitos en todo proceso de investigación, con el objeto de ponerlos de manifiesto y sistematizarlos; a propósito de permitir descubrir y analizar los supuestos del estudio y de reconstruir los datos, a partir de los conceptos teóricos convencionalmente operacionalizados”

Es decir, es la estructura sistemática de la investigación que permite alcanzar los objetivos propuestos usando métodos, procedimientos e instrumentos necesarios para la recolección y análisis de la información sobre el problema que se investiga con el fin de obtener resultados confiables.

2.2 Nivel de la investigación

El nivel de investigación se refiere a la profundidad con que se abarca el estudio (Hernández, et al., 2010, p. 85).

Según el tema planteado y los objetivos a alcanzar se recurrió a un nivel de investigación de tipo exploratoria y explicativa.

Investigación exploratoria. Se realiza cuando el estudio es examinar un tema poco estudiado del cual se tiene muchas dudas o no se abordado antes. (Hernández, et al., 2010, p. 85)

Investigación explicativa. Está dirigido a responder por las causas de los eventos y fenómenos físicos o sociales. Se enfoca en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta, o por qué se relacionan dos o más variables. (Hernández, et al., 2010, p. 85)

2.3 Enfoque de la investigación

Dado que en el presente estudio se buscó comprobar la hipótesis, así como objetivos trazados, este trabajo experimental fue elaborado bajo un planeamiento metodológico del enfoque cuantitativo, porque es el mejor que se adapta a la investigación.

El enfoque cuantitativo usa la recolección de datos para comprobar la hipótesis, con base en la medición numérica y el análisis estadístico, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías. (Hernández, et al., 2010, p. 4)

Del enfoque cuantitativo se tomó la técnica de observación indirecta y la de pruebas estandarizadas para medir la resistencia a la tracción de los diferentes tipos de muestras de Al-Cu y determinar si el porcentaje de cobre presente en la combinación mejora sus propiedades mecánicas.

2.4 Diseño de la investigación

De acuerdo con Balestrini (2006, p. 131) señala que el diseño de la investigación es “un plan global de investigación que integra de un modo coherente y adecuadamente correcto las técnicas de recolección de datos a utilizar, análisis previstos y objetivos; intenta dar de una manera clara y no ambigua respuestas a las preguntas planteadas en la misma”.

Como el objetivo de esta investigación fue caracterizar las aleaciones de aluminio – cobre por medio de ensayos destructivos para generar una base de datos, se recurrió a un diseño experimental de tipo cuasiexperimental porque es el más adecuado para el estudio. También se aplicó la investigación explicativa para relacionar la metalurgia de la aleación de aluminio-cobre con las propiedades mecánicas del material.

EL diseño experimental busca una situación de control en el cual se manipulan, de manera intencional, una o más variables independientes(causas) para analizar las consecuencias de tal manipulación sobre una o más variables dependientes (efectos). (Hernández, et al., 2010, p. 122)

Por su parte, el diseño tipo cuasiexperimental manipula al menos una variable independiente para observar su efecto y relación con una o más variables dependientes. (Hernández, et al., 2010, p. 148)

Cabe destacar que el diseño tipo cuasiexperimental los sujetos asignados son establecidos con anterioridad diferenciándose del diseño tipo experimental “puro” en el que los sujetos son seleccionados al azar. Por tanto, este estudio no cumpliría con los requisitos para optar por un diseño tipo experimental “puro”.

2.5 Población y muestra

Se determinan los elementos representativos del experimento que serán objeto de estudio.

2.5.1 Población

La población es el conjunto de todos los elementos que concuerdan con determinadas especificaciones. Está queda determinada por el problema y los objetivos de la investigación. (Hernández, et al., 2010)

Para este trabajo experimental, la población de objeto de estudio estuvo conformado por las muestras de la aleación de aluminio-cobre que se obtuvieron mediante fundición de materiales reciclables en un horno de crisol fijo usando un molde permanente y un posterior mecanizado a través de un torno convencional, donde la geométrica de la probeta depende del tipo de ensayo que se realizó para lo cual se tomó como referencia la norma ASTM.

2.5.2 Muestra

La muestra es un subconjunto de elementos representativos que se extrae de la población en el que se lleva a cabo la investigación. (Hernández, et al., 2010, p. 175)

Para este trabajo experimental se utilizó una muestra no probabilística. La muestra no probabilística o dirigida es un subgrupo de la población en la que la elección de los elementos no depende de la probabilidad sino de las características de la investigación. (Hernández, et al., 2010, p. 176)

Se utilizaron 5 muestras por ensayo siendo en total 30 que se usaron en la investigación ya que se realizó dos tipos ensayos en el laboratorio. Las cuales cada paquete de 5 probetas presenta una variación del contenido de aluminio y cobre en su constitución como se muestra en la tabla 1-2. El número probetas usado por tipo de muestra corresponde al criterio de la norma ASTM E8/E8M-13 y ASTM E3-11.

Tabla 1-2: Muestras de Al-Cu

Muestra	Aleación Al-Cu
	(%) Cu
ET-01	1,00
ET-02	2,00
ET-03	3,00
ET-04	4,00
ET-05	5,00

Fuente: Autor

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

Como no existen normas en nuestro país que regulen las pruebas que se van a realizar en el laboratorio se utilizaron los criterios de la normativa respectiva.

2.6 Operación de las variables

Se delimita una zona de control para las variables del experimento.

2.6.1 Variables independientes

Indica la pureza de los materiales reciclables y el porcentaje de Al y Cu para obtener las diferentes aleaciones de Al-Cu.

2.6.1.1 Pureza de los materiales reciclados

La pureza es un factor indispensable en la recolección de materiales reciclables ya que se evita la presencia de excesivas impurezas y porosidad en la aleación.

2.6.1.2 Concentración del Al y Cu

En la tabla 2-2 se indica la composición teórica que tuvieron las muestras de Al-Cu durante la fundición:

Tabla 2-1: Composiciones de la Al-Cu

Muestra	Composición aluminio-cobre				
	Al		Cu		
	Concentración (%)	Masa (kg)	Concentración (%)	Masa (kg)	Peso Total (kg)
ET-01	99.01	10	0.99	0.1	10.1
ET-02	98.02	8.6	1.98	0.86	9.46
ET-03	97.03	7.96	2.97	0.796	8.756
ET-04	96.04	7.256	3.96	0.726	7.982
ET-05	95.05	6.482	4.95	0.798	7.28

Fuente: Autor

Realizado por: Tipanluiza D, 2020


2.6.2 Variable dependiente

Indica el porcentaje de cobre presente en la aleación luego de la solidificación de las probetas mejora la resistencia mecánica de las mismas.

2.7 Materiales y equipos


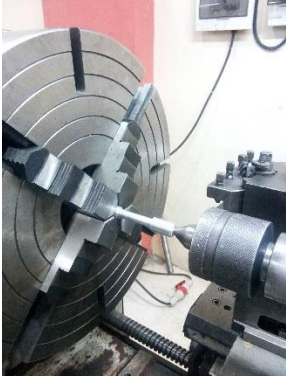


Los materiales y equipos más importantes para el desarrollo del experimento se ilustran en la tabla 3-2:

Tabla 3-2: Materiales y equipos

MATERIALES/EQUIPOS	FIGURA
Horno de crisol	

Fuente: Autor

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

<p>Todo el seguridad</p>	<p>Soldadora invertir PPK 250 A / 220 V</p>		<p>equipo de y</p>
	<p>Torno convencional</p>		
	<p>Espectrómetro de emisión óptica BRUKER Q2 ION</p>		
	<p>Material reciclado (Cables de aluminio y cobre)</p>		

herramientas requeridas para la fundición fueron dispuestos por el taller metalúrgico.

Las máquinas y equipos de ensayos necesarias fueron proporcionadas por el Centro de Fomento Productivo Metalmeccánico Carrocero.

2.8 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se detallan el método e instrumentos empleados para la recolección de datos.

2.8.1 Técnicas de recolección de datos

Se entenderá por técnica de investigación, el procedimiento o forma particular de obtener datos o información. (Arias, 2006, p. 67)

Una técnica de recolección de datos que se usó en la investigación fue la observación indirecta en el laboratorio de resistencia de materiales ya que para visualizar la estructura granular de la aleación de aluminio-cobre se recurrió al uso de un microscopio metalográfico. La otra técnica utilizada fueron las pruebas estandarizadas donde la calibración de los equipos, el procedimiento del ensayo y entrega de resultados se realizaron según normativa. Por último, estos resultados fueron ordenados, corroborados, tabulados con el fin de hacer un análisis estadístico de los datos para comparar y concluir; cual combinación de aleación de aluminio-cobre presenta mejores propiedades mecánicas.

La observación es una técnica que consiste en visualizar o captar mediante la vista, en forma sistemática, cualquier hecho, fenómeno o situación que se produzca en la naturaleza o en la sociedad, en función de unos objetivos de investigación preestablecidos. (Arias, 2006, p. 69)

Las pruebas estandarizadas permiten miden variables específicas, como el esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo, elongación, composición química, entre otros.

También se procedió con la investigación bibliográfica como primer punto en libros, tesis, artículos científicos, revistas, páginas web para sustentar la base teórica de la investigación, así también diseñar el proceso experimental para el control de las variables con el fin de obtener resultados fiables.

2.8.2 Instrumentos de recolección de datos

Un instrumento de recolección de datos es cualquier recurso, dispositivo o formato (en papel o digital), que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información. (Arias, 2006, p. 68)

El instrumento utilizado es una escala de estimación tipo numérica y gráfica debido a que los equipos de ensayo presentan los resultados en valores numéricos y gráficos.

