



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MANABÍ

FACULTAD DE CIENCIAS MATEMÁTICAS, FÍSICAS Y QUÍMICAS

CARRERA DE MECÁNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

TEMA:

**“ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y CRISTALINAS DE LA
ALEACIÓN CU – AL OBTENIDA EN EL LABORATORIO DE FUNDICIÓN”**

AUTORES:

AJILA ÁVILA RONNY XAVIER

QUIROLA FRANK DAVID ALEXANDER

TUTOR:

ING. ARTEAGA LINZAN ÁNGEL RAFAEL, PHD.

PORTOVIEJO – MANABÍ – ECUADOR

2023

DEDICATORIA

Dios, todo esto te lo debo enteramente a ti porque gracias a cómo has sido conmigo es que he llegado hasta estas instancias. Si no fuera por la promesa que anidaste en mí mucho antes de iniciar esta carrera universitaria; por abrigarme y darme las herramientas para continuar, no hubiera sido posible cumplir esta meta de finalizar mis estudios superiores. Se lo dedico a mis padres que son fuente inspiradora en mí vida; por ayudarme y sostenerme cuando me caía, por corregirme y brindarme todo su amor en el trayecto, para ustedes es esto; al igual, que también se lo quiero dedicar a mis hermanos y a mí novia que han sido incondicionales conmigo.

Quirola Frank David Alexander

DEDICATORIA

A Dios por darme la oportunidad y las fuerzas para poder culminar este camino que me había trazado; a mis padres por su condicional apoyo y por motivarme a seguir a delante sin importar qué tan difícil sea el sendero y cuántos obstáculos se interpusieron; a mí hijo y esposa por ser mi mayor fuente de energía y motivación para impulsarme a ser alguien mejor, a mis compañeros por su incondicional apoyo moral y por nunca dejarme desistir; al igual que a mis docentes por impartir sus conocimientos, experiencia laboral a lo largo de toda su vida y así inculcarnos ser grandes profesionales.

Ajila Ávila Ronny Xavier

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios por brindarme su amor y hacerme parte de un hogar extraordinario; gracias por cuidarme y guiarme en cada paso que he dado, por su apoyo incondicional a través de mi familia; quienes me han animado y levantado en los buenos y no tan buenos momentos.

Agradecerles a mis padres por siempre ejecutar de manera maravillosa su labor como padres; por no rendirse, por apoyarme y creer en mí, pues no saben lo valioso que ha sido eso en cada momento de mi vida. Al igual, que agradecer a los docentes por tener la paciencia y la predisposición de enseñar y transmitir su sabiduría conmigo. Quiero darles las gracias a mis hermanos y mi novia por alentarme y nunca dudar de las capacidades que Dios colocó en mí.

Gracias también al excelente grupo de compañeros y amigos con lo que logré coincidir en esta etapa universitaria, pues en conjunto nos esforzábamos y apoyábamos para salir adelante.

Quirola Frank David Alexander

AGRADECIMIENTO

Mis más sinceros agradecimientos a Dios que sin él nada de esto hubiera sido posible, por mantenerme con vida en todo este trayecto; a mis padres de todo corazón les estoy eternamente agradecido por su gran sacrificio que han tenido en todos estos años de estudios en los que me han dado una gran ayuda económica; a mi hijo y esposa por ser un gran incentivo en sacar mi carrera adelante sin importar las adversidades, a mis docentes por sus grandes enseñanzas y al grupo de personas en las que aparte de ser mis compañeros, se convirtieron en mis hermanos que sin su apoyo, hubiera sido difícil llegar hasta donde estoy.

Ajila Ávila Ronny Xavier

CERTIFICADO DEL TUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MANABÍ
FACULTAD DE CIENCIAS MATEMÁTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS
CARRERA DE MECÁNICA

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe la presente, ingeniero Arteaga Linzan Ángel Rafael, PhD., docente del departamento de Mecánica de la Universidad Técnica de Manabí, adscrito a la Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, en micondición de Tutor del Trabajo de Titulación: "**ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y CRISTALINAS DE LA ALEACIÓN CU-AL ABTENIDA EN EL LABORATORIO DE FUNDICIÓN**", desarrollada por los profesionistas: Quirola Frank David Alexander y Ajila Ávila Ronny Xavier; en este contexto, tengo a bien extender la presente certificación mediante lo dispuesto en el Art. 8 del Reglamento de Titulación en vigencia, habiendo cumplido con los siguientes procesos:

1. Verificación de que el trabajo desarrollado por los profesionales cumple con el diseño metodológico y rigor científico según la modalidad de titulación escogida por los autores.
2. Se asesoró oportunamente a los estudiantes en el desarrollo del trabajo de titulación.
3. Se confirmó la originalidad del trabajo de titulación.
4. Han respetado los derechos de autor correspondientes a tener un porcentaje menor al 10% de similitud.

Cabe mencionar que, durante el desarrollo del trabajo de titulación, los profesionistas pusieron mucho interés en el desarrollo de cada una de las actividades de acuerdo al cronograma trazado.

Particular que certifico para los fines pertinentes.

ANGEL RAFAEL
ARTEAGA
LINZAN

Firmado digitalmente por
ANGEL RAFAEL ARTEAGA
LINZAN
Fecha: 2024.02.08 08:28:20
-05'00'

Ing. Arteaga Linzan Ángel Rafael, PhD.

Tutor del Trabajo de Titulación

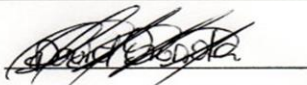

DECLARACIÓN SOBRE DERECHOS DE AUTOR

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MANABÍ
FACULTAD DE CIENCIAS MATEMÁTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS
CARRERA DE MECÁNICA

DECLARACIÓN SOBRE DERECHOS DE AUTOR

Quienes firmamos la presente ESTUDIANTE 1 y ESTUDIANTE 2, en calidad de autores del trabajo de titulación sobre **“ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y CRISTALINAS DE LA ALEACIÓN CU-AL OBTENIDA EN EL LABORATORIO DE FUNDICIÓN”**, declaramos que:

El presente trabajo de titulación ha sido desarrollado en base a una exhaustiva investigación, respetando derechos intelectuales de terceros, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía, en consecuencia, este trabajo de titulación es fruto del esfuerzo, entrega y dedicación de los autores. Por la presente se autoriza a la UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MANABÍ, hacer uso de todos los contenidos o de parte de los que contiene este proyecto, con fines estrictamente académicos o de investigación. Los derechos que como autores nos corresponden, con excepción de la presente autorización seguirán vigentes a nuestro favor, de conformidad con lo establecido en la normativa correspondiente de Propiedad Intelectual. Así mismo las conclusiones y recomendaciones que constan en este texto, son criterios netamente personales y asumimos con responsabilidad la descripción de las mismas.

	
Quirola Frank David Alexander C.C: 1313035394	Ajila Ávila Ronny Xavier C.C: 1311517013

INDICE

Introducción	14
Problema científico.....	17
Objeto de estudio.....	17
Campo de acción.....	18
Objetivos:.....	18
Objetivo general	18
Objetivos específicos	18
Justificación	18
Resultados esperados	19
Capítulo I. Marco Teórico.....	20
1.Estudio Bibliográfico de las Propiedades Mecánicas y Cristalinas de la Aleación Cu - Al.....	20
1.1 Propiedades Mecánicas de los Materiales	20
1.1.1 Resistencia Mecánica	20
1.1.2 Módulo de elasticidad o módulo de Young	31
1.1.3.Coeficiente de Poisson.....	33
1.2. Propiedades Mecánicas de la Aleación Cu – Al	34
1.2.1 Aleaciones de aluminio	34
1.2.2 Propiedades generales del aluminio	35
1.2.3.Aleaciones de cobre	39
1.3. Estructuras Cristalinas de los Materiales	41
1.3.1 Estructura Cristalina de la Aleación Cu-Al.....	42
1.4. Normas ASTM E8.....	43
1.5. Fundición.....	45
1.5.1 Proceso de fundición	46
1.5.2 Fundición en molde de arena	47
1.5.3 Solidificación y enfriamiento	48
1.6. Ensayos Mecánicos de los Materiales.....	48
1.6.1 Ensayo de tensión.....	48
1.6.2 Ensayo de flexión.....	50
1.6.3 Ensayo de dureza.....	51

1.6.4 Ensayo de impacto	52
1.6.5 Ensayo de fatiga	54
1.6.6. Ensayo de termofluencia.....	55
1.7. Diagrama de fases	56
1.7.1. Diagrama de aleación Cu-Al.....	57
Capítulo II. Marco Metodológico	59
2. Diseño y elaboración de probetas en base a la aleación Cu-Al para someterlas a pruebas de ensayos y determinar las propiedades mecánicas y cristalinas	59
2.1. Fundamentos de la solución	59
2.2. Metodología para el diseño y elaboración de probetas a base de distintas concentraciones de Cu-Al para someterlas a ensayos de laboratorio.....	62
2.2.1 Primera etapa. Estudio bibliográfico.....	63
2.2.2 Segunda etapa. Diseño de experimentación	64
2.2.3 Tercera etapa. Experimentación de ensayo	65
2.2.4 Cuarta etapa. Análisis y discusión.....	68
Conclusiones del capítulo.....	68
Capítulo III. Resultados y Discusión	70
3. Resultado del estudio del diagnóstico	70
3.1. Delimitación del estudio y experimentación de campo para la aleación Cu-Al.....	70
3.1.1 Dimensiones de la muestra.....	70
3.1.2 Diseño y fundición de la aleación	70
3.1.3 Ensayos mecánicos.....	72
3.1.4 Ensayo metalográfico.....	79
Conclusiones	82
Recomendaciones	83
Referencia Bibliográfica	84
ANEXOS	87

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Tipos de resistencia mecánica	22
Figura 2.	Contracción transversal bajo una tensión de tracción	23
Figura 3.	Prueba de compresión.....	24
Figura 4.	Ilustración del esfuerzo cortante.....	25
Figura 5.	Ilustración de varios tipos de vigas con distintas sujeciones.....	26
Figura 6.	Esfuerzos cortantes	27
Figura 7.	Energía de deformación.....	27
Figura 8.	Diagrama esfuerzo-deformación	32
Figura 9.	Ilustración de esfuerzos bajo carga biaxial.....	34
Figura 10.	Estructura FCC del cobre.....	42
Figura 11.	Diseño y dimensiones de una probeta según ASTM E8.....	44
Figura 12.	Procesos de fundición de metales	46
Figura 13.	Proceso de fundición en arena	47
Figura 14.	Ensayo de tensión mediante un cabezal móvil	50
Figura 15.	Ensayo de flexión.....	51
Figura 16.	Ensayos de dureza.....	51
Figura 17.	Ensayos de impacto.....	53
Figura 18.	Curva típica de termofluencia.....	56
Figura 19.	Diagrama de fase Cu.....	57
Figura 20.	Diagrama de fase del Al.....	58
Figura 21.	Esquema general para el desarrollo experimental	60
Figura 22.	Metodología para el diseño y elaboración de probetas fundidas en base a la aleación Cu-Al en distintas concentraciones para ser sometidas a ensayos de laboratorio.....	63
Figura 23.	Gráfica esfuerzo-deformación de ensayo de tracción con concentración del 10%. 75	
Figura 24.	Estructura metalográfica de la aleación Cu – Al, a 100x.....	80
Figura 25.	Estructura metalográfica de la aleación Cu – Al, a 100x.....	81

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Comparación de escalas de dureza con la resistencia a la tensión	30
Tabla 2.	Propiedades elásticas y puntos de fusión (Tf)	32
Tabla 3.	Resistencia específica y costo de aleaciones no ferrosas	35
Tabla 4.	Efecto de los mecanismos de endurecimiento en el Al	36
Tabla 5.	Sistema de designación para Al.....	37
Tabla 6.	Sistema de clasificación para las aleaciones de aluminio.....	38
Tabla 7.	Propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio típicas.....	39
Tabla 8.	Propiedades de aleaciones típicas de cobre	40
Tabla 9.	Dimensiones según la norma ASTM E8	44
Tabla 10.	Resultados de un ensayo de tensión	49
Tabla 11.	Resultados de un ensayo de tracción con concentración de 10%	74
Tabla 12.	Promedio obtenido de los ensayos de tracción con concentración del 10%	75
Tabla 13.	Promedio obtenido de los ensayos de tracción con concentración del 5%	76
Tabla 14.	Promedio obtenido de los ensayos de tracción con concentración del 5%	76
Tabla 15.	Ensayos de compresión a probetas de aleación Cu-Al.....	78

RESUMEN

El estudio de las propiedades mecánicas y cristalinas de la aleación Cu – Al tiene su connotación en la importancia dentro de los avances y aplicaciones de la industria en cuanto a la fabricación de componentes mecánicos y estructurales que brindan una alta resistencia, poseen buena maleabilidad y son resistentes a la corrosión, siendo un tema de gran interés para el avance de la industria, sea esta aeroespacial, marítima o automotriz. El objetivo del presente trabajo de titulación se alinearé a la valoración y el estudio de las propiedades mecánicas y cristalinas de la aleación Cu – Al, basadas en las normas ASTM E8. El desarrollo da comienzo con el proceso de fundición de las probetas, su respectivo mecanizado, ensayos de tracción y dureza para después darle un análisis metalográfico mediante ataque químico y posterior a esto observar la microestructura mediante el microscopio. La investigación se desarrolló de forma integrada con ayuda de métodos como el análisis bibliográfico, la metodología intervenida en cada etapa dentro del proceso de desarrollo experimental, el análisis y recomendación en base a los datos arrojados por los ensayos conseguidos donde se plasma mediante tablas y gráficas las diferentes variables con sus valores específicos. Así mismo se muestra en los anexos los procesos previos a la obtención y pulido de las probetas. Como resultado del estudio y la observación directa se obtuvo que es importante la realización de varios ensayos para determinar un promedio aproximado de resistencia en cuanto a las propiedades mecánicas y la microestructura presenta cambios favorables para ser implementadas en trabajos de la industria. Los porcentajes de concentración utilizados fueron de 5% y 10% y como conclusión, lo expuesto permite una buena tolerancia a la tracción y compresión, así como una microestructura correcta producto de la aleación Cu-Al.

Palabras claves: Propiedades mecánicas y cristalinas, aleación, corrosión, maleabilidad, horno de fundición, tracción, compresión, ASTM.

SUMMARY

The study of the mechanical and crystalline properties of the Cu-Al alloy has its connotation in the importance with in the advances and applications of the industry in terms of the manufacture of mechanical and structural components that provide high resistance, have good malleability and are resistant to corrosion, being a topic of great interest for the advancement of the industry, be it aerospace, maritime or automotive. The objective of this thesis will be aligned with the assessment and study of the mechanical and crystalline properties of the Cu-Al alloy based on the ASTM E8 standards. The development begins with the process of casting the specimens, their respective machining, tensile and hardness tests to then give a metallographic analysis by chemical attack and after this to observe the microstructure through the microscope. The research was developed in an integrated way with the help of methods such as bibliographic analysis, the methodology intervened at each stage within the experimental development process, the analysis and recommendation based on the data obtained by the trials obtained, where the different variables with their specific values are reflected through tables and graphs. The appendices also show the processes prior to obtaining and polishing the specimens. As a result of the study and direct observation, it was obtained that it is important to carry out several test to determine an approximate average of resistance in terms of mechanical properties and the microstructure presents favorable changes to be implemented in industrial works. The concentration percentages used were 5% and 10% and as a conclusion, the above allows a good tolerance to tensile and compression, as well as a correct microstructure product of the Cu-Al alloy.

Keywords: Mechanical and crystalline properties, alloy, corrosion, malleability, smelting furnace, tensile, compression, ASTM.

Introducción

En el mundo contemporáneo las aleaciones referentes a metales han tenido un papel muy importante dentro de la historia de la humanidad; siendo este, uno de los impulsores en cuanto a los avances tecnológicos y económicos que han marcado un desenlace arraigado con el paso del tiempo. Entre las aleaciones destacadas tenemos la combinación del cobre y aluminio, que ha despuntado mayormente por su abundancia dentro de la corteza terrestre; así mismo, por las propiedades mecánicas y cristalinas presentes en estos metales que hacen de dicha aleación una herramienta de alta gama dentro de aplicaciones industriales específicas.

(Callister, 2012) menciona que:

Se han creado una amplia gama de materiales con propiedades únicas para cumplir con las demandas de nuestra sociedad moderna y diversa. El desarrollo de numerosas tecnologías que mejoran nuestra calidad de vida está estrechamente ligado a la disponibilidad de materiales apropiados. El avance en la comprensión de ciertos tipos de materiales generalmente impulsa el progreso tecnológico.

Por otro lado, se puede argumentar que los materiales compuestos como lo es la aleación de Cu – Al han desarrollado mayormente su importancia relativa con la aparición de los cerámicos compuestos. Si bien es cierto, el aumento de los metales ha sido un desarrollo que se ha llevado a cabo de manera lenta, su proyección a futuro cada vez coge más fuerza. Otra de las características que confieren a los materiales y su evolución es a la aparición de nuevos procesos de síntesis y procesado.

(Barroso Herrero Segundo, 2014) expresa lo siguiente:

Es necesario realizar un análisis detallado del material en diversos aspectos, como su estructura atómica, microestructura y propiedades mecánicas y físicas, entre otros. Además, se deben considerar factores adicionales como la capacidad de reproducir las propiedades, la resistencia al envejecimiento y los avances en los procesos de fabricación. Todos estos elementos requieren una investigación minuciosa antes de que el producto pueda alcanzar su pleno potencial comercial.

Sin embargo, tanto el Cu como el Al en sus formas puras, ambos son materiales que presentan grandes limitaciones. Si hablamos del cobre, es básicamente blando, lo que conlleva que sea inadecuado para aplicaciones que requieran, por ejemplo, una alta resistencia mecánica. Por otro lado; el aluminio, aunque se considera liviano, puede presentar carencias en cuanto a la rigidez necesaria para ciertos contextos prácticos. Las aleaciones de Cu – Al, al ser combinadas sus propiedades, ofrecen una solución atractiva para una amplia variedad de desafíos tecnológicos. Las aleaciones pueden variar tanto en su composición y propiedades según la cantidad de aluminio añadido, lo que verdaderamente ayuda para ajustar sus características a la satisfacción de las necesidades industriales; además de ser conocidas por su resistencia a la corrosión, lo que las convierte en aplicaciones ideales para entornos hostiles.

(Rethwisch, 2017) argumenta que:

La comprensión de las características de un material demanda una explicación detallada, considerando que, durante su uso, están sujetas a influencias externas que provocan diversas reacciones. Es posible clasificar la mayoría de las propiedades

importantes de los materiales sólidos en seis categorías distintas: mecánicas, eléctricas, térmicas, magnéticas, ópticas y químicas.

