



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIOPÁEZ

**EVALUACIÓN DE LA ENERGÍA ABSORBIDA
POR UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO
SOMETIDA A ENSAYO CHARPY**

Urb. Yuma II, calle N° 3. Municipio San Diego
Teléfono: (0241) 8714240 (master) – Fax: (0241) 8712394



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**EVALUACIÓN DE LA ENERGÍA ABSORBIDA POR UNA ALEACIÓN DE
ALUMINIO SOMETIDA A ENSAYO CHARPY**

**Trabajo especial de grado presentado como requisito para optar al
título de**

INGENIERO MECÁNICO

Autores:

Restrepo P, Giovanna B.

C.I.: 18.468.702

Suarez G, Moisés A.

C.I.: 20.029.891

Tutor: Ing. Camejo T. Franklin J.

San Diego, junio de 2017



Universidad José Antonio Páez
Facultad de Ingeniería

FI-70-2017-1GB-076

Valencia, 13 de Enero de 2017.

Ciudadanos,
Suárez Mohés
C.I. 28.029.891
Restrepo Giovanna
C.I. 18.468.762
Presente -

Cumpla con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 1-2017 de fecha 13/01/2017 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado "EVALUACIÓN DE LA ENERGÍA ABSORBIDA POR UNA ALEACION DE ALUMINIO SOMETIDA A ENSAYO CHARPY" presentado por ustedes como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Ing. Franklin Camejo, C.I. 13.045.723 y la Ing. Alicia Pizzella, C.I. 4.598.880 como Tutores Académicos que lo asesorarán en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,


Prof. Marlene Zambrano
Decana (Encargada) de la Facultad de Ingeniería
(C.I. 502 de fecha 11/10/2016)



c.c. Coordinación de Preventas y Trabajo de Grado (C).
Archivo.

MZ/20



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Franklin J. Camejo T. portador de la cédula de identidad N° 13.045.753, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por los ciudadanos Giovanna Restrepo, portadora de la cedula de identidad N° 18.468.702 y Moisés Suárez, portador de la cedula de identidad N° 20.029.891 titulado **EVALUACIÓN DE LA ENERGÍA ABSORBIDA POR UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO SOMETIDA A ENSAYO CHARPY**, presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los 09 días de junio del año dos mil diecisiete.

Ing. Franklin J. Camejo T.

C.I.: 13.045.723



ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	XII
RESUMEN INFORMATIVO	XIVV
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO

I EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del Problema.	3
1.2 Formulación del problema.	5
1.3 Objetivos de la investigación.	5
1.3.1 Objetivo general.	5
1.3.2 Objetivos específicos.	5
1.4 Justificación.	5
1.5 Alcance.	6

II MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes.	7
2.2 Base teórica.	10
2.2.1 Generalidades del aluminio.	10
2.2.2 Clasificación del aluminio	12
2.2.3 Designación de las aleaciones de aluminio	12
2.2.4 Características del aluminio y sus aleaciones.....	14
2.2.5 Tratamientos térmicos del aluminio y sus aleaciones.....	18
2.2.6 Influencia de los elementos de aleación en el aluminio	21

2.2.7 Aleación de aluminio 2024.....	23
2.2.8 Software estadístico	32
2.2.9 Ensayo de metalografía	32
2.2.10 Espectrometría de emisión por chispa	32
2.2.11 Análisis químico	33
2.2.12 Tracción.....	33
2.2.13 Curvas esfuerzo - deformación.....	34
2.2.14 Impacto.....	37
2.2.15 Ensayo Charpy.....	37
2.2.16 Falla y Fractura.....	42
2.2.17 Trabajo, calor y temperatura.....	30

III MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de investigación.....	48
3.2 Diseño de la investigación	48
3.4 Población y muestra.....	48
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	48
3.6 Fases de la investigación	49

IV RESULTADOS

4.1 Caracterización del material, mediante análisis químico y ensayos mecánicos..	50
4.2 Análisis de la selección de las probetas	78
4.3 Análisis de los resultados del ensayo Charpy	78
4.4 Análisis de las condiciones favorables y desfavorables del material	81
CONCLUSIONES.....	83
RECOMENDACIONES.....	85
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
ANEXOS.....	

ÍNDICE DE FIGURAS

CONTENIDO FIGURA	pág
1	Influencia del Mg en las propiedades mecánicas de las aleaciones Al –Cu..... 23
2	Diagrama de fases de una aleación Aluminio - Cobre..... 25
3	Diagrama de fases del sistema Al – Cu - Mg..... 25
4	Curvas de envejecimiento natural de la aleación 2024 en comparación con otras aleaciones..... 26
5	Enejecimiento natural de la aleación 2024..... 26
6	Microscopía de una aleación 2024 – O atacada con ácido nítrico al 25%. 500X..... 27
7	Micoscopia de una aleación de aluminio 2024 extruida..... 28
8	Microscopía de la aleación 2024 con tratamiento térmico T6..... 31
9	Fases del ensayo de tracción..... 35
10	Probeta para un ensayo de tracción..... 36
11	Curva típica de esfuerzo deformación..... 37
12	Péndulo de Charpy..... 39
13	Probeta Charpy con entalladura en V..... 40
14	Probeta Charpy con entalladura en U..... 40
15	Secuencia del ensayo Charpy..... 42
16	Falla en materiales..... 42
17	Tipos de fractura a tracción..... 44
18	Superficies características de fractura por fátiga de materiales..... 45
19	Fractura frágil..... 45
20	Efectos residuales al doblar una viga de sección rectangular..... 46
21	Espectro Fotómetro..... 50
22	Tamaño estándar de probetas de tracción..... 51
23	Máquina de corte por control numérico..... 51
24	Máquina de ensayo de tracción..... 52

25	Muestra para el análisis metalográfico.....	53
26	Probeta para ensayo de tracción.....	60
27	Probeta A, luego de ensayo de tracción.....	61
28	Probeta B, luego de ensayo de tracción.....	63
29	Probeta C, luego de ensayo de tracción.....	65
30	Microscopía longitudinal 200X.....	70
31	Microscopía longitudinal 400X.....	71
32	Microscopía transversal 100X.....	72
33	Microscopía transversal 200X.....	72
34	Comparación longitudinal de la microscopia de la aleación 2024 -T6.....	73
35	Probeta para el análisis metalográfico luego de un recocido....	74
36	Microscopía longitudinal luego de un recocido 100X.....	75
37	Microscopía longitudinal luego de un recocido 200X.....	75
38	Microscopía longitudinal luego de un recocido 400X.....	76
39	Microscopía longitudinal luego de un recocido 1000X.....	77
40	Comparación longitudinal de la microscopia de la aleación 2024 – T6.....	78
41	Probeta para ensayo Charpy.....	79

LISTADO DE TABLAS

CONTENIDO	pág.
TABLA	
1 Designación del aluminio y aleaciones de forja.....	13
2 Propiedades de algunas aleaciones de aluminio a temperatura ambiente.....	20
3 Ficha técnica de la aleación 2024	29
4 Propiedades mecánicas de la aleación 2024 en sus diferentes etapa.....	30
5 Datos obtenidos del ensayo espectrométrico.....	58
6 Promedio en la composición química de la aleación de aluminio en estudio.....	59
7 Composición química de la aleación Al – Cu.....	60
8 Datos obtenidos den ensayo de tracción de las probetas A, B y C.....	67
9 Valores obtenidos de la microdureza Vickers.....	69
10 Valores promedio de la microdureza Vickers.....	69
11 Ángulo final del péndulo, energía y tenacidad de la muestra de aluminio.....	80

LISTADO DE GRÁFICOS

CONTENIDO	pág.
TABLA	
1 Gráfica fuerza – desplazamiento, probeta A.....	62
2 Gráfica esfuerzo – deformación, probeta A	63
3 Gráfica fuerza – desplazamiento, probeta B	64
4 Gráfica esfuerzo – deformación, probeta B.....	65
5 Gráfica fuerza – desplazamiento, probeta C	66
6 Gráfica esfuerzo – deformación, probeta C	67
7 Composición química de la aleación Al – Cu.....	60
8 Datos obtenidos den ensayo de tracción de las probetas A, B y C.....	67
9 Valores obtenidos de la microdureza Vickers.....	69
10 Valores promedio de la microdureza Vickers.....	69
11 Ángulo final del péndulo, energía y tenacidad de la muestra de aluminio.....	80

REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

EVALUACIÓN DE LA ENERGÍA ABSORBIDA POR UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO SOMETIDA A ENSAYO CHARPY

Autores: Restrepo P. Giovanna B.

Suárez G. Moisés A.

Tutor: Camejo T. Franklin J.

Fecha: Junio 2017

RESUMEN INFORMATIVO

El presente estudio tuvo como propósito la evaluación de la energía absorbida por una aleación de aluminio. Para cumplir con nuestro objetivo general primero se caracterizó el aluminio, mediante cuatro ensayos que fueron; espectrometría para hallar su composición química por medio de cuatro emisiones por chispa en un espectrofotómetro a una muestra de 20x 47x 51 mm, luego tracción y microdureza Vickers, ambos ensayos para saber sus propiedades mecánicas, posteriormente metalografía con un recocido a 500°C en un tiempo promedio de 40 minutos para conocer la microestructura de los granos en estado cero de la aleación. Para la metalografía y la microdureza Vickers se cortó una sección de aluminio de dimensiones 20x 15,5x 13,5 mm y para el ensayo de tracción se mecanizaron tres probetas, tal y como lo describe la norma ASTM E8M. Con la composición química y la microestructura se pudo determinar, que el material en estudio es a una aleación de aluminio 2024 T6. Todos estos procedimientos fueron basados en la norma ASTM. En segundo lugar se realizó un análisis estadístico para conocer el número de probetas empleadas en el ensayo de Charpy, donde seguidamente se determinó la energía absorbida y la tenacidad de la aleación de aluminio. Para este ensayo se rompieron veintitrés probetas extraídas del material, de dimensiones 55x 10x 10 con una entalla en V tal y como lo describe la norma ASTM E23. Finalmente se pudo establecer, luego de comparar los valores de energía absorbida y tenacidad con los de la aleación de aluminio 2024 T6 descritos en la ASM, como condiciones favorables y desfavorables, que la aleación estudiada contiene valores comprendidos en el rango, y que se puede emplear en la industria automotriz, para la fabricación de tornillos, remaches y bases de moldes para soplado de PET, por un tiempo limitado, debido a las condiciones y tiempo de servicio al que estuvo expuesto este material.

Descriptor: Evaluación, ensayo Charpy, impacto, aleación, aluminio, probetas, tracción, metalografía, dureza.

INTRODUCCIÓN

En las investigaciones de formación académica, específicamente en carrera de Ingeniería, la misma cumple una función muy técnica. Sin embargo, la actitud y los componentes cognoscitivos que debe asumir el investigador no escapan los procedimientos metodológicos. Por esta razón existen unos requerimientos al cual el investigador debe respetar de acuerdo a la normativa.

Este estudio centró su atención en la evaluación de la energía absorbida por una aleación de aluminio. Teniendo en cuenta que el aluminio es uno de los materiales más importantes para su utilización y gracias a las tecnologías y tecnificación de la mano de obra, hoy por hoy, se puede aprovechar al máximo las propiedades de este metal. En este mismo orden, la Organización de Naciones Unidas (2004), plantea, que el aluminio es el metal de mayor presencia de la corteza terrestre, de la que forma el 7,5 por ciento. Del mismo modo, la caracterización de este material jugó un papel de importancia, ya que de allí se identificó con precisión el tipo de aluminio, el cual es el objeto de estudio. En consecuencia, se procedió con la realización del ensayo Charpy para luego evaluar los resultados mediante la fórmula de cálculo para la energía de impacto, para así poder establecer condiciones favorables y desfavorables para el servicio. Esta investigación estuvo constituida por cuatro capítulos, la cual se estructuró de la siguiente manera:

Capítulo I, que comprende toda la problemática del tema; conocimientos sobre el aluminio, su aporte hasta la actualidad y perspectiva futurista; a nivel industrial en la sustitución de otros materiales debido a sus excelentes propiedades y características, centralizando su atención en la fabricación de transportes, siendo de manera más específica la problemática, el posible uso de este material como mejor alternativa. Una vez identificado el problema se procedió a la formulación de problema, para establecer el objetivo general y sus objetivos específicos, las cuales fueron el sustento de esta investigación. Posteriormente se justificó el problema,

donde se reflejó la importancia de esta investigación sujeta a los posibles resultados a obtenerse. Del mismo modo, el alcance que tuvo.

El capítulo II, comprende los aspectos del marco teórico, como son antecedentes, referidos a trabajos realizados a nivel nacional e internacional. Así como también bases teóricas donde se sustentara la científicidad documental del trabajo, el cual contempla generalidades del aluminio, clasificación, designación y características de sus aleaciones, análisis químico, metalografía, tracción, curvas esfuerzo-deformación, impacto, todo lo relacionado con el ensayo Charpy, energía absorbida, fallas y fractura, esfuerzos residuales, trabajo, calor y temperatura.

El capítulo III, este viene referido al marco metodológico el cual explica los procedimientos propios del estudio, como concepto de investigación, tipo de investigación, diseño, población y muestra. Así como las fases y procedimientos técnicos e instrumental del estudio.

En el capítulo IV, el lector se paseara por los procesos administrativos, en la cuales los investigadores planificarán el cronograma que asumirán durante el proceso de realización del trabajo especial de grado.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

El aluminio en la actualidad juega un papel muy importante, ya que es un material utilizado en todo tipo de industria y 100 % reciclable sin que pierda sus propiedades características. Además, con el avance de las ciencias y las tecnologías este elemento metálico representa por su abundancia en la corteza terrestre y debido a características que posee, es determinante en el desarrollo de la industria.

Es un material muy valioso, ya que cuenta con una resistencia bastante alta, por lo que sirve para construir variedades de piezas importantes, para diferentes máquinas pudiendo resistir mejor el desgaste. De hecho, este metal es un excelente conductor de electricidad y de calor, no es tóxico ni tampoco magnético, en efecto, todas estas características hacen que el aluminio sea un bien altamente atractivo para las empresas modernas a lo largo del tiempo.

A nivel industrial, especialmente en la construcción del transporte, el aluminio se ha vuelto un material más apreciado, ya que gracias a su ligereza y economía, es posible fabricar automóviles muchísimo menos pesados, algo que reduce considerablemente el combustible. De allí, que el aluminio en el mundo de los vehículos, tiene impacto favorable que benefician al ambiente. También es utilizado en trenes, camiones e incluso bicicletas, que emplean este material por ser más ligeros. Evidentemente, que en el sector aeroespacial es donde el aluminio es más apreciado; y es que este material es esencial para este sector, aportando muchísima más ligereza y resistencia a las naves.

Décadas atrás, los transportes estaban diseñados con materiales que poseían propiedades con un bajo poder de absorción de energía, por ello, a la hora del impacto

generaba consecuencias letales a la integridad humana; para evaluar el comportamiento de materiales que pudiesen tener la característica de absorber el impacto y así garantizar la seguridad de las personas a bordo, el mundo de la ingeniería se vio en la necesidad de realizar distintos ensayos. Dentro de estos ensayos está el de Charpy el cual es utilizado para medir la tenacidad del material, el mismo conduce directamente a hablar de la energía disponible que representa la máxima cantidad de energía cinética que puede ser disipada durante la colisión y restitución que no es más que la capacidad que posee el material de volver a su forma original luego del impacto.