Una escala de estimación consiste en una escala que busca medir cómo se manifiesta una situación o conducta. (Arias, 2006, p. 71)

La escala de estimación numérica asigna las categorías o ítems descriptivos que componen la escala y los pasos a seguir mientras que la escala de estimación gráfica se caracteriza por ser una línea recta: horizontal, vertical y curva. Además, pueden contener rayas divisorias a lo largo de las mismas que ayudan al investigador a evaluar los resultados obtenidos.

2.9 Procesamiento de datos

La técnica que se utilizara para el procesamiento de datos es la estadística descriptiva que consiste en un conjunto de procedimientos que tiene por objeto presentar una masa de datos por medio de tablas, gráficos y/o medidas de resumen.

2.9.1 Herramienta para el procesamiento de datos

Una herramienta es el medio físico que nos permite registrar o medir la información. Para llevar a cabo los registros de los datos que se obtuvieron al ensayar las probetas de Al-Cu en las máquinas y/o equipos en el laboratorio, se utilizó las hojas de cálculo del programa Microsoft Excel 2016.

2.10 Procedimiento experimental

A continuación, se describe el proceso de forma general que se llevó a cabo para la realización del estudio.

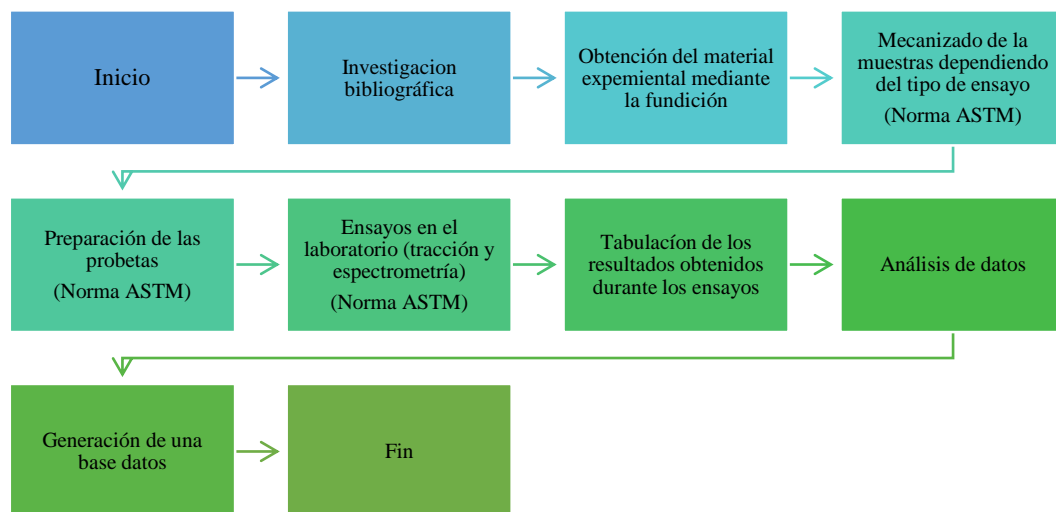


Figura 1-2: Proceso para realización del estudio

Fuente: Tipanluiza D, 2020

CAPÍTULO III

3 MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

3.1 Proceso de fundición

El proceso para obtener una pieza por fundición consta de las siguientes etapas:

3.1.1 *Diseño del modelo*

Se realizó el diseño de la pieza que esperamos obtener considerando la contracción del material.

3.1.2 *Moldeo*

Se diseñó el molde tomando en cuenta la geometría de la pieza a dar forma.

3.1.2.1 *Diseño y fabricación de los moldes desechables*

Para ello se utilizó un tubo de acero con 1,25 pulgadas de diámetro y un corte a una longitud de 80 cm con la amoladora, luego se sella uno de sus extremos con una platina cuadrada mediante soldadura eléctrica, así obteniendo un total de 5 moldes.



Figura 1-3: Soldadura de las
platinas

Fuente: Tipanluiza D, 2020



Figura 2-3: Moldes metálicos desechables

Fuente: Tipanluiza D, 2020

3.1.3 *Fusión y colada*

Para el cual se calienta el horno de crisol a 700 °C, temperatura que supera el punto de fusión del aluminio.

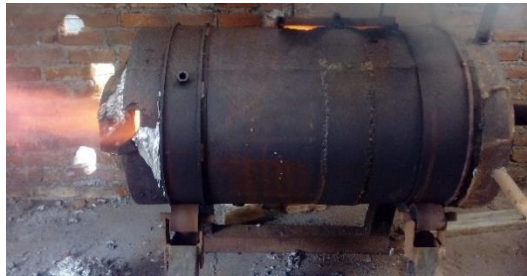


Figura 3-3: Horno de crisol a 700°C

Fuente: Tipanluiza D, 2020

A continuación, se pesó el material reciclado; cables de alta tensión para obtener el aluminio y conductores eléctricos para el cobre en función de la tabla 2-2.

Una vez el horno se encuentre a la temperatura especificada se carga el material reciclado requerida para obtener las diferentes combinaciones de la aleación, añadiendo bórax que descontamina la fundición, sal para dar brillo y ½ pastilla de cloro para eliminar los gases internos del fundido evitando la formación de poros. Después, se extrae la colada del horno y se deposita en un crisol para poder transportarlo.



Figura 4-3: Extracción de la colada del horno

Fuente: Tipanluiza D, 2020

3.1.4 *Vertido*

La colada del crisol se deposita en los moldes desechables correspondientes.



Figura 5-3: Deposición del fundido en los moldes

Fuente: Tipanluiza D, 2020

3.1.5 *Acabo y limpieza*

Una vez que la pieza se ha enfriado y solidificado se separó las piezas de los moldes metálicos desechables cortando por la mitad a ambos lados de los mismos al igual que las platinas con una amoladora así para todos los moldes.



Figura 6-3: Piezas extraídas de los moldes

Fuente: Tipanluiza D, 2020

Con las piezas extraídas de sus moldes se pudo continuar con el siguiente punto de la investigación.

Todo el proceso de fundición de las piezas se debe desarrollar usando el equipo de protección apropiado y aplicando las medidas de seguridad adecuadas para evitar lesiones graves ante un accidente.

3.2 Ensayo de espectrometría

El ensayo se realizó bajo la norma ASTM E3-11 (Guía estándar para la preparación de las muestras metalográficas). La preparación de los especímenes y el número de ensayos se tomó en cuenta las especificaciones de la normativa.

Se utilizó una sierra eléctrica para cortar las muestras. Cabe destacar que la sierra al encenderla de forma automática refrigera el elemento de corte y el material a trabajar para evitar posibles cambios en la estructura del material que pueda afectar a los resultados.



Figura 7-3: Muestras para el ensayo metalográfico

Fuente: Tipanluiza D, 2020

Para el ensayo se utilizó un espectrómetro de emisión óptica BRUKER Q2 ION el cual permitió determinar la composición química de las probetas con las diferentes combinaciones.




Figura 8-3: Muestra montada en el espectrómetro

Fuente: Tipanluiza D, 2020

Los resultados encontrados durante el ensayo de espectrometría se detallan a continuación:

Tabla 1-3: Composición química de la aleación Al 1% Cu


Bruker Analysis Report						
Sample:						
Analysis Time: 26.07.2019 15:20:23				Method: Al130		
	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	
∅	0,161	0,271	1,091	0,0082	0,038	
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]	
∅	<0,0050	<0,0050	0,0073	0,0070	<0,050	
	Sn [%]	V [%]	Zr [%]	Cd [%]	Co [%]	
∅	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	
	B [%]	Ag [%]	Bi [%]	Al [%]		
∅	0,0030	<0,0050	<0,0050	98,39		

Fuente: Autor

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

Como se observa en la tabla 1-3 las muestras luego del ensayo presentan una concentración de 1,091% (Cu) y 98,39% (Al) si lo comparamos con el teórico se tiene una diferencia de 0.101% (Cu) y 0.62% (Al).

Tabla 2-3: Composición química de la aleación Al 2% Cu


Bruker Analysis Report					
Sample:					
Analysis Time: 26.07.2019 15:25:36			Method: Al130		
	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
∅	0,139	0,317	2,147	0,0088	0,055
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
∅	<0,0050	<0,0050	0,011	<0,0050	<0,050
	Sn [%]	V [%]	Zr [%]	Cd [%]	Co [%]
∅	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050
	B [%]	Ag [%]	Bi [%]	Al [%]	
∅	0,0013	<0,0050	<0,0050	97,28	

Fuente: Autor

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

En la tabla 2-3 se visualiza que las probetas después del ensayo tienen una concentración de 2.147% (Cu) y 97.28% (Al), las cuales presentan una diferencia con el teórico de 0.16% (Cu) y 0.74% (Al).

Tabla 3-1: Composición química de la aleación Al 3% Cu


Bruker Analysis Report					
Sample:					
Analysis Time: 26.07.2019 15:28:01			Method: Al130		
	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
∅	0,171	0,300	3,037	0,0082	0,020
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
∅	<0,0050	<0,0050	0,017	<0,0050	<0,050
	Sn [%]	V [%]	Zr [%]	Cd [%]	Co [%]
∅	0,0057	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050
	B [%]	Ag [%]	Bi [%]	Al [%]	
∅	0,0023	<0,0050	<0,0050	96,41	

Fuente: Autor

Realizado por: Tipanluiza D, 2019

Como se ilustra en la tabla 3-3, se obtiene una concentración de 3,037% (Cu) y 96,41% (Al) en las muestras luego del ensayo, presentando una diferencia con el teórico de 0.067% (Cu) y 0.62% (Al).

Tabla 4-3: Composición química de la aleación Al 4% Cu


Bruker Analysis Report					
Sample:					
Analysis Time: 26.07.2019 15:31:59			Method: Al130		
	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
∅	0,163	0,325	4,078	0,0089	0,024
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
∅	<0,0050	<0,0050	0,025	<0,0050	<0,050
	Sn [%]	V [%]	Zr [%]	Cd [%]	Co [%]
∅	0,0065	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050
	B [%]	Ag [%]	Bi [%]	Al [%]	
∅	0,0020	<0,0050	<0,0050	95,33	

Fuente: Autor

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

Según la tabla 4-3 se obtiene una concentración de 4,078% (Cu) y 95,33% (Al) en las probetas después del ensayo, presentando una diferencia con el teórico de 0.118% (Cu) y 0.71% (Al).