Las propiedades mecánicas tienen que ver con la deformación por una carga o fuerza aplicada; dentro de los cuales podemos conocer la tracción, el impacto y la maleabilidad. Además de las propiedades mecánicas y estructuras cristalinas, se debe tener en cuenta otros dos componentes importantes como lo son el procesado y el rendimiento.

(Ashby, 2019) cita lo siguiente:

Los países industrializados consideran el avance de materiales innovadores como una “herramienta de respaldo” que puede impulsar la innovación en todas las áreas de la ingeniería. Esto abre la puerta a nuevos diseños para una variedad de productos, como estructuras, electrodomésticos, dispositivos electrónicos, equipos de conservación de energía y otros más.

Es importante que el ingeniero sea consciente más que nunca de los materiales y su potencial, dado que la innovación cada vez aporta la manera de que los componentes hechos por un material en particular sean reemplazados por otro, a manera de potenciar las cualidades del rediseño del producto y obtener un mejor rendimiento a la hora de la práctica. Dentro de este contexto, el presente trabajo se sumerge en lo que sería un viaje dentro del análisis bibliográfico de las propiedades mecánicas y cristalinas de las aleaciones de Cu – Al, destacando así su importancia, las propiedades mecánicas propiamente especificada mediante los ensayos de tracción, la estructura cristalina proveniente de la aleación Cu-Al y el impacto que esta tendrá en los procesos industriales.

Problema científico.

En cualquier tipo de industria es necesario conocer las propiedades mecánicas y cristalinas de los materiales. Esto permite tomar la mejor decisión al momento de elegir la materia prima para una aplicación o proyecto industrial. Es importante destacar que las propiedades mecánicas de los materiales son determinadas por la composición química y estructura interna.

(Barroso Herrero Segundo, 2014) expone lo siguiente:

Las características mencionadas se derivan del tipo de enlace entre átomos y la disposición cristalina de los metales, lo que les otorga una combinación de rigidez y resistencia mecánica, así como una notable capacidad de deformación y resistencia a la fractura.

Para establecerlas se utilizan ensayos, que pueden alterarse en ciertas condiciones debido a que están relacionadas con las fuerzas exteriores que se ejercen sobre ellos. Las propiedades mecánicas de los materiales establecen el comportamiento que tendrá ante la aplicación de fuerzas o agentes externos, para conseguir un rendimiento óptimo. Es por ello que nace la siguiente interrogante:

¿Cómo se relacionan las propiedades mecánicas y cristalinas con las variaciones de la composición de Cu – Al?

Objeto de estudio.

Estudio de las propiedades mecánicas y cristalinas de la aleación Cu-Al.

Campo de acción.

Investigación experimental, de las propiedades físicas mediante ensayos experimentales y de la estructura cristalina mediante ensayo metalográfico.

Objetivos:

Objetivo general

Determinar las propiedades mecánicas y cristalinas de la aleación Cu – Al obtenida en el laboratorio de fundición de la UTM mediante el proceso experimental.

Objetivos específicos

1. Describir las generalidades de las aleaciones Cu – Al.
2. Definir la metodología a aplicar para los distintos ensayos de tracción, compresión y metalografía.
3. Analizar los resultados obtenidos a través de ensayos de laboratorio.

Justificación

El presente trabajo de titulación está fundamentado en la valoración de la investigación teórica que respalda la aplicación metodológica en base al razonamiento, relevancia y aplicabilidad práctica de los ensayos desarrollados para el correspondiente estudio de las propiedades mecánicas y cristalinas de la aleación Cu-Al. Siendo así, un tema bastante importante para dar solución a problemas o interrogantes surgidas en base a la obtención de aleaciones con determinados porcentajes de concentración y aplicados dentro de los distintos trabajos industriales.

En la elección de los métodos implementados para la realización del trabajo investigativo fueron enfocados en las normas para ensayos mecánicos como lo es la ASTM E8, asegurando así que el trabajo desempeñado tenga validez y confiabilidad en los resultados obtenidos posterior a

los ensayos realizados para la determinación de las propiedades mecánicas y cristalinas en las probetas fundidas con dos tipos de concentración.

Los resultados que se esperan obtener en este trabajo de titulación buscan contribuir al conocimiento fundamental sobre las propiedades mecánicas y cristalinas. Dichas propiedades en este tipo de aleaciones requieren tener y exponer; a su vez, información relevante para el diseño y desarrollo de nuevas aleaciones mejoradas.

Los distintos ensayos de laboratorio como método de recopilación de datos se justifican metodológicamente debido a la naturaleza de la investigación que explora el estudio y necesidades asociadas a entender, analizar y evaluar los diferentes patrones reflejados en los ensayos de tracción, dureza y metalografía.

Resultados esperados

1. Informe de las características mecánicas, físicas y químicas al igual que su estructura cristalina en los metales cobre y aluminio.
2. Metodología para la evaluación de las propiedades mecánicas y metalográficas de la aleación obtenida en el laboratorio.
3. Informe detallado de los resultados obtenidos a través de los ensayos experimentales.

Capítulo I. Marco Teórico

1. Estudio Bibliográfico de las Propiedades Mecánicas y Cristalinas de la Aleación Cu - Al

El presente capítulo tiene como propósito realizar el estudio bibliográfico a las propiedades mecánicas y cristalinas de la aleación Cu – Al así como también revisar las características y leyes que rigen a este tipo de fenómeno inmerso dentro del proceso de obtención de la aleación; se abordan temas referentes a los diferentes tipos de ensayos, siendo estos de tracción, compresión y metalografía. Mediante esto se pretende contextualizar el método de estudio del trabajo investigativo, permitiendo así fundamentar los apartados teóricos evaluados posteriormente en los siguientes capítulos.

1.1 Propiedades Mecánicas de los Materiales

1.1.1. Resistencia Mecánica

La capacidad que presentan los cuerpos para poder resistir las distintas fuerzas que se le aplican sin tener que llegar al momento de fatiga o ruptura se denomina resistencia mecánica. La resistencia mecánica presente en los cuerpos depende básicamente del tipo de material y de la geometría que este tenga. Dentro de los parámetros a considerar, el coeficiente de seguridad es quien permite determinar cuánta resistencia mecánica posee el cuerpo según los materiales intrínsecos.

La resistencia de materiales tiene la facultad de combinar datos puntuales y específicos acorde al material utilizado, tales como la geometría y las fuerzas aplicadas para poder generar modelos matemáticos que faciliten el análisis de la resistencia mecánica proveniente de los cuerpos. Unos de los ensayos más comunes dentro de la comprobación de la resistencia mecánica

de un material, es mediante el ensayo de tracción, que se lleva a cabo con ayuda de una probeta de geometría estándar.

(Bercero, 2010) menciona lo siguiente “la resistencia que presenta a deformarse cuando está sometido a la acción de una carga exterior” (pág. 24).

(Askeland, 2012) explica que

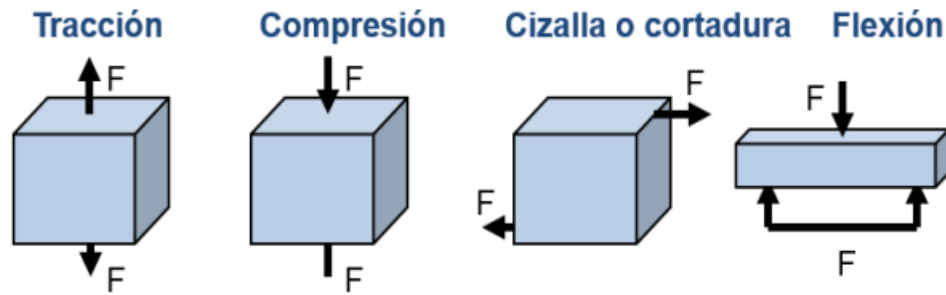
Las características mecánicas de un material, que indican su respuesta ante una fuerza aplicada abarcan aspectos como la resistencia, la rigidez y la ductilidad. Sin embargo, frecuentemente nos interesa también cómo reacciona un material frente a diferentes situaciones, como impactos repentinos y fuertes, cargas cíclicas a lo largo del tiempo, altas temperaturas o condiciones abrasivas.

Por su parte, (Silva, 2012) contribuye diciendo “generalmente el material se deforma temporal o permanentemente, o se rompe; por lo tanto, decimos que un material resiste un determinado esfuerzo cuando no se deforma excesivamente o no se rompe” (pág. 3).

Sabemos que, dentro de los límites elásticos permisibles del material, ante un esfuerzo presente en este, el material tiende a tener tres respuestas: deformarse elásticamente, deformarse plásticamente o romperse.

(S. Kalpakjian, 2008) finaliza argumentando que “al seleccionar materiales para un producto, primero se consideran sus propiedades mecánicas: resistencia, tenacidad, ductilidad, dureza, elasticidad, fatiga y termofluencia” (pág. 16).

Figura 1. *Tipos de resistencia mecánica*



Nota: Adaptado de *Introducción a la ciencia de los materiales y sus aplicaciones*, por (Nuria, 2018).

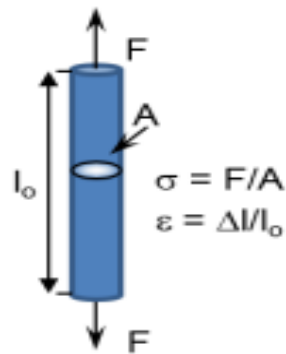
Analizando los tipos de resistencia mecánica es posible determinar que según las fuerzas que se le apliquen a un determinado objeto, como resultado de obtendrá un tipo de deformación específica para cada prueba. Con fines investigativos y acorde al enfoque dado en la presente investigación se definirán los tipos de resistencia mecánica previstos.

Tracción.

(Silva, 2012) señala que “un cuerpo está sometido al esfuerzo de tracción cuando sobre este actúan dos fuerzas iguales, de sentido contrario y como saliendo del elemento” (pág. 4).

Es entendible que un cuerpo que esté bajo el sometimiento a tracción tienda a deformarse mediante un proceso de alargamiento y estrechamiento paralelos a sus caras opuestas que tienden a unirse, mientras que las caras perpendiculares buscarán separarse. Se conoce que los materiales resistentes a este esfuerzo se manejarán en el diseño de piezas que estén bajo las cargas de pesos colgados, cables de puentes, cadenas y ascensores.

Figura 2. *Contracción transversal bajo una tensión de tracción*



Nota: Adaptado de *Introducción a la ciencia de los materiales y sus aplicaciones*, por (Nuria, 2018).

Se puede apreciar dentro de la figura 2 la fuerza de tracción que está actuando sobre el área perpendicular a la dirección en que se aplica. Para poder calcular esto, se divide la fuerza del área transversal sobre la dirección de aplicación de dicha fuerza. Ahí podemos denotar la deformación que es la diferencia de longitudes, entre la inicial y la final después de producirse la tensión.

Compresión.

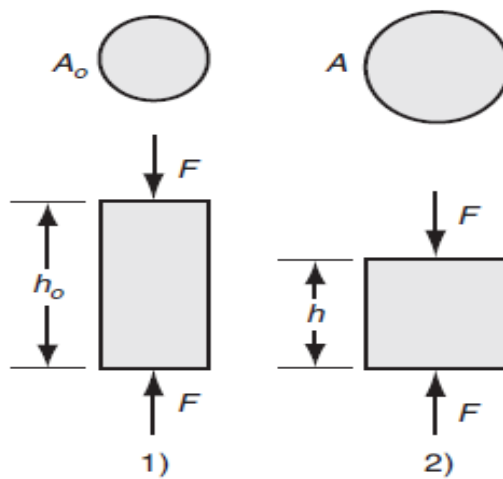
(Silva, 2012) explica dentro de su libro *Ingeniería en Procesos de Manufactura I* “un cuerpo se encuentra sometido a compresión, cuando sobre él actúan dos fuerzas iguales, de sentido contrario y hacia el interior del objeto. Un cuerpo sometido a compresión se deforma acortándose y ensanchándose” (pág. 4).

Esto se debe a que, dentro del cuerpo mismo, ambas caras que están en similitud y paralelas al esfuerzo se separan, mientras que las perpendiculares se unen; un caso totalmente contrario a la resistencia a la tracción.

(Groover, 2015) argumenta que “debido a que la compresión ocasiona que la sección transversal se incremente (en vez de disminuir, como en la prueba de tensión), la carga se incrementa con mayor rapidez que antes” (pág. 47).

Esta tensión deja como resultado un valor por encima del esfuerzo hallado mediante el cálculo de ingeniería.

Figura 3. Prueba de compresión



Nota: Adaptado de *Fundamentos de Manufactura Moderna*, por (Groover, 2015).

Se puede apreciar la fuerza de compresión aplicada y el cambio que originó en la altura.

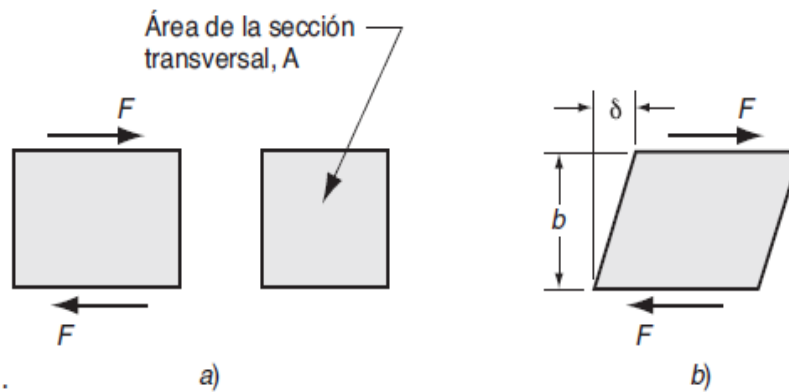
Cizalla o cortadura.

(Miguel Cervera Ruiz, 2015) menciona que “una sección de una pieza está sometida a cizallamiento o cortadura cuando sobre ella actúa un esfuerzo, es decir, una resultante de fuerzas paralelas al plano de la sección” (pág. 213).

Por otro lado, (Molt, 2009) manifiesta lo siguiente junto con algunos puntos a considerar

Sucede cuando un componente sometido a carga experimenta una torsión alrededor de su eje principal debido a la aplicación de un momento de torsión en uno o varios puntos a lo largo del mismo, contrarrestando por un momento de torsión de reacción en uno o varios puntos.

Figura 4. *Ilustración del esfuerzo cortante*



Nota: Adaptado de *Fundamentos de Manufactura Moderna*, por (Groover, 2015).

En la ilustración de la figura 4 se puede observar que tenemos a) esfuerzo y b) deformación acorde al esfuerzo al que fue sometido el cuerpo, su área de la sección transversal y las fuerzas opuestas para llegar al esfuerzo cortante.

(Groover, 2015) añade que “es común probar el esfuerzo y deformación cortantes por medio de una prueba de torsión, en la que un espécimen tubular de pared delgada se sujeta a un par” (pág. 50).

Así mismo, (Silva, 2012) destaca que

Un objeto experimenta torsión cuando se intenta girar sus extremos en direcciones opuestas, lo que provoca que sus secciones tiendan a rotar en direcciones contrarias. Si la

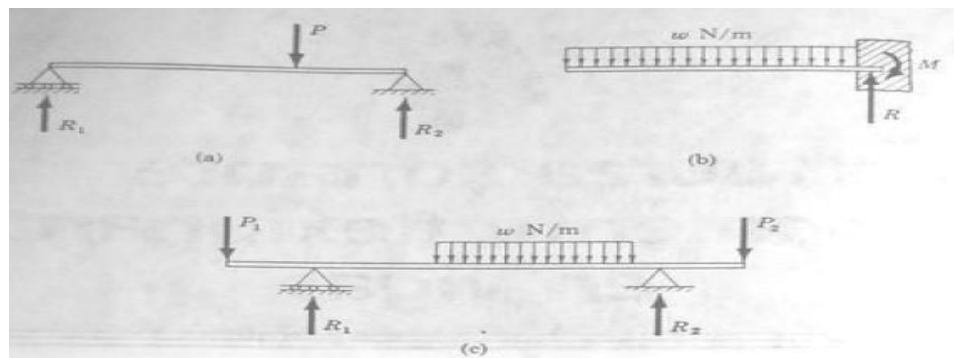
fuerza aplicada es lo suficientemente grande, también puede ocasionar el desgarro o corte del material. Este fenómeno afecta a todos los ejes que transmiten movimiento de giro.

Flexión.

(Singer, 1994) menciona lo referente

El análisis de la flexión es más desafiante debido a que los impactos de las fuerzas aplicadas varían de una sección a otra de la viga. Estos impactos se dividen claramente en dos tipos: la fuerza cortante y el momento de flexión.

Figura 5. Ilustración de varios tipos de vigas con distintas sujeciones.



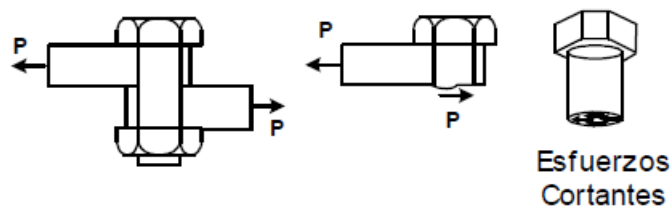
Nota: Adaptado de *Resistencia de Materiales*, por (Singer, 1994).

En la presente figura 5. Se puede apreciar diferentes tipos de vigas sometidas a sujeción; se observa que hay una viga apoyada en sus extremos, al igual que una viga simple que cuenta en uno de sus extremos con una articulación y también un apoyo sobre sus rodillos; pero, algunos de los extremos salen de los soportes.

(Singer, 1994) explica que “una carga concentrada o puntual es la que actúa sobre una longitud tan pequeña de la viga que puede suponerse que lo hace sobre un punto” (pág. 89).

Esto quiere decir que una carga distribuida al contrario de la puntual es aquella que está siendo aplicada o actúa sobre una longitud no infinita de la misma viga correspondiente. Podemos llegar a decir que una fuerza cortante es aquella que se la conoce como la resultante de las fuerzas exteriores no equilibradas y el momento flexionante es cuando la suma de los momentos debe ser igual o de sentido contrario para producir un par M igual a R_1 .

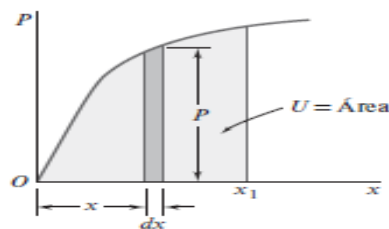
Figura 6. *Esfuerzos cortantes*



Nota: Adaptado de *Resistencia de Materiales Aplicada*, por (Mayori, 2022).