A pesar de todos los beneficios que puede aportar el aluminio, se producen muchas fallas, entre ellas la deformación por el impacto, por ello es necesario conocer las propiedades mecánicas del material y evaluar el comportamiento del mismo antes, durante y después del ensayo, todo esto con la finalidad de conocer de manera más precisa el comportamiento y las características del aluminio ante esta circunstancia para un mejor aprovechamiento en esas condiciones. En este sentido, las unidades de transporte tanto terrestres como aéreas no escapan de las consecuencias que producen el impacto, en el caso de los terrestres el choque entre ellos (colisión), u otros objetos y en el caso aéreo el impacto con objetos.

Cuando los transportes son sometidos a impacto estos sufren deformaciones que dependen tanto del material como de la energía cinética presente en el impacto. De allí, la importancia de introducir conceptos que van más allá del conocimiento de las propiedades y características del material. En efecto, la energía disponible y restitución son dos conceptos que unidos pueden ser de gran utilidad para disipar situaciones de incertidumbre respecto a los rastros y las constantes técnicas empleadas en el proceso de análisis de siniestros viales, hacen detenerse precisamente, en la selección del material en transporte terrestre. Por cuanto va directamente relacionado con el hecho de su deformación elastoplástica al impacto. En consecuencia, es necesario detenerse en el conocimiento de la energía disponible y

del coeficiente de restitución, para evaluar y predecir el comportamiento que fundamenta la energía disponible en la colisión.

El aluminio puede representar la sustitución de otros materiales ya antes empleados para todo tipo de transporte. Los aviones, ya poseen su estructura a base de aleaciones de aluminio para generar un menor peso entre sus distintas cualidades, pudiendo también generar muchas grandes ventajas en medios de transportes terrestres tanto comerciales como industriales, y así buscar mejorar su rendimiento en muchos de sus componentes.

1.2 Formulación del problema

¿Cómo se comporta una aleación de aluminio luego de ser sometida al impacto?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Evaluar el comportamiento de la energía absorbida por una aleación de aluminio sometida a ensayo Charpy.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Caracterizar el material, a través de un análisis químico y metalográfico y sus propiedades mecánicas.
- Evaluar los resultados obtenidos mediante la fórmula de cálculo para la energía de impacto.
- Establecer condiciones favorables y desfavorables para el servicio.

1.4 Justificación de la investigación.

El aluminio es uno de los minerales más prometedor por sus beneficios para el sector industrial y ambiental gracias a sus propiedades. Su tenacidad, maleabilidad, ductilidad, capacidad para conducir la corriente eléctrica y su fortaleza para resistir el desgaste lo convierten en un material muy apreciado para la fabricación de diversos tipos de productos. Su apariencia, que lo asemeja a la plata, también permite crear elementos o revestimientos decorativos y resulta un material económico en

comparación con otros metales. Es posible encontrar al aluminio en innumerables productos que son utilizados en nuestra vida cotidiana, como en cosas para el hogar, medios de transportes, instrumentos para la salud, aparatos empleados en la industria alimenticia, entre otros

En esta investigación la aleación de aluminio fue sometida a impacto mediante el ensayo Charpy, donde se analizaron los resultados obtenidos en la evaluación de las propiedades mecánicas antes, durante y después del ensayo; para así determinar el comportamiento de este material. Destacando que la ingeniería sigue invirtiendo tiempo y recursos en ensayos al aluminio y sus diversas aleaciones en busca de innovar y crear, apoyado siempre en la ciencia y tecnología, estos resultados pudieron servir de base y ser considerados en futuros proyectos de ingeniería donde pueden disminuirse costos de fabricación de una pieza con mejores propiedades mecánicas, generando y mejorando el uso de productos en el área industrial.

1.5 Alcance.

Con esta investigación se logró evaluar hasta qué punto una aleación de aluminio puede llegar a soportar impacto mediante el ensayo Charpy y la cantidad de energía absorbida durante el mismo; basado en las normas ASTM E-23; para la caracterización de este material fue necesario cumplir con una serie de ensayos, como el análisis químico, tracción, dureza, y metalografía. De los resultados obtenidos se determinó el comportamiento del material y de allí aportar nuevas opciones para la fabricación de medios de transporte considerando las necesidades requeridas por el mercado industrial.

Para el desarrollo de esta investigación fue importante la utilización de dos (2) muestras de material para el análisis químico, tres (3) para el ensayo de tracción, una (1) para el ensayo de dureza, dos (2) para metalografía y veintitrés (23) para ensayo Charpy.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Este aspecto viene referido al soporte principal del estudio. Ampliándose la descripción del problema, permitiendo integrar la teoría con la investigación y establecer sus interrelaciones, de manera coordinado, coherente de conceptos para abordar el problema.

2.1 Antecedentes.

Es conveniente destacar el trabajo realizado por, Román A. & Pineda Y. (2008), efectuaron un trabajo de investigación titulado “**Evaluación de las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio AA-6061, sometida a un tratamiento térmico de envejecimiento**”. Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela. Se ha realizado un estudio del efecto que tiene el tratamiento térmico de envejecimiento aplicado al material AA-6061 con respecto a sus propiedades mecánicas. Partiendo de barras cilíndricas de dicha aleación de dos (2) metros de longitud y de diámetro de 1/2 pulgadas. La misma se mecanizó para obtener las probetas, tratarlas térmicamente y realizar ensayos según las normas. Se trabajó la aleación con 5 condiciones; la condición original, solubilizada con un tiempo de 2 horas a 533°C, y tres tiempos de envejecimiento de 12, 24 y 48 horas a 177°C, las cuales fueron estudiadas y analizadas mediante ensayos de tracción, Charpy y dureza, bajo las normas A-557, E-23 y E-28 de la ASTM respectivamente y además se evaluó la microscopia del material y la Fractografía mediante un Microscopio electrónico de barrido. Obtenidos los resultados de los ensayos, se determinaron las propiedades mecánicas de resistencia (esfuerzo de fluencia, máximo y ruptura), deformación ingenieril, dureza, ductilidad y tenacidad de impacto. Con estos resultados se determinó como varían éstas de acuerdo a las condiciones a las que fueron sometidas, comprobando como el material se hace altamente dúctil con el proceso de

solubilización a la temperatura y tiempo antes mencionadas y con un tiempo mayor de permanencia en el horno, el material tiende a aumentar su fragilidad, afianzando esto con el análisis Fractográfico del material. Con respecto a la dureza se observó que tiene un descenso al aplicársele la solubilización al material, comprobando la ductilidad del material y luego aumenta a medida que transcurre el tiempo del tratamiento fragilizándose el material. Respecto a la absorción de energía por impacto, la condición de solubilización obtuvo el valor máximo, concluyendo que el material tiene más resistencia al impacto en esa condición. La conclusión más importante es que se comprobó que mientras es mayor el tiempo de envejecimiento, el material tiende a aumentar sus propiedades mecánicas, pero no logra un aumento considerable para el tamaño del intervalo de tiempo que tiene el tratamiento de envejecimiento. Este trabajo fue realizado en la línea de investigación “comportamiento mecánico de los materiales”.

El aporte de este trabajo fue significativo debido a que el ensayo Charpy se realizó según las normas E-23 de la ASTM, y además la evaluación para la determinación de las propiedades mecánicas de resistencia.

Por otra parte, De Frenza J. &Leañez M. (2005), titulado “**Evaluación de la tenacidad de impacto de las aleaciones de aluminio 8011 y 6063 sometidas a un tratamiento térmico de envejecimiento**”. Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela. Se ha llevado a cabo un estudio sobre el comportamiento de la tenacidad de impacto según la relación propuesta por Rolfe – Novak - Barson de las aleaciones de aluminio AA-8011 y AA-6063 sometidas a un tratamiento térmico de envejecimiento; para la aleación AA-8011 el estudio se realizó partiendo de láminas de 6 mm de espesor, fabricadas por medio de un proceso de colada continua de doble rodillo donadas por ALUCASA C.A. Para la aleación AA-6063 se partieron de barras cuadradas de lado $L=5/8$ ” y $3/4$ ”, fabricadas mediante un proceso de extrusión. A dichas aleaciones se le realizó un tratamiento térmico de homogeneización, para luego someter las muestras a un envejecimiento en tres (3) tiempos diferentes para una misma temperatura de permanencia en horno; para la aleación AA-8011 se

homogeneizó a una temperatura de 620°C por 24 horas, en envejecimiento se realiza a temperatura constante de 425°C en tiempos de dos (2), tres (3) y cinco (5) horas; para la aleación AA-6063 se homogeneizó a una temperatura de 550°C por una (1) hora, el envejecimiento a temperatura constante de 350°C en tiempos de una (1), tres (3) y cinco (5) horas, para obtener un total de cinco (5) condiciones de trabajo para cada aleación, las cuales fueron estudiadas mediante ensayos de tracción, Charpy y dureza. Una vez obtenidos los resultados de estos ensayos, se determinó las propiedades mecánicas de resistencia (esfuerzo fluencia, máximo y ruptura), deformación en ingeniería, dureza y tenacidad de impacto, obteniéndose como principales conclusiones; que el tratamiento térmico de homogeneización es necesario para poder lograr una microestructura organizada de la matriz, eliminando la deformación previa del material en su proceso de fabricación. En la aleación AA-8011 obtener excelentes resultados en la energía absorbida por impacto para el mayor tiempo de envejecimiento estudiado, siendo este el 3% mayor que en la condición homogeneizada y un 92% que la condición original. Para la aleación AA-6063 se presenta menor susceptibilidad al tratamiento térmico de envejecimiento, ya que la mayor Energía absorbida por impacto alcanzada fue para la menor condición de envejecimiento de una (1) hora, sin embargo esta fue un 53% mayor a la condición original y un 2% que la condición homogeneizada. Este trabajo fue realizado en la línea de investigación “Comportamiento Mecánico de los Materiales”.

El estudio citado tiene relación por cuanto la similitud para el estudio del aluminio mediante el ensayo Charpy, para así, luego de obtenidos los resultados de este ensayo, determinar las características mecánicas y su deformación en ingeniería de impacto de dicho material.

Del mismo modo, Beltran C. & Aguilar A (2005), realizó un trabajo de investigación, titulado “**análisis de la resistencia al impacto del aluminio 6061 – T6 a una temperatura de 170°C durante tiempos de 12, 18, 24, 48, 72 y 96 horas**”. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Chapinero, Colombia. El presente artículo precisa la realización del análisis y estudio del

aluminio 6061 T6, enfocados en la investigación de la resistencia al impacto del material, después de la realización de un tratamiento térmico a una temperatura de 170 °C durante tiempos de 12, 18, 24, 48, 72 y 96 horas. Para el desarrollo de este proyecto se fabricaron probetas de estudio, las cuales fueron sometidas a un tratamiento térmico a una temperatura de 170°C variando el tiempo de permanencia en la mufla de 12, 18, 24, 48, 72 y 96 horas. Posteriormente se realizó la prueba de impacto a cada una de las probetas en donde se analizaron y se determinaron los cambios en las propiedades del material, desarrollando conjuntamente a esto el análisis metalográfico y la prueba de dureza, con el fin de analizar los cambios en la microestructura del material. Para así después de este proceso lograr determinar las condiciones en las que el material será más eficiente y el proceso en el que se pudiese trabajar de una mejor manera con el aluminio 6061 T6.

La pertinencia de esta investigación citada es, el análisis de las propiedades del material después que es impactado, para así determinar las condiciones más favorables en las que el aluminio será más eficiente y el proceso más adecuado para trabajar con dicho material.

2.2 Bases Teóricas.

2.2.1 Generalidades del Aluminio.

En el área de ingeniería el aluminio representa uno de los materiales más importantes para su utilización y gracias a las tecnologías y tecnificación de la mano de obra, hoy por hoy, se puede aprovechar al máximo las propiedades de este metal. En este mismo orden, la Organización de Naciones Unidas (2004), plantea, que el aluminio es el metal de mayor presencia de la corteza terrestre, de la que forma el 7,5 por ciento. Se encuentra sobre todo bajo la forma de óxido. Pese a su abundancia no se utilizó sino hasta fines del siglo XIX. En 1886, simultáneamente Paul Louis ToussaintHérault en Francia y Charles Martin Hall en los Estados Unidos resolvieron el problema de superar la afinidad de este elemento con el oxígeno, con lo que hicieron posible el primer procedimiento económicamente viable de metalización del aluminio.

Chang R &College W (2002), plantean que este metal es uno de los metales más versátiles que se conocen. Tienen una baja densidad ($2,7 \text{ g/cm}^3$) y una alta resistencia a la tracción (es decir, puede estirarse o alargarse). El aluminio es maleable, puede formar láminas muy delgadas y es un excelente conductor de la electricidad. Su conductividad es de alrededor de 65% de la del cobre. Sin embargo debido a que el aluminio es más económico y más ligero que el cobre, es muy utilizado en la línea de transmisión de alto voltaje. A pesar de que su uso más importante es para la construcción de aeronaves, el metal puro es demasiado suave y débil para soportar deformaciones fuertes. Sus propiedades mecánicas se mejoran en forma considerable en una aleación con pequeñas cantidades de metales como cobre, magnesio o silicio. El aluminio no está involucrado con los sistemas vivos y casi siempre se le considera como inofensivo con estos sistemas.

De acuerdo a Clara Acebes (2010). El aluminio es un material valioso, incluso como residuo, porque su reciclado ofrece un poderoso incentivo económico. Debido a esta combinación única de propiedades, la variedad de aplicaciones del aluminio aumenta constantemente y es esencial en nuestra vida cotidiana. No se podría volar, ni viajar en un tren de alta velocidad, o en un vehículo de altas prestaciones o en un ferry, sin el aluminio.

El sector del transporte absorbe más de la cuarta parte del aluminio que se produce. Desde sus orígenes es indispensable para la industria aeroespacial debido a su ligereza, pero el aluminio es cada vez más utilizado en coches, autobuses, camiones, trenes barcos, ferrys, aviones y bicicletas. Vehículos fabricados enteramente de aluminio, han obtenido las puntuaciones más altas en las pruebas de seguridad vial de los organismos oficiales. Cuando se utiliza en vehículos de carretera, la ligereza de los componentes de aluminio mejora la eficiencia del combustible, ya que reduce el peso del vehículo en más del 50% en comparación a los vehículos tradicionales. Una reducción del peso de 100 kg ahorra

aproximadamente 6 litros de combustible cada 1000 km y en la misma proporción se reducen las emisiones a la atmosfera. Un tren de aluminio aporta un ahorro de energía del 87% a lo largo de los 40 años de vida media, en comparación con los trenes fabricados con metales más pesados.

2.2.2 Clasificación del aluminio.

Giachino J & Weeks W (2007), clasifican el aluminio en tres grandes grupos: aluminio comercial puro, aleaciones de forja y aleaciones de moldeo.