Tabla 5-3: Composición química de la aleación Al 5% Cu

Bruker Analysis Report					
Sample:					
Analysis Time: 26.07.2019 15:39:34			Method: Al100		
	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
∅	0,162	0,394	4,905	0,011	0,048
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
∅	<0,0020	0,017	0,028	0,0037	<0,050
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Cd [%]
∅	0,021	<0,0030	0,0031	<0,0020	<0,0050
	Co [%]	B [%]	Ag [%]	Bi [%]	Ca [%]
∅	0,0032	<0,0010	<0,0010	<0,0060	0,020
	Al [%]				
∅	94,35				

Fuente: Autor

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

Como se indica en la tabla 5-3, las probetas luego del ensayo presentan una concentración de 4,905% (Cu) y 94,35% (Al), los cuales presenta una diferencia con el teórico de 0.045% (Cu) y 0.7% (Al). En la figura 9-3 se observa la apariencia de las muestras ensayadas.



Figura 9-3: Probetas ensayadas en el espectrómetro

Fuente: Tipanluiza D, 2020

3.3 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción se utilizó para evaluar la resistencia mecánica de las aleaciones de aluminio-cobre. En el cual, las muestras fueron estiradas a velocidad constante hasta la fractura, las mismas se produjo en un tiempo relativamente corto. En la figura 10-3 se visualiza la máquina para ensayos de tracción usada en el presente estudio.



Figura 10-3: Máquina universal de ensayos

Fuente: Tipanluiza D, 2020

El ensayo se realizó bajo la norma ASTM E8/E8M-13 (Métodos de prueba estándar para pruebas de tensión de materiales metálicos). La cual especifica que el número mínimo de probetas ensayadas debe ser cinco y como deben prepararse los especímenes para evitar excesiva variación en los resultados.

Para ello las muestras fueron cortadas con un arco de sierra como se ilustra en la figura 11-3.



Figura 11-3: Corte de las probetas

Fuente: Tipanluiza D, 2020

Luego se pasó al mecanizado de las mismas en un torno convencional cuya geometría debe cumplir con los requisitos de la normativa como se observa en la figura 12-3.

Dimensiones de la probeta:

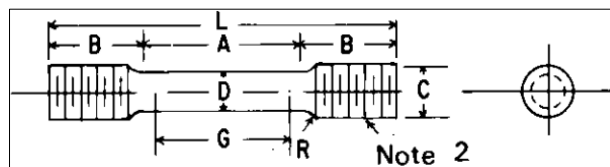


Figura 12-3: Geometría de la probeta del ensayo de tracción

Fuente: (American Tinning & Galvanized Company, 2017)

G—Gauge length	50 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]
R—Radius of fillet, min	10 [0.375]
A—Length of reduced section	56 [2.25] min
L—Overall length, approximate	145 [5]
B—Length of end section (Note 3)	35 [1.375] approximate
C—Diameter of end section	20 [0.75]
E—Length of shoulder and fillet section, approximate	
F—Diameter of shoulder	

Figura 13-3: Dimensiones de la probeta del ensayo de tracción

Fuente: (American Tinning & Galvanized Company, 2017)

Las probetas mecanizadas en el torno convencional se ilustran en la figura 14-3.



Figura 14-3: Probetas preparadas para realizar el ensayo de tracción

Fuente: Tipanluiza D, 2020

Sección inicial de la probeta:

$$A_0 = \pi * R^2 \quad (3-1)$$

Donde:

R : Radio de la probeta (6,25mm)

Así tenemos:

$$A_0 = \pi * (6,25 \text{ mm})^2 = 122,718 \text{ mm}$$

Las condiciones iniciales que se tomaron en cuenta para realizar el ensayo de tracción se detallan a continuación y el mismo se repite para cada una de las probetas con las diferentes combinaciones de aluminio y cobre.

Parametros			
Precarga	=	4000,00	N
Caida %	=	100,00	
Retorno Automatico	=	0,00	
Limite Fuerza	=	45000,00	N
Limite Desplazamiento	=	500,00	mm
Stop Ext	=	1000,00	mm
Velocidades			
Precarga	=	10,00	mm/min
Ensayo	=	5,00	mm/min
Retorno	=	20,00	mm/min
Posicionamiento	=	50,00	mm/min

Figura 15-3: Condiciones iniciales del ensayo

Fuente: Tipanluiza D, 2020

Una vez realizado el ensayo de tracción en la probeta se obtuvo los diagramas de esfuerzo-deformación que a posterior serán analizados para determinar las propiedades del material.

3.3.1 Aleación Al 99% de Al y 1% Cu

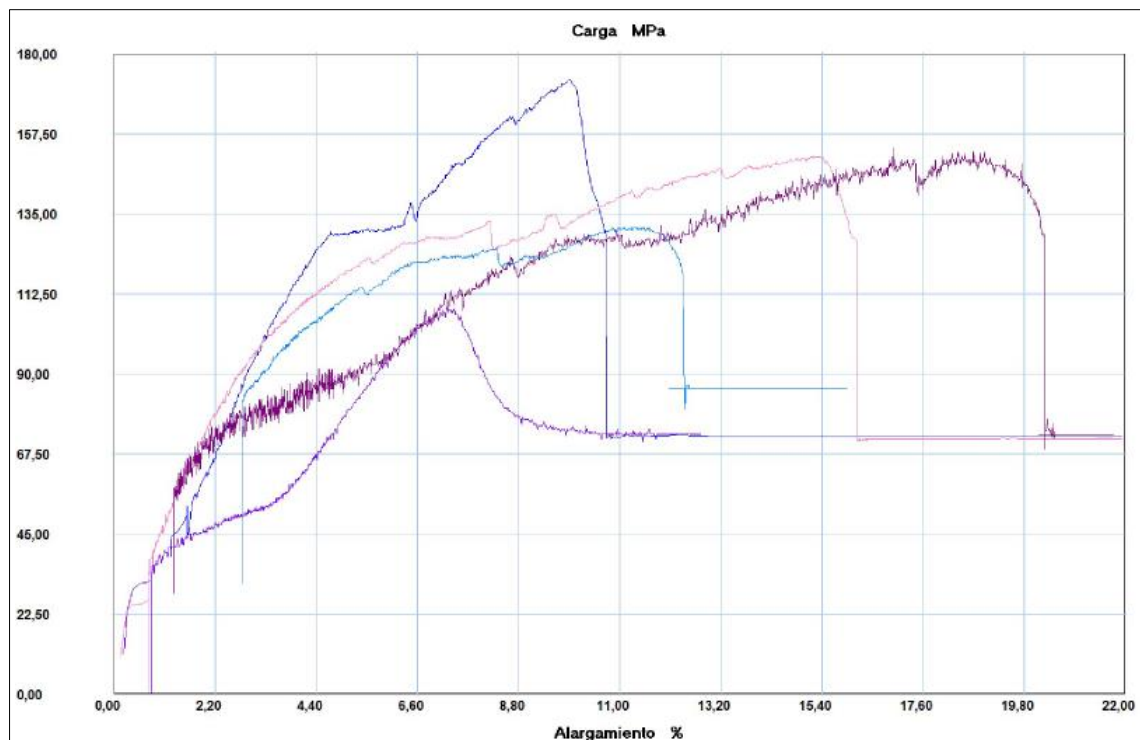


Gráfico 1-3: Curva esfuerzo-deformación de las muestras con 1% Cu

Fuente: Tipanluiza D, 2020

Para realizar el ANOVA de datos obtenidos del ensayo de tracción se utilizó la distribución normal.

Tabla 6-3: Análisis ANOVA de las muestras con 1% Cu

Probeta	FMax N	FRot N	FYield N	CMax MPa	CRot MPa	C.Yield MPa
1	21850,00	16350,00	6650,00	172,76	129,27	52,58
2	19650,00	16550,00	6700,00	151,28	127,42	51,58
3	13800,00	13550,00	4450,00	108,26	106,29	34,91
4	19300,00	18750,00	8200,00	153,56	149,19	65,24
5	16750,00	15600,00	8150,00	131,40	122,38	63,93
Media	18270,000	16160,000	6830,000	143,451	126,909	53,650
Mediana	19300,000	16350,000	6700,000	151,283	127,417	52,579
Desv. Std	3085,166	1872,298	1527,498	24,528	15,392	12,215
Coef. V.	0,169	0,116	0,224	0,171	0,121	0,228
Máximo	21850,000	18750,000	8200,000	172,758	149,187	65,244
Mínimo	13800,000	13550,000	4450,000	108,256	106,294	34,909
Rango	8050,000	5200,000	3750,000	64,502	42,892	30,336
CPK	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
+3 Sigma	27525,498	21776,894	11412,494	217,036	173,085	90,295
-3 Sigma	9014,502	10543,106	2247,506	69,867	80,733	17,004

Fuente: Autor

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

A continuación, se crea la base de datos de la aleación Al 1% Cu para lo cual se utilizó los datos indicados en la tabla 7-3 los cuales fueron obtenidos durante el ensayo de tracción.

Tabla 7-3: Datos de la aleación Al 1% Cu

Magnitud	Valor	Unidad
m	65.318 E-03	kg
V	2.58 E-05	m^3
A_p	122.718	mm
D_0	12.5	mm
D_f	12.12	mm^2
L_0	50	mm
L_f	54.62	mm
F_{max}	18270	N

Fuente: Autor

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

Finalmente, la base datos quedo determinada por las propiedades mecánicas, las cuales fueron calculadas obteniéndose como resultado final una media de las 5 probetas, las mismas se muestran en la tabla 8-3.