Por su parte (F., 2010) resalta lo siguiente “se concluye que deben existir fuerzas internas en el plano de la sección, y que su resultante es igual a P . Estas fuerzas internas elementales se conocen como fuerzas cortantes” (pág. 9).

Figura 7. *Energía de deformación*



Nota: Adaptado de *MECÁNICA de MATERIALES*, por (Mazurek, 2017).

La figura muestra un diagrama de una fuerza P aplicada en un eje de desplazamiento x , donde se puede apreciar que dx es la variación de la posición o desplazamiento dentro de U que representa el área correspondiente desde el origen.

(Molt R. , 2006) menciona acerca del módulo de flexión

El término módulo de flexión o módulo de elasticidad en flexión se refiere a cargar un espécimen del material, como una viga, y registrar los datos de carga en relación con la deflexión. Estos datos son luego utilizados para calcular el esfuerzo y la deformación unitaria, teniendo en cuenta la geometría de la muestra.

(Singer, 1994) argumenta que

El momento flexionante se define como la suma de los momentos de todas las fuerzas que actúan a la izquierda o derecha de una sección de la viga, con respecto a un eje perpendicular al plano de las fuerzas y que pasa por el centro de gravedad o centroide de la sección analizada.

1.1.1.1.1. Tenacidad.

(Nisbelt., 2012) en su libro titulado *Diseño en Ingeniería Mecánica*

La capacidad de un material para absorber energía sin fracturarse se denomina tenacidad. El módulo de tenacidad de un material se define como la energía absorbida por unidad de volumen sin que ocurra fractura, lo cual es equivalente al área total bajo la curva de esfuerzo-deformación hasta el punto de fractura.

(Molt R. , 2006) postula lo siguiente “la tenacidad es la capacidad de un material para absorber la energía que se le aplica sin fractura” (pág. 38).

(Askeland, 2012) menciona que

La cantidad de energía que un material puede absorber antes de fracturarse se denomina tenacidad a la tracción, y a veces se cuantifica como el área bajo la curva de esfuerzo-deformación verdadera (también conocida como trabajo de fractura).

1.1.1.2. Ductilidad.

(F., 2010) nos da a conocer que “una medida estándar de la ductilidad de un material es su porcentaje de alargamiento” (pág. 54).

Por su parte, (Nisbelt., 2012) expone

La ductilidad es una característica crucial ya que evalúa la habilidad de un material para resistir sobrecargas y ser moldeado en frío. Por lo tanto, actividades como el doblado, grabado, recalcado y estirado son procesos metalúrgicos que demandan materiales con esta propiedad.

(Molt R. , 2006) menciona dentro de su libro *Diseño de elementos de máquinas*

La ductilidad se refiere a la capacidad de un material para deformarse antes de fracturarse, mientras que la fragilidad representa lo opuesto. La forma común de medir la ductilidad es mediante el porcentaje de elongación o alargamiento del material durante una prueba de tensión estandarizada.

1.1.1.3. Dureza.

(Molt R. , 2006) expresa lo siguiente

La capacidad de un material para resistir la penetración de un dispositivo es un indicador de su dureza. La dureza se evalúa mediante diferentes dispositivos, métodos y

penetradores, siendo los probadores de dureza Brinell y Rockwell los más comúnmente empleados.

Hay que tener claro que los métodos dentro de la comprobación de dureza tanto con el método de Brinell como el de Rockwell basan su diagnóstico en distintos factores, obteniendo resultados diversos. Pero hay que tener claro que ambos están midiendo la dureza y por eso es que tienen mucha similitud entre ambos. Es importante acotar mientras más endurecido sean las aleaciones de acero, mayor relación tendrán estos dos métodos.

Tabla 1. *Comparación de escalas de dureza con la resistencia a la tensión*

Material y condición	Dureza			Resistencia a la tensión	
	HB	HRB	HRC	ksi	MPa
1020 recocido	121	70		60	414
1040 laminado en caliente	144	79		72	496
4140 recocido	197	93	13	95	655
4140 OQT 1000	341	109	37	168	1160
4140 OQT 700	461		49	231	1590

Nota: Comparación de escalas de dureza. Tomado de (Molt R. , 2006)

(Askeland, 2012) argumenta que “la ductilidad se refiere a la habilidad de los materiales a estirarse o flexionarse permanentemente sin romperse” (pág. 35).

1.1.1.4. Fatiga.

(Nisbelt., 2012) menciona lo siguiente

La fractura por fatiga se asemeja a la fractura frágil en su apariencia, ya que las superficies fracturadas son planas y perpendiculares al eje del esfuerzo, y no muestran adelgazamientos. A pesar de esto, las características de la fractura en una falla por fatiga son distintas a las de una fractura frágil en reposo.

(Molt R. , 2006) en su libro *DISEÑO DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS* expone “los materiales se prueban bajo condiciones controladas de carga cíclica, para determinar su capacidad de resistir cargas repetidas” (pág. 40).

1.1.2. Módulo de elasticidad o módulo de Young

Para poder comprender el módulo de elasticidad es importante dar un concepto concreto en base a lo que viene siendo el límite elástico. Sabemos que todo material posee cierta cantidad de deformación, la misma que regresa a su estado original una vez que haya sido liberada o desechada la carga aplicada en el material. Por eso, el límite de proporcionalidad y el límite elástico mantienen una cercanía con la resistencia de fluencia.

(Molt R. , 2006) menciona “el esfuerzo es proporcional a la deformación unitaria y el valor de E, el módulo de elasticidad, es la constante de proporcionalidad” (pág. 36).

(Singer, 1994) argumenta “se trata de una medida de las propiedades elásticas del material, es una medida de su rigidez” (pág. 32).

(Askeland, 2012) en su libro *Ciencia e ingeniería de materiales* expresa lo siguiente

El módulo de elasticidad, también conocido como módulo de Young (E), es la medida de la rigidez de un material y se define como la pendiente de la curva de esfuerzo-deformación unitaria en la región elástica. La relación entre el esfuerzo y la deformación en esta región elástica se conoce como ley de Hooke.

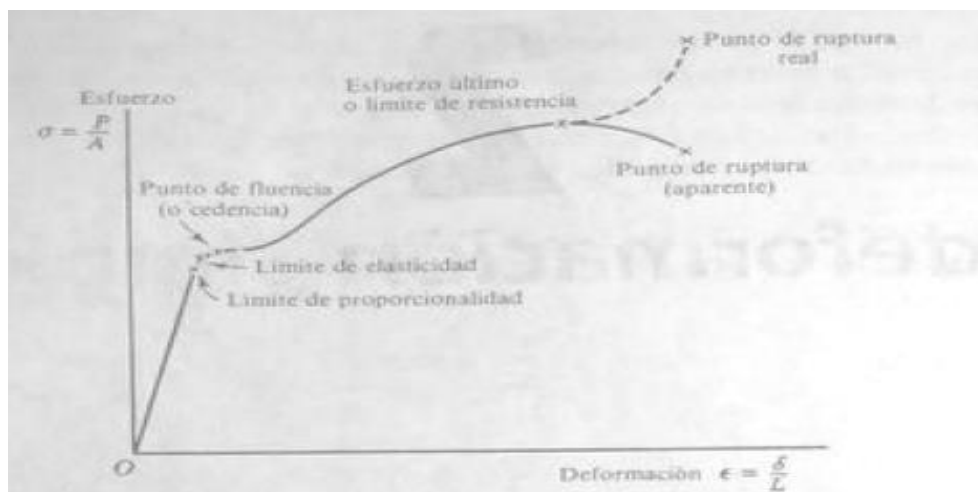
Tabla 2. Propiedades elásticas y puntos de fusión (T_f)

Material	T_f (°C)	E (psi)	Razón de Poisson (ν)
Pb	327	2.0×10^6	0.45
Mg	650	6.5×10^6	0.29
Al	660	10.0×10^6	0.33
Cu	1085	18.1×10^6	0.36
Fe	1538	30.0×10^6	0.27
W	3410	59.2×10^6	0.28
Al_2O_3	2020	55.0×10^6	0.26
Si_3N_4		44.0×10^6	0.24

Nota: Datos de las propiedades elásticas y temperatura de fusión de algunos materiales. Tomado de (Askeland, 2012)

Aquí se puede apreciar los diferentes materiales enunciados acorde a sus siglas en donde se muestran las diferentes temperaturas admisibles, el módulo de elasticidad y la razón de Poisson para cada uno de ellos. Es importante acotar que cada material cuenta con su propia temperatura de fusión para poder sufrir un alargamiento sin llegar a la rotura que es cuando el material excede el límite elástico.

Figura 8. Diagrama esfuerzo-deformación



Nota: Adaptado de *Resistencia de materiales*, por (Singer, 1994).

Analizando la figura 8 que trata de un diagrama esfuerzo-deformación se puede apreciar las debidas fórmulas tanto de deformación como el límite de elasticidad y el límite de proporcionalidad, así también como sus puntos de ruptura según el esfuerzo o límite de resistencia del material.

(F., 2010) postula que

El límite de proporcionalidad de un material representa el máximo esfuerzo donde la ley de Hooke se aplica con precisión. En contraste, el límite elástico es el punto en el cual el material deja de comportarse elásticamente, indicando que ha excedido su capacidad de recuperarse completamente después de la deformación.

Para darle otro concepto un poco más claro, el material tiene un comportamiento tanto lineal como elástico siempre y cuando el esfuerzo no se exceda y se mantenga por debajo del punto de cedencia.

1.1.3. Coeficiente de Poisson

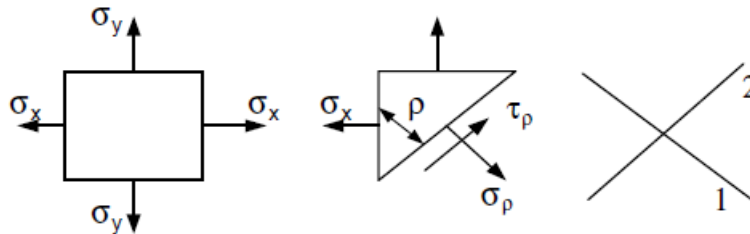
(Molt R. , 2006) menciona que

Cuando un material es sometido a una deformación por tensión, ocurre una reducción simultánea en las dimensiones de la sección transversal en la dirección de la deformación por tensión. La relación entre la deformación unitaria de contracción y la deformación unitaria de tensión se conoce como la relación de Poisson.

(Singer, 1994) afirma “otro tipo de deformación elástica es la variación de las dimensiones transversales que acompaña a toda tensión o compresión axial” (pág. 38).

Entonces podemos decir que esta relación conocida como relación Poisson nos permite poder generalizar la aplicación referente a la ley de Hooke referente a los esfuerzos biaxiales.

Figura 9. *Ilustración de esfuerzos bajo carga biaxial*



Nota: Adaptado de *Resistencia de Materiales Aplicada*, por (Mayori, 2022).

La carga biaxial es conocida como aquel cuerpo que es capaz de soportar cargas en dos direcciones que están aplicadas de manera perpendicular al objeto o cuerpo, en este caso, material.

(Mayori, 2022) indica lo siguiente “se define como coeficiente o módulo de Poisson a la relación entre las deformaciones longitudinales y transversal unitarias” (pág. 16).

1.2. Propiedades Mecánicas de la Aleación Cu – Al

1.2.1. Aleaciones de aluminio

Como bien se expresa el aluminio dentro de los elementos es el segundo metal más abundando dentro de la corteza terrestre, décadas atrás, en el siglo XVIII se consideraba un metal de gran costo y difícil de producir. Con el desarrollo de la energía eléctrica y conjuntamente el proceso Hall-Heroult es que se permite al aluminio convertirse en uno de los materiales para el ámbito de la ingeniería más económico y empleado dentro de los procesos ingenieriles.

Tabla 3. Resistencia específica y costo de aleaciones no ferrosas

Metal	Densidad g/cm ³	Densidad (lb/plg ³)	Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia específica (plg)	Costo por libra (\$)
Aluminio	2.70	(0.097)	83,000	8.6×10^5	0.60
Berilio	1.85	(0.067)	55,000	8.2×10^5	300.00
Cobre	8.93	(0.322)	150,000	4.7×10^5	1.10
Plomo	11.36	(0.410)	10,000	0.2×10^5	0.35
Magnesio	1.74	(0.063)	55,000	8.7×10^5	1.40
Níquel	8.90	(0.321)	180,000	5.6×10^5	4.10
Titanio	4.51	(0.163)	160,000	9.8×10^5	5.50
Tungsteno	19.25	(0.695)	150,000	2.2×10^5	10.00
Zinc	7.13	(0.257)	75,000	2.9×10^5	0.55
Hierro	7.87	(0.284)	200,000	7.0×10^5	0.10

Nota: Dato de las resistencias específicas acorde a su costo en las aleaciones. Tomado de
(Askeland D. R., 1999)

Se puede apreciar los diferentes tipos de materiales, en el caso de estudio el cobre y el aluminio con sus distintas densidades en las medidas correspondientes y acorde a su resistencia a la tensión, resistencia específica y su costo por libra.

1.2.2. Propiedades generales del aluminio

Cuenta con una densidad de 2.70 g/cm³, lo que equivale a la tercera parte de la densidad por parte del acero y cuenta con un módulo de elasticidad de 10×10^6 psi.

(Askeland D. R., 1999) menciona que

A pesar de que las aleaciones de aluminio poseen propiedades de resistencia a la tensión que son relativamente bajas en comparación con las del acero, su relación resistencia-peso es excepcionalmente alta. Este metal se utiliza con frecuencia en situaciones donde el peso tiene una gran relevancia, como en la industria aeronáutica y en aplicaciones automotrices.

Tabla 4. Efecto de los mecanismos de endurecimiento en el Al

Material	Resistencia a la tensión (psi)	Esfuerzo de cedencia (psi)	% de elongación	Límite elástico (aleación) / límite elástico (puro)
Aluminio puro	6,500	2,500	60	
Aluminio puro comercial	13,000	5,000	45	2.0
Aleación de aluminio endurecida por solución sólida	16,000	6,000	35	2.4
Aluminio trabajado en frío	24,000	22,000	15	8.8
Aleación de aluminio endurecida por dispersión	42,000	22,000	35	8.8
Aleación de aluminio endurecida por envejecimiento	83,000	73,000	11	29.2

Nota: Efecto de mecanismos de endurecimiento y aleaciones de Al. Tomado de (Askeland D. R., 1999)

También se le acredita que responda de manera efectiva a mecanismos de endurecimiento y se afirma que las aleaciones de aluminio resulten ser en un promedio de 30 veces más resistentes que el Al en su estado puro.

(Askeland D. R., 1999) añade que “las propiedades físicas benéficas son alta conductividad eléctrica y térmica; comportamiento no magnético y excelente resistencia a la oxidación y a la corrosión” (pág. 368).

Es importante acotar que a pesar de que el aluminio no exhibe, tener un alto límite de endurecimiento podría causar como consecuencia que se produzca una fatiga incluso si es sometido a bajos esfuerzos, esto dado que su baja temperatura de fusión le acarrea un inconveniente al verse sometido a temperaturas elevadas. Las aleaciones de aluminio también presentan baja dureza y esto conlleva a que no sean tan resistentes al desgaste.

Clasificaciones.

Las aleaciones de aluminio son clasificadas o divididas en dos grupos principales: aleaciones forjadas y fundidas.

- **Aleaciones forjadas:** estas reciben su forma mediante la deformación plástica, presentan composiciones y microestructuras que son en gran parte distintas a las aleaciones fundidas, dando a conocer de esta manera las diferentes carencias o necesidades del proceso de manufactura.

(Askeland D. R., 2012) expone lo siguiente “las aleaciones 1xxx, 3xxx, 5xxx y casi todas las 4xxx no se pueden endurecer por envejecimiento. Las aleaciones 1xxx y 3xxx son aleaciones de una sola fase, excepto por la presencia de pequeñas cantidades de inclusiones o compuestos intermetálicos” (pág. 543).

Tabla 5. *Sistema de designación para Al*

TABLA 14-3 ■ *Sistema de designación para aleaciones de aluminio*

Aleaciones forjadas:

1xxx ^a	Al comercialmente puro (>99% Al)	No endurecible por envejecimiento
2xxx	Al-Cu y Al-Cu-Li	Endurecible por envejecimiento
3xxx	Al-Mn	No endurecible por envejecimiento
4xxx	Al-Si y Al-Mg-Si	Endurecible por envejecimiento si Mg está presente
5xxx	Al-Mg	No endurecible por envejecimiento
6xxx	Al-Mg-Si	Endurecible por envejecimiento
7xxx	Al-Mg-Zn	Endurecible por envejecimiento
8xxx	Al-Li, Sn, Zr, o B	Endurecible por envejecimiento
9xxx	No usada actualmente	

Aleaciones fundidas:

1xx.x. ^b	Al comercialmente puro	No endurecible por envejecimiento
2xx.x.	Al-Cu	Endurecible por envejecimiento
3xx.x.	Al-Si-Cu or Al-Mg-Si	Algunas son endurecibles por envejecimiento
4xx.x.	Al-Si	No endurecible por envejecimiento
5xx.x.	Al-Mg	No endurecible por envejecimiento
7xx.x.	Al-Mg-Zn	Endurecible por envejecimiento
8xx.x.	Al-Sn	Endurecible por envejecimiento
9xx.x.	No usada actualmente	

Nota: Sistema de designación para aleaciones de aluminio. Tomado de (Askeland D. R., 2012)

- **Aleaciones fundidas:** En la tabla 6 se muestran muchas de las aleaciones fundidas más comunes para el aluminio, donde poseen suficiente silicio para provocar la reacción eutéctica, brindando a las aleaciones bajos puntos de fusión, buena fluidez y facilidad al moldeo.

(Askeland D. R., 2012) postula que “la fluidez es la capacidad del metal líquido para fluir por un molde sin solidificarse prematuramente, y la facilidad de moldeo se refiere a la facilidad con la que una buena pieza fundida puede hacerse con la aleación” (pág. 544).