El aluminio puro comercial tiene una pureza no inferior al 99 por ciento, el 1 por ciento restante suele ser hierro y silicio. Puesto que carece de elementos de aleación, no presenta una gran resistencia a la tracción. Una de sus principales cualidades es la ductilidad, lo que le hace especialmente adaptable a las operaciones de conformación en frío.

Las aleaciones de forja contienen uno, o más, elementos de aleación y poseen una resistencia a tracción mucho más alta que el aluminio puro. Los principales elementos de aleación son el cobre, manganeso, magnesio, silicio, cromo, zinc y níquel. Según su comportamiento ante los tratamientos térmicos, las aleaciones para forja se clasifican en bonificables y no bonificables. Las aleaciones no bonificables son aquellas que no experimentan variaciones de dureza, aunque se sometan a distintos tratamientos térmicos. Los diversos grados de dureza sólo pueden alcanzarse mediante el trabajo en frío. Por el contrario, en las aleaciones bonificables, puede aumentarse la dureza y la resistencia mediante la aplicación de un tratamiento térmico adecuado.

Las aleaciones de moldeo se emplean para la obtención de piezas fundidas. La mayor parte de estas aleaciones son soldables, pero cuando se sueldan las pertenecientes al grupo de las bonificables, deben tomarse las precauciones adecuadas para evitar la pérdida de las características alcanzadas en el tratamiento térmico.

2.2.3 Designación de las aleaciones de aluminio

Giachino J & Weeks W (2007), mencionan que el aluminio y sus aleaciones de forja se designan mediante cuatro cifras. La primera de estas cifras indica el grupo al

que pertenece el material (ver tabla 1). Así, 1xxx indica aluminio de 99 por ciento de pureza; 2xxx indica una aleación de aluminio en la que el cobre es el elemento de mayor contenido; 3xxx es una aleación en la que el manganeso es el principal elemento de aleación, etc.

Tabla 1. Designación del aluminio y aleaciones de forja.

Aluminio de una pureza mínima del 99 %, 1xxx		
	ELEMENTO DE ALEACIÓN MÁS IMPORTANTE	NÚMERO
ALAEACIONES DE ALUMINIO CLASIFICADAS POR GRUPOS SEGÚN SU ELEMENTO DE ALEACIÓN DE MAYOR CONTENIDO	Cobre	2xxx
	Manganeso	3xxx
	Silicio	4xxx
	Magnesio	5xxx
	Magnesio y Silicio	6xxx
	Zinc	7xxx
	Otros elementos	8xxx

Fuente: Giachino J & Weeks W (2007). Técnica y práctica de la soldadura.

Aluminio Puro. En el grupo 1xxx, correspondiente al aluminio de una pureza mínima del 99 por ciento, se puede encontrar aluminio en distintos grados de pureza: 99,30%, 99,75%, 99%, etc. las dos últimas cifras de designación indican el exceso de pureza, sobre el 99 por ciento. Así, un aluminio del 99,30% de pureza, se designa 1x30 y si la pureza es del 99,55%, la designación será 1x55.

La segunda cifra de la designación indica el grado de control sobre los límites de impurezas individuales. Si es un cero, quiere decir que no hay un control especial sobre ningún tipo de impurezas, mientras que si es entre 1 y 9 nos indica que una o más impurezas (según el número) están controladas. Según esto, 1030 corresponde a un aluminio del 99,30 por ciento de pureza, sin un control especial de las impurezas individualmente consideradas; 1130, 1230, 1330, etc., indican aluminio de la misma

pureza pero con una o más impurezas controladas. De la misma forma, 1097, 1197, 1297, etc., corresponden al aluminio del 99,97 por ciento de pureza.

Aleaciones de aluminio. En los grupos 2xxx a 7xxx, las dos últimas cifras de designación no tienen un significado especial y sólo sirven para identificar las diferentes aleaciones dentro de cada grupo.

La segunda cifra de designación indica las modificaciones en la aleación. Si esta cifra es cero, corresponde a la aleación original, mientras que desde el hasta el 9, que se asignan consecutivamente, indican distintas variantes en la aleación.

Aleaciones de aluminio bonificables y no bonificables. Alonso Carlos (), explica que existen aleaciones de aluminio bonificables (que admiten tratamientos térmicos para variar propiedades mecánicas como la ductilidad o resistencia) y aleaciones no bonificables. Lo que distingue a las segundas de las primeras es que no tienen en su aleación presencia de elementos que formen precipitados que le den alta resistencia y dureza.

2.2.4 Características del aluminio y sus aleaciones.

S. Kalpakjian & S.R. Schmid (2008), señalan que las propiedades que favorecen la selección del aluminio y sus aleaciones son su alta relación de resistencia – peso, resistencia a la corrosión de muchos productos químicos, alta conductividad térmica y eléctrica, atoxicidad, reflectividad, apariencia y formabilidad y maquinabilidad; además, no son magnéticos. Los usos principales del aluminio y sus aleaciones, en orden decreciente de consumo, se dan en contenedores y empaques (latas y papel aluminio), edificios y otros tipos de construcción, transporte (aplicaciones en aviones y naves aeroespaciales, autobuses, automóviles, carros de ferrocarril y artículos marinos), aplicaciones eléctricas (como conductor eléctrico económico y no magnético), productos de consumo durables (artículos domésticos, utensilios de cocina y muebles) y herramientas portátiles. Casi todo el cableado para transmisión de alto voltaje se fabrica con aluminio (ver tabla 2 y anexo A).

2.2.5 Tratamientos térmicos del aluminio y sus aleaciones.

Alonso C (2014). Explica que juegan con la aportación de temperatura en ambiente controlado para variar las propiedades mecánicas de una aleación tratable térmicamente o “bonificable” o para otras aplicaciones (por ejemplo eliminar tensiones) siendo en este último caso válidas para todas las aleaciones de aluminio.

Principales aplicaciones de los tratamientos térmicos:

1. **Recocido de estabilización:** Sirve para eliminar las tensiones que puedan producirse en los tratamientos mecánicos de las series que no admiten tratamientos térmicos. Para ello se calienta el material a una temperatura inferior a la de fusión atómica y se mantiene un tiempo determinado (temperatura y tiempo de dependencia del tipo de aleación). El tiempo que se debe dejar pasar para llevar la aleación a esa temperatura y, sobre todo, el de enfriado deben ser largos para evitar que vuelvan a aparecer las tensiones. El recocido en general se puede usar con todas las aleaciones de aluminio, bonificables o no.
2. **Recocido contra acritud (RCA):** Elimina la dureza conseguida por el endurecimiento por acritud.

Un metal en estado sólido está formado por elementos químicos cuyos átomos se disponen en estructuras cristalinas que se conocen como “granos”. Los metales presentan unas propiedades diferentes en función de su composición química, proceso de fabricación y tratamiento térmico.

Las temperaturas del RCA dependen de la aleación y suelen estar entre 300 y 400 °C. Con este tratamiento los granos recuperan su forma original salvo en casos donde la deformación haya sido muy intensa. En este caso se rompen los granos y de los fragmentos surge una nueva estructura molecular más fina. A esto se le llama “germinación”.

El tamaño de los granos para una aleación determinada es función de la temperatura y tiempo del tratamiento térmico y se debe controlar muy bien para evitar que exista un crecimiento excesivo del grano, lo que daría lugar a una modificación importante de las propiedades mecánicas.

- 3. Recocido de homogeneización y regeneración:** Sirve para que la composición química de las aleaciones de aluminio, que tienden a ser heterogéneas en su estructura química, se homogenice.

La temperatura para este tratamiento oscila entre 450 y 550 °C durante un tiempo de 15 a 60 minutos.

Por otra parte también se anula el endurecimiento por temple en materiales a los que se le haya aplicado ese otro tratamiento.

El tiempo de enfriado también debe ser muy lento para evitar el endurecimiento de la aleación, por ello se puede usar un horno.

- 4. Disolución y temple:** aunque el recocido es un tratamiento térmico que se puede utilizar prácticamente con cualquier aleación de aluminio, el temple es el método que se usa para endurecer solo las aleaciones bonificables. En el proceso se distinguen tres fases:

- Se calienta el material a una temperatura en la que se disuelven los elementos que lleva la aleación, liberándolos. Se lleva a una temperatura cercana a los 500 °C durante el tiempo necesario para disolver los compuestos formados por los elementos que le dan aleación, así se consigue disolver una gran cantidad de precipitados distribuidos uniformemente por toda la red cristalina.
- Se enfría rápidamente (temple) para conseguir una aleación sobre – saturada de elementos. El enfriado según el caso, puede hacerse con agua fría, agua caliente, agua hirviendo

(revenido T61) solución de agua y un polímero (glicol) o pulverización de las dos horas siguientes.

Inmediatamente después del enfriamiento rápido todas las aleaciones son relativamente blandas y pueden conformarse moderadamente si este se realiza dentro de las dos horas siguientes.

Se pueden disminuir las tensiones que deja este tratamiento con una deformación plástica controlada (como por ejemplo una tracción que alargue la pieza un 2%)

- Se deja madurar (envejecimiento) para que estos elementos formen los precipitados o compuestos responsables del endurecimiento. Según la aleación la maduración puede ser a temperatura ambiente (natural) o controlada (artificial).

5. Revenido o maduración: también conocido como “envejecimiento”.

Después del temple la aleación está dentro de un débil equilibrio estructural. Este proceso es el encargado de darle la resistencia final y la dureza adecuada al tipo de aleación:

1. Maduración natural: se deja reposar varias horas o días a temperatura ambiente.
2. Maduración artificial: se mantiene a una temperatura durante horas (160 – 180 °C en el caso de la serie 6) lo que acelera la precipitación de los compuestos responsables del endurecimiento estructural.

Las propiedades mecánicas de las aleaciones, no solo provienen de su composición química sino que también pueden modificarse por tratamientos de recocido, conformado en frío o endurecimiento por precipitación (disolución, temple y maduración). Esto es algo importante que debe indicarse en las aleaciones tratadas a

continuación del número que la identifica y para ello existen unos códigos que permiten saber qué tipo de tratamiento ha recibido.

Los códigos se agrupan en cinco grupos diferentes. Consiste en una letra que puede estar acompañada de un número con el fin de precisar, es decir:

1. “F”. El material está en estado bruto son constancia de tratamientos que hayan variado sus propiedades mecánicas.
2. “O”. Recocido. Indica que la aleación a la que acompaña en su designación se le ha aplicado un recocido para que tenga una baja resistencia mecánica. Dentro de este grupo se distingue:
 - “01”. Recocido a elevada temperatura y enfriado lento.
 - “02”. Es sometida a tratamiento termomecánico (combinación de conformación fría o caliente con tratamiento térmico)
 - “03”. Homogeneizado. Se aplica a alambres o coladas continuas sometidas a tratamientos por difusión a alta temperatura.
3. “H”. Indica endurecimiento por conformado (deformación) en frío. Se distinguen:
 - “H1”. Endurecido por deformación hasta conseguir el nivel deseado sin tratamiento térmico posterior.
 - “H2”. Endurecido en exceso por deformación y recocido parcial para recuperarlo sin perder ductilidad.
 - “H3”. Endurecido y tratamiento de estabilizado.
 - “H4”. Endurecido y lacado o pintado. Aleaciones endurecidas en frío que pueden sufrir un cierto recocido en el proceso de curado de la pintura.
4. “W”. indica que se ha endurecido por precipitación a temperatura ambiente (envejecimiento natural) y después sometida a tratamiento de disolución. Las designaciones de aleaciones bonificables o

termoestables que van acompañadas de una “W” o una “T” indican que han sido tratadas térmicamente.

5. “T”. Materiales endurecidos por tratamiento térmico con o sin endurecimiento por conformado posterior. Son varias:

- “T1”. Fabricado a alta temperatura, enfriado y envejecido de forma natural.
- “T2”. Fabricado a alta temperatura, trabajado en frío y envejecido de forma natural.
- “T3”. Tratado térmicamente por disolución, trabajado en frío y envejecido de forma natural.
- “T4”. Tratado térmicamente por disolución y envejecido naturalmente.
- “T5”. Fabricado a alta temperatura, enfriado y envejecido artificialmente.
- “T6”. Productos conformados a alta temperatura (moldeo o extrusión) que no son endurecidos en frío sino sometidos a envejecimiento artificial.
- “T7”. Tratado térmicamente por disolución y sobreenvejecido o estabilizado.
- “T8”. Tratado térmicamente, trabajado en frío y envejecido artificialmente.
- “T9”. Tratado térmicamente por disolución, envejecido artificialmente y trabajado en frío.
- “T10”. Fabricado a alta temperatura, trabajado en frío y envejecido artificial.

Tabla 2. Propiedades de algunas aleaciones de aluminio a temperatur ambiente.

Aleación	1050 H18- H14	2011 T3-T8	2018 T6	5083 F	6012 T6	6061 T6	6082 T6	6026 T6- T8-T9	702 0 T6	7049A T6	707 5 T6
Características mecánicas a la tracción.											
Carga de rotura (Rm)	100-160	290-420	440	300	275-315	280-310	340	310-360	380	590	480-530
Límite elástico (Rp)	105-140	290-315	390	145	200-245	270	310	260-330	335	500	390-450
Alargamiento (A 5,65%)	6-42	10-15	8,5	23	4-8	14	11	4	13	7	2-8
Dureza Brinell (HB)	20-24	95-120	135	70-80	-	95	95	95	120		130
Resistencia a la cizalladura (N/mm²)	60-85	220-235	270	175		190	170-210		230		350
Límite de fatiga (N/mm²)	70-100	250	140	250		190			170		300

Fuente: San metal S.A.

2.2.6 Influencia de los elementos de aleación en el aluminio

Orrego G & Echavarría A (2012), señalan en su trabajo de investigación como influyen los elementos de aleación en el aluminio, estos son:

Cobre: aumenta de manera notable la resistencia a la tracción y la dureza, tanto en condiciones de extrusión como tratado térmicamente. Las aleaciones que contienen de 4 a 6% Cu tienen una respuesta más efectiva al tratamiento térmico. Por lo general, el cobre reduce la resistencia a la corrosión y, en ambientes muy específicos en ciertos tipos de aleaciones, induce a la corrosión bajo tensión. Las adiciones de cobre reducen resistencia al agrietamiento en caliente y disminuye la colabilidad en piezas fundidas.

Hierro: es altamente soluble en estado líquido pero virtualmente insoluble (0,04% Fe) a temperatura ambiente. Por ello aparece como compuestos intermetálicos insolubles, siendo los más comunes Al_3Fe , Al_6

superficial brillante, buena resistencia a la corrosión y una excelente combinación entre resistencia y ductilidad. Las composiciones entre 4 a 10% Mg, así como aquellas que contienen más de 7% Mg son tratables térmicamente, cuya desventaja principal es la inestabilidad en las características de envejecimiento a temperatura ambiente. Las aleaciones Al-4Cu-1Mg se caracterizan por precipitar el compuesto Al_2CuMg , responsable del endurecimiento por precipitación de dichas aleaciones.