Tabla 8-3: Base de datos de la aleación Al 1 % Cu

Propiedad mecánica	Valor	Unidades
Módulo elástico	625.00	N/mm^2
Coefficiente de Poisson	0.329	N/D
Módulo cortante	205.48	N/mm^2
Densidad de masa	2531.70	kg/m^3
Límite de tracción	143.45	N/mm^2
Límite de elástico	53.65	N/mm^2

Fuente: Autor

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

Como se observa en los resultados obtenidos la aleación de aluminio-cobre con 1% Cu contiene porosidad, este defecto produce que el valor de la resistencia máxima a la tracción y la elongación del material este por debajo del valor normal para mayor comprensión véase la figura 16-3.



Figura 16-3: Probetas rotas con 1% Cu

Fuente: Tipanluiza D, 2020

3.3.2 Aleación Al 98% de Al y 2% Cu

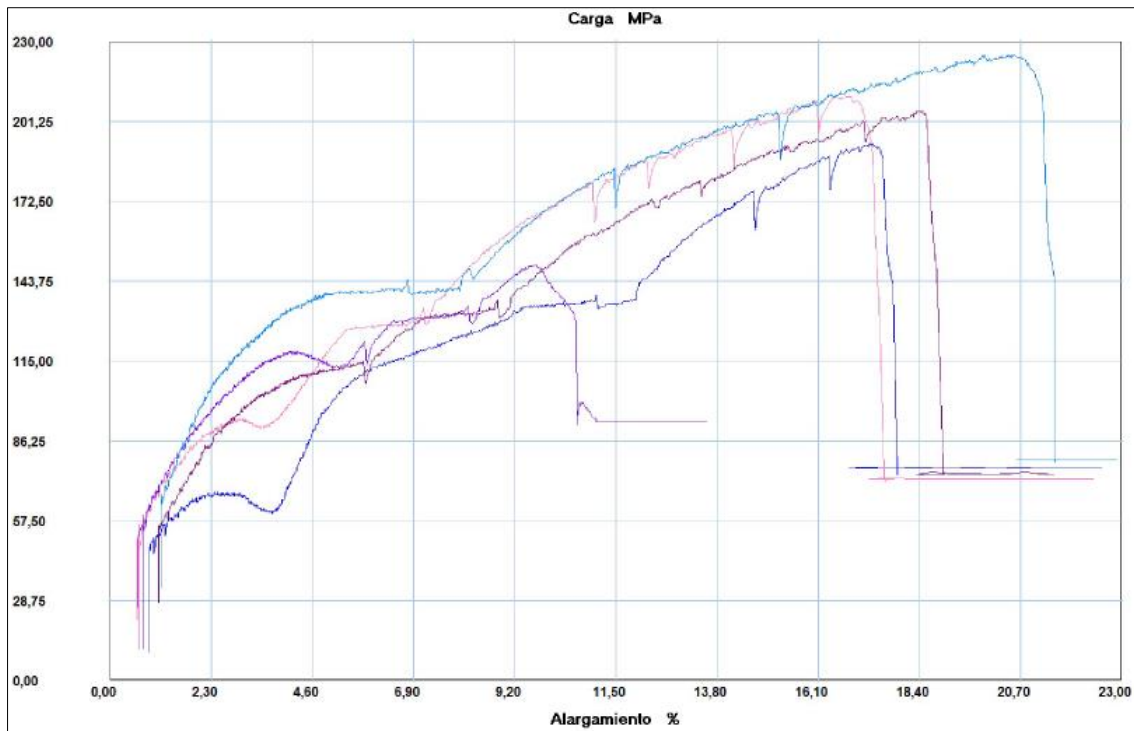


Gráfico 2-3: Curva esfuerzo-deformación de las muestras con 2% Cu

Fuente: Tipanluiza D, 2020

Se utilizó la distribución normal para el ANOVA de los datos obtenidos durante el ensayo de tracción.

Tabla 9-3: Análisis ANOVA de las muestras con 2% Cu

Probeta	FMax N	FRot N	FYield N	CMax MPa	CRot MPa	C.Yield MPa
1	23900,00	23200,00	7100,00	193,21	187,55	57,40
2	27650,01	25250,00	9050,00	210,25	192,00	68,82
3	19000,00	16450,00	8150,00	149,75	129,65	64,24
4	26150,01	25600,00	8250,00	205,14	200,82	64,72
5	26900,01	24750,00	9750,00	225,29	207,28	81,66
Media	24720,006	23050,000	8460,000	196,726	183,461	67,364
Mediana	26150,010	24750,000	8250,000	205,137	192,001	64,718
Desv. Std	3491,888	3801,809	1000,250	28,672	31,039	8,979
Coef. V.	0,141	0,165	0,118	0,146	0,169	0,133
Máximo	27650,010	25600,000	9750,000	225,287	207,281	81,656
Mínimo	19000,000	16450,000	7100,000	149,752	129,654	57,396
Rango	8650,010	9150,000	2650,000	75,535	77,627	24,260
CPK	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
+3 Sigma	35195,670	34455,426	11460,750	282,742	276,577	94,303
-3 Sigma	14244,342	11644,574	5459,250	110,710	90,344	40,426

Fuente: Autor

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

Para poder generar la base de datos de la aleación Al 2% Cu se utilizó los datos mostrados en la tabla 10-3 los cuales fueron obtenidos durante el ensayo de tracción.

Tabla 10-3: Datos de la aleación Al 2% Cu

Magnitud	Valor	Unidad
m	65.318 E-03	kg
V	2.54 E-05	m^3
A_0	122.718	mm
D_0	12.5	mm
D_f	12.1	mm^2
L_0	50	mm
L_f	54.78	mm
F_{max}	24720.006	N

Fuente: Autor

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

Por último, se calculó las propiedades mecánicas, obteniéndose como resultado final una media de las 5 probetas para generar la base de datos, la cual se ilustra en la tabla 11-3.

Tabla 11-3: Base de datos de la aleación Al 2 % Cu

Propiedad mecánica	Valor	Unidades
Módulo elástico	584.28	N/mm^2
Coefficiente de Poisson	0.335	N/D
Módulo cortante	209.58	N/mm^2
Densidad de masa	2571.57	kg/m^3
Límite de tracción	196.73	N/mm^2
Límite de elástico	67.36	N/mm^2

Fuente: Autor

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

Debido a que las muestras con 2% Cu presentan porosidad, los valores de la elongación y la resistencia a la tracción del material no son tan precisos para mayor comprensión véase la figura 17-3.



Figura 17-3: Probetas rotas con 2% Cu

Fuente: Tipanluzia D, 2020

3.3.3 Aleación Al 97% de Al y 3% Cu

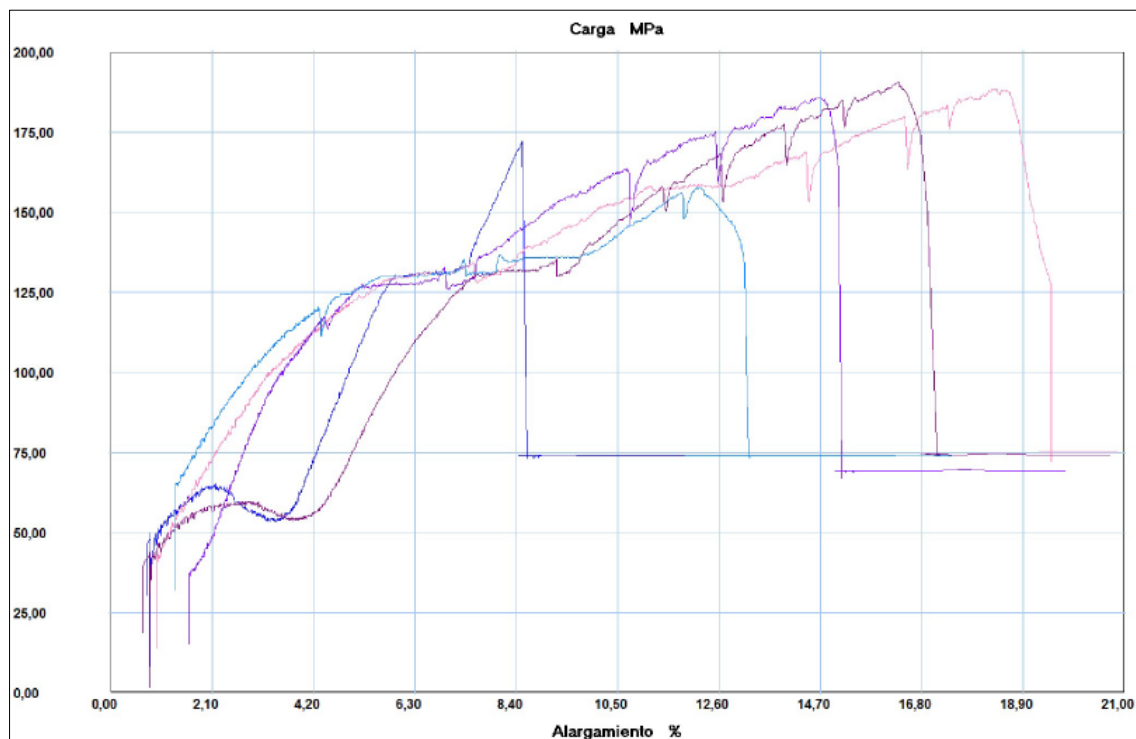


Gráfico 3-1: Curva esfuerzo-deformación de las muestras con 3% Cu

Fuente: Tipanluzia D, 2020

Después de realizar el ensayo de tracción se procedió con el ANOVA empleando la distribución de normal.