Tabla 6. *Sistema de clasificación para las aleaciones de aluminio*

Aleaciones para forja:	
1xxx Aluminio comercialmente puro (>99% Al)	No es endurecible por envejecimiento
2xxx Al-Cu y Al-Cu-Li	Endurecibles por envejecimiento
3xxx Al-Mn	No es endurecible por envejecimiento
4xxx Al-Si y Al-Mg-Si	Endurecible por envejecimiento si está presente el magnesio
5xxx Al-Mg	No es endurecible por envejecimiento
6xxx Al-Mg-Si	Endurecible por envejecimiento
7xxx Al- Mg-Zn	Endurecible por envejecimiento
8xxx Al-Li, Sn, Zr o B	Endurecible por envejecimiento
Aleaciones para fundición:	
1xx Aluminio comercialmente puro	No endurecible por envejecimiento
2xx Al-Cu	Endurecible por envejecimiento
3xx Al-Si-Cu o Al-Mg-Si	Algunos son endurecibles por envejecimiento
4xx Al-Si	No endurecibles por envejecimiento
5xx Al-Mg	No endurecibles por envejecimiento
7xx Al-Mg-Zn	Endurecibles por envejecimiento
8xx Al-Sn	Endurecible por envejecimiento

Nota: Sistema de clasificación para las aleaciones de aluminio, tanto por las aleaciones forjadas como por las aleaciones para fundición. Tomado de (Askeland D. R., 1999)

Tabla 7. *Propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio típicas*

Aleación	Resistencia a la tensión (psi)	Esfuerzo de cedencia (psi)	% de elongación	Aplicaciones	
Aleaciones para forja no tratables térmicamente:					
1100-O	> 99% Al	13,000	5,000	40	Componentes eléctricos, forja, procesamiento de alimentos
1100-H18		24,000	22,000	10	
3004-O	1.2% Mn-1.0% Mg	26,000	10,000	25	Cuerpos de latas de bebidas, usos arquitectónicos
3004-H18		41,000	36,000	9	
4043-O	5.2% Si	21,000	10,000	22	Metal de relleno para soldadura
4043-H18		41,000	39,000	1	
5182-O	4.5% Mg	42,000	19,000	25	Tapas de las latas de bebidas, componentes marinos
5182-H19		61,000	57,000	4	
Aleaciones para forja tratables térmicamente					
2024-T4	4.4% Cu	68,000	47,000	20	Ruedas de camión
2090-T6	2.4% Li-2.7% Cu	80,000	75,000	6	Lámina externa de aeronaves
4032-T6	12% Si-1% Mg	55,000	46,000	9	Pistones
6061-T6	1% Mg-0.6% Si	45,000	40,000	15	Canoas, carros de ferrocarril
7075-T6	5.6% Zn-2.5% Mg	83,000	73,000	11	Bastidores de aeronaves
Aleaciones para fundición:					
201-T6	4.5% Cu	70,000	63,000	7	Carcasas de transmisiones
319-F	6% Si-3.5% Cu	27,000	18,000	2	Fundiciones de uso general
356-T6	7% Si-0.3% Mg	33,000	24,000	3	Acoplamientos para aeronaves
380-F	8.5% Si-3.5% Cu	46,000	23,000	3	Carcasas para motor
390-F	17% Si-4.5% Cu	41,000	35,000	1	Motores automotrices
443-F	5.2% Si (fundición de arena)	19,000	8,000	8	Equipo para manejo de alimentos
	(molde permanente)	23,000	9,000	10	acoplamientos marinos
	(fundición de a presión)	33,000	16,000	9	

Nota: Propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio para forja no tratables térmicamente y tratables térmicamente y también para trabajos de fundición. Tomado de (Askeland D. R., 1999)

1.2.3. Aleaciones de cobre

Sabemos que dentro de la naturaleza el cobre tiene una presentación de cobre elemental y este fue extraído gracias a los minerales, debido a que las distintas temperaturas requeridas para poder obtenerlo se podían tener con mayor facilidad. Otros de los métodos para poder obtener el cobre tienen que ver con la lixiviación a partir de minerales con bajo consumo de azufre.

(Askeland D. R., 2012) sostiene que

Las aleaciones que tienen cobre como componente principal suelen tener densidades superiores a las del acero. Aunque algunas de estas aleaciones pueden tener una alta resistencia a la fluencia, su relación resistencia-peso generalmente es menor que la de las aleaciones de aluminio o magnesio.

Se entiende que las aleaciones provenientes de este método cuentan con mejor resistencia a la fatiga, así mismo a la termofluencia y al desgaste a diferencia de las aleaciones de peso ligero de aluminio.

(Askeland D. R., 1999) dice lo siguiente “los cobres con menos del uno por ciento de impurezas se utilizan para aplicaciones eléctricas. Las aleaciones de una sola fase se endurecen por trabajo en frío” (pág. 380).

Aleaciones endurecidas por solución sólida

Se conoce que varias aleaciones que tienen sus hechos en cobre, poseen un número grande de elementos de aleación y pese a eso se mantienen en una sola fase.

Tabla 8. *Propiedades de aleaciones típicas de cobre*

Material	Resistencia a la tensión (psi)	Esfuerzo de cedencia (psi)	% de elongación	Mecanismo de endurecimiento
Cu puro, recocido	30,300	4,800	60	
Cu comercialmente puro, recocido a tamaño de grano grueso	32,000	10,000	55	
Cu puro comercial recocido a tamaño de grano fino	34,000	11,000	55	Tamaño de grano
Cu comercial puro, trabajado en frío 70%	57,000	53,000	4	Endurecimiento por deformación
Cu-35% Zn recocido	47,000	15,000	62	Solución sólida
Cu-10% Sn recocido	66,000	28,000	68	Solución sólida
Cu-35% Zn trabajado en frío	98,000	63,000	3	Solución sólida + endurecimiento por deformación
Cu-2% Be endurecido	190,000	175,000	4	Endurecimiento por envejecimiento
Cu-Al templado y revenido	10,000	60,000	5	Reacción martensítica
Bronce al manganeso fundido	71,000	28,000	30	Reacción eutectoide

Nota: Propiedades de aleaciones típicas de cobre obtenidas mediante diferentes mecanismos de endurecimiento. Tomado de (Askeland D. R., 1999)

Aleaciones endurecibles por envejecimiento

(Askeland D. R., 2012) en su libro *Ciencia e Ingeniería de Materiales* menciona

Diversas aleaciones que tienen cobre como componente principal muestran un fenómeno de endurecimiento por envejecimiento, entre ellas el zirconio-cobre, cromo-cobre y berilio-cobre. Las aleaciones de cobre-berilio son empleadas debido a su alta resistencia, rigidez elevada (que las hace inapropiadas para aplicaciones como resortes y alambres delgados) y a su propiedad de no producir chispas.

1.3. Estructuras Cristalinas de los Materiales

(S. Kalpakjian, 2008) postula que “Una estructura cristalina está definida por la combinación de una red y una base” (pág. 101).

Tenemos que entender que los materiales de ingeniería que se usan en la vida real son monocristales y presenten muchos defectos, al igual de que tienden a ser policristalinos, todo esto, debido a que tanto los cristales como los granos están orientados en distintas direcciones de manera aleatoria.

(S. Kalpakjian, 2008) comenta lo siguiente

Cuando los metales se enfrían desde un estado fundido, sus átomos se organizan en diferentes configuraciones ordenadas, conocidas como cristales, formando lo que se denomina estructura cristalina. La unidad más pequeña de átomos que exhibe la estructura de red distintiva de un metal en particular se denomina celda unitaria.

Los tres arreglos atómicos básicos en los metales son:

- **Estructura cúbica centrada en el cuerpo (bcc):** hierro alfa, cromo, molibdeno, tantalio, tungsteno y vanadio.
- **Estructura cúbica centrada en las caras (fcc):** hierro gama, aluminio, cobre, níquel, plomo, plata, oro y platino.
- **Estructura hexagonal compacta (hcp):** berilio, cadmio, cobalto, magnesio, titanio alfa, zinc y zirconio.

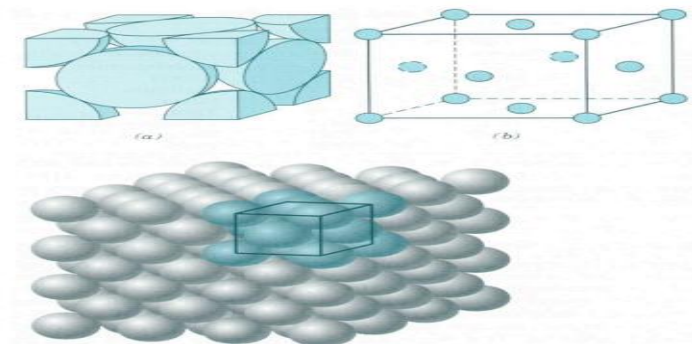
Es importante saber que los metales están formados por diferentes estructuras cristalinas, esto con el fin de minimizar la energía que se requiere para poder agruparse en un patrón considerado regular.

1.3.1. Estructura Cristalina de la Aleación Cu-Al

Estructura Cristalina Cu

La estructura cristalina que presenta el cobre es una estructura cúbica centrada en las caras, en donde los átomos situados en los vértices de una pequeña parte de la celda unitaria, están a su vez, en todo el centro de dichas caras. Por otro lado, el parámetro de la red representa la parte de la celda unitaria. Para el cobre se tiene un valor referencial de 0,362nm.

Figura 10. Estructura FCC del cobre



Nota: Adaptado de *Materiales de Partida*, por (Escamilla, 2023)

Estructura Cristalina Al

Al igual que en el cobre, el aluminio y sus aleaciones presenta una estructura cristalina que se mantiene centrada en las caras, tal como se muestra en la figura 10. Esto lo lleva a ser muy estable hasta que se fusiona a los 660.32 °C. Debido a sus propiedades mecánicas y físicas, el aluminio se convierte en un metal muy fácil de cambiar en cuanto a su forma, permitiendo así ser aplicado en procesos de soldadura.

1.4. Normas ASTM E8

(Escacena, 2020) estipula que

La American Society for Testing and Materials (ASTM, de ahí el nombre) ha elaborado estas regulaciones como pautas para llevar a cabo pruebas de materiales, estableciendo las condiciones y los métodos más apropiadas para obtener resultados precisos.

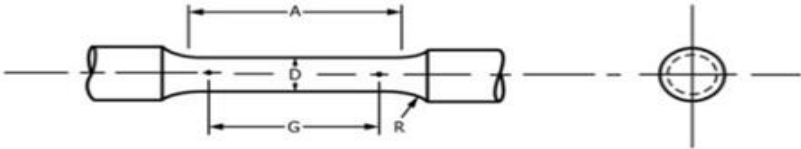
Estas normas describen todo lo referente a ensayos de tracción en metales bajo condiciones de temperatura ambiente (uniaxial) y a su vez determinan los valores característicos como límite elástico, límite de fluencia, deformación del límite de fluencia, resistencia a la tracción, alargamiento de rotura y estricción.

Es importante destacar que las normas ASTM E8 se lleva a cabo en base a una variedad de muestras de diferentes especificaciones para cada diseño en cuanto a las probetas acorde a las dimensiones que se ensayarán en base a las normas donde se establece que es un proceso relativamente sencillo.

(ASTM, 2015) menciona lo siguiente

Según las especificaciones de la norma ASTM E8, para ensayar la tracción de muestras cilíndricas, típicamente se utiliza una muestra estándar de 12,5 mm de diámetro, lo cual es comúnmente empleada para evaluar materiales metálicos, ya sea fundidos o forjados.

Tabla 9. Dimensiones según la norma ASTM E8



Dimensions, mm [in.]				
For Test Specimens with Gauge Length Four times the Diameter [E8]				
	Standard Specimen		Small-Size Specimens Proportional to Standard	
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4
<i>G</i> —Gauge length	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	36.0 ± 0.1 [1.400 ± 0.005]	24.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.005]	16.0 ± 0.1 [0.640 ± 0.005]
<i>D</i> —Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	9.0 ± 0.1 [0.350 ± 0.007]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]	4.0 ± 0.1 [0.160 ± 0.003]
<i>R</i> —Radius of fillet, min	10 [0.375]	8 [0.25]	6 [0.188]	4 [0.156]
<i>A</i> —Length of reduced section, min (Note 2)	56 [2.25]	45 [1.75]	30 [1.25]	20 [0.75]

Nota: Norma ASTM E8 detalla las dimensiones de las probetas para su ensayo. Tomado de (ASTM, 2015)

De acuerdo a la norma ASTM E8 la realización de las probetas van estandarizadas acorde a las medidas señaladas a continuación.

Figura 11. Diseño y dimensiones de una probeta según ASTM E8



Nota: Adaptado de *Estándar Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, por (ASTM, 2015)

En esta figura se puede apreciar las dimensiones que estipula la norma ASTM E8 para las pruebas de tracción en probetas fundidas.

1.5. Fundición

(Shackelford, 2010) establece que

El proceso de fundición de metales implica derretir el metal, verterlo en un molde y permitir que se enfríe. Su principal beneficio radica en la capacidad de producir piezas con formas complejas y de gran tamaño. Para llevar a cabo este proceso con éxito, los materiales que se van a fundir deben poseer características adecuadas de fusibilidad y fluidez, especialmente importantes en aleaciones como el hierro, el cobre y el aluminio.

Por su parte, (Kalpakjian, 2008) postula lo siguiente:

Durante el proceso de fundición, cuando el metal fundido comienza a enfriarse, ocurre un cambio de fase en el material que resulta en la liberación de una cantidad significativa de calor. Este proceso establece muchas de las propiedades y características del metal fundido, como sus propiedades mecánicas y microestructuras, las cuales están influenciadas por la velocidad de enfriamiento. Estas propiedades pueden variar según el tipo de proceso de fundición utilizado, lo que resulta en un tamaño de grano característico.

Es por eso que, con la implementación de técnicas actuales acorde a los avances tecnológicos de procesamiento y control de la composición química, las propiedades mecánicas de las fundiciones logran igualar a los demás procesos de manufactura.

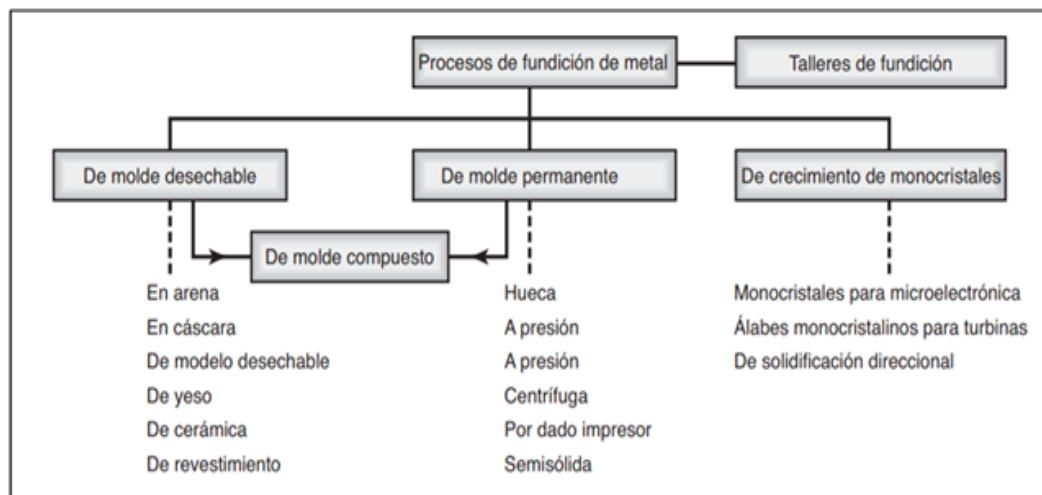
1.5.1. *Proceso de fundición*

Dentro de lo que viene siendo el proceso de fundición, podemos resaltar tres pasos esenciales, tales como:

- Se vacía el metal que se fundió en un molde con la forma de la pieza a manufacturar.
- Se deja solidificar pasando el tiempo prudente para aquello, que suele ser de 10 minutos.
- Se retira lo que es la parte del molde para extraer la pieza.

A continuación, se detallan los procesos de fundición más relevantes.

Figura 12. *Procesos de fundición de metales*



Nota: Adaptado de *Manufactura ingeniería y tecnología*, por (Kalpakjian, 2008)

La mayoría de los metales pueden ser fundidos de forma deseada o cercana, requiriendo muy poco las operaciones de acabado. Por esto es que se coloca a la fundición entre las tecnologías más importantes dentro de la industria de manufactura, junto al forjado de forma neta.

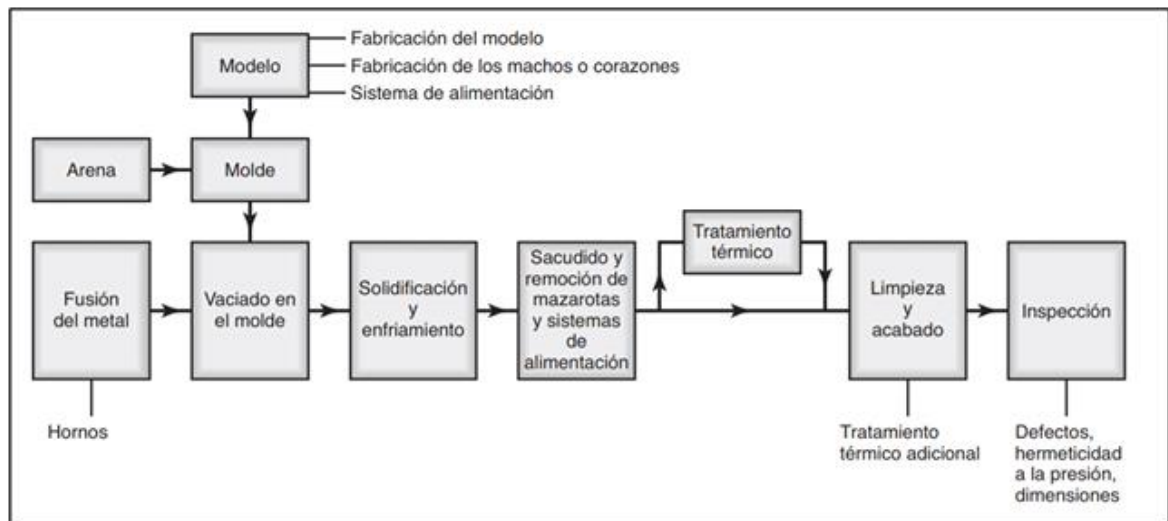
Según el tipo de fundición es que se obtiene un resultado específico y según esto, se elije según la conveniencia el tipo de fundición a establecer.

1.5.2. Fundición en molde de arena

Para los moldes de arena, se dice que su uso es único debido a que una vez esté solidificado el producto, lo que tiene que ver con el molde se destruye.

Los procesos de fundición en arena se dan en primer plano con la fabricación del modelo de la pieza a fundir, después de esto, el modelo sugerido se vierte en la arena con una humedad de la misma del 9% para generar una cavidad negativa y también, se dejan marcados los canales de alimentación que guían el metal fundido hacia las cavidades del molde; luego de solidificarse, se procede a quitar el molde y extraer la pieza para su posterior maquinado o tratamientos térmicos requeridos.