Manganeso: incrementa la resistencia mecánica sea por solución sólida o por finos precipitados intermetálicos. No altera la resistencia a la corrosión. Se usa en la fundición para corregir la forma acicular de los precipitados aciculares ricos en hierro y disminuir su efecto fragilizante, aunque promueve una estructura fibrosa en los lingotes. En forma de precipitados finos previene el crecimiento del grano en la recristalización. Se encuentra que el manganeso incrementa la sensibilidad al agrietamiento de las aleaciones tratables térmicamente. Hasta 1,25% Mn es el principal aleante en las aleaciones del tipo 3xxx. Con grandes deformaciones plásticas, estos materiales exhiben una aceptable embutibilidad. En presencia de Fe, Cr o Ni, debe cuidarse que no sobrepasen los límites de composición para evitar formación de cristales primarios intermetálicos.

Níquel: se emplea conjuntamente con el cobre para mejorar las propiedades a altas temperaturas. También reduce el coeficiente de expansión térmica.

Silicio: el efecto más notable del silicio en el aluminio es mejorar las características del colado, mejorando la fluidez, la resistencia al agrietamiento en caliente y las características de la alimentación de las piezas fundidas. Las aleaciones comerciales Al – Si varían desde composiciones hipoeutécticas hasta cerca del 25% Si. Para procesos de colado con velocidades lentas de solidificación se prefieren los rangos de 5 a 7% Si, para moldes permanentes se recomienda 7 a 9% Si y para fundición a presión, que inducen altas velocidades de enfriamiento, 8 a 12% Si. Se recomienda mayores cantidades de eutéctico para propósitos de alimentación de la pieza a medida que aumenta la velocidad de enfriamiento. Las adiciones de silicio disminuyen la densidad y el coeficiente de expansión térmica.

Estaño: mejora las características antifricción y la maquinabilidad. Debido a esto, se utiliza en las aleaciones destinadas a cojinetes. El estaño puede influenciar la respuesta al endurecimiento de ciertas aleaciones de aluminio.

Titanio: refina la estructura del grano del aluminio, usualmente adicionado como boruro de titanio, TiB_2 , preferiblemente en concentraciones mayores que la estequiométrica. Reduce la tendencia al agrietamiento.

Zinc: no se reportan beneficios por la adición del zinc al aluminio. Sin embargo, en aleaciones que contienen Cu y/o Mg, mejora la respuesta al endurecimiento por tratamiento térmico o natural

2.2.7 Aleación de aluminio 2024

Contiene como elementos principales el Cu con un contenido entre 3,8 – 4,9%Cu, 1,2 – 1,8% Mg y 0,3 – 0,9% Mn lo explican Orrego G & Echavarría A (2012). El manganeso se agrega a las aleaciones 2024 con el fin de mejorar la elongación con una notable mejora de las propiedades de resistencia a la tensión y la cedencia, como se muestra en la figura 1

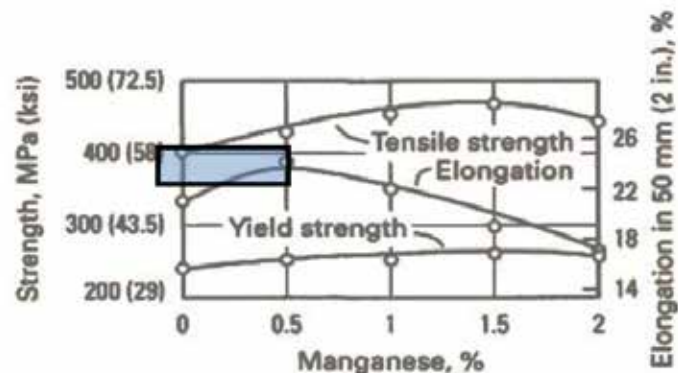


Figura 1. Influencia del manganeso en las propiedades mecánicas de las aleaciones Al-4%Cu-0,5%Mg, tratado térmicamente a 525°C.

Fuente: Orrego G & Echavarría A (2012). METALURGIA BÁSICA DE ALGUNAS ALEACIONES DE ALUMINIO EXTRUIDAS O LAMINADAS

En este tipo de aleaciones, se puede presentar un mayor incremento en la resistencia a la tensión y particularmente en la resistencia a la cedencia en la deformación plástica luego del tratamiento térmico. Los rangos de composición química de manganeso y magnesio no deben ser superiores a 0,9 y 1,8% respectivamente, porque la pérdida de ductilidad en las aleaciones aluminio – cobre aumenta. Las adiciones de Co, Cr o Mo, a la aleación extruida Al – 4% Cu – 0,5% Mg incrementan las propiedades a la tensión en el tratamiento térmico, pero ninguno ofrece una ventaja superior a la del manganeso.

Su metalurgia básica se refiere al diagrama Al-Cu, pero en vez de precipitar la fase CuAl_2 precipita la fase S: Al_2CuMg , como se observa en la figura 2

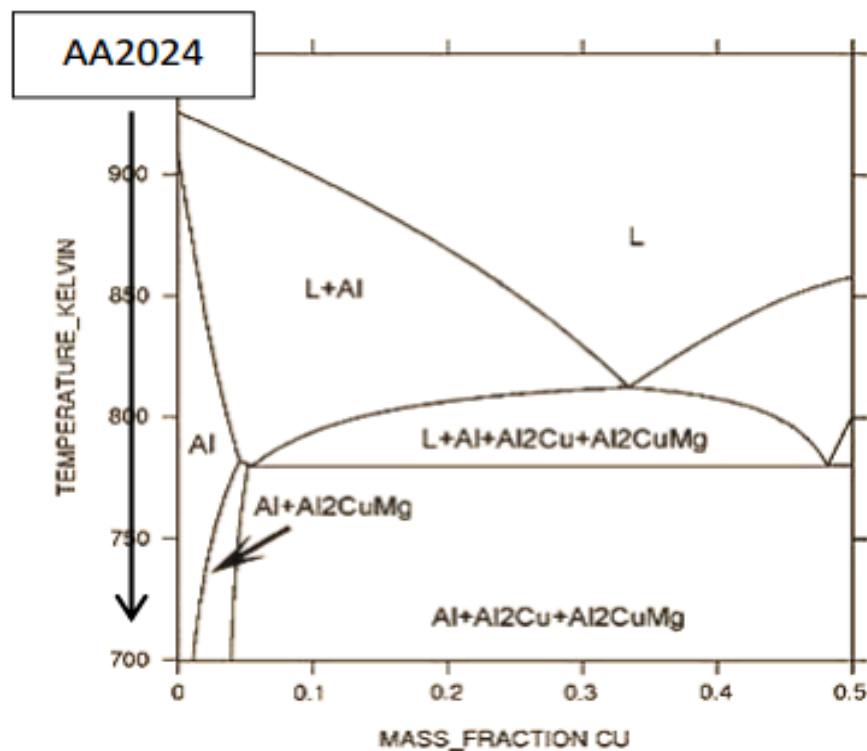
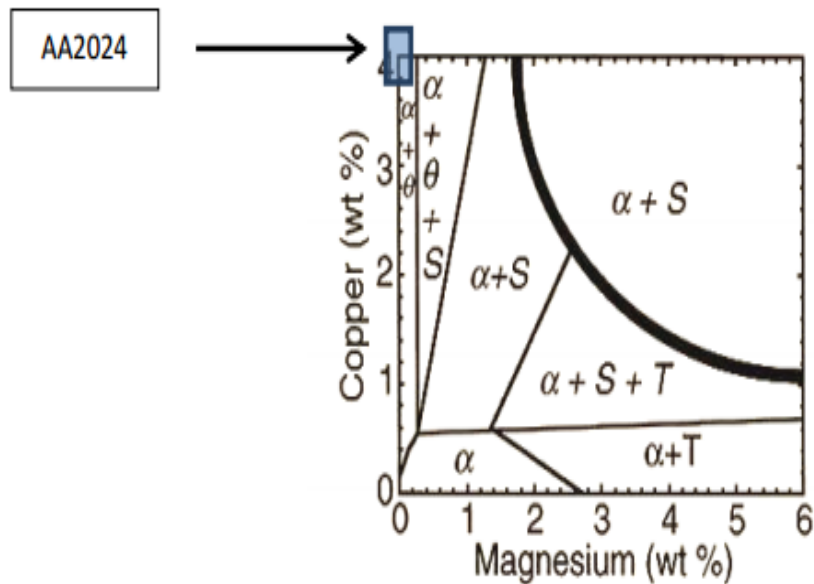


Figura 2. Diagrama de fases de una aleación Al - Cu.

Fuente: Orrego G & Echavarría A (2012). METALURGIA BÁSICA DE ALGUNAS ALEACIONES DE ALUMINIO EXTRUIDAS O LAMINADAS

El eutéctico funde a 420°C para la aleación con 1,0%Mg y 33% en peso de cobre. A

En la figura 3 se ilustra el diagrama de fases Al-Cu-Mg a 190°C. En ella se encuentra que a dicha temperatura se coprecipitan las fases Al₂CuMg y en menor cantidad, el Al₂Cu.



*Figura 3. Diagrama de fases del sistema Al-Cu-Mg
Mostrando los límites de los diagramas de fases a 190 °C. La línea gruesa define el*

*Fuente: Orrego G & Echavarría A (2012). METALURGIA BÁSICA DE ALGUNAS
ALEACIONES DE ALUMINIO EXTRUIDAS O LAMINADAS*

El endurecimiento de la aleación 2024 puede ser natural (maduración) o artificial. En el caso de la maduración, a las 10 h puede obtenerse el 95% de la resistencia a la tracción (figura 5), siendo más representativo el valor de 30 h (figura 4) cuando se deja libremente a la temperatura ambiente

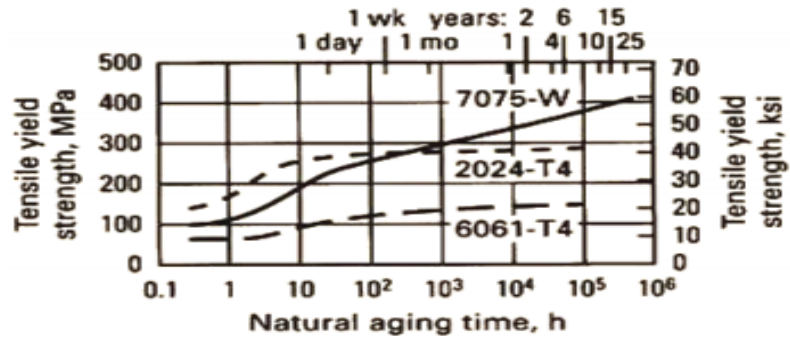


Figura 4. Curvas de envejecimiento natural de la aleación 2024 en comparación con las del tipo 7075 y 6061.

Fuente: Orrego G & Echavarría A (2012). METALURGIA BÁSICA DE ALGUNAS ALEACIONES DE ALUMINIO EXTRUIDAS O LAMINADAS

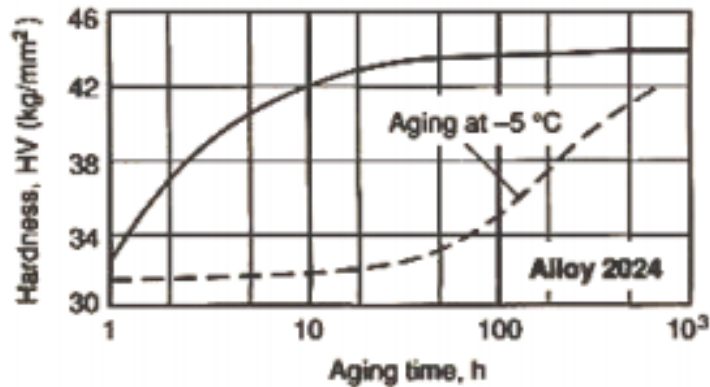


Figura 5. Envejecimiento natural (22 °C) de la aleación 2024

Fuente: Orrego G & Echavarría A (2012). METALURGIA BÁSICA DE ALGUNAS ALEACIONES DE ALUMINIO EXTRUIDAS O LAMINADAS

La secuencia de precipitación en la aleación 2024 es:

2

CuMg).

precipitados típicos de la 2024 son: $\text{Al}_{12}\text{Si}[\text{Mn,Fe}]_3$ Mg_2Si y en algunos casos $\text{Al}_3[\text{Fe,Mn}]$ o

$Al_6[Mn,Fe]$. Durante el tratamiento térmico los precipitados de hierro se transforman en Al_7Cu_2Fe y de manganeso a $Al_{20}Cu_2Mn_3$.

Zonas GP: precipitados tetragonales coherentes que se forman a bajas temperaturas y se crean por la segregación de átomos de Cu en la solución sobresaturada. Se crean en regiones segregadas en forma de discos de pocos átomos de espesor (0,4 – 0,6 nm) y de 8 a 10 nm de diámetro.

En la figura 6 y 7, se muestran los precipitados presentes en una aleación de aluminio 2024.

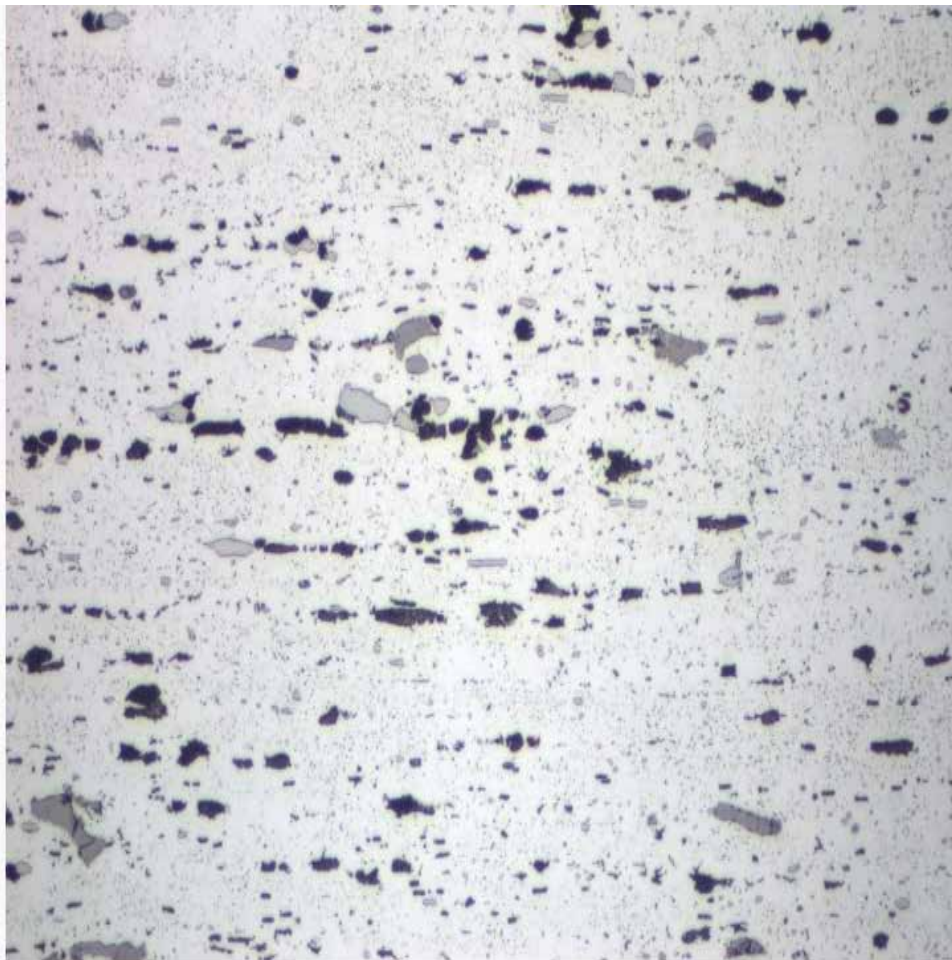


Figura 6: Microscopía de una aleación 2024 – O atacada con ácido nítrico al 25%. 500X

Fuente: MetalsHandbook 8th Edition.