Tabla 12-3: Análisis ANOVA de las muestras con 3% Cu

Probeta	FMax N	FRot N	FYield N	CMax MPa	CRot MPa	C.Yield MPa
1	22000,00	22000,00	6400,00	172,04	172,04	50,05
2	24400,00	21250,00	7250,00	188,44	164,11	55,99
3	23300,00	22200,00	5850,00	185,68	176,92	46,62
4	24400,00	21650,00	6150,00	190,81	169,30	48,09
5	20250,00	17150,00	6650,00	157,61	133,49	51,76
Media	22870,000	20850,000	6460,000	178,917	163,172	50,502
Mediana	23300,000	21650,000	6400,000	185,683	169,304	50,048
Desv. Std	1766,918	2099,702	531,977	13,955	17,229	3,633
Coef. V.	0,077	0,101	0,082	0,078	0,106	0,072
Máximo	24400,000	22200,000	7250,000	190,809	176,917	55,991
Mínimo	20250,000	17150,000	5850,000	157,614	133,485	46,620
Rango	4150,000	5050,000	1400,000	33,195	43,432	9,371
CPK	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
+3 Sigma	28170,755	27149,107	8055,932	220,782	214,859	61,401
-3 Sigma	17569,245	14550,893	4864,068	137,052	111,484	39,604

Fuente: Autor

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

Con el fin de crear la base de datos de la aleación Al 3% Cu se usó los datos que se visualizan en la tabla 13-3, los mismos fueron obtenidos durante el ensayo de tracción.

Tabla 13-3: Datos de la aleación Al 3% Cu

Magnitud	Valor	Unidad
m	68.947 E-03	kg
V	2.61 E-05	m^3
A_0	122.718	mm
D_0	12.5	mm
D_f	12.16	mm^2
L_0	50	mm
L_f	54.28	mm
F_{max}	22870	N

Fuente: Autor

Realizado por: Tipanluiza D, 2019

Para finalizar, se obtuvo un promedio de las propiedades mecánicas de las 5 probetas para desarrollar la base de datos, la cual se observa en la tabla 14-3.

Tabla 14-3: Base de datos de la aleación Al 3 % Cu

Propiedad mecánica	Valor	Unidades
Módulo elástico	523.364	N/mm^2
Coeficiente de Poisson	0.318	N/D
Módulo cortante	198.582	N/mm^2
Densidad de masa	2641.638	kg/m^3
Límite de tracción	178.917	N/mm^2

Límite de elástico	50.502	N/mm^2
--------------------	--------	----------

Fuente: Autor

Realizado por: Tipanluzia D, 2020

El valor de la elongación y la resistencia a la tracción de las muestras con 3% Cu es menor que el normal debido a que presenta porosidad en el material para mayor comprensión véase la figura 18-3.



Figura 18-3: Probetas rotas con 3% Cu

Fuente: Tipanluzia D, 2020

3.3.4 Aleación Al 96% de Al y 4% Cu

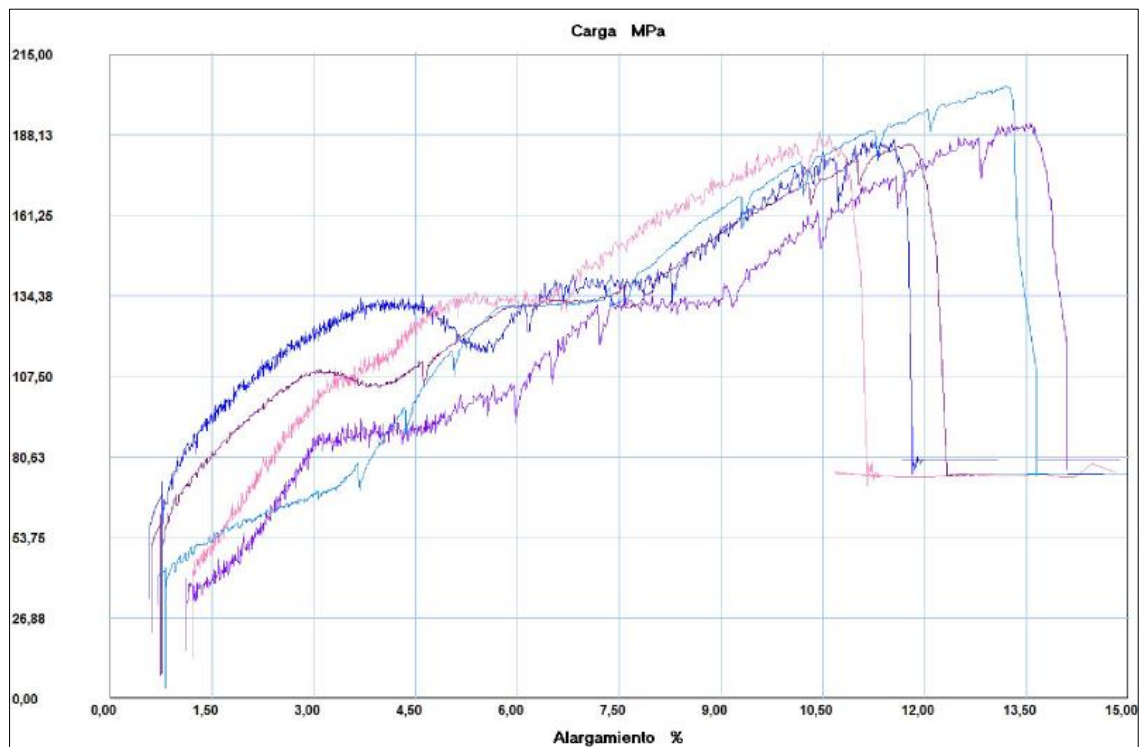


Gráfico 4-3: Curva esfuerzo-deformación de las muestras con 4% Cu

Fuente: Tipanluiza D, 2020

Para definir el ANOVA de los datos obtenidos del ensayo de tracción se utilizó la distribución normal.

Tabla 15-3: Análisis ANOVA de las muestras con 4% Cu

Probeta	FMax N	FRot N	FYield N	CMax MPa	CRot MPa	C.Yield MPa
1	22700,00	21350,00	9150,00	186,46	175,38	75,16
2	23900,00	22150,00	6900,00	188,97	175,13	54,56
3	24400,00	20350,00	7000,00	192,01	160,14	55,09
4	23500,00	20400,00	8650,00	184,93	160,53	68,07
5	26100,01	25500,00	6450,00	204,10	199,41	50,44
Media	24120,002	21950,000	7630,000	191,295	174,118	60,662
Mediana	23900,000	21350,000	7000,000	188,966	175,130	55,085
Desv. Std	1269,650	2119,257	1190,903	7,646	15,986	10,464
Coef. V.	0,053	0,097	0,156	0,040	0,092	0,172
Máximo	26100,010	25500,000	9150,000	204,103	199,411	75,161
Mínimo	22700,000	20350,000	6450,000	184,928	160,140	50,439
Rango	3400,010	5150,000	2700,000	19,175	39,271	24,722
CPK	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
+3 Sigma	27928,951	28307,771	11202,709	214,233	222,077	92,054
-3 Sigma	20311,053	15592,229	4057,291	168,357	126,159	29,270

Fuente: Autor

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

En la tabla 16-3 se indica los datos necesarios para desarrollar la base de datos de la aleación Al 4% Cu, los cuales fueron obtenidos durante el ensayo de tracción.

Tabla 16-3: Datos de la aleación Al 4% Cu

Magnitud	Valor	Unidad
m	68.947 E-03	kg
V	2.65 E-05	m^3
A_p	122.718	mm
D_0	12.5	mm
D_f	12.21	mm^2
L_0	50	mm
L_f	53.96	mm
F_{max}	24120.002	N

Fuente: Autor

Realizado por: Tipanluiza D, 2019

Al final, se hizo un promedio de las propiedades mecánicas ya que son 5 probetas ensayadas para generar la base de datos, la misma se ilustra en la tabla 17-3.

Tabla 17-3: Base de datos de la aleación Al 4 % Cu

Propiedad mecánica	Valor	Unidades
Módulo elástico	694.444	N/mm^2
Coefficiente de Poisson	0.293	N/D
Módulo cortante	268.555	N/mm^2
Densidad de masa	2601.764	kg/m^3
Límite de tracción	191.295	N/mm^2
Límite de elástico	60.662	N/mm^2

Fuente: Autor

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

Tanto los valores de la elongación como la resistencia a la tracción de las muestras con 4% Cu debido a la presencia de porosidad los valores respectivos están por debajo de lo normal para mejor comprensión véase la figura 29-3.