Figura 13. *Proceso de fundición en arena*



Nota: Adaptado de Documento de una tesis web, por (Caiza & Mayorga, 2020)

Existen tres tipos básicos de moldes de arena:

- Arena verde
- Caja fría
- Sin cocción

Se le denomina “verde” porque la arena que está dentro del molde está húmeda o mojada mientras se vierte el metal de la fundición en su interior. Es importante destacar que para el método de superficie seca se debe cuidar que la superficie del molde esté seca y esto se logra con ayuda de sopletes.

El proceso de caja fría se lleva a cabo mediante algunos aglutinantes orgánicos e inorgánicos donde se involucra la arena; esto permite que químicamente los granos se unan, obteniendo así una mayor resistencia. Para el proceso de molde no cocido se añade una resina sintética a la arena para que la mezcla se endurezca a temperatura ambiente.

1.5.3. Solidificación y enfriamiento

Una vez que se ha vertido el metal dentro del molde, éste procede a enfriarse y solidificarse pasado un tiempo específico que tiene que ver mucho con el material fundido, el tipo de molde, los factores ambientales. Los factores asociados a este enfriamiento son:

- Tiempo de enfriamiento
- Contracción
- Solidificación
- Diseño de las mazarotas

1.6. Ensayos Mecánicos de los Materiales

1.6.1. Ensayo de tensión

(Askeland D. R., 1999) menciona que

El ensayo de tensión evalúa la capacidad de un material para resistir una fuerza que se aplica gradual o estáticamente. Una muestra comúnmente utilizada tiene un diámetro de 0,505 pulgadas y una longitud calibrada de 2 pulgadas. La muestra se coloca en la máquina de ensayos y se aplica una fuerza, denominada carga.

Para poder determinar la medida oportuna mediante el ensayo de tensión para el parámetro de alargamiento del material que es consecuencia de la fuerza que se le aplicó se emplea un extensómetro.

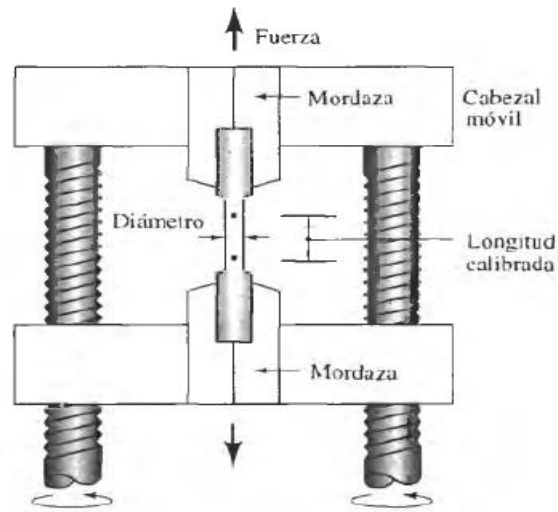
Tabla 10. *Resultados de un ensayo de tensión*

Medido		Calculado	
Carga (lb)	Longitud calibrada (plg)	Esfuerzo (psi)	Deformación (plg/plg)
0	2.000	0	0
1000	2.001	5,000	0.0005
3000	2.003	15,000	0.0015
5000	2.005	25,000	0.0025
7000	2.007	35,000	0.0035
7500	2.030	37,500	0.0150
7900	2.080	39,500	0.0400
8000 (carga máxima)	2.120	40,000	0.0600
7950	2.160	39,700	0.0800
7600 (fractura)	2.205	38,000	0.1025

Nota: Resultado de un ensayo de tensión a una barra de aleación de aluminio de 0.505 plg de diámetro. Tomado de (Askeland D. R., 1999)

Para poder llevar a cabo el ensayo de tensión es necesario usar como herramienta un cabezal móvil y así determinar la tensión acorde a la fuerza aplicada.

Figura 14. *Ensayo de tensión mediante un cabezal móvil*



Nota: Adaptado de *Ciencia e Ingeniería de los materiales*, por (Askeland D. R., 1999)

Propiedades obtenidas del ensayo de tensión

Después de haber realizado ensayos de tensión se pueden obtener información relacionada con la resistencia, rigidez y ductilidad de un material específico.

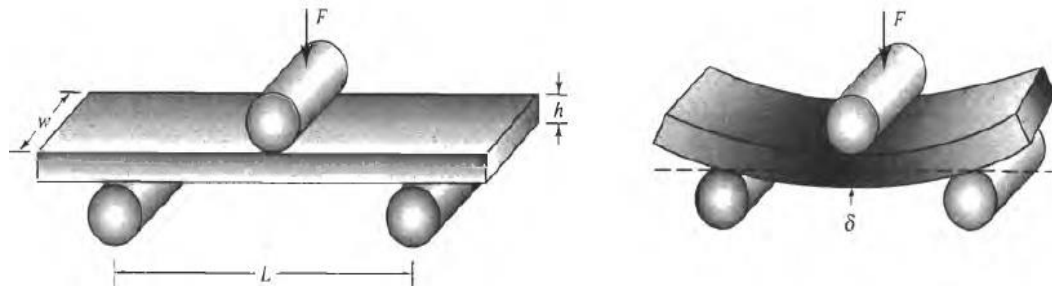
1.6.2. Ensayo de flexión

Para los materiales que son dúctiles, una curva esfuerzo-deformación generalmente es aquel que pasa por un valor máximo, el mismo que se le atribuye como resistencia del material a la tensión.

(Askeland D. R., 1999) sostiene “la falla ocurre a un esfuerzo menor después de que el encuellamiento ha reducido el área de la sección transversal que soporta la carga” (pág. 138).

Todos estos materiales pueden ser probados empleando el ensayo de flexión; al aplicar la carga en los tres puntos considerados se provoca la flexión y esto hace que la fuerza provoque tensión sobre la superficie opuesta a la probeta.

Figura 15. *Ensayo de flexión*



Nota: Adaptado de *Ciencia e Ingeniería de los materiales*, por (Askeland D. R., 1999)

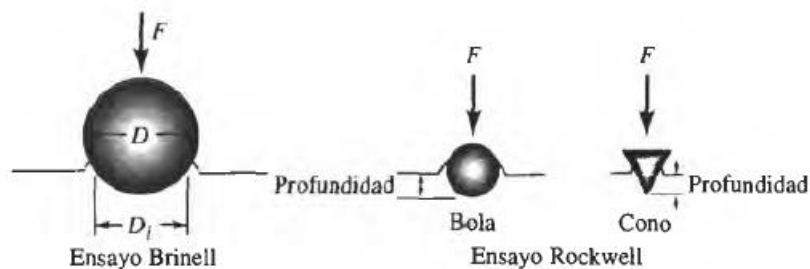
1.6.3. *Ensayo de dureza*

(Askeland D. R., 1999) menciona lo siguiente “el ensayo de dureza mide la resistencia de la superficie de un material a la penetración por un objeto duro” (pág. 142).

Dentro de los tipos de ensayo por dureza encontramos el ensayo por dureza Brinell en donde una esfera de acero duro es oprimida sobre la superficie del material seleccionado. Una vez medido el diámetro se calcula el número de la dureza o como bien se conoce, la dureza Brinell.

El ensayo de dureza Rockwell emplea una bola pequeña que es completamente de acero, necesaria para materiales blandos y también un cono de diamante para materiales con características más resistentes.

Figura 16. *Ensayos de dureza*



Nota: Adaptado de *Ciencia e Ingeniería de los materiales*, por (Askeland D. R., 1999)

(Askeland D. R., 1999) menciona que

Las pruebas de microdureza, como los ensayos Vickers (HV) y Knoop (HK), generan penetraciones tan diminutas que es necesario utilizar un microscopio para medirlas. Los valores de dureza se emplean principalmente como punto de referencia para comparar materiales, establecer especificaciones para procesos de fabricación y tratamiento térmico, garantizar el control de calidad y establecer relaciones con otras propiedades de los materiales.

1.6.4. Ensayo de impacto

Decimos que es un ensayo de impacto cuando un material es sometido al golpe súbito o intenso, donde la velocidad que se aplica acorde al esfuerzo es demasiado grande. Hay que tener en cuenta que, a diferencia del ensayo de tensión, aquí el material puede tener un comportamiento más frágil.

(Askeland D. R., 1999) menciona en su libro *Ciencia e Ingeniería de los Materiales* “el ensayo de impacto a menudo se utiliza para evaluar la fragilidad de un material bajo estas condiciones” (pág. 143).

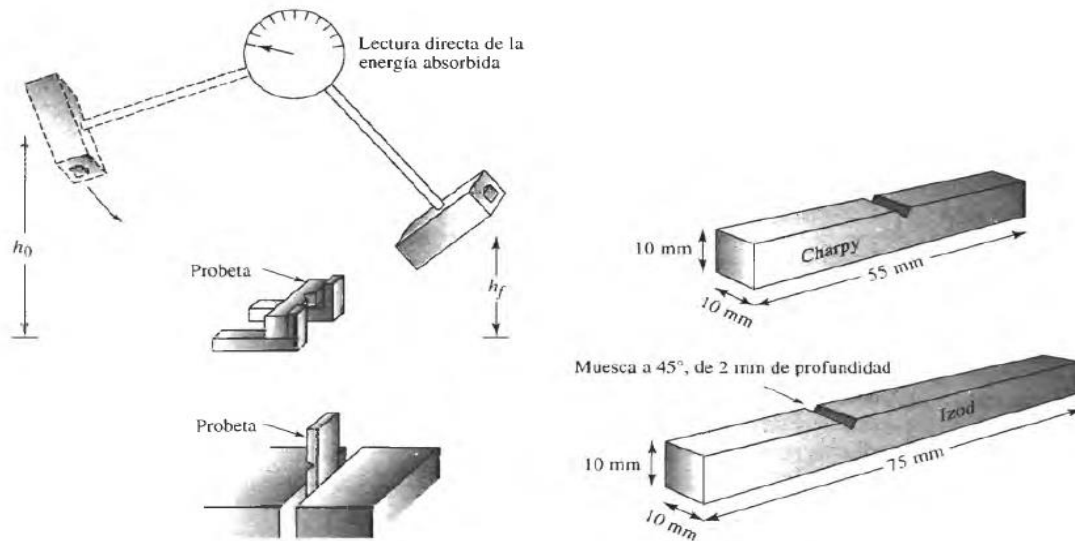
Dentro de este tipo de ensayos se han generado o diseñado algunos experimentos entre los cuales destacan: el ensayo de Charpy y el ensayo de Izod; el mismo que se emplea para materiales no metálicos.

(Askeland D. R., 1999) argumenta lo siguiente

Durante la prueba, un péndulo pesado, iniciando su movimiento desde una altura determinada, describe un arco y luego golpea y fractura la muestra. Alcanzando una altura final más baja. Conociendo las alturas inicial y final del péndulo, es posible calcular la

variación en su energía potencial. Esta variación representa la energía de impacto absorbida durante la falla o ruptura de la muestra.

Figura 17. *Ensayos de impacto*



Nota: Adaptado de *Ciencia e Ingeniería de los materiales*, por (Askeland D. R., 1999)

Propiedades obtenidas a partir del ensayo de impacto

A partir del ensayo de impacto se pueden obtener propiedades tales como: la temperatura de transición que no es más que aquella a la cual un material su comportamiento siendo en el comienzo dúctil y terminando por frágil. A su vez la sensibilidad de las muescas que son causadas por un maquinado, fabricación de alguna manera defectuoso originando concentraciones de esfuerzos que ocasionan la tenacidad de los materiales a implementar.

Tenacidad a la fractura

En la tenacidad de la fractura, (Askeland D. R., 1999) menciona lo siguiente

La mecánica de la fractura se centra en investigar cómo se comportan los materiales que presentan grietas u otros defectos menores. Es innegable que todos los materiales tienen ciertos defectos. Lo que interesa conocer es la máxima carga que un material puede soportar cuando tiene defectos de un tamaño y forma específicos.

Importancia de la mecánica de la fractura

(Askeland D. R., 1999) comenta lo siguiente “la mecánica de la fractura permite diseñar y seleccionar materiales y al mismo tiempo tomar en consideración la inevitable presencia de defectos” (pág. 149).

1.6.5. Ensayo de fatiga

En ocasiones, un componente puede estar sometido o verse intervenido a la aplicación repetitiva de una carga considerada menor que el límite de elasticidad del material escogido. Dicha carga cíclica puede ser el resultado de rotación, flexión o vibración. Aunque la carga presente un resultado por debajo del límite elástico, el material puede fallar después de muchas aplicaciones de dicha carga. A esto se le conoce como fatiga.

(Askeland D. R., 1999) argumenta lo siguiente

Los ciclos de fatiga típicamente se desarrollan en tres etapas: inicialmente, se forma una pequeña grieta en la superficie, a menudo después de cierto tiempo de aplicación de la carga. Posteriormente, la grieta se extiende gradualmente a medida que la carga sigue alterándose. Finalmente, cuando la sección transversal restante del material se vuelve insuficiente para resistir la carga aplicada, se produce la fractura abrupta del material.

Resultados del ensayo de fatiga

(Askeland D. R., 2012) menciona en su libro *The Science and Engineering of Materials*

El ensayo de fatiga determina el tiempo o el número de ciclos que una pieza puede resistir, o la carga máxima permitida que se puede aplicar para evitar que el componente falle. El límite de esfuerzo para fatiga, definido como el nivel de esfuerzo por debajo del cual hay un 50% de probabilidad de que ocurra una falla por fatiga, es el criterio de diseño preferido.

Para poder evitar o asegurar que un elemento no entre en momento de falla es indispensable que el esfuerzo que se aplica sea menor al de la resistencia del material a emplear.

(Askeland D. R., 2012) dice también que “la vida o fatiga indica cuánto resiste un componente a un esfuerzo en particular. La resistencia a la fatiga es el esfuerzo máximo con el cuál no ocurrirá fatiga en un número particular de ciclos” (pág. 151).

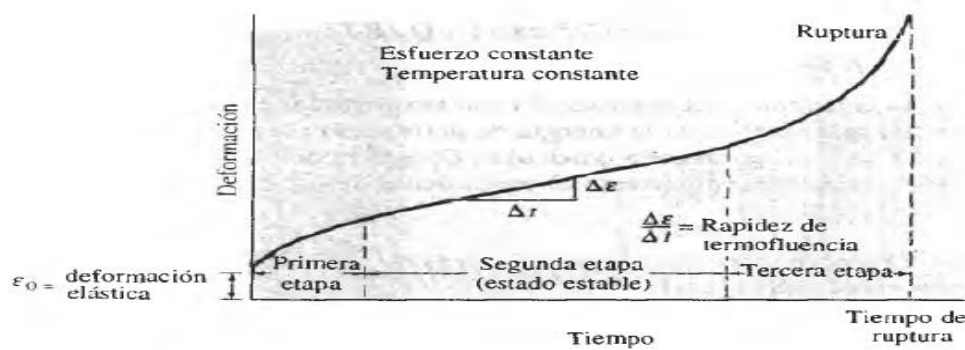
1.6.6. Ensayo de termofluencia

Para poder conocer bien la terminología de termofluencia, es importante recalcar que la deformación plástica sometida a muy altas temperaturas se conoce como el procedimiento de termofluencia. Cuando un material es sometido a un esfuerzo en donde dicho material presenta una temperatura elevada; éste puede presentar deformaciones como estiramiento y así, llegar a la fatiga o falla sin importar que el esfuerzo que se le aplica sea menor al esfuerzo de cedencia de la temperatura a la que se somete.

(Askeland D. R., 2012) argumenta lo siguiente

Para analizar cómo se comporta un material, se emplea el ensayo de termofluencia, en el cual se somete una muestra calentada a alta temperatura a un esfuerzo constante. Cuando se aplica este esfuerzo, la muestra experimenta una deformación elástica mínima, que está determinada por el esfuerzo aplicado y el módulo de elasticidad del material a esa temperatura.

Figura 18. Curva típica de termofluencia



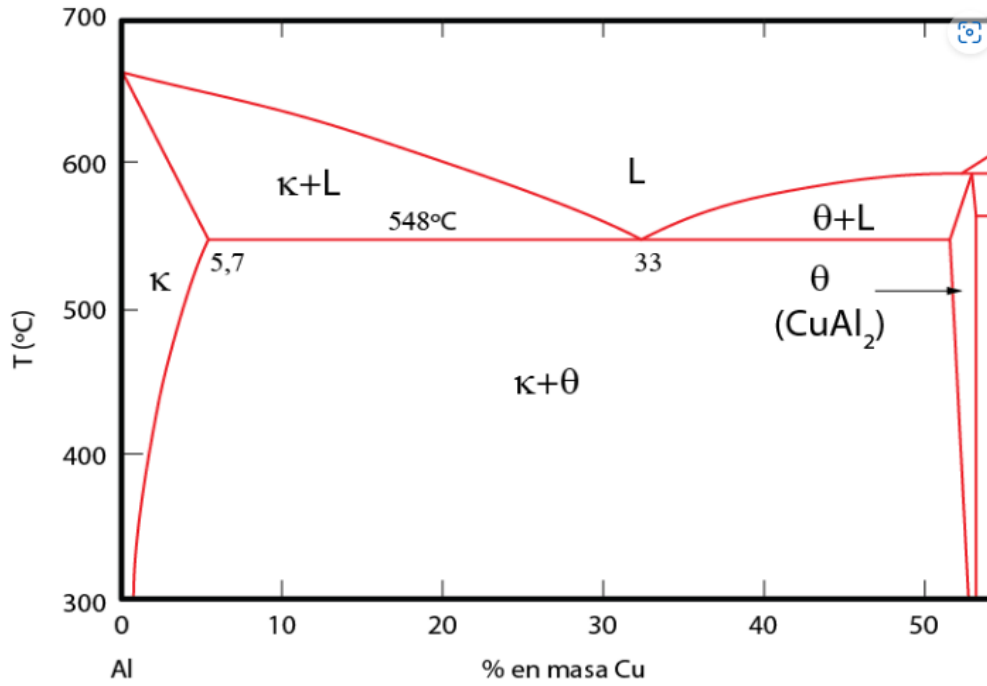
Nota: Adaptado de *The Science and Engineering of Materials*, por (Askeland D. R., 2012)

1.7. Diagrama de fases

Un diagrama de fases se entiende como un gráfico que ilustra las etapas existentes en el material a utilizar bajo diversas condiciones de temperaturas y presión. De esta manera dentro de un diagrama se determina en el eje x el porcentaje en peso del material y por su parte, en el eje y se definen las condiciones tales como temperatura y presión en grados Celsius.