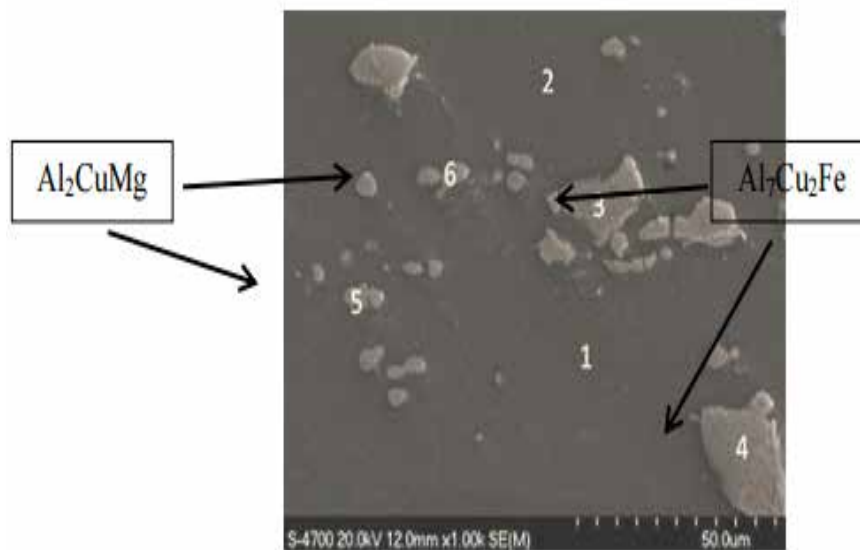


Figura 7: Microscopía de una aleación 2024 extruida.

Fuente: Orrego G & Echavarría A (2012). METALURGIA BÁSICA DE ALGUNAS ALEACIONES DE ALUMINIO EXTRUIDAS O LAMINADAS

Se observa que los constituyentes están fragmentados, deformados y encadenados en la dirección de laminación, la estructura consiste en partículas insolubles de color gris claro (Cu, FE, Mn) Al_6 , además de partículas no disueltas de color negro $CuMgAl_2$ y finas partículas que precipitan durante el recocido.

Al comienzo del envejecimiento natural (maduración) natural, aparecen en la solución sólida gérmenes de una segunda fase rica en cobre, bajo la forma de plaquetas paralelas a los planos base de la red cúbica de caras centradas de la matriz. Cuando la temperatura de maduración es mayor que 100 °C, las plaquetas llegan a ser muy importantes y de mayor grosor, conservando, sin embargo, la misma orientación con relación a la red de la matriz.

En la tabla 3 se muestra una ficha técnica de la aleación 2024 y en la tabla 4 las propiedades mecánicas de la aleación 2024 con sus respectivos tratamientos térmicos, además en la figura F, se muestra la microscopía de una aleación 2024 – T6 :

Tabla 3. Ficha técnica de la aleación 2024.

Composición química											
%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti		Otros	Al
Mínimo	0,50	0,50	3,80	0,30	1,20	0,10	0,25	0,15	Zr+Ti	0,15	Resto
Máximo			4,90	4,90	1,80				0,20		
Propiedades físicas											
Densidad (g/cm³)	2,77		Coefficiente de dilatación (0 a 100 °C) [°C-1 x106]						22,9		
Rango de fusión [°C]	500-638		Conductividad térmica (0 a 100 °C) [W/m°C]						Temple T3: 120		
Módulo de elasticidad [MPa]	73000								Temple T3: 5,7		
Coefficiente de Poisson	0,33		Calor específico (0 a 100 °C)						920		
Propiedades tecnológicas											
Proceso	Clasificación		Proceso						Clasificación		
Soldabilidad: Electro Beam Gas inerte (TIG o MIG) Por resistencia Brazing	Buena No recomendada Muy buena Buena		Maquinabilidad (Temple T3) Corte de viruta Brillo de sup, mecanizada						Buena Buena		
<u>Embutido profundo:</u> Recocido Semi duro Duro			<u>Resistencia a la corrosión</u> Agentes atmosféricos Ambiente marino						Acceptable No recomendado		

Continuación Tabla 3. Ficha técnica de la aleación 2024

Propiedades tecnológicas			
Procesos	Clasificación	Proceso	Clasificación
Repujado Temple 0		<u>Anodizado</u> Protección Brillante Duro	Acceptable Buena Acceptable

Fuente: Manual DELMETAL Metales no ferrosos.

Tabla 4. Propiedades mecánicas de la aleación 2024 en sus diferentes estados.

Estado	Carga Rotura Rm (MPa)	Límite elástico Rp (MPa),	Alargamiento A 5,65%	Dureza Brinell
0	185	125	20	55
T3	485	345	17	120
T4	470	325	19	
T6	475	395	10	125

Fuente: San Metal S.A

En la microscopía de la aleación 2024 – T6, mostrada en la figura 8, se pueden observar la ausencia de líneas de tensión, además de los precipitados de color obscuro y precipitados alargados

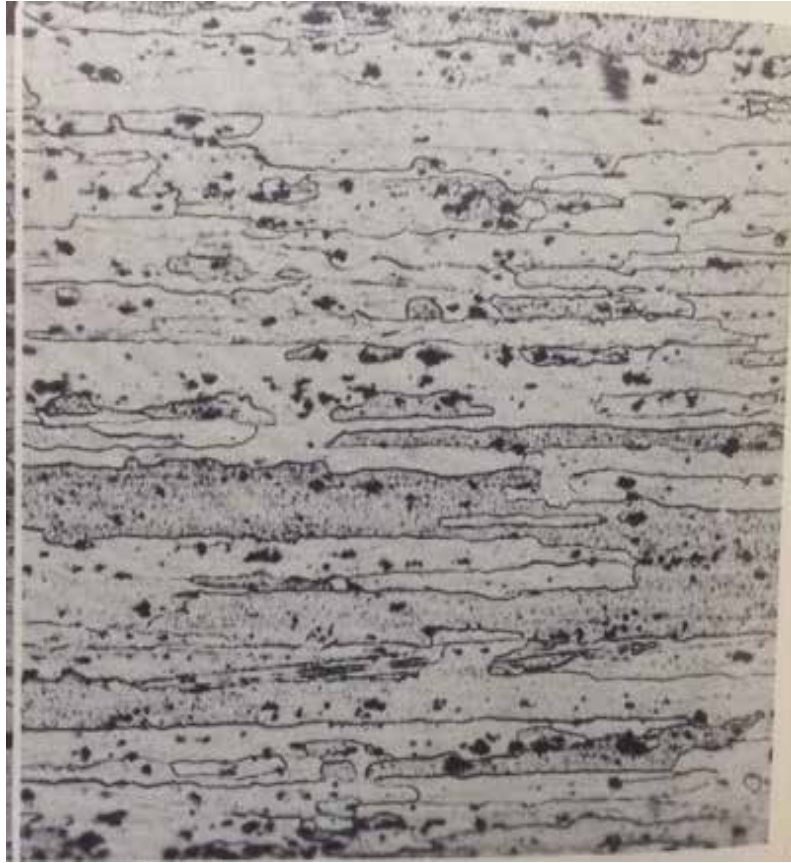


Figura 8: Microscopía de la aleación 2024 con un tratamiento térmico T6.

Fuente: Metals Handbook (8th Edition)

Orrego G & Echavarría A (2012). En la práctica la obtención de estas aleaciones es difícil de conseguir por los métodos tradicionales de vaciado, lográndose el mejor producto a través de colada continua, teniendo cuidados especiales por ser una aleación susceptible de sufrir agrietamiento interno si no se controlan las velocidades de descenso y una temperatura de vaciado.

Las aplicaciones más importantes de esta aleación denominada “Duraluminio” se encuentra en la industria aeroespacial, en la fabricación de moldes para soplado de PET, en la fabricación de tornillos y remaches especiales, en la industria militar como los soportes de culata de algunos fusiles y en general para la fabricación de piezas de maquinaria por su excelente maquinabilidad.

2.2.8 Software estadístico Pérez César (2007), indica que es una herramienta que aporta técnicas gráficas preparadas para el examen de los datos que se ven mejoradas con medidas estadísticas más detalladas para su descripción. Estas técnicas permiten el examen de las características de la distribución de las variables implicadas en el análisis, las relaciones bivariantes (y multivariantes) entre ellas y el análisis.

2.2.6 Ensayo de metalografía

Bernau. R. L (1958), señala que la metalografía estudia la estructura interna de los metales y de las aleaciones y relacionan esa estructura con las propiedades mecánicas. Para poder establecer las relaciones entre la composición química de los metales y aleaciones con las respectivas propiedades físicas, es necesario estudiar varias materia separadamente, tales como los ensayos mecánicos, los tratamientos térmicos, los diagramas de equilibrio físico-químicos, las observaciones macro y microscópicas, etc. Los resultados de estos estudios se relacionan finalmente entre si y permiten deducir las conclusiones necesarias, ya sea en el campo de la investigación, en el del control de los procesos metalúrgicos o en el de la verificación de la calidad de los productos terminados.

2.2.7 Espectrometría de emisión por chispa

Como las propiedades metalúrgicas de aluminio y sus aleaciones dependen fundamentalmente de la composición química; la norma ASTM E1251 (Método de prueba estándar para el análisis de aluminio y aleaciones de aluminio por chispa espectrometría de emisión por chispa), explica que este método de ensayo describe el análisis de aluminio y sus aleaciones por espectrometría de emisión atómica. El espécimen de aluminio para ser analizadas puede ser de forma de un disco de enfriamiento del molde, papel, hojas, láminas, extrusión o alguna otra forma o forma forjado.

“Es un método estándar para el análisis directo de muestras metálicas, de gran utilidad en fabricación y control de la producción en la industria del metal. Se basa en la obtención de chispas entre dos electrodos, lo que produce un plasma de vapor en el cátodo, de una temperatura mayor de 10.000°K. Esta técnica permite la determinación

rápida y simultánea de muchos elementos químicos en aleaciones, incluyendo elementos ligeros como C, S, B y P, por lo que es complementaria con la espectrometría de fluorescencia de rayos X para análisis metalúrgicos”.Vásquez Méndez Magdalena. (2017, Marzo 8). ESPECTRÓMETRO DE EMISIÓN POR CHISPA [En línea]. La UPCT de Tenerife.[2017,Junio 8].

2.2.8 Análisis químico

Angiolani. A (1960), hace referencia que el análisis químico tiene por fin individualizar la naturaleza de las sustancias, ya sea desde el punto de vista de la especie de átomos o grupos atómicos funcionales que las forman, como de aquel de las proporciones de estos constituyentes. La primera tarea se realiza mediante el análisis químico cualitativo y la segunda, por el análisis químico cuantitativo.

Las sustancias que se pueden someter al análisis químico pueden ser: elementos o compuestos, o viene mezclas de unos y otros; los compuestos pueden ser: inorgánicos u orgánicos. Cuando se trata de una sustancia única ya sea elemento o compuesto, la tarea del análisis generalmente se simplifica, porque la individualización está entonces ayudada a por la observación de sus caracteres físicos: color, forma cristalina, dureza, densidad, punto de fusión, solubilidad, etc. la individualización es más compleja si se trata de una mezcla de elementos o de compuestos.

Harris D (2007), define que, la identificación de lo que es una muestra desconocida se llama análisis cualitativo, y la determinación de la cantidad que hay presente, análisis cuantitativo.

2.2.9 Tracción

El ensayo de tracción es el más común según S. Kalpalkjian&S.R. Schmid (2008) para determinar propiedades mecánicas de los materiales, como resistencia, ductilidad, tenacidad, módulos elásticos, y capacidad de endurecimiento por deformación. Primero, requiere la preparación de una probeta como se muestra (ver figura 1). Esta probeta se prepara de acuerdo con las especificaciones de la ASTM, las mismas pueden ser planas o tubulares.

Casado A & García J (2016), explica que consiste en someter una muestra, de forma y dimensiones determinadas, a un esfuerzo axial de tracción creciente en la dirección de su eje hasta romperla. Las muestras empleadas son generalmente barras de sección uniforme, a las que se hacen dos marcas, entre las cuales se mide la longitud que se denomina calibrada. Esta longitud puede dividirse en partes iguales para medir las deformaciones a lo largo de la muestra. Los ensayos se realizan en una máquina cuyo embolo, movido hidráulicamente produce tracciones, compresiones y flexiones, aplicando las cargas deseadas. Como resultado de la prueba se obtiene una gráfica en la que se aprecia el alargamiento que se produce (en milímetros) al aplicar la fuerza de tracción creciente (en Newtons). El sistema de sujeción de la probeta suele realizarse mediante mordazas en cuña, por ello, los extremos de las probetas suelen ser de mayor sección para facilitar la fijación a la máquina (ver figura 9).

2.2.10 Curvas esfuerzo – deformación

En las figuras (ver figura 10 y 11) se muestra una secuencia típica de deformación del espécimen de ensayo de tensión. S. Kalpalkjian&S.R. Schmid (2008). Cuando se aplica la carga por primera vez, la probeta se alarga en proporción a ella; a este comportamiento se le llama elástico lineal. Si se retira la carga, la probeta recupera su longitud y forma originales de manera elástica, como una banda de hule cuando se estira y se suelta.

El esfuerzo ingenieril (esfuerzo nominal) se define como la relación de la carga aplicada al área transversal original de la probeta:

—

Ec 1.