Figura 19-3: Probetas rotas con 4% Cu

Fuente: Tipanluiza D, 2019

3.3.5 Aleación Al 95% de Al y 5% Cu

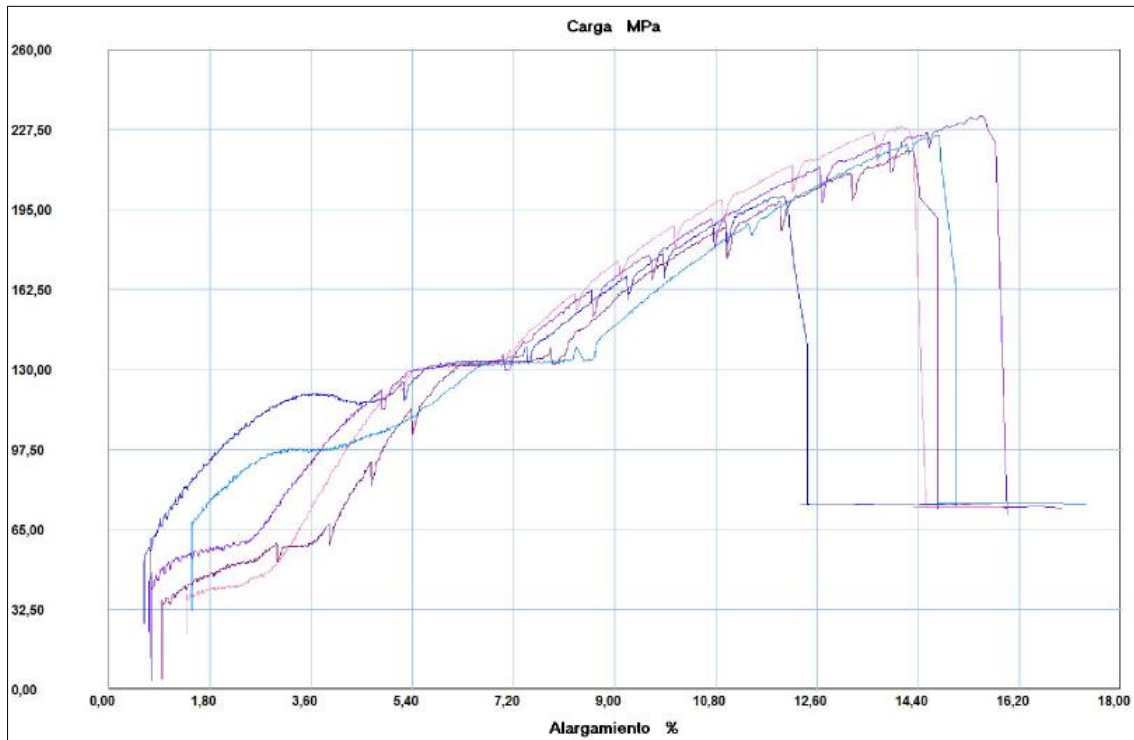


Gráfico 5-3: Curva esfuerzo-deformación de las muestras con 5% Cu

Fuente: Tipanluz D, 2020

Se utilizó la distribución normal para realizar el ANOVA de los resultados obtenidos durante el ensayo de tracción.

Tabla 18-3: Análisis ANOVA de las muestras con 5% Cu

Probeta	FMax N	FRot N	FYield N	CMax MPa	CRot MPa	C.Yield MPa
1	25400,00	24800,00	8800,00	200,51	195,77	69,47
2	29350,01	28300,01	4950,00	228,80	220,61	38,59
3	29800,01	28400,01	6650,00	233,04	222,09	52,00
4	27600,01	26650,01	7500,00	218,91	211,38	59,49
5	28400,01	28350,01	6900,00	224,90	224,50	54,64
Media	28110,008	27300,008	6960,000	221,232	214,871	54,837
Mediana	28400,010	28300,010	6900,000	224,900	220,615	54,641
Desv. Std	1737,962	1579,956	1397,945	12,697	11,777	11,267
Coef. V.	0,062	0,058	0,201	0,057	0,055	0,205
Máximo	29800,010	28400,010	8800,000	233,037	224,504	69,468
Mínimo	25400,000	24800,000	4950,000	200,510	195,774	38,588
Rango	4400,010	3600,010	3850,000	32,527	28,731	30,880
CPK	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
+3 Sigma	33323,895	32039,877	11153,835	259,323	250,204	88,638
-3 Sigma	22896,121	22560,139	2766,165	183,140	179,539	21,036

Fuente: Autor

Realizado por: Tipanluz D, 2020

Como se puede observar en la tabla 19-3 se indican los datos necesarios para generar la base de datos de la aleación Al 5% Cu, los cuales fueron extraídos durante el ensayo de tracción.

Tabla 19-3: Datos de la aleación Al 5% Cu

Magnitud	Valor	Unidad
m	67.132 E-03	kg
V	2.584 E-05	m^3
A_p	122.718	mm
D_0	12.5	mm
D_f	12.18	mm^2
L_0	50	mm
L_f	54.34	mm
F_{max}	28110.008	N

Fuente: Autor

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

A continuación, se calculó las propiedades mecánicas correspondientes para luego realizar un promedio de las 5 probetas y crear la base de datos, la cual se visualiza en la tabla 20-3.

Tabla 20-3: Base de datos de la aleación Al 5 % Cu

Propiedad mecánica	Valor	Unidades
Módulo elástico	566.820	N/mm^2
Coefficiente de Poisson	0.295	N/D
Módulo cortante	218.861	N/mm^2
Densidad de masa	2598.002	kg/m^3
Límite de tracción	221.232	N/mm^2
Límite de elástico	54.837	N/mm^2

Fuente: Autor

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

Los valores obtenidos de las muestras con 5% Cu para la elongación y la resistencia a la tracción se puede notar que los mismos son menores a lo normal, esto se debió a la presencia de porosidad en el material para mejor comprensión véase la figura 20-3.



Figura 20-3: Probetas rotas con 4% Cu

Fuente: Tipanluiza D, 2020

3.3.6 Implementación de la base de datos

Para implementar la base de datos en el Software SolidWorks se tomó como ejemplo la aleación Al 5% Cu. Para ello se crea un nuevo material en la biblioteca como se visualiza en la figura 21-3.

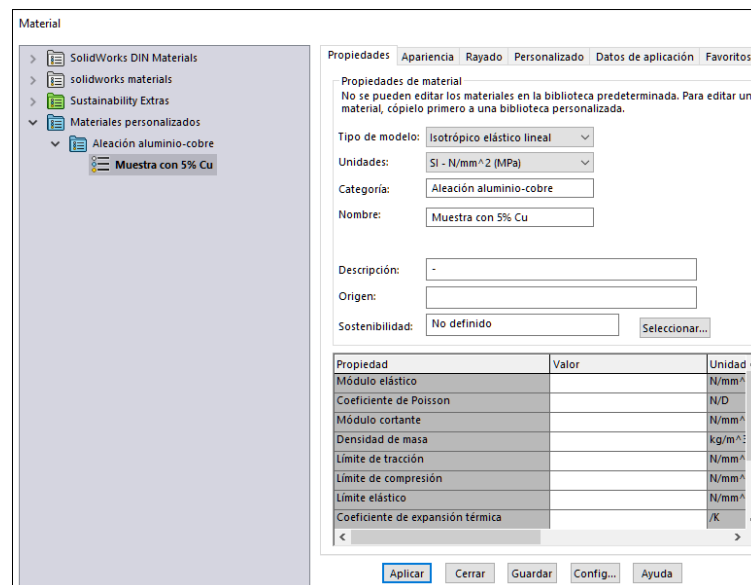


Figura 21-3: Creación del nuevo material en el software SolidWorks

Fuente: Tipanluiza D, 2020

A continuación, ingresan los datos de la base generada en la planilla dentro de la biblioteca del software SolidWorks.

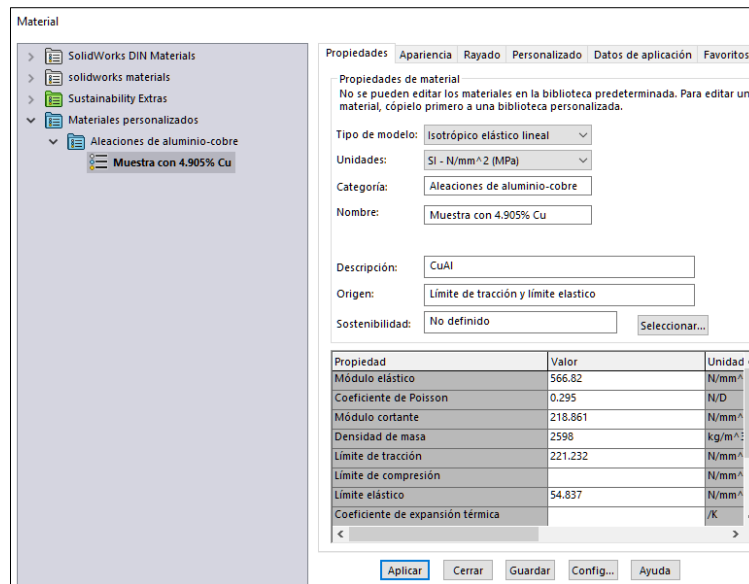


Figura 22-3: Datos ingresados en la planilla

Fuente: Tipanluiza D, 2020

3.4 Prueba de hipótesis

La prueba de hipótesis se realizó basándose en el estadístico Z, el cual sigue una distribución normal.

3.4.1 Hipótesis

Hipótesis nula (H_0): Se acepta que el porcentaje de no cobre genera un aumento de la resistencia de las aleaciones Al-Cu.

Hipótesis alternativa (H_1): Se acepta que el porcentaje de cobre genera un aumento de la resistencia de las aleaciones Al-Cu.

3.4.2 Modelo matemático

$$H_0: \mu_0 \leq 186$$

$$H_1: \mu_0 > 186$$

3.4.3 Nivel de significancia

Se indicó el valor del nivel de significancia es decir la probabilidad que se rechace la hipótesis nula cuando esta es verdadera. Por tanto, un valor más pequeño significa menor probabilidad de cometer un error de tipo 1, pero habrá mayor posibilidad de cometer un error tipo 2 y viceversa

- *Error tipo 1*: Probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando en realidad es verdadera.
- *Error tipo 2*: Probabilidad de aceptar la hipótesis nula cuando en realidad es falsa.

Para el presente estudio se seleccionó un nivel de confianza del 95% y un nivel de significancia del 5%.

3.4.4 Grados de libertad

Los grados de libertad representa el tamaño de la tabla. Así los grados de libertad de una fila es el número de filas menos uno y los grados de libertad de una columna es el número de columnas menos uno.

$$GL = (m - 1) * (n - 1) \quad (2-3)$$

Donde:

m: Número de filas

n: Número de columnas

GL: Grados de libertad

3.4.5 Cálculo del valor estadístico y crítico Z

Para ello se consideró que se tiene una resistencia a la tracción y límite elástico nominal, el cual se determinó realizando un promedio de los 5 tipos de muestra y la desviación estándar correspondiente del ANOVA de los datos obtenidos durante el ensayo de tracción.