1.7.1. Diagrama de aleación Cu-Al

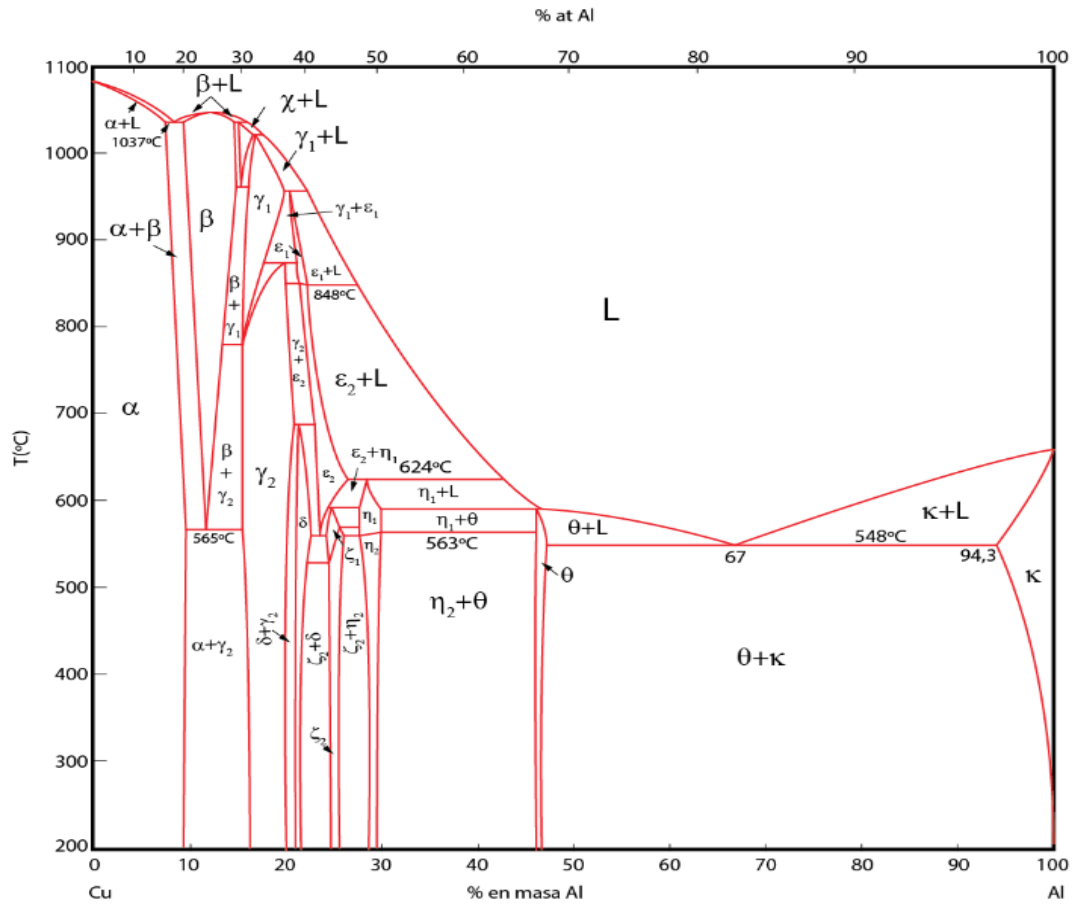
Figura 19. Diagrama de fase Cu



Nota: Adaptado de *Proyecto de Innovación Atlas Metalográfico*, por (Madrid, 2022)

Como bien lo explica la literatura, en el diagrama podemos observar las variables a considerar como la temperatura y el porcentaje de masa del Cu. Donde podemos ver que el punto L es considerado la reacción eutéctica.

Figura 20. Diagrama de fase del Al



Nota: Adaptado de *Proyecto de Innovación Atlas Metalográfico*, por (Madrid, 2022)

Podemos apreciar dentro de la figura los valores acordes a los grados Celsius y porcentajes en masa del Al.

Capítulo II. Marco Metodológico

2. Diseño y elaboración de probetas en base a la aleación Cu-Al para someterlas a pruebas de ensayos y determinar las propiedades mecánicas y cristalinas

En este capítulo se dará una explicación detallada de los procedimientos que se llevaron a cabo dentro del marco metodológico, para el cumplimiento de los objetivos planteados en el presente trabajo de investigación y proponer acciones para su perfeccionamiento y generalización.

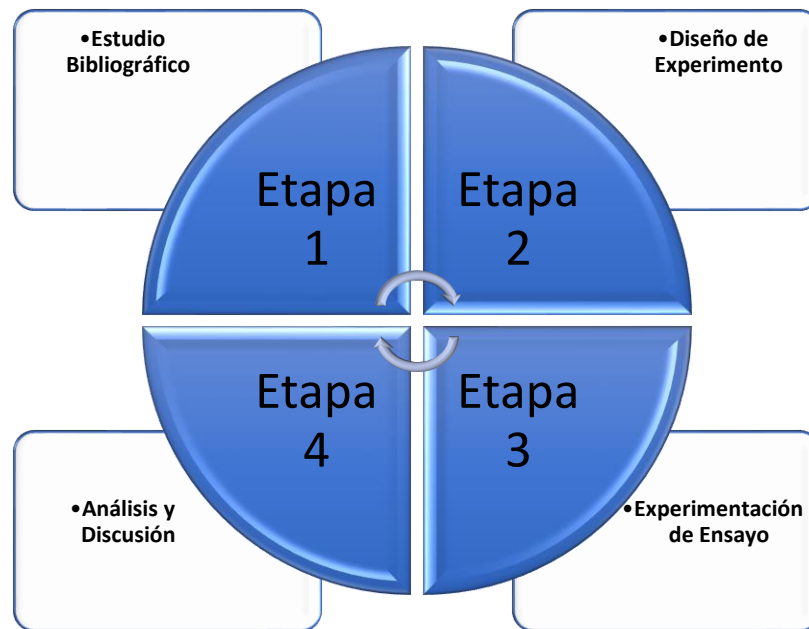
2.1. Fundamentos de la solución

El presente trabajo de titulación se realizó bajo el análisis teórico-metodológico con el objetivo de establecer el diseño de experimento para la elaboración de probetas en base a la fundición con diferentes porcentajes de concentración de Cu-Al y así mediante ensayos de laboratorio determinar las propiedades mecánicas y cristalinas de la aleación obtenida. De esta manera se implementan técnicas y procedimientos dentro de los laboratorios, así como ofrecer recomendaciones que permitan dar solución a la problemática. Para poder alcanzar tales propuestas metodológicas, el trabajo investigativo se fundamenta en las siguientes consideraciones:

- Tomando como referencia la literatura expuesta en el capítulo anterior y dentro del enfoque de proceso a partir del análisis del objeto de estudio, se parte de la aseveración de que las propiedades mecánicas y estructura cristalina de la aleación Cu-Al, constituye un sistema experimental en el que se dan varios procesos, por lo que la solución recae en la aplicación de la teoría fundamentada en los ensayos pertinentes y enfoques que se llevan a cabo, acompañado de métodos generalizados de investigación que sustenten los resultados obtenidos.

- La solución sistémica del objeto de estudio consigue plantear la solución acorde al orden consecuente de un modelo teórico del tema tratado y una metodología experimental.
- A raíz de la consideración sistémica del objeto de estudio antes asumida, se consideró; para la síntesis del trabajo en cuanto al procedimiento experimental, las normas ASTM E8, adaptado al caso de estudio. En correspondencia con lo anterior, en la Tabla 9 se muestra los parámetros establecidos acorde a las dimensiones de las probetas para ensayos y poder de esta manera estar dentro de los rangos de la normativa.
- Además del estudio bibliográfico y el enfoque en cuanto a la obtención de la aleación Cu-Al, se llevó a cabo el plan que detalla el diseño de experimento, la experimentación de ensayo y su correspondiente análisis e interpretación de resultados.

Figura 21. *Esquema general para el desarrollo experimental*



Tomado de. Elaboración Propia

- El estudio bibliográfico comprende todos los temas que intervienen en las actividades de modelación y conceptualización dentro del objeto de estudio. Como paso inicial dentro de esta etapa, es que mediante la información que se obtiene de los conceptos estudiados y en cuanto a las recomendaciones de la bibliografía prevista por otros autores, se fijan las condiciones previas y premisas sobre las cuales se sustenta el modelo, y finalmente, partiendo de abstracciones y consideraciones teóricas donde se basan los fundamentos de la metodología, se sintetiza la propuesta de modelo, se relacionan los componentes abordados y se destacan los resultados obtenidos en base a la experimentación. Este tipo de metodología brinda la comprensión acerca de las propiedades mecánicas y estructuras cristalinas arraigadas a la experimentación, los procesos de fundición, muestra de moldeo y ensayos previos a la obtención de los resultados.
- El diseño de experimentación consta de un plan detallado que se establece antes de llevar a cabo la parte experimental dentro del proceso metodológico propiamente del trabajo investigativo. Este plan incluye la selección de variables a estudiar, la determinación de cómo se van a manipular esas variables, el diseño de las condiciones bajo las cuales se realizarán las observaciones, y la organización de los diferentes tipos de ensayos y tratamiento. Este diseño busca maximizar la precisión y la validez de los resultados obtenidos, controlando adecuadamente los posibles factores de confusión y evitando sesgos.
- La tercera etapa aplica la metodología, se procesa la información y se obtienen los resultados en base a los procedimientos metodológicos propiamente expuestos.
- En la cuarta etapa se analizan los resultados obtenidos y se brindan recomendaciones pertinentes.

2.2. Metodología para el diseño y elaboración de probetas a base de distintas concentraciones de Cu-Al para someterlas a ensayos de laboratorio.

El objetivo del acápite es abarcar la metodología pertinente para el diseño y elaboración de probetas fundidas con distintas concentraciones de Cu-Al y realizarles distintos ensayos de laboratorios. Entendiendo por metodología de diagnóstico a la integración lógica de métodos, técnicas y procedimientos pertinentes que permiten obtener información de valor para caracterizar el objeto.

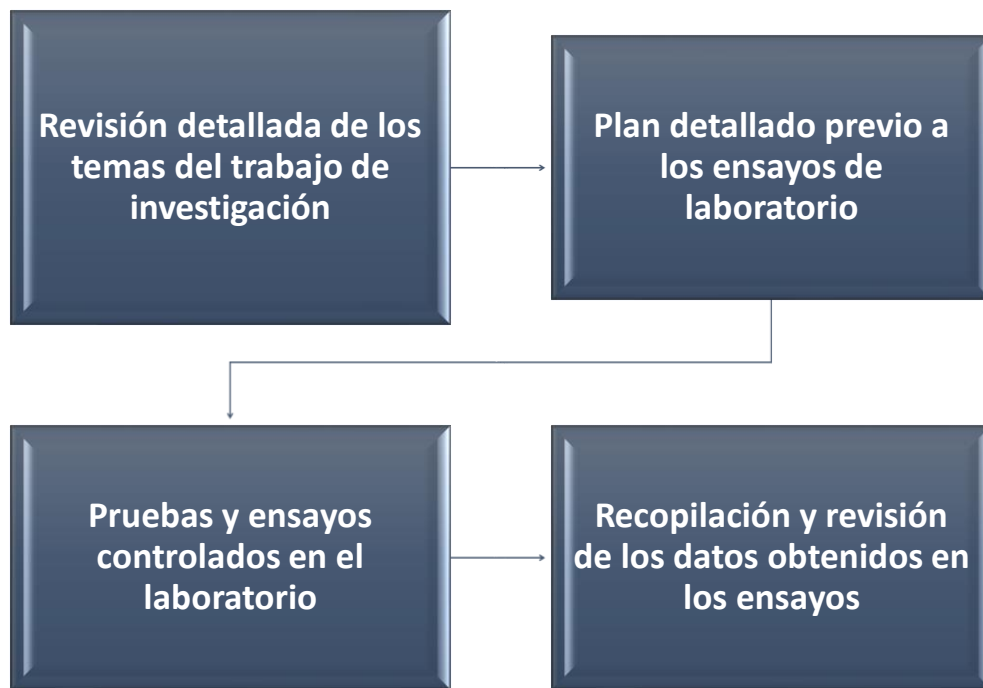
Para poder llegar a tratar la metodología, primero se partió de los resultados en base al análisis de los resultados teóricos del sistema antes visto y de la aseveración del fundido, mecanizado y puesto bajo ensayos determinan un sistema metodológico experimental, complejo, abierto y dinámico con carácter procesal por lo que cada etapa y elementos que se emplean en los procesos tiene un aspecto vital para lograr resultados favorables en el análisis de resultados.

Por lo que, para poder llevar a cabo una metodología para el diseño y elaboración de probetas con una aleación Cu-Al en distintas proporciones, basadas en los estándares ASTM E8, partiremos de las siguientes consideraciones:

- Conocer la realidad en la que se empezará a trabajar dentro de la fundición de las probetas, su mecanizado y pruebas de ensayos, lo cual en gran medida condiciona el tipo de calidad en los resultados de las propiedades mecánicas y cristalinas.
- El análisis teórico muestra que los componentes claves de una buena composición tanto en las propiedades mecánicas y estructura cristalina es la buena fundición y mecanizado bajo las dimensiones empleadas según el porcentaje requerido.
- El empleo de métodos y técnicas pertinentes para obtener el procesado y análisis de información.

- Las conclusiones y recomendaciones en el trabajo de titulación deben ser una herramienta que permita el perfeccionamiento de las actividades para el diseño y elaboración de probetas puestas a prueba bajo ensayos de laboratorio.

Figura 22. *Metodología para el diseño y elaboración de probetas fundidas en base a la aleación Cu-Al en distintas concentraciones para ser sometidas a ensayos de laboratorio.*



Tomado de. Elaboración Propia

2.2.1. Primera etapa. Estudio bibliográfico

Esta etapa tiene como finalidad precisar el objetivo de estudio. Por ende, se debe considerar en orden, lo siguiente:

- Obtención de la información, la cual debe detallar con claridad y objetividad que es lo que ahonda el tema en cuanto a propiedades mecánicas, estructura cristalina, diferentes ensayos

para determinar las propiedades mecánicas, así como dar una primera aproximación de relaciones de variables. Esta información es una orientación importante en la toma de objetivos.

- Verificar que la información obtenida sea confiable mediante libros, páginas web que suministren información relevante para poder sustentarla dentro del proceso investigativo y que enriquezcan la metodología experimental, así mismo como tesis de otros autores que hayan desarrollado algo similar en qué poder basar el tema propuesto y sacar beneficio.
- Valorados los aspectos antes mencionados se fija el objetivo y el alcance de estudio. Entendiéndose por alcance el volumen, costo y complejidad del trabajo a realizar.

2.2.2. Segunda etapa. Diseño de experimentación

En este se detalla el plan trazado para poder abordar los procesos que se realizan a lo largo del tema investigativo. Aquí se determinan las variables a estudiar como lo son el tipo de material, la manera en cómo se manipula cada variable. El entorno representa un aspecto determinante a la hora de ir a desarrollar la metodología experimental puesto que se hace un análisis previo al estado de los implementos de laboratorio para tener conocimiento de las condiciones que están.

Esta etapa se desarrolla en base al análisis de la documentación disponible, de revistas especializadas sobre los temas de referencia. Así se puede entender de manera más general lo que se va a experimentar dentro del proceso metodológico. También se estiman costos para poder adquirir los materiales, implementos y necesidades que puedan ir surgiendo en el transcurso de las prácticas. A su vez, se investiga sobre las normas en la que se manejen las probetas que se vayan a obtener del proceso de fundición, y según las dimensiones es que se recomienda el tipo de mecanizado; para los ensayos de tracción, juega un papel importante las dimensiones y concentraciones de elementos, así como en el ensayo metalográfico.

2.2.3. Tercera etapa. Experimentación de ensayo

En esta etapa se detallan los procedimientos que se llevaron a cabo para la realización y posterior análisis mediante los diferentes ensayos a las probetas hechas con aleación Cu-Al. Entre la metodología implementada, se tiene:

- **Selección de materiales y equipos**

Dentro de esta sección se procede a seleccionar la aleación con la cual se va a trabajar y que sea apropiada para el estudio requerido. Una vez que se lleva a cabo la selección de los metales, se empieza a conseguir los materiales necesarios para la fundición de las probetas. Para esto se reutilizó aluminio comercialmente puro 1100 y cobre comercial; a todo esto, se le fueron dando las proporciones deseadas bajo las normas estandarizadas por la norma ISO 1811.

Se realizó la inspección de los elementos necesarios para llevar a cabo un proceso de fundición, tales como: crisol, combustible, caja, arena de moldeo y equipo de seguridad personal.

- **Preparación de la aleación**

Consiste en la puesta a punto de los materiales a ser utilizados para la obtención de la colada de la aleación, es importante calcular las proporciones de manera precisa según el diseño experimental.

- **Fabricación de probetas**

Se utiliza arena de moldeo y se procedió a realizar el correspondiente filtrado para eliminar impurezas de la arena que tiene que brindar una excelente característica para compactar la fundición y así evitar agrietamientos y desmoronamientos cuando se vierta la mezcla. Es importante decir que la arena tiene que contener la cantidad de humedad necesaria para que el

metal fundido se pueda solidificar correctamente. Luego de esto, se cogen los moldes de manera y se los apila en el suelo para llenarlos con la arena antes filtrada.

Una vez que se va llenando, se procede a compactar con un partillo para eso y ese procedimiento de manufactura se lo repite con cautela y en cada capa de llenado de la arena.

Pasado más o menos 90 minutos que estipula la teoría y después de haber mesclado con ayuda de las pinzas la aleación dentro del crisol que está en el horno de fundición, se procede a sacar la mezcla y con ayuda del compañero se sostiene el crisol con el uso de una pinza para vertido y elevación con la finalidad de verter la aleación fundida en los moldes preparados y se deja enfriar hasta solidificar. Luego de 10 minutos aproximadamente se procede a extraer las probetas de los moldes y se los lleva a que le realicen el acabado superficial mediante limado o rectificado y así eliminar rebatas y asegurar dimensiones precisas.

- **Preparación para ensayos mecánicos**

Se identifican las probetas con etiquetas o marcadores para su posterior identificación, luego de eso se realiza el mecanizado de las probetas para adaptarlas a los estándares de los ensayos de tracción y compresión en cuanto a las normas ASTM E8. Se tiene que tomar en consideración el ángulo de la cuchilla, la velocidad de la misma y que sobre todo que esté lo suficientemente afilada para que dé un buen acabado a la pieza.