Dónde:

- : Esfuerzo ingenieril o esfuerzo nominal. (Pa)
- P : Carga aplicada. (N)
- A_0 : área transversal original. (m²)

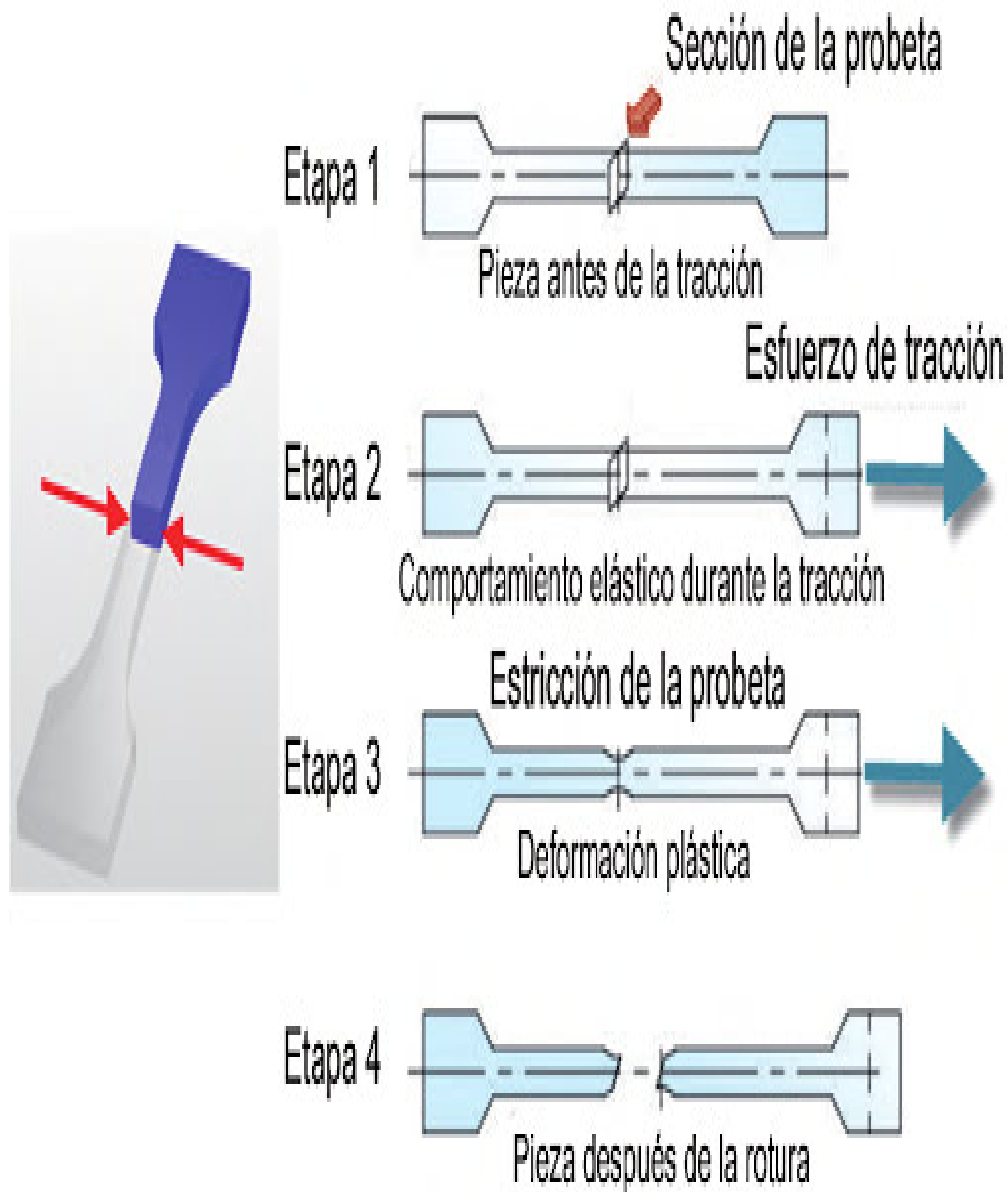


Figura 9: Fases del ensayo de tracción.

Fuente: Águeda E & García L (2016). Estructuras del vehículo.

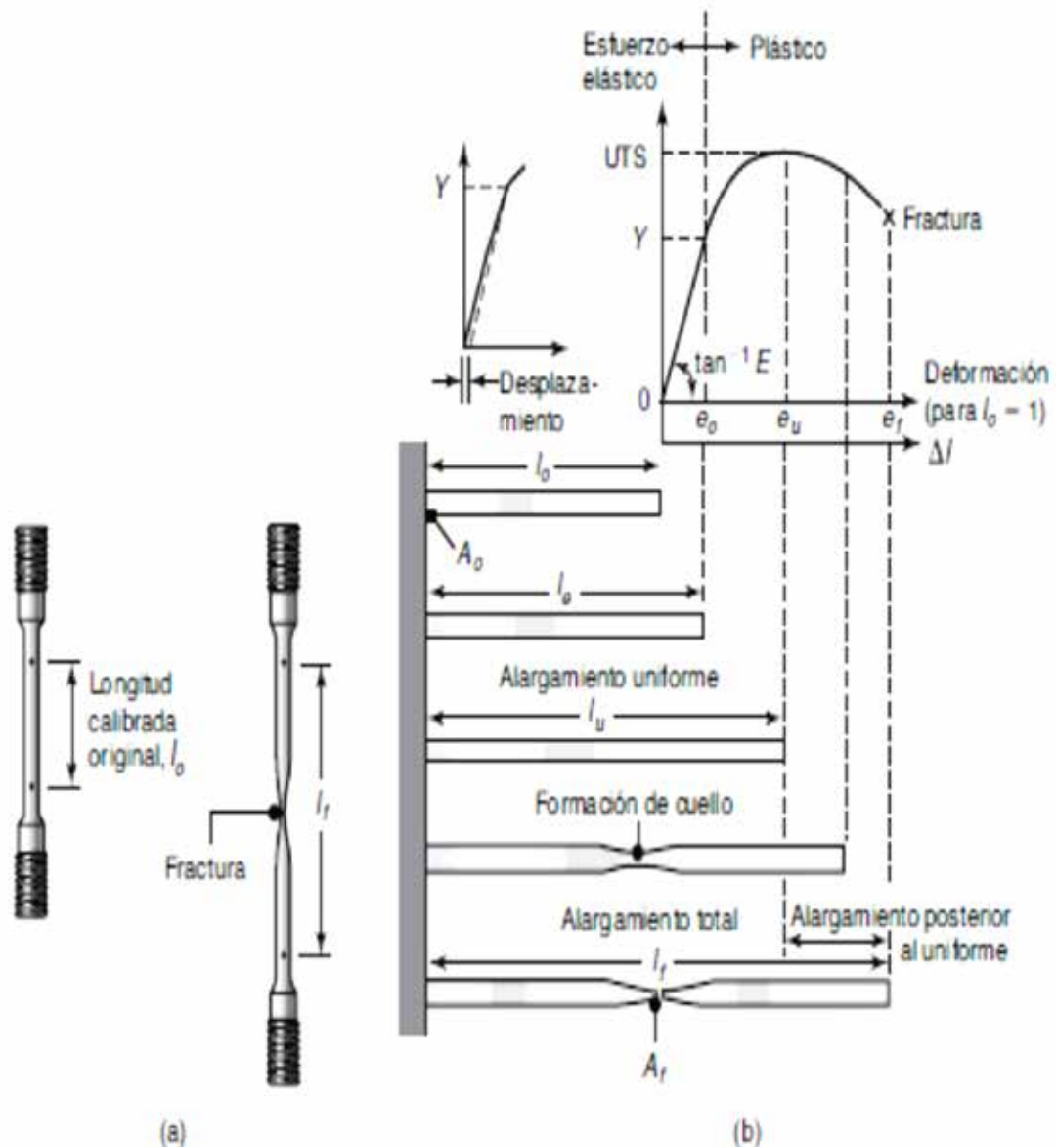


Figura 10: Probeta para ensayo de tracción, (a) Probeta estándar de tensión antes y después de la tracción, mostrando las longitudes calibradas original y final. (b) Secuencia de ensayo de tensión que muestra diferentes etapas en el alargamiento de la probeta.

Fuente: S. Kalpalkjian & S.R. Schmid (2008). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*.

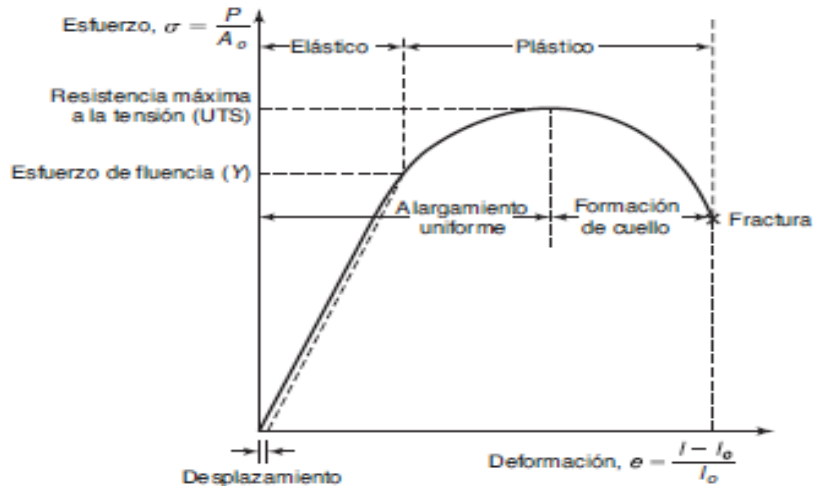


Figura 11. Curva típica esfuerzo-deformación obtenida de un ensayo de tensión, que muestra varias características.

Fuente: S. Kalpalkjian & S.R. Schmid (2008). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*.

2.2.11 Impacto

Beer & Johnston (2013), define al impacto como un choque entre dos cuerpos que ocurre en un intervalo muy pequeño y durante el cual los dos cuerpos ejercen fuerzas relativamente grandes entre sí. La normal común de las superficies en contacto durante el impacto se conoce como línea de impacto. Si los centros de masa en los dos cuerpos que chocan se ubican sobre esa línea, el impacto es un impacto central. En otro caso, se dice que el impacto es excéntrico.

2.2.12 Ensayo Charpy

Morral F.R. et al (2004), definen al ensayo Charpy, como un ensayo de choque que determina la absorción de energía en la rotura de los materiales. El ensayo consiste en aplicar rápidamente un golpe a una probeta con entalladura, con una masa en movimiento, con la suficiente energía cinética para romper o deformar la barra; los resultados se expresan corrientemente en función de la energía absorbida por unidad de área de la sección transversal, que se mide por la pérdida de energía

cinética de la masa en movimiento. Este ensayo utiliza la inercia, y todas las formas del ensayo dependen de la oscilación pendular. La altura desde que cae el péndulo mide su energía en el punto más bajo. En este momento choca con la probeta, la rompe y continúa su oscilación hacia arriba. La altura que alcanza, entonces, el péndulo depende de la inercia que queda después de romper la probeta, y la diferencia entre esta altura y la altura a que ascendería sin probeta mide la energía necesaria para romperla, que expresada en kilogramos expresa el valor de choque de la probeta.

Según R. L. Bernau (1958), la energía absorbida en el ensayo Charpy, se calcula mediante la ecuación 2:

Ec.2

Dónde:

-
- P es la masa del péndulo en kilogramos (kg)
- g es la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$)
- h es la altura inicial del péndulo (mm)
- h' es la altura final del péndulo (mm)
- l es la longitud del péndulo en metros (mm)
- α y α' son los ángulos que forma el péndulo vertical antes y después de soltarlo respectivamente. (°)

- **Péndulo Charpy**

Conforme a R. L. Bernau (1958), el péndulo está compuesto de una masa de peso P que pende de una barra de longitud calculada, suspendida sobre dos apoyos paralelos. Un cuadrante con corredera permite medir el ángulo que alcanza el péndulo, después de romper la probeta, ubicada en el punto inferior del recorrido de la masa del péndulo (ver figura 12).

La probeta se sitúa sobre dos apoyos angulares que la sostienen por sus extremos. La ranura de la probeta se coloca en la dirección contraria de aquella desde

la cuál ha de recibir el golpe fijo de la masa del péndulo. La probeta está en contacto con la masa del péndulo cuando éste está en su posición vertical de suspensión.

- **Probeta Charpy**

Núñez C. et al (2013), señalan que las probetas Charpy pueden ser de dos tipos según la entalla:

- Entalla en V: entalla en forma de V, de 2 mm de profundidad y con un ángulo de 45° entre las caras de la entalla. El fondo de la entalla tiene un radio de 0,25 mm, (ver figura 13). Este tipo es muy habitual en los ensayos Charpy.
- Entalla en U: entalla en forma de U, de 5 mm de profundidad y 2 mm de ancho practicada en el centro de la probeta. El fondo de la entalla tiene un radio de 1 mm (ver figura 14).

La probeta tiene forma de paralelepípedo con una longitud nominal de 55 mm y una sección variable. Cuando la entalla es de tipo U, la sección de la probeta es cuadrada y de 10 mm de lado. Cuando es de tipo V, la sección puede ser cuadrada de 10 mm de lado o rectangular con 10mm de altura y 7,5 o 5 mm de anchura.

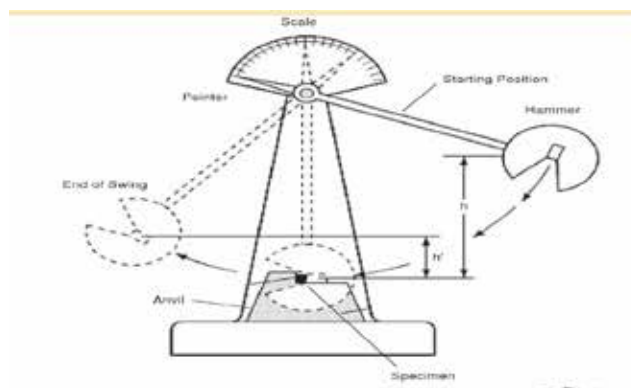


Figura 12. Péndulo Charpy.

Fuente: F.C. Cambell (2008).

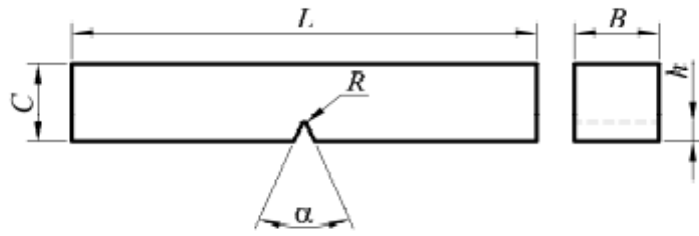


Figura 13. Probeta Charpy con entalladura en V

Fuente: Matusevich A. et al (2012)

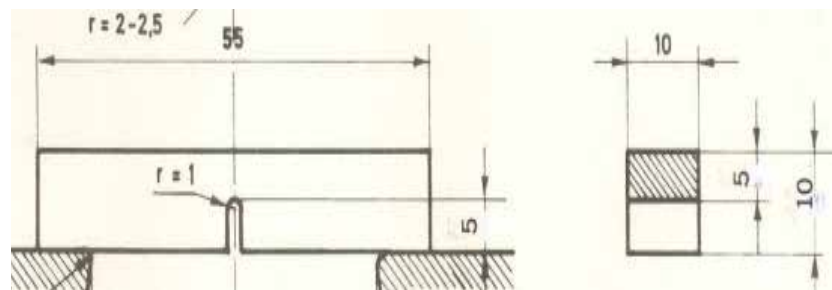


Figura 14. Probeta Charpy con entalladura en U

Fuente: Instituto Ecuatoriano de Normalización, INEN (1976)

· **Pasos para realizar el ensayo Charpy.**

Núñez C. et al (2013). La probeta se coloca en un soporte que actúa de bancada, y se orienta de tal modo que el péndulo golpee en el plano de simetría de la entalla y en la cara opuesta de la probeta. La forma y dimensiones de la bancada aseguran que los apoyos estén separados 40 mm, y actúan como pivotes sobre los que la probeta se flexiona durante el ensayo. Una vez se coloca ésta:

- Se levanta el péndulo hasta una altura prefijada y se deja caer (ver figura 15.a).
- El martillo (M en la figura 15.b) impacta en la espalda de la probeta (P, en la figura 15.b) y la carga se aplica de golpe, en una fracción de segundo.