Para calcular el valor estadístico Z se emplea las siguientes ecuaciones:

$$Z_c = \frac{\bar{x} - u}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \quad (3-3)$$

$$Z_{t\alpha} = \alpha \quad (4-3)$$

Donde:

Z_c : Valor estadístico calculado

\bar{x} : Promedio

σ : Desviación estándar

u : Media

$Z_{t\alpha}$: Valor crítico de tabla

α : Nivel de significancia

Datos:

$$\bar{x} = 2554$$

$$\sigma = 1025$$

$$n = 5$$

$$\alpha = 0.05$$

Reemplazando datos en la ecuación 3-3 y 4-3 se completa la tabla 21-3 y 3-22.

Tabla 21-3: Comparación entre los valores críticos Z del σ_{max}

Probetas	Zc	Zt	Decisión
Aleación Al 1% Cu	-3.879	-1.645	Se rechaza H0
Aleación Al 2% Cu	0.836	-1.645	No se rechaza H0
Aleación Al 3% Cu	-1.135	-1.645	No se rechaza H0
Aleación Al 4% Cu	1.549	-1.645	No se rechaza H0
Aleación Al 5% Cu	6.205	-1.645	No se rechaza H0

Fuente: Autor

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

Tabla 22-3: Comparación entre los valores críticos Z del σ_y

Probetas	Zc	Zt	Decisión
Aleación Al 1% Cu	-0.613	-1.645	No se rechaza H0
Aleación Al 2% Cu	2.581	-1.645	No se rechaza H0
Aleación Al 3% Cu	-3.999	-1.645	Se rechaza H0
Aleación Al 4% Cu	0.783	-1.645	No se rechaza H0
Aleación Al 5% Cu	-0.429	-1.645	No se rechaza H0

Fuente: Autor

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

Regla de decisión:

- Si $Z_c \geq Z_t$ no se debe rechazar H0.
- Si $Z_c < Z_t$ se debe aceptar H1.

A la prueba de hipótesis se lo complementó con un gráfico del σ_{max} , σ_y versus el porcentaje de cobre de las muestras, como se visualiza en el grafico 6-3.

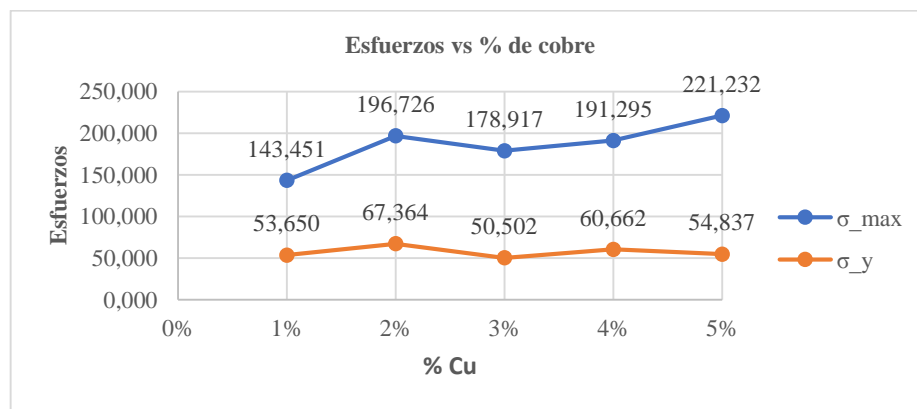


Gráfico 6-3: Comparación del σ_{max} y el σ_y de las muestras

Realizado por: Tipanluiza D, 2020

3.4.6 Toma de decisión y conclusión

Al realizar la prueba de hipótesis para la resistencia a la tracción (tabla 21-3) se observa que para las cuatro muestras se acepta la hipótesis nula mientras que para la probeta con 1% de cobre se rechaza la misma y se acepta la alternativa que menciona: “No se acepta que el porcentaje de cobre genera un aumento de la resistencia de las aleaciones Al-Cu”.

Con respecto al límite elástico (tabla 22-3) también se visualiza que en los cuatro tipos de probetas se acepta la hipótesis nula mientras que la probeta con 3% de cobre se rechaza la misma y se acepta la alternativa.

Al analizar los datos obtenidos y realizado la prueba de hipótesis para la resistencia a la tracción se concluye que el porcentaje de cobre aumenta la resistencia mecánica de las aleaciones de aluminio-cobre obsérvese el gráfico 6-3. Así también se visualiza que el límite elástico permanece constante a medida que aumenta el porcentaje de cobre en las probetas esto quiere decir que el comportamiento de la zona elástica es similar para todas las muestras.

CONCLUSIONES

La caracterización de un material como parte de la ingeniería de materiales es un método ampliamente utilizado para extraer información acerca de las propiedades de los materiales mediante equipos y/o máquinas calibradas bajo ciertos parámetros, así pudiendo destinar dicho material para una determinada aplicación.

Durante el proceso de fundición se obtuvieron los diferentes tipos de muestras y se pudo constatar a posterior a través de los ensayos que se eliminó de forma eficaz las impurezas de la colada. Lo que no sucedió con la porosidad presente en las probetas ya que no se pudieron reducirlas eficientemente durante el proceso. Lo cual también influyó a la hora de mecanizar las probetas en el torno convencional ya que las mismas pudiese llegar a romperse.

Se pudo corroborar mediante el ensayo espectrométrico que el porcentaje de Al y Cu presente en las probetas no tienen mucha diferencia con respecto a lo que se planteó durante el proceso de fundición de los materiales reciclados. Así mismo, se observó que el contenido de cobre de las muestras está directamente relacionado con los valores de las propiedades mecánicas obtenidas.

Los valores de las propiedades mecánicas de las probetas están determinados por la composición química y la calidad del acabado superficial de las mismas. Las cuales a su vez dependen del proceso de fundición. Debido a esto, los valores obtenidos durante el ensayo de tracción decrecen por debajo del valor normal, pudiéndose notar en la resistencia mecánica y la elongación de cada una de las muestras. Por tanto, esta varianza se produjo por la porosidad del material, el cual se puede visualizar en las probetas.

Al analizar los datos obtenidos de las probetas durante los ensayos se observó que a medida que el porcentaje de cobre aumenta en la aleación de aluminio-cobre, las probetas presentan mejores propiedades mecánicas. Por ejemplo: la resistencia a la tracción para las probetas con 5% de cobre se tuvo un valor promedio de 221,232 MPa frente a 143,451 Mpa de las muestras con 1% de cobre, siendo este último el valor más bajo encontrado.

Las bases de datos generadas de las muestras del presente estudio experimental están listas para implementarse a la librería de materiales como un nuevo material ya sea en un software de diseño y/o simulación como SolidWorks y Ansys. Además, de encontrarse adecuadas a nuestro medio.

RECOMENDACIONES

Hacer la revisión de la literatura respectiva para diseñar la metodología y los criterios del experimento adecuadas para dar solución a la problemática y cumplir los objetivos propuestos de este trabajo de titulación. Así también sustentar la base teórica del experimento.

Durante el proceso de fundición de los diferentes tipos de muestras se recomienda añadir bórax, sal y cloro a la colada en las cantidades apropiadas que garantice el aumento de la pureza en la aleación de aluminio-cobre. Así también, poder eliminar los gases atrapados que induce a la formación de poros en la estructura del material para así obtener resultados confiables a posterior.

En función de los resultados obtenidos en el presente estudio se recomienda aumentar el número de muestras ya que mejorara la precisión de los resultados. Para estudios experimentales siempre es necesario realizar el ANOVA de los datos mediante un software estadístico y/o hojas de cálculo debido a que los mismos son imposibles de realizarlos manualmente. Además, permiten comprender de mejor manera los resultados obtenidos por medio de gráficos estadísticos.

De acuerdo con el presente estudio, las aleaciones de aluminio-cobre incrementa la resistencia mecánica a medida que aumenta el porcentaje de cobre en el material por lo que sería ideal para ciertas aplicaciones especialmente en la fabricación de partes y piezas automotrices.

La preparación de las probetas, procedimiento de ensayo y calibración de los equipos y/o máquinas es aconsejable realizarlos bajo la norma ASTM ya que es la aceptada en nuestro país. Además de ser reconocida internacionalmente y ampliamente utilizada por instituciones y/o empresas.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN TINNING & GALVANIZED COMPANY. *Ensayos estandarizados.* [En línea] 2017. [Consulta: 20 noviembre 2019]. Disponible en: <http://www.galvanizeit.com/uploads/ASTM-E-8-yr-13.pdf>

APPLUS+. *Ensayos destructivos de materiales.* [En línea] 2018. [Consulta: 18 julio 2019]. Disponible en: <https://www.applus.com/global/es/what-we-do/sub-service-sheet/ensayos-destructivos-de-materiales>.

ARIAS, Fidias. *El proyecto de investigación.* 6ª ed. Caracas-Venezuela: Episteme, C.A., 2006, pp.13-64.

ASHBY, Michael; & JONES, David. *Materiales para Ingeniería Vol. 1: Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño.* 1ª ed. Bracelona-España: REVERTÉ, S. A., 2008, pp. 31-39.

ASHBY, Michael; & JONES, David. *Materiales para Ingeniería Vol. 2: Introducción a la microestructura, el procesamiento y el diseño.* 1ª ed. Barcelona-España: REVERTÉ, S.A, 2009, pp. 119-132.

BALESTRINI, Mirian. *Como se elabora un proyecto de investigación.* 7ª ed. Caracas-Venezuela: BL Consultores Asociados, 2006, pp. 91-191.

BRICEÑO, Charlis; et al. *Ensayo materiales destructivos y no destructivos.* [En línea] 2017. [Consulta: 18 julio 2019]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/charlistareas/ensayo-materiales-destructivos-y-no-destructivos>

CATEDU. *Tema 2. Ensayos de materiales.* [En línea] 2016. [Consulta: 18 julio 2019]. Disponible en: <http://e-ducativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4913/html/index.html>

CODELCO. *Historia del cobre.* [En línea] 2019. [Consulta: 11 julio 2019]. Disponible en: https://www.codelco.com/historia-del-cobre/prontus_codelco/2011-06-03/222414.html

DE LA CRUZ, Antonio. *Análisis del comportamiento metalúrgico y propiedades mecánicas en uniones de aleaciones de aluminio 6061-t6 y 7075-t6 para aplicaciones en industria de transporte unidas mediante el proceso de soldadura GTAW.* (Trabajo de Titulación). Corporación Mexicana de Investigación en Materiales. Saltillo, México. 2015, pp. 15-59.