- **Realización de ensayos mecánicos**

Se someten las probetas a ensayos de tracción utilizando una máquina de ensayos universal en el laboratorio. Es importante tener en cuenta las dimensiones tanto del diámetro reducido, como la longitud total y longitud reducida para detallarlo en la computadora, así mismo como el peso de cada probeta y una vez registrados los datos se procede a realizar los ensayos en donde para el de

tracción se aplica una carga axial lo que conlleva a que este experimente un porcentaje de elongación y llegue al límite de elasticidad, ocurriendo la falla o ruptura de la probeta. Aquí se determina la carga aplicada y la deformación experimentada, estos ensayos se repiten varias veces con diferentes probetas para obtener resultados representativos y reducir la variabilidad experimental, generalmente se recomienda que sean 8 muestras por ensayo.

Para el ensayo de compresión se utilizan unas probetas planas que primero se lijaron con diferentes numeraciones de granos y una vez que queden bien lisas se las coloca en la máquina y se va tomando datos del procedimiento, como insertar la norma con la que trabaja para el material seleccionado y se le va haciendo la experimentación requerida ubicando en distintas partes de la superficie liza para así tener 8 variables y conseguir un promedio.

- **Análisis metalográfico**

Se preparan las muestras metalográficas mediante el ataque químico del ácido fluorhídrico a la probeta que se usa para la toma de muestra. Para esto como principal acción es la colocación de agua destilada en la fiola, de cierta cantidad para así evitar que se exceda el límite establecido. Luego, se agregan los 2 ml de ácido fluorhídrico y se completa hasta que en probeta estén los 100 ml con los que se trabajará. Se requiere una pipeta fina para poder colocar el ácido. Cuando se junta el agua destilada y el ácido se puede comprobar que al hacer contacto se siente caliente el recipiente porque el ácido fluorhídrico genera una reacción exotérmica lo que ocasiona que haya desprendimiento de calor y por eso se siente ese aspecto físico.

Al momento de colocar la probeta dentro de probeta se calcula el tiempo de 30 sg para que se produzca el ataque químico en el material sumergido. Después se enrrusa el agua destilada para poder llegar al nivel requerido. Se observa la microestructura de las muestras bajo el uso de un

microscopio metalográfico para evaluar la distribución de fases y la presencia de defectos. Todo esto se procede a documentar y fotografiar la microestructura para la constancia dentro de los anexos y posterior análisis y comparación. Se visualiza la estructura macro de la aleación con la ayuda del microscopio que conectado a la laptop muestra las pequeñas incrustaciones o mejor conocidas como segregación debido a que no se ha alcanzado la temperatura requerida para que la mezcla sea homogénea.

Para ello, es necesario contar con el microscopio metalográfico OMAX del laboratorio de materiales, el cual cuenta con aumentos de 4x, 10x, 40x y 100x. Para capturar las imágenes de lo observado en el microscopio se aprovechó la capacidad del mismo de ser conectado por medio de USB a la computadora y permitir la visualización de la probeta por medio del software ToupView.

2.2.4. Cuarta etapa. Análisis y discusión

Se analizan los resultados de los ensayos mecánicos y el análisis metalográfico para identificar relaciones entre la composición de la aleación, su microestructura y su comportamiento mecánico. A su vez, se discuten las implicaciones de los hallazgos en relación con la literatura previa y las hipótesis planteadas.

También se identifican las áreas de mejora en la metodología y se sugiere direcciones para investigaciones futuras que aporten en el desarrollo teórico-práctico.

Conclusiones del capítulo.

Se propone una metodología basada en la experimentación teórica-práctica de los fundamentos intrínsecos del diseño y obtención de probetas en base a la fundición del Cu-Al para ser sometidos a ensayos mecánicos. Al seguir esta metodología detallada, se pueden obtener datos confiables y significativos sobre las propiedades mecánicas y la estructura microscópica de las

aleaciones Cu-Al, lo que viene siendo una contribución importante al avance del conocimiento en este tipo de campo.

Capítulo III. Resultados y Discusión

3. Resultado del estudio del diagnóstico

Este capítulo tiene por objetivo la presentación y discusión de los resultados del trabajo de investigación, para poder obtener los mismos se aplicó la metodología para el diseño y elaboración de las probetas sometidas a ensayos de tracción, compresión y ensayo metalográfico. Los mismos que muestran la valoración de las composiciones mecánicas y cristalinas de la aleación obtenida dentro de la metodología de fundición y mecanizado de las probetas bajo la normativa ASTM E8.

3.1. Delimitación del estudio y experimentación de campo para la aleación Cu-Al

Atendiendo a la metodología para el estudio y experimentación de la aleación obtenida se precisan los puntos como: las dimensiones de la muestra, el diseño y fundición de la aleación, ensayos mecánicos, ensayo metalográfico y la aplicación del instrumento de estudio bajo los distintos ensayos mecánicos.

3.1.1. Dimensiones de la muestra

Según (ASTM, 2015) que determina las dimensiones requeridas para el correcto diseño de las probetas bajo fundición en arena estipula que para el diámetro exterior se tiene un rango entre 4.0 mm a 15 mm, en el radio tienen un rango estipulado entre 4 mm a 10 mm y la longitud total de las probetas mantiene un promedio de entre 20 mm a 165 mm. Para el diámetro interior tenemos valores cercanos a 12.5 mm.

3.1.2. Diseño y fundición de la aleación

El material que se emplea es Aluminio 7075 que refiere a una aleación de aluminio tratable térmicamente muy empleada en situaciones en las que se requiere una gran resistencia mecánica y ligereza a la vez. Esta aleación posee un límite elástico y de rotura muy superior a las demás aleaciones de aluminio.

A continuación, se detallan los respectivos pesos que se usaron acorde a las concentraciones de las probetas empleadas en cada caso, estando estas definidas en gramos. Todas estas fueron escogidas dentro de lo admisible por la norma, estando un poco limitadas por el tamaño de las barras.

- **Concentración del 10%**

Para la fundición de la respectiva aleación se procedió a tomar las medidas de las cantidades de concentración tanto de aluminio y cobre. Se cortó los metales y con ayuda de la balanza se tomaron los pesos respectivos; para el cobre se usó un peso de 50 g y en el aluminio 500 g para realizar la fundición con el 10% de concentración. Una vez pesado los metales se prepara con ayuda de moldes de madera la arena que se filtra mediante el proceso de tamizado y se colocó dentro de los moldes de madera para proceder a compactar por capas la misma y tenerla lista para verter la mezcla fundida.

Se alista el horno de fundición donde se llegó a una temperatura mayor de 760°C y así poder llevar a cabo un proceso adecuado de homogenización de la mezcla. Se espera aproximadamente un tiempo de 90 minutos para asegurarse de que todo el material quede bien fundido y de ahí se lo extrae con ayuda de las pinzas y verterlo dentro de los moldes de madera. El tiempo que se espera para que la mezcla de pueda solidificar correctamente es de aproximadamente 10 minutos. Luego de esto, se quita el molde y cuidadosamente se retira las primeras probetas fundidas bajo una concentración del 10%.

- **Concentración del 5%**

Se procede a replicar los pasos mencionados y detallados anteriormente pero ahora se trabajará con una concentración del 5%, donde nuevamente se vuelve a cortar los metales y

pesarlos con ayuda de la balanza, estimando un peso para el cobre de 300 g y con la metodología de fundición de obtuvieron las siguientes probetas bajo la concentración del 5%.

3.1.3. Ensayos mecánicos

Las probetas pasaron por un proceso de mecanizado, para poder conseguir el acabado requerido y las dimensionas planteadas que se encuentran dentro de lo permitido por las normas ASTM E8.

3.1.3.1. Ensayo de tracción

Antes de proceder a la realización del ensayo es importante tomar una serie de medidas a la probeta a fin de garantizar la validez de ésta como objeto a ensayar. Para los ensayos de tracción se realizaron aplicando las correspondientes normas ASTM, dentro de las cuales se establece que:

- Ensayos de tracción: E8M-00

La normativa mencionada pone amuestra las dimensiones admisibles que tiene que tener las probetas, el procedimiento correcto de ensayo y los instrumentos de medida que se usarán para la obtención de datos en el proceso de tratamiento correspondiente. Con la realización de estos ensayos se pretende determinar la elongación sufrida por parte del material al verse sometido a fuerzas axiales de acuerdo a lo establecido por la normativa. Para estas probetas se verifican las medidas específicas A, D y R; que involucran el diámetro de la sección reducida (D) el cual se mide en tres puntos, anotando todos los valores y considerando a su vez el valor medio del diámetro. Por otra parte, se revisa que cada caso dentro de la sección reducida no presente irregularidades tales como entalladas o fisuras que provoquen una variación en la medida tomada. Luego de haber comprobado los parámetros dimensionales a las probetas se marca la distancia inicial entre puntos mediante el uso de un tintado con rotulador indeleble a la probeta, en donde se

señale la distancia G indicada por la normativa. Una vez realizado lo anterior, se monta la probeta en la máquina de ensayos y procede a aplicarle las cargas.

Como nosotros trabajamos con probetas cilíndricas, estas deben cumplir que la longitud inicial entre puntos sea cinco veces el diámetro. En nuestro caso el diámetro de la primera probeta fue de 13 mm, y la sección reducida fue de 9.84; la distancia entre puntos (G) es de 44.56 mm; por su parte la longitud total fue de 99 mm, cumpliendo con dicho requisito. Para la segunda probeta se desarrolló con un diámetro de 12.5 del área normal y en el área reducida fue de 9.99 mm. La longitud total es de 70 mm y la longitud reducida fue de 32.16 mm.

Este ensayo mecánico por método de tracción consiste en someter la probeta a esfuerzo axial aplicando tensiones cada vez mayores, hasta que llegue al límite de rotura del material. Durante la realización de los respectivos ensayos se registran la deformación sufrida por la probeta y la carga que se aplicó, siendo estos datos que complementan en la determinación de los parámetros señalados. Para la primera prueba se aplicó una carga de 144.25 N/mm^2 y en la segunda fue de 116.86 N/mm^2 , teniendo un porcentaje de elongación para el primero del 4.47% y para el segundo 9.08%.

Haciendo un promedio entre ambas se tiene una carga de 130.55 N/mm^2 y un porcentaje de elongación del 6.77%.

Tabla 11. Resultados de un ensayo de tracción con concentración de 10%

	OK	Date	Time	Fm N	Rm N/mm²	dLH mm	dLB mm	Strain %
1	X	06.02.24	11:47	8853.20	144.25	1.99	1.99	4.47
2	X	06.02.24	11:56	9159.58	116.86	2.92	2.92	9.08
3	X	06.02.24	12:10	9210.30	132.45	1.86	1.86	5.12
4	X	06.02.24	12:17	8845.23	154.12	2.87	2.87	8.03
5	X	06.02.24	12:25	9103.54	115.10	1.97	1.97	4.40
6	X	06.02.24	12:32	8841.38	125.74	2.94	2.94	9.10
7	X	06.02.24	12:40	9451.74	111.96	1.90	1.90	5.02
8	x	06.02.24	12:48	8931.60	117.68	2.93	2.93	8.45

Nota: Resultado de ensayos de tracción a la aleación Cu-Al. Tomado de Pruebas de laboratorio.

La velocidad de la carga para el caso del aluminio, según la norma se sitúa entre 1.15 y 11.5 Mpa/s para control por carga y entre 0.05 y 0.5 metros por metro de longitud de la sección reducida y en minuto para lo que viene siendo control de desplazamiento. La realización del ensayo propiamente dicho consta de varias etapas que hay que considerar:

- Primer paso: situar la probeta sujetándola con las mordazas la cabeza de la misma y una vez hecho eso se fija el extensómetro.
- Segundo paso: Definidos los parámetros tanto en el programa como en el control de la máquina de tracción se lleva a cabo el ensayo y se aplica la carga.

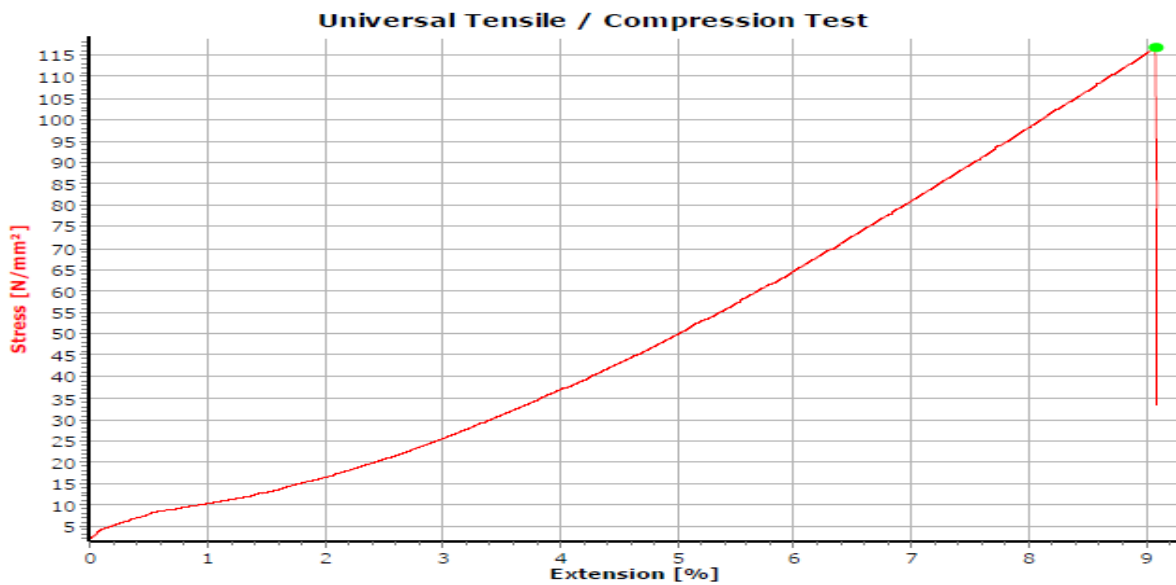
Tabla 12. Promedio obtenido de los ensayos de tracción con concentración del 10%

	Fm N	Rm N/mm ²	dLH mm	dLB mm	Strain %
Average	9049.57	126.02	2.42	2.42	6.71

Nota: Promedio establecido en base a los ensayos de tracción. Tomado de Pruebas de laboratorio.

Finalizado el ensayo se la misma máquina arroja en la computadora los datos respecto a la carga de rotura, la medida de G tras la rotura y el porcentaje e elongación en base a los resultados obtenido. Para luego promediarlo y arrojar un equivalente a los 8 ensayos realizados.

Figura 23. Gráfica esfuerzo-deformación de ensayo de tracción con concentración del 10%



Nota: Diagrama esfuerzo-deformación donde se ve un incremento de la tensión en base a la fuerza aplicada, por elaboración de pruebas de laboratorio.

Se determina que en la concentración del 10% se tiene una variación en cuanto a la fuerza aplicada en cada probeta y el respectivo porcentaje de elongación que se vio en el límite elástico.

Tabla 13. Promedio obtenido de los ensayos de tracción con concentración del 5%

	OK	Date	Time	Fm N	Rm N/mm²	dLH mm	dLB mm	Strain %
1	X	06.02.24	12:50	3990.16	58.99	0.65	0.65	1.45
2	X	06.02.24	12:56	2450.58	45.86	0.78	0.78	1.28
3	X	06.02.24	13:10	3870.30	68.45	0.60	0.60	2.12
4	X	06.02.24	13:17	2730.23	52.12	0.71	0.71	1.33
5	X	06.02.24	13:25	3754.54	49.10	0.67	0.67	2.02
6	X	06.02.24	13:32	2540.38	55.74	0.74	0.74	1.30
7	X	06.02.24	13:40	3685.74	47.96	0.55	0.55	2.05
8	x	06.02.24	13:48	2310.60	50.68	0.80	0.80	1.65

Nota: Resultado de ensayos de tracción a la aleación Cu-Al al 5%. Tomado de Pruebas de laboratorio.

En la presente tabla se detallan los valores obtenidos procedentes del ensayo de tracción para la concentración de aleación al 5%, en donde se observan datos como la fuerza aplicada a la probeta, así mismo como las elongaciones y su porcentaje requerido.

Tabla 14. Promedio obtenido de los ensayos de tracción con concentración del 5%

	Fm N	Rm N/mm²	dLH mm	dLB mm	Strain %
Average	3166.57	53.61	0.68	0.68	1.65

Nota: Promedio establecido en base a los ensayos de tracción. Tomado de Pruebas de laboratorio.

En la tabla donde se muestran los promedios obtenidos en función a la valoración del ensayo de tracción, podemos notar en comparación a la Tabla 13 que con una concentración del 5% para el ensayo de tracción, esta resulta ser más frágil para poder soportar las cargas axiales presentes dentro de la experimentación de laboratorio, por eso es que tiene menor porcentaje de elongación debido a que a menor porcentaje la magnitud en la que el material puede estirarse también será menor, siendo así un proceso directamente proporcional.

3.1.3.2. Ensayo de dureza

En este ensayo se ve la aplicación de una fuerza axial que tiende a comprimir una muestra de material entre dos superficies paralelas, determinando así la dureza de la aleación. Para esto se hicieron uso de otras probetas que mediante el ensayo de compresión se proporcionó información valiosa sobre las propiedades mecánicas del material, como la resistencia a la compresión, la resistencia al aplastamiento y el módulo de elasticidad. Para poder llevar a cabo los ensayos se siguen varios pasos meticulosos:

- **Primero:** se debe tener previamente lijadas las probetas con varias numeraciones de menor a mayor para dejarlas lisas y así poder tener una superficie más uniforme a la hora de ensayarlas mediante el proceso de compresión y que no haya desigualdades a la hora de toma de datos.
- **Segundo:** se hace la correcta inserción de la información requerida por la máquina acerca del tipo de prueba en donde también se le añade la presión a trabajar según las normas INEN 125 para ensayos de dureza tipo Rodwell.
- **Tercero:** una vez que se haya digitado los datos se procede al ensayo de dureza donde en cada intervalo hay que esperar un tiempo de 10 segundos, Para esto se determinaron los

datos y el máximo de carga axial que toleró el material fue de 75.36 N/mm² y en el mínimo se obtuvo 64.26 N/mm².

El promedio obtenido en base a los 8 ensayos en función a las mismas dimensiones de la probeta fue de 71.1 N/mm² con una varianza de 9.5 N/mm².

Tabla 15. *Ensayos de compresión a probetas de aleación Cu-Al*

No	Tipo	Valoración
1	HRB	64.3
2	HRB	70.2
3	HRB	70.0
4	HRB	70.5
5	HRB	72.8
6	HRB	75.4
7	HRB	73.2
8	HRB	72.4

Nota: Promedio establecido por ensayos de compresión. Tomado de Pruebas de laboratorio.

Se puede observar que hay diferencias, es decir, variaciones en cuanto a los ensayos de compresión y esto se debe a que la superficie no está completamente lisa lo que ocasiona que la presión ejercida en las diversas partes de la superficie no sean las mismas y por ello se generen estos valores distintos.