- La probeta absorbe parte de la energía que aporta el martillo, se flexiona y se rompe.
- El martillo sigue su camino hasta alcanzar un nuevo punto situado en una determinada altura a partir de la cual interviene la dirección de su desplazamiento y sigue, o bien puede proseguir su movimiento pendular.

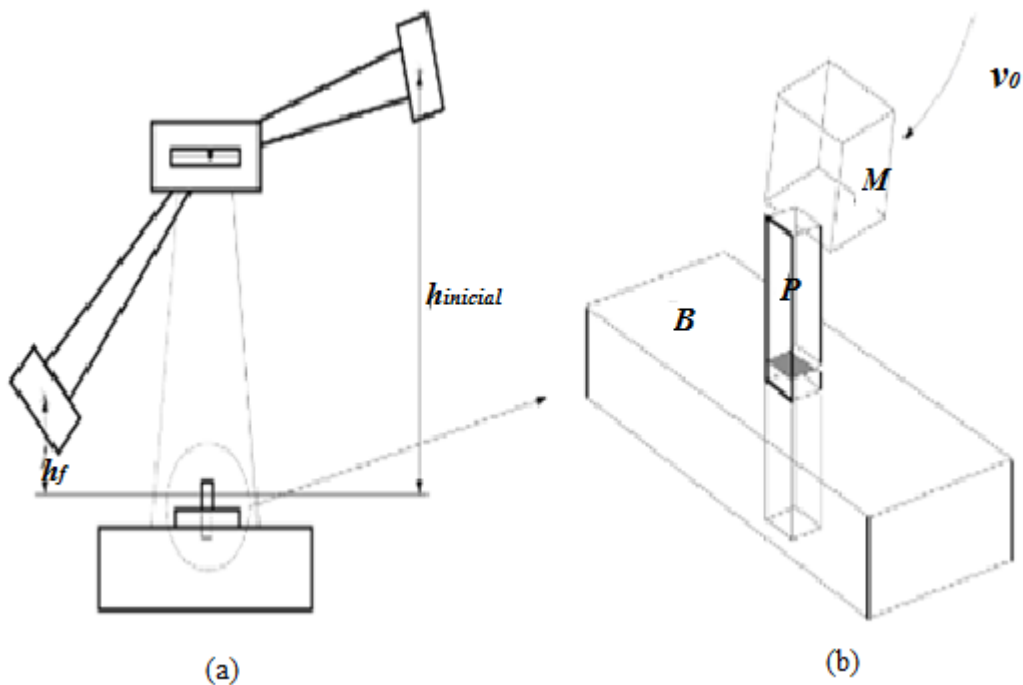


Figura 15.: Secuencia del Ensayo Charpy. (a) Péndulo Charpy, (b) detalle que muestra la forma de colocar la probeta.

Fuente: Núñez C. et al (2013)

- **Energía absorbida.**

Núñez C. et al (2013), indica que en un principio, la probeta absorbe energía elástica mientras se flexiona. Una vez alcanzado el valor correspondiente a la resistencia a la cedencia a esas condiciones de ensayo, se produce una deformación plástica de la zona cercana a la entallada, que consume energía, además de la energía

elástica que sigue acumulando. Cuando la deformación local alcanza un valor crítico, se absorbe energía para nuclear una microfisura por deformación plástica localizada debajo del centro de la entallada, y se sigue consumiendo energía para la deformación plástica del resto del material cercano a la entalla. Finalmente, la microfisura aumenta, consumiendo parte de la energía aportada por el martillo y parte de la energía elástica acumulada por el material cercano a la fisura hasta que se produce la fractura de la probeta. Si durante todo este proceso aún queda energía elástica acumulada, los dos fragmentos de la probeta salen impelidos de la bancada. Dicha energía puede ser calculada mediante la Ec.2.

2.2.13 Falla y fractura.

La falla es uno de los aspectos más importantes del comportamiento de los materiales, porque influye directamente en la selección del material para una aplicación particular, en los métodos de manufactura y en la vida útil del componente, según lo establecen S. Kalpalkjian & S.R. Schmid (2008), además señalan que hay dos tipos generales de falla:

1. **Pandeo:** aunque generalmente se considera que la falla de los materiales es indeseable, algunos productos se diseñan de tal manera que la falla es fundamental para su función, (ver figura 16).

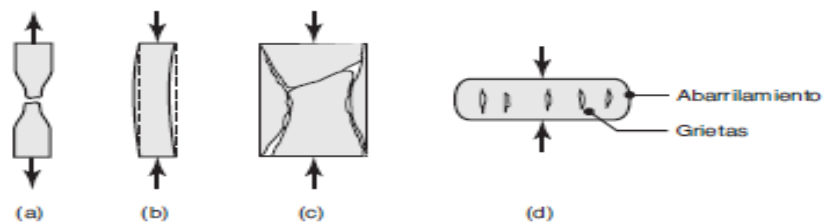


Figura 16. Tipos de falla en materiales. (a) formación de cuello y fractura de materiales dúctiles; (b) pandeo de materiales dúctiles bajo carga de compresión; (c) fractura de materiales frágiles a compresión; (d) agrietamiento en la superficie abarrilada de los materiales frágiles a compresión.

Fuente: S. Kalpalkjian & S.R. Schmid (2008)

- **Fractura dúctil.**

S. Kalpalkjian&S.R. Schmid (2008), señalan que este tipo de fractura se caracteriza por la deformación plástica que precede de la falla (ver figura 17.a). En un ensayo de tracción los materiales altamente dúctiles, pueden romperse en un punto antes de fallar (ver figura 17.b). Sin embargo, la mayoría de los metales y aleaciones se estrechan en un área finita y después fallan. La fractura dúctil ocurre en general a lo largo de planos en los que el esfuerzo cortante es máximo. Por lo tanto, bajo torsión, un material dúctil se fractura a lo largo de un plano perpendicular al eje de torsión, esto es, el plano donde el esfuerzo cortante es máximo. En contraste, la fractura por cortante simple es el resultado de un extenso deslizamiento a lo largo de los planos de deslizamiento dentro de los granos.

- **Fractura por fatiga.**

S. Kalpalkjian&S.R. Schmid (2008), explican que este tipo de fractura ocurre sobre todo en una naturaleza fundamentalmente frágil. Se desarrollan minúsculas grietas externas o internas en imperfecciones o defectos preexistentes en el material, las cuales se propagan durante cierto periodo y, al final, llevan a la falla total y súbita de la parte. La superficie de la fractura en fatiga suele caracterizarse por el término marcas de playa, debido a su apariencia (ver figura 18). En una ampliación elevada (comúnmente más de 1000 x), se puede observar una serie de estrías en las superficies de fractura, donde cada marca de playa consta de varias estrías.

- **Fractura por impacto.**

Este tipo de fractura es también conocida como fractura frágil, Ostegui J. &Rubertis E. (2008), menciona que es una fractura súbita bajo tensiones (residuales o aplicadas), donde el material exhibe pequeña o ninguna evidencia de deformación plástica. La fractura frágil tiene lugar sin una apreciable deformación y debido a la rápida propagación de una fisura. Normalmente ocurre a lo largo de planos cristalográficos específicos denominados planos de fractura que son perpendiculares a la tensión aplicada. La mayoría de las fracturas frágiles (ver figura 19) son

transgranulares o sea que se propagan a través de los granos. Pero si los límites de granos constituyen una zona de debilidad, es posible que la fractura se propague intergranularmente. Los siguientes factores favorecen la ocurrencia de la fractura frágil:

- Bajas temperaturas
- Fisuras generadas durante la fabricación o en servicio.
- Altas deformaciones plásticas previas.
- Baja tenacidad del material (materiales antiguos).
- Concentración de tensiones debido a discontinuidades.
- Tensión residual existente en una discontinuidad.

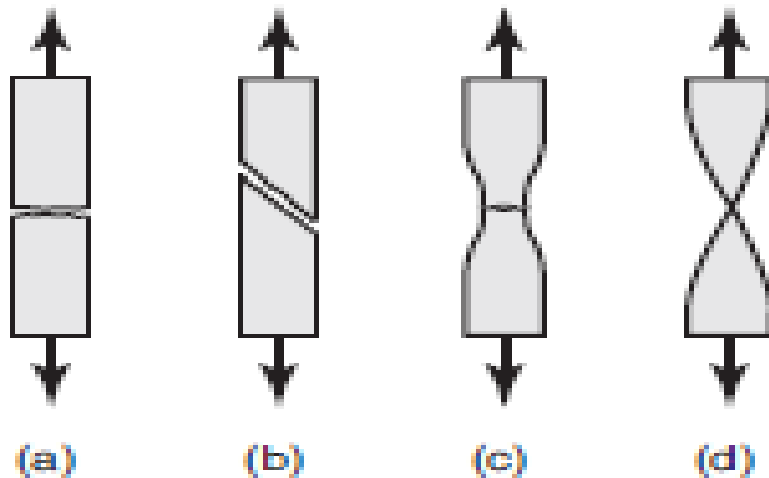


Figura 17. Tipos de fracturas a tracción: (a) fractura frágil en metales policristalinos; (b) fractura por cortante en monocristales dúctiles; (c) fractura dúctil de copa y cono en metales policristalinos; (d) fractura dúctil completa en metales policristalinos, con 100% de reducción del área.

Fuente: S. Kalpalkjian & S.R. Schmid (2008).

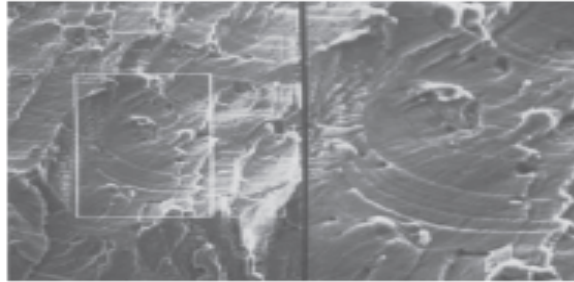


Figura 18. Superficie característica de fractura por fatiga en metales, mostrando las marcas de playa.

Fuente: S. Kalpalkjian & S.R. Schmid (2008)

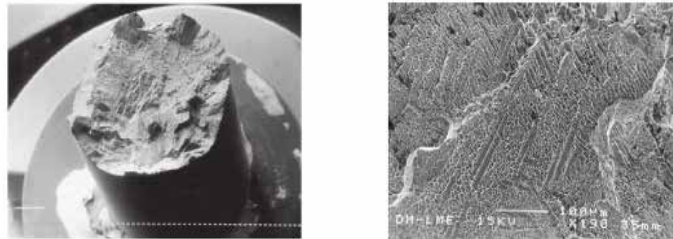


Figura 19. Fractura frágil macroscópica y detalle a mayores aumentos de la superficie de fractura.

Fuente: Gil F. & Manero J. (2005)

- **Esfuerzos residuales.**

S. Kalpalkjian & S.R. Schmid (2008). Cuando las piezas de trabajo se someten a deformación plástica no uniforme a través de toda la parte, desarrollan esfuerzos residuales. Estos permanecen en una parte después de haberle dado forma y de que se han retirado todas las fuerzas externas (aplicadas mediante herramientas y matrices). El momento de doblez primero produce una distribución elástica lineal de esfuerzos (ver figura 20). Cuando aumenta el momento externo, las fibras exteriores en la barra alcanzarán un nivel de esfuerzo lo suficientemente alto para provocar fluencia. Al final, para un material característico de endurecimiento por deformación, se alcanza la distribución de esfuerzos y la barra sufre un doblez permanente.

Los esfuerzos residuales de tensión en la superficie de una parte por lo general son indeseables porque reducen resistencia a la fatiga y a la fractura de la pieza. Esto se debe a que la superficie con esfuerzos residuales de tensión no puede soportar esfuerzos adicionales producidos por fuerzas externas, tan grandes como los soportados por una superficie sin esfuerzos residuales. Esta reducción de la resistencia es característica, particularmente de los materiales frágiles o menos dúctiles, en los que la fractura ocurre con poca o ninguna deformación plástica precediendo a la fractura. En cambio los esfuerzos residuales de compresión sobre una superficie generalmente son deseables.

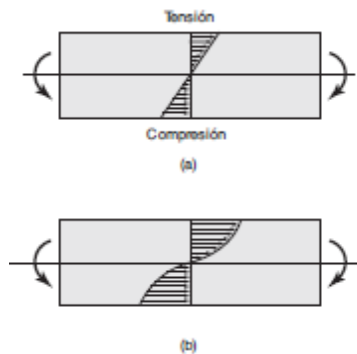


Figura 20. Esfuerzos residuales desarrollados al doblar una viga que tiene una sección transversal rectangular.

Fuente: S. Kalpalkjian&S.R. Schmid (2008).

2.2.14 Trabajo, calor y temperatura.

S. Kalpalkjian&S.R. Schmid (2008), explican que casi todo el trabajo mecánico de deformación en el trabajo plástico se convierte en calor. Esta conversión no es total, ya que una parte de este trabajo se almacena dentro del material deformado como energía elástica. Conocida como energía almacenada, que

representa del 5% al 10% del total de energía aplicada; sin embargo, en algunas aleaciones puede ser tan elevada como un 30%.

Es un proceso simple de deformación sin fricción, y suponiendo que el trabajo se convierte totalmente en calor, la evaluación de la temperatura teórica viene dada por:

— Ec. 3

Dónde:

- T es la elevación de la temperatura teórica.
- u es la energía específica (kJ/kg)
- c es el calor específico del material.
- ρ es la densidad (kg/m³)

Puede verse que se asocian temperaturas más elevadas con áreas más grandes bajo la curva esfuerzo deformación con valores menores de calor específico. Sin embargo, dichas propiedades físicas, como el calor específico y la conductividad térmica, también dependen de la temperatura, y por lo tanto, deben considerarse en los cálculos.

Se puede calcular que la elevación de temperatura para una deformación real de 1 (como la que ocurre en la probeta de 27 mm de alto cuando se comprime a 10 mm), en el aluminio es 75°C (165°F). En operaciones reales, el calor se transfiere al medio ambiente, hacia las herramientas y matrices, y a los lubricantes y refrigerantes utilizados, en su caso. Si el proceso de deformación se realiza con rapidez, las pérdidas de calor serán relativamente pequeñas en un periodo breve. Si el proceso se efectúa con lentitud, la temperatura real se elevará solo una fracción de valor calculado.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

La metodología es una teoría de la investigación científica. Según Pardini (1982) “es el estudio crítico del método”. Desde el punto de vista semántico, el término significa tratado del método. Como tal se entiende una guía procedimental, producto de la reflexión, que provee pautas lógicas generales pertinentes para desarrollar y coordinar operaciones destinadas a la consecución de objetivos intelectuales o materiales del modo más eficaz posible.