DECONCEPTOS. *Concepto de cobre.* [En línea] 2015. [Consulta: 11 julio 2019]. Disponible en: <https://deconceptos.com/ciencias-naturales/cobre>

EL ESQUIÚ. *Una breve historia del cobre.* [En línea] 2013. [Consulta: 18 julio 2019]. Disponible en: <https://www.elesqui.com/sociedad/2013/5/16/una-breve-historia-del-cobre-109997.html>

ESMERALDA, Alma. 2012. *Propiedades mecánicas en aleaciones de aluminio vaciadas desde temperatura ambiente hasta 300° c.* (Trabajo de Titulación). Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León, México. 2012, pp. 06-52.

GIL, Francisco; et al. *Aleaciones ligeras.* 1ª ed. Barcelona-España: Edicions UPC, 2001, pp. 13-48.

GROOVER, Mikell. *Fundamentos de manufactura moderna.* 3ª ed. México: McGraw-Hill/Interamericana, S.A., 2007, pp. 194-242.

GUSTAVO, Ernesto. *Estructura y propiedades de las aleaciones.* [En línea] 2013. [Consulta: 18 julio 2019]. Disponible en: https://www.ing.unlp.edu.ar/catedras/M0624/descargar.php?secc=0&id=M0624&id_inc=2717

HERNÁNDEZ, Roberto; et al. *Metodología de la investigación.* 5ª ed. México D.F.: McGraw-Hill, 2010, pp. 118-194.

KALPAKJIAN, Serope; & SCHMID, Steven. *Manufactura, Ingeniería y Tecnología.* 5ª ed. México: Pearson Educación de Mexico, S.A., 2008, pp. 261-315.

MANGONON, Pat. *Ciencia De Los Materiales, Selección y Diseño.* 1ª ed. México: Pearson Educación, 2001, pp. 129-519.

MARTINEZ, José. *Estudio de la aleación de aluminio 6063-t5 utilizada en pasamanos de buses para disminuir el riesgo de contaminación biológica con ensayos en ambientes controlados.* (Trabajo de Titulación). Universidad Técnica de Ambato. Ambato, Ecuador. 2017, pp. 05-32.

MÁXIMA URIARTE, Julia. *-Definición y características-Aluminio.* [En línea] 2017. [Consulta: 15 julio 2019]. Disponible en: <https://www.caracteristicas.co/aluminio/>

OPOSINET. *Tema 11-Ensayos metalográficos.* [En línea] 2019. [Consulta: 18 julio 2019]. Disponible en: <https://www.oposinet.com/temario-de-fabricacion-mecanica-secundaria/temario-2-fabricacion-mecanica/tema-11-ensayos-metalograficos-fundamento-equipos-empleados-technicas-aplicables-a-los-ensayos-macrogficos-y-micrograficos-preparacin-de-probetas-y-muestras-2/>

PERÉZ, Guillermo. 2019. *Espectrometría de emisión.* [En línea] 2019. [Consulta: 18 julio 2019]. Disponible en: https://www.espectrometria.com/espectrometra_de_emisin

SMITH, William; & HASHEMI, Javad. 2006. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. 4^a ed. México, D.F.: McGRAW-HILL Interamericana Editores, S. A. DE C.V., 2006, pp. 256-273. .

SORIA, Ricardo. *Aplicación de la técnica analítica de espectrometría de emisión óptica de plasma*. [En línea] 2017. [Consulta: 18 julio 2019]. Disponible en: https://www.google.com/search?biw=1366&bih=629&ei=iz8xXZqJOKLl5gLo_pHoDg&q=Aplicaci%C3%B3n+De+La+T%C3%A9cnica+Anal%C3%ADtica+De+Espectrometr%C3%ADa+De+Emisi%C3%B3n&q=Aplicaci%C3%B3n+De+La+T%C3%A9cnica+Anal%C3%ADtica+De+Espectrometr%C3%ADa+De+Emisi%C3%B3n

TORRES, Manuel. *Metales pesados*. [En línea] 2015. [Consulta: 11 julio 2019]. Disponible en: https://www.edu.xunta.gal/centros/espazoAbalar/aulavirtual2/pluginfile.php/249/mod_resource/content/1/10_paquetes/Paquetes_web/3_materiales/531_metales_pesados.html

VISALCA. *Aislamientos Visalca*. [En línea] 2019. [Consulta: 10 julio 2019]. Disponible en: <https://www.aislamiento-visalca.com/es/blog/la-historia-del-aluminio/>

ANEXOS

ANEXO A: VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN NORMAL Z (0.05)

El valor de la tabla para z es el área bajo la curva de la normal estándar a la izquierda de z

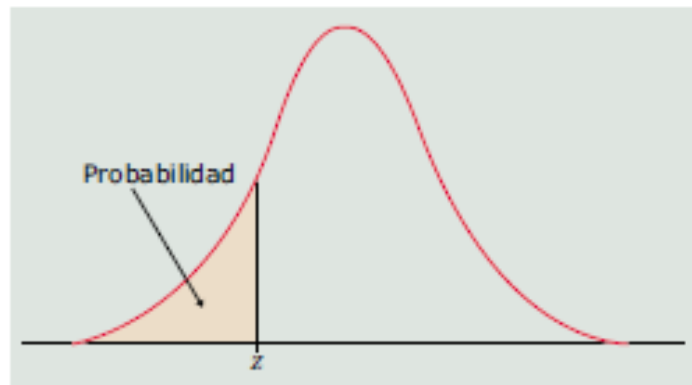


TABLA A: Probabilidades de la normal estándar

z	.00	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09
-3.4	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0002
-3.3	.0005	.0005	.0005	.0004	.0004	.0004	.0004	.0004	.0004	.0003
-3.2	.0007	.0007	.0006	.0006	.0006	.0006	.0006	.0005	.0005	.0005
-3.1	.0010	.0009	.0009	.0009	.0008	.0008	.0008	.0008	.0007	.0007
-3.0	.0013	.0013	.0013	.0012	.0012	.0011	.0011	.0011	.0010	.0010
-2.9	.0019	.0018	.0018	.0017	.0016	.0016	.0015	.0015	.0014	.0014
-2.8	.0026	.0025	.0024	.0023	.0023	.0022	.0021	.0021	.0020	.0019
-2.7	.0035	.0034	.0033	.0032	.0031	.0030	.0029	.0028	.0027	.0026
-2.6	.0047	.0045	.0044	.0043	.0041	.0040	.0039	.0038	.0037	.0036
-2.5	.0062	.0060	.0059	.0057	.0055	.0054	.0052	.0051	.0049	.0048
-2.4	.0082	.0080	.0078	.0075	.0073	.0071	.0069	.0068	.0066	.0064
-2.3	.0107	.0104	.0102	.0099	.0096	.0094	.0091	.0089	.0087	.0084
-2.2	.0139	.0136	.0132	.0129	.0125	.0122	.0119	.0116	.0113	.0110
-2.1	.0179	.0174	.0170	.0166	.0162	.0158	.0154	.0150	.0146	.0143
-2.0	.0228	.0222	.0217	.0212	.0207	.0202	.0197	.0192	.0188	.0183
-1.9	.0287	.0281	.0274	.0268	.0262	.0256	.0250	.0244	.0239	.0233
-1.8	.0359	.0351	.0344	.0336	.0329	.0322	.0314	.0307	.0301	.0294
-1.7	.0446	.0436	.0427	.0418	.0409	.0401	.0392	.0384	.0375	.0367
-1.6	.0548	.0537	.0526	.0516	.0505	.0495	.0485	.0475	.0465	.0455
-1.5	.0668	.0655	.0643	.0630	.0618	.0606	.0594	.0582	.0571	.0559
-1.4	.0808	.0793	.0778	.0764	.0749	.0735	.0721	.0708	.0694	.0681
-1.3	.0968	.0951	.0934	.0918	.0901	.0885	.0869	.0853	.0838	.0823
-1.2	.1151	.1131	.1112	.1093	.1075	.1056	.1038	.1020	.1003	.0985
-1.1	.1357	.1335	.1314	.1292	.1271	.1251	.1230	.1210	.1190	.1170
-1.0	.1587	.1562	.1539	.1515	.1492	.1469	.1446	.1423	.1401	.1379
-0.9	.1841	.1814	.1788	.1762	.1736	.1711	.1685	.1660	.1635	.1611
-0.8	.2119	.2090	.2061	.2033	.2005	.1977	.1949	.1922	.1894	.1867
-0.7	.2420	.2389	.2358	.2327	.2296	.2266	.2236	.2206	.2177	.2148
-0.6	.2743	.2709	.2676	.2643	.2611	.2578	.2546	.2514	.2483	.2451
-0.5	.3085	.3050	.3015	.2981	.2946	.2912	.2877	.2843	.2810	.2776
-0.4	.3446	.3409	.3372	.3336	.3300	.3264	.3228	.3192	.3156	.3121
-0.3	.3821	.3783	.3745	.3707	.3669	.3632	.3594	.3557	.3520	.3483
-0.2	.4207	.4168	.4129	.4090	.4052	.4013	.3974	.3936	.3897	.3859
-0.1	.4602	.4562	.4522	.4483	.4443	.4404	.4364	.4325	.4286	.4247
-0.0	.5000	.4960	.4920	.4880	.4840	.4801	.4761	.4721	.4681	.4641

ANEXO B: MECANIZADO DE LAS PROBETAS EN EL TORNO CONVENCIONAL



ANEXO C: PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS PARA LOS ENSAYOS