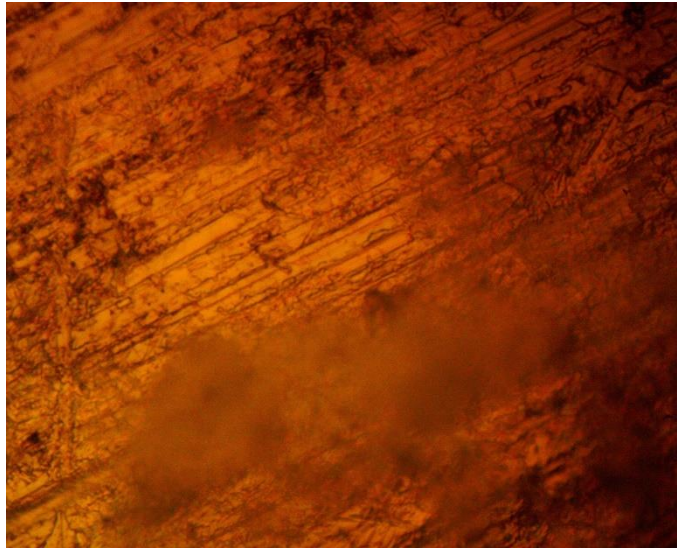
3.1.4. Ensayo metalográfico

Para realizar los ensayos metalográficos se realiza mediante ataque químico, con esto se puede ver las concentraciones de Cu y Al a través del microscopio; la metodología para realizar se detalla a continuación:

- Se debe lijar las superficies de la probeta con las siguientes medidas: 2000, 1500, 1200, 1000, 600, 500 y cada intervalo debe durar 10 minutos acompañado de la lija la misma que debe ser humedecida con agua y alcohol después de cada pasada.
- Una vez terminado el paso del lijado de las superficies de las probetas se lleva a un estudio de laboratorio donde se añade una mezcla de 100 ml de agua destilada y 2 ml de ácido fluorhídrico en una fiola.
- A esto, se le agrega una pequeña cantidad de agua con la finalidad de que no se vaya a pasar del límite indicado. Se vierten 2 ml de ácido fluorhídrico y se termina de llenar donde indica la fiola.
- Luego que se haya llevado a cabo el procedimiento anterior, en otro recipiente se vierte la mezcla de agua destilada y ácido fluorhídrico para sumergir las probetas y se deja unos 30 segundos controlados por un temporizador.
- Pasado el tiempo se retira la probeta y se lleva al microscopio para ver la macroestructura de la aleación Cu-Al.

Los resultados del ensayo metalográfico de acuerdo a la figura 23, muestran la estructura metalográfica de la aleación Cu – Al, en el punto más liso de la probeta:

Figura 24. *Estructura metalográfica de la aleación Cu – Al, a 100x*

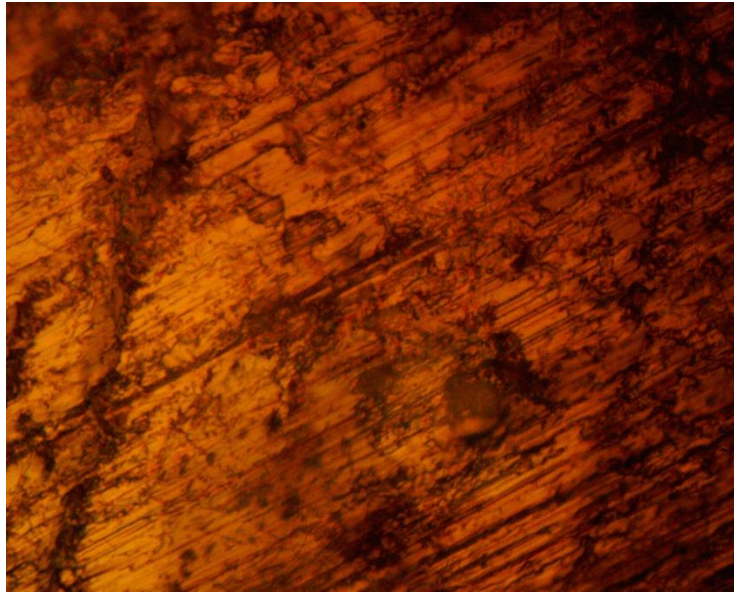


Nota: Estructura metalográfica de la aleación Cu-Al, vista desde un microscopio. Tomado de elaboración propia.

Como podemos observar en la figura, la aleación presenta en la zona de estudio, buena segregación, lo cual da lugar para concluir que el rango operacional de temperatura de 740 °C de acuerdo al diagrama de fases, permite una difusión correcta del cobre en el aluminio.

Por su parte, en la figura 25 se muestra otra área de la probeta, en la cual se pueden observar los puntos de concentración del cobre, lo que da lugar, a una baja disolución del cobre en el aluminio, generando segregación.

Figura 25. *Estructura metalográfica de la aleación Cu – Al, a 100x*



Nota: Estructura metalográfica de la aleación Cu-Al, vista desde un microscopio a 100x. Tomado de elaboración propia.

Conclusiones

Basándonos en el estudio de las propiedades mecánicas y cristalinas de la aleación Cu-Al fundidas en el laboratorio y sometidas a ensayos de tracción, dureza y análisis metalográfico; se ha podido obtener una comprensión profunda de su comportamiento bajo diferentes cargas y condiciones. Los ensayos mecánicos como el de dureza revelaron la resistencia y la ductilidad del material, consiguiendo que este sea más ligero y que tenga la capacidad de tolerar cargas mucho mayores; proporcionando así información crucial sobre su capacidad para soportar fuerzas de tensión. Por otro lado, los ensayos de compresión ofrecieron una visión de la capacidad del material para soportar cargas axiales de compresión, lo que es importante para entender su comportamiento bajo diferentes tipos de esfuerzos.

Dentro de las generalidades de la aleación Cu-Al se puede argumentar que es una aleación que presenta buena maleabilidad y que cuenta con buena ductilidad debido a las propiedades propias del aluminio; también, actúa como agente conductor de calor lo que permite el mejor proceso de fundido a la hora de la mezcla. El análisis metalográfico junto con la observación de la macroestructura utilizando un microscopio permitió examinar la microestructura interna de la aleación Cu-Al. Esto proporcionó tener información clave sobre la distribución de fases, el tamaño de grano y cualquier posible defecto o irregularidad en la estructura cristalina. Estos datos son fundamentales para comprender cómo se forman y se comportan las diferentes fases dentro del material, lo que a su vez influye en sus propiedades mecánicas.

Para finalizar, este tipo de estudios y sus procedimientos relacionados a las propiedades mecánicas y cristalinas mediante ensayos experimentales de tracción, dureza y ensayos metalográficos sirvieron para determinar la composición propia de la aleación fundante.

Recomendaciones

Se hace referencia a los aspectos concluidos con la investigación y a otros relacionados con el trabajo realizado.

- Se recomienda ajustar el proceso de fundición y tratamiento térmico para obtener una microestructura más homogénea y refinada. Esto puede mejorar las propiedades mecánicas, como la resistencia y la ductilidad, al reducir el tamaño de grano y minimizar las imperfecciones en la estructura cristalina.
- Realizar pruebas con otras concentraciones y materiales aleantes para establecer el cambio en las propiedades mecánicas de la aleación Cu-Al.
- Explorar el uso de técnicas avanzadas de caracterización microestructural, como la microscopía electrónica de barrido (SEM) y la difracción de rayos X, para obtener una comprensión más detallada de la estructura cristalina y la distribución de fases en la aleación Cu-Al.
- Buscar nuevas aplicaciones y oportunidades de diseño para la aleación en función de sus propiedades mecánicas y cristalinas. Esto podría implicar colaboraciones con industrias específicas o el desarrollo de nuevos productos que aprovechan las características únicas de este material.

Referencia Bibliográfica

- Ashby, M. F. (2019). *MATERIALES PARA INGENIERÍA 2: Introducción a la microestructura, el procesamiento y el diseño*. Barcelona: Editorial Rverté, S. A.
- Askeland, D. R. (1999). *Ciencia e Ingeniería DE LOS MATERIALES*. Mexico: International Thomson Editores, S.A. de C.V.
- Askeland, D. R. (2012). *The Science and Engineering of Materials*. Mexico: International Thomson Editores S.A. de C.V.
- ASTM. (2015). *Standar Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM, vol. E8*. United States: IHS.
- Barroso Herrero Segundo, I. U. (2014). *INTRODUCCIÓN AL CONOCIMIENTO DE MATERIALES*. Madrid: Edición digital: febrero de 2014.
- Bercero, J. R. (2010). *Introducción Al Conocimiento de los Materiales y a sus Aplicaciones*. Madrid:
<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=2b558cn2jscC&oi=fnd&pg=PA5&dq=Introducci%C3%B3n+al+tema+estudio+de+las+propiedades+mec%C3%A1nicas+y+cristalinas+de+la+aleaci%C3%B3n+cobre+aluminio&ots=3XX5-juN0e&sig=6ZtHIULFA3J2f41hZuf9u9hN66w#v=onepage&q&f=fals>.
- Caiza, M., & Mayorga, A. (23 de Septiembre de 2020). *UPS - TTS169*. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19293/1/UPS%20-%20TTS169.pdf>
- Callister, W. D. (2012). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales 1*. Barcelona: Editorial Reverté, S. A., 2012.

- Escacena, J. (17 de Noviembre de 2020). *CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE ALUMINIO 7075-T651*. Obtenido de <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/4089/>
- Escamilla, A. (22 de noviembre de 2023). *Biblus*. Obtenido de <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/20385/fichero/04-MaterialesDePartida.pdf>
- F., F. P. (2010). *MECÁNICA DE MATERIALES*. México: Mc GRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Groover, M. P. (2015). *Fundamentos de Manufactura Moderna Tercera Edición*. México: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Kalpakjian, S. S. (2008). *Manufactura ingeniería y tecnología*. México: Pearson.
- Madrid, U. C. (06 de 02 de 2022). *Proyecto de Innovación Atlas Metalográfico*. Obtenido de <https://www.ucm.es/atlasmetalografico/diagrama-cu-al>
- Mayori, A. M. (2022). *Resistencia de Materiales Aplicada*. La Paz - Bolivia: Editorial Yucatán Hermosa.
- Mazurek, B. &. (2017). *MECÁNICA de MATERIALES*. México: Mc GRAW HILL/INTERAMERICANA EDITORES. S.A. DE C.V.
- Miguel Cervera Ruiz, E. B. (2015). *Resistencia de Materiales*. Barcelona: CIMNE.
- Molt, R. (2006). *DISEÑO DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS*. México: PEARSON EDUCATION DE MÉXICO, S.A. DE C.V.
- Molt, R. L. (2009). *Resistencia de Materiales*. Mexico: PEARSON EDUCACIÓN, MEXICO, 2009.

Nisbelt., R. G. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica*. México: Mc GRAW-HILL/INTERAMERICANA. EDITORES, S.A. DE C.V.

Nuria, G. A. (2018). INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA DE LOS MATERIALES Y SUS APLICACIONES (I). Bilbao: https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/51171/mod_resource/content/0/Tema%206-Comportamiento%20mec%C3%A1nico%20de%20los%20materiales.pdf.

Rethwisch, D. G. (2017). *CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES*. Barcelona: Editorial Reverté. S.A.

S. Kalpakjian, S. R. (2008). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. México: Pearson Educación de Mexico, S.A. de C.V.

Shackelford, J. (2010). *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. Madrid: Pearson.

Silva, W. J. (2012). *Ingeniería y Procesos de Manufactura I*. Perú: Editorial Universitaria S.A.

Singer, A. P. (1994). *Resistencia De Materiales*. México: Harla, S.A. de C.V.

ANEXOS

Anexo 1. Determinación de los pesos respectivos para el proceso de fundición.



Anexo 2. Tamizado de la arena de moldeo y fundición de los metales.



Anexo 3. Implementación de pirómetro para calcular el nivel de temperatura del horno.



Anexo 4. Obtención de las probetas y mecanizado de las mismas.



Anexo 5. Resultado del mecanizado de las probetas acorde a las normas ASTM E8



Con concentración de 5%



Con concentración de 10%

Probetas para ensayo de compresión y
metalográfico.



Anexo 6. Peso de las probetas en distintas concentraciones para analizarlos en los ensayos.

Concentración de 10%



Concentración de 5%



Anexo 7. Aplicación del ensayo de tracción a las probetas.



Anexo 8. Resultados obtenidos del ensayo de tracción.

Diagnóstico del ensayo en probetas en base a la aleación Cu-Al con 5% de concentración.

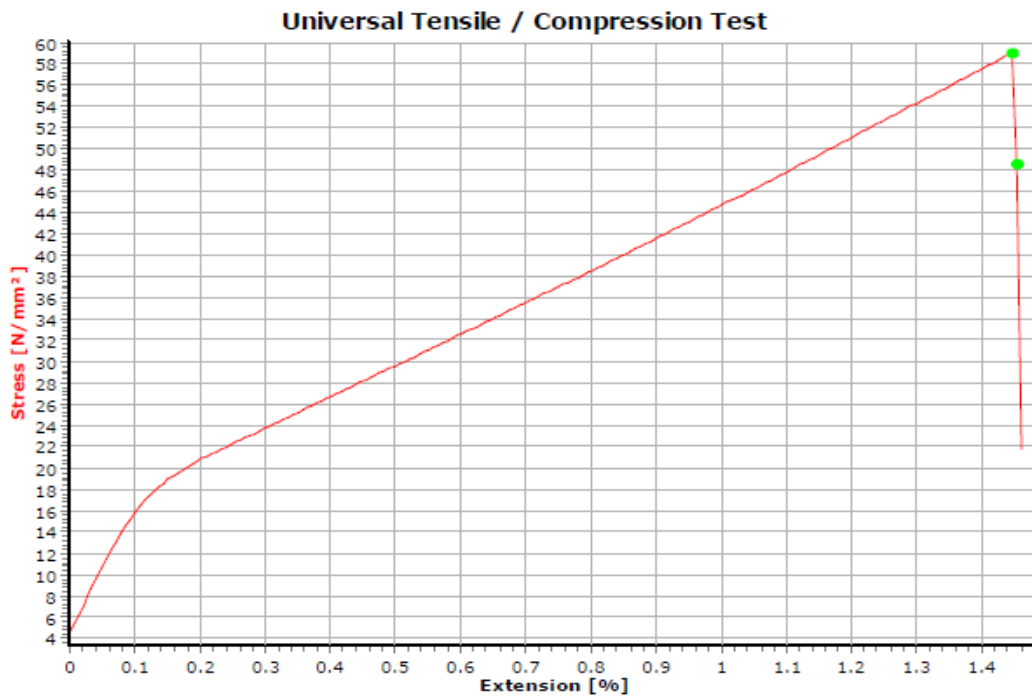
Operator:
Material: Aluminio cobre
File name: MVL

Date: 06.02.24
Time: 11:30

Test parameters

Material : Aluminio cobre
Batch number :
Order number :
Test : Universal Tensile / Compression Test
UTM type : Machine
Load cell : 100 kN
Extensometer : XHead

Customer number :
Operator :
Department :



Test results

	OK	Date	Time	Fm N	Rm N/mm ²	dLH mm	dLB mm	Strain %
1	x	06.02.24	11:30	3990.16	58.99	0.65	0.65	1.45

Statistics n = 1

	Fm N	Rm N/mm ²	dLH mm	dLB mm	Strain %
Average	3990.16	58.99	0.65	0.65	1.45

Diagnóstico del ensayo en probetas en base a la aleación Cu-Al con 10% de concentración.

Operator:
Material: Aluminio cobre
File name: MVL

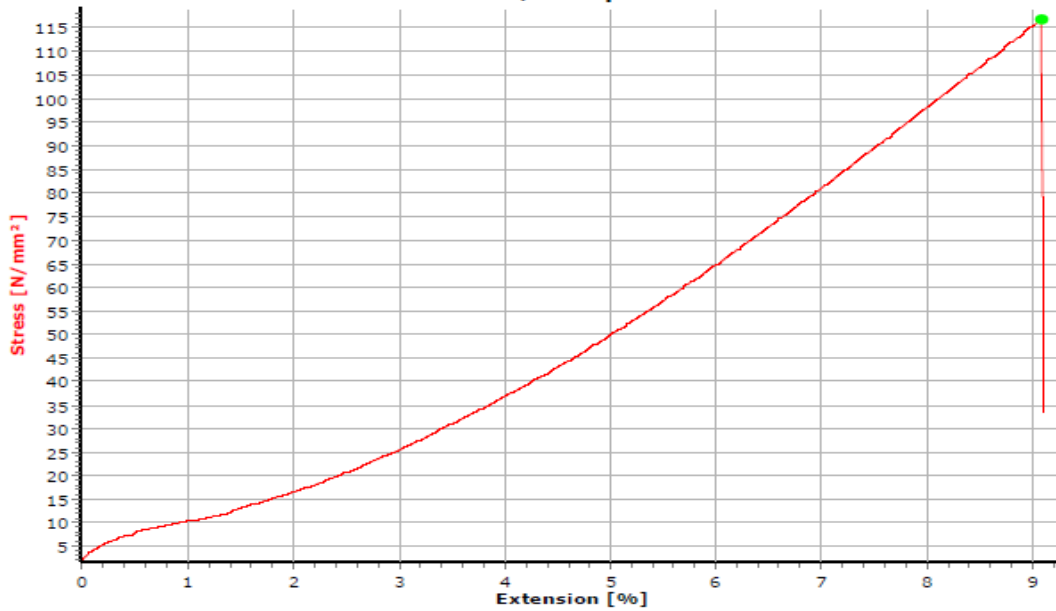
Date: 06.02.24
Time: 11:56

Test parameters

Material : Aluminio cobre
Batch number :
Order number :
Test : Universal Tensile / Compression Test
UTM type : Machine
Load cell : 100 kN
Extensometer : XHead

Customer number :
Operator :
Department :

Universal Tensile / Compression Test



Test results

	OK	Date	Time	Fm N	Rm N/mm ²	dLH mm	dLB mm	Strain %
1	x	06.02.24	11:47	8853.20	144.25	1.99	1.99	4.47
2	x	06.02.24	11:56	9159.58	116.86	2.92	2.92	9.08

Statistics n = 2

	Fm N	Rm N/mm ²	dLH mm	dLB mm	Strain %
Average	9006.39	130.55	2.46	2.46	6.77

Anexo 9. Resultados obtenidos del ensayo de compresión.



Anexo 10. Procedimiento en ensayo metalográfico por ataque abrasivo.



Anexo 11. Observación mediante el microscopio para analizar la estructura macroscópica.