3.1 Tipo de investigación.

De acuerdo a Tamayo (2009), el tipo de investigación es determinada de acuerdo con la naturaleza del problema planteado, los objetivos a lograr y la disponibilidad de recursos, constituyéndose en las directrices ejecutorias de la misma. En relación con el propósito del estudio, esta puede clasificarse según los distintos criterios a considerar.

Esta investigación estuvo basada en la evaluación de la energía absorbida por una aleación de aluminio sometida a ensayo Charpy, la misma se centró, de acuerdo a lo señalado por la UPEL (1999) en un tipo de investigación evaluativa, ya que a través de la misma se busca ofrecer sugerencias para dar solución a las fallas que pueda presentar el aluminio cuando es sometido a impacto, evaluando así los resultados obtenidos, para luego establecer condiciones que pueda satisfacer el servicio. También se centró en la investigación tipodescriptiva ya que comprende la descripción, análisis e interpretación de la naturaleza del material, composición o procesos de los fenómenos. En enfoque sobre conclusiones obtenidas mediante el ensayo aplicado.

3.2 Diseño de la investigación.

El diseño de investigación, lo define Stracuzzi (2003) como la estrategia que adopta el investigador para responder al problema, dificultad o inconveniente planteado en el estudio. Para fines didácticos, se clasifican en diseño experimental,

diseño no experimental y diseño bibliográfico. De acuerdo a lo planteado en esta investigación, el diseño de la misma fue experimental, porque se caracterizó, se realizaron pruebas de impacto mediante el ensayo Charpy, se evaluaron los resultados y se establecieron condiciones favorables y desfavorables para el servicio.

3.3 Población y muestra

Todo estudio implica, en la fase de diseño, la determinación del tamaño poblacional y muestral necesario para su ejecución. Así mismo, Stracuzzi (2003), define a la población de una investigación como el conjunto de unidades de las que se desea obtener información y sobre las que se van a generar conclusiones. La población puede ser definida como el conjunto finito o infinito de elementos, personas o cosas pertinentes a una investigación y que generalmente suele ser inaccesible.

En esta investigación la población y la muestra, fue objeto una aleación de aluminio, de donde se desprenderá toda la información y datos.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para llevar a cabo la investigación se utilizaron tres instrumentos fundamentales, uno de ellos es la revisión documental, la cual “se trata del acopio de los antecedentes relacionados con la investigación, se realiza por la consulta de documentos escritos, sean formales o no, en los que se plasmará un conocimiento que fue avalado por autores que realizaron una investigación previa” (Delgado de Smith. 2013).

De esta manera siendo la revisión documental la que permitió la construcción del marco teórico, como también el desarrollo de los objetivos específicos, así mismo, permitió la evaluación de la energía absorbida por una aleación de aluminio ante el impacto, mediante el ensayo Charpy.

El segundo instrumento fue el de la observación “consiste en estar a la expectativa frente al fenómeno, del cual se toma y se registre la información para su posterior análisis” (Stracuzzi. 2003) que se le realizó a la aleación de aluminio antes y

después del ensayo Charpy; antes para la caracterización del material, mediante el microscopio del laboratorio de materiales de la Universidad de Carabobo y después del ensayo para evaluar las propiedades mecánicas del aluminio.

El tercer instrumento fue el Péndulo Charpy “se trata de una máquina de ensayo muy simple desde el punto de vista mecánico. A través de la misma se puede conocer el comportamiento que tienen los materiales al impacto, y consiste en golpear mediante una masa a una probeta que se sitúa en un soporte. La masa, la cual se encuentra acoplada al extremo del péndulo de longitud determinada, se deja caer desde una altura, mediante la cual se controla la velocidad de aplicación de la carga en el momento del impacto” (Ortega. 2005). Esta máquina fue uno de los instrumentos fundamentales en la investigación, ya que mediante esta se realizó la prueba para la obtención de los resultados para la evaluación de la aleación de aluminio.

3.6 Fases de la investigación

Rodríguez, Yajaira (2003), describe que, los procedimientos a seguir para el logro de los objetivos planteados se pueden organizar en fases o etapas, lo que permitirá el procesamiento de los datos en forma organizada. Para ello fue necesario realizar las siguientes fases:

Fase I: Caracterización del material, a través de un análisis químico y metalográfico y sus propiedades mecánicas.

La caracterización del material inició con un análisis químico que permitió conocer la composición química de la aleación de aluminio.

Análisis espectrométrico: este ensayo se realizó para saber la composición química de la aleación según lo establece la norma ASTM E1251 (Método de prueba estándar para el análisis de aluminio y aleaciones de aluminio por chispa espectrometría de emisión por chispa). Se tomó una muestra de 50mm x 50mm, estas medidas se utilizaron para tener mejor manipulación de la muestra ya que la norma ASTM E-1251 especifica que el espécimen de

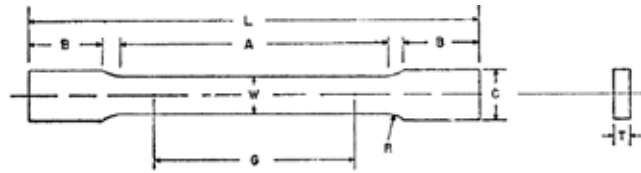
aluminio para ser analizadas puede ser de forma de un disco de enfriamiento del molde, papel, hojas, láminas, extrusión o alguna otra forma o forjado, seguidamente se colocó en el espectrómetro, de la empresa CVGALUCASA, donde se le aplicaron tres chispazos, en zonas distintas de la muestra (ver figura 21).



Figura 21. Espectro Fotómetro.

Fuente: CVGALUCASA (2017)

Ensayo de tracción: para conocer la resistencia del material es necesario en este ensayo, antes de realizar el mismo, se cortaron las probetas, según lo establece la norma ASTM E-8 (ver figura 22), en la empresa POLOPLAST, C.A; mediante un equipo de corte por control numérico (ver figura 23), una vez cortadas las probetas se realizó el ensayo en una máquina especial para realizar el mismo ubicada en la empresa TREXAC.A, utilizando un equipo de marca SISTEMAS DE ENSAYOS, modelo MEN-101/SDC de fabricación española cuyo esfuerzo máximo es de 100 kN, la probeta se colocó en la máquina y se sujetó con una mordaza, luego se aplicó la fuerza hasta causar la fractura de la misma, esto se aplicó a las tres probetas (ver figura 24)



	Dimensions		
	Standard Specimens		Subsize Specimen
	Plate-Type, 40 mm [1.500 in.] Wide	Sheet-Type, 12.5 mm [0.500 in.] Wide	6 mm [0.250 in.] Wide
	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]
G—Gage length (Note 1 and Note 2)	200.0 ± 0.2 [8.00 ± 0.01]	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	25.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.003]
W—Width (Note 3 and Note 4)	40.0 ± 2.0 [1.500 ± 0.125, -0.250]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]
T—Thickness (Note 5)		thickness of material	
R—Radius of fillet, min (Note 6)	25 [1]	12.5 [0.500]	6 [0.250]
L—Overall length, min (Note 2, Note 7, and Note 8)	450 [18]	200 [8]	100 [4]
A—Length of reduced section, min	225 [9]	57 [2.25]	32 [1.25]
B—Length of grip section, min (Note 9)	75 [3]	50 [2]	30 [1.25]
C—Width of grip section, approximate (Note 4 and Note 9)	50 [2]	20 [0.750]	10 [0.375]

Figura 22: Tamaños estándar de probetas de sección plana según norma E8/E8M
Fuente. Estándar ASTM E8/E8M- 2009 (p. 3).



Figura 23. Máquina de corte por control numérico.

Fuente: POLOPLAST C.A (2017)



Figura 24. Máquina de ensayo de tracción. Sistemas de ensayos, modelo MEN101/SDC.

Fuente: TREXA CA 2017.

Microdureza Vickers: mediante este ensayo se conoce la dureza de la aleación en estudio, el mismo se basó en lo establecido en la norma ASTM E-384, utilizando un indentador piramidal estándar, con una precarga de 50 g, ya que dependiendo del equipo se puede fijar una precarga de 20 g, 50 g o 75 g, dicho ensayo se realizó en el laboratorio de materiales de la Universidad de Carabobo, en un equipo de marca Buehler, especial para este tipo de estudio. Se prefijo la carga, la muestra se colocó en el equipo y se le aplicó la fuerza, dejando esta una huella en el material que permitió medir la dureza.

Con el fin de realizar una caracterización completa del material se procedió a realizar un análisis de la microestructura del mismo.

Ensayo Metalográfico: Para el desarrollo de la caracterización del material(metalografía) en estudio el proceso estuvo basado en la norma ASTM-E340 la cual rige como debe realizarse la preparación de una muestra, teniendo como objetivo obtener una superficie plana, y sin ralladuras, de formas especular semejante a un espejo. Las etapas necesarias para preparar adecuadamente una muestra metalográfica son las siguientes:

1. **Selección de la muestra:** se seleccionó una lámina cuadrada de 460 mm x 460 mm x 20 mm de espesor, la misma se escogió debido a que cumplía con las condiciones necesarias para el corte y mecanizado de las probetas.
2. **Corte del material:** se cortó una sección cuadrada del material de 55 mm de longitud, 10 mm de ancho y un espesor de 10 milímetros (estas medidas se seleccionaron con el fin de tener una mejor y fácil manipulación de la muestra) para analizar las estructuras y las propiedades en esas dos direcciones (ver figura 25)



*Figura 25. Muestra para el análisis metalográfico.
Fuente: Restrepo, Suarez (2017)*

3. **Desbaste:** se sometieron las caras elegidas de la pieza a la acción de un papel abrasivo, este procedimiento se dividió en 3 etapas:
 - a. La primera etapa es un desbaste grueso, para esto se utilizó papel abrasivo (lija) 80 no se debió ejercer mucha presión.
 - b. La segunda etapa comprendió un desbaste intermedio, donde se utilizaron papeles de lija 240,320 y 400.

c. La última etapa fue el desbaste fino en el cual se utilizarán papeles de lija de 600, 1200 y 1500.

4. Pulido: consiste en eliminar las rayas muy finas dejadas en la etapa de desbaste y producir una superficie muy brillante, parecida a un espejo. El pulido se realizó del centro a la periferia, contrario al movimiento del disco. El equipo utilizado fue una pulidora metalográfica que tiene dos discos de pulidos, ubicada en el laboratorio de materiales de la escuela de Ingeniería Mecánica, en las instalaciones de la Universidad de Carabobo, los materiales utilizados, fueron los paños de fieltro y un abrasivo llamado alumina.

Paños: es un pedazo de tela tipo fieltro colocado en el disco de la pulidora el cual se moja con un abrasivo en suspensión acuosa, debe ser capaz de resistir el roce entre el metal y las partículas abrasivas. El más usado es el que se utiliza en la mesa de billar.

Abrasivos: se preparan en suspensión acuosa, son partículas muy frágiles, en sus texturas tienen muchas aristas y vértices cortantes. Su tamaño es muy pequeño, en este caso se utilizó la alumina.

5. Ataque químico: consiste en someter la cara pulida de la pieza a la acción de un reactivo químico. Para el ataque químico se utilizó como reactivo una solución compuesta por 190 ml de agua, 5 ml de ácido clorhídrico y 2 ml de ácido fluorhídrico según lo establece la ASTM.

6. Observación microscópica: consiste en observar con un microscopio con aumentos de 100X, 200X y 400X o para identificar la microestructura del material.

Para poder analizar detalladamente la microestructura del material desde su estado inicial fue necesario someter el mismo a un tratamiento térmico, dicho tratamiento fue el siguiente:

Recocido: la muestra cortada se sometió a un tratamiento térmico de recocido con el fin de homogeneizar la composición química del material estudiado y llevarla a

su estado inicial, para ello la muestra se expuso a 500 °C, en un horno; según Alonso C (2014), "La temperatura para este tratamiento oscila entre 450 y 550 °C durante un tiempo de 15 a 60 minutos", por esta razón se seleccionó un tiempo promedio de 40 minutos.

Luego del análisis metalográfico se procedió a realizar un análisis químico:

Posteriormente para medir las propiedades mecánicas del material en estudio, se realizaron una serie de ensayos mecánicos, entre ellos:

Fase II: Utilizar un software estadístico para la selección de probetas de ensayo Charpy

Con la finalidad de obtener resultados más exactos del ensayo Charpy, se aplicó esta herramienta, de la siguiente forma:

- Mediante un software estadístico, se calculó la cantidad de probetas necesarias para obtener resultados óptimos de este ensayo. El software utilizado solicita un valores de entrada para poder realizar el cálculo del número de probetas y preestablece el valor de la tolerancia:
 - El primer valor es el valor nominal, que para los fines de este estudio fue la energía máxima que puede brindar una máquina para pruebas de impacto Charpy y tomando en cuenta lo señalado por Y. Ortega (2005), el valor es aproximadamente de 358 Julios.
 - El segundo valor fue la tolerancia, para este estudio se utilizó un valor estándar de $\pm 0,5$, que es el prefijado por el software.
 - Al conocer la cantidad de probetas necesarias, se procedió a realizar el corte de las mismas en la empresa POLOPLAST, C.A, mediante un equipo de corte por control numérico según lo fundamentado en la norma ASTM E-23.

Fase III: Realizar pruebas de impacto mediante el ensayo Charpy.

En la fase tres, se realizó la prueba de impacto Charpy, que se efectuó de la siguiente manera:

1. Utilizando un equipo de ensayo Charpy marca KARL FRANK GMBH, tipo 580 M, número 85, ubicado en el laboratorio de materiales de la Universidad de Carabobo, cuya longitud del péndulo es de 0,8 metros, se levantó el péndulo hasta una altura de 165 grados respecto a la vertical, siendo esta la altura máxima que puede alcanzar el equipo, como la ASTM establece que la altura inicial para desarrollar el ensayo debe ser la máxima alcanzada por el equipo luego se dejó caer.
2. La masa con la que opera este equipo es de 15 kilogramos, la misma impactó en la espalda de la probeta y la carga se aplicó de golpe, en una fracción de segundo.
3. La probeta absorbió parte de la energía que aporta la masa, se flexionó y se rompió.
4. La masa siguió su camino hasta alcanzar un nuevo punto situado en una determinada altura a partir de la cual interviene la dirección de su desplazamiento y sigue, o bien puede proseguir su movimiento pendular.

Fase III: Evaluar los resultados obtenidos con un modelo matemático conocido.

Luego de la prueba de impacto y de los datos recogidos durante la prueba, lo siguiente fue introducir los datos en la ecuación 2.

Posteriormente que se realizaron los cálculos, se pudo obtener los resultados, para así conocer el comportamiento de la aleación de aluminio ante el impacto.

Fase IV: Establecer condiciones favorables y desfavorables para el servicio.

En esta fase, de acuerdo a los resultados obtenidos en las fases II y III, se establecieron las condiciones más favorables y menos favorables para el servicio, tomando en cuenta las propiedades y características que puede ofrecer la aleación de

aluminio en estudio. Además se consideraron las condiciones de servicio a la que pudo haber estado sometido la aleación, bien sea condiciones a bajas o altas temperaturas y el tiempo de servicio..

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

Cumpliendo con los procesos metodológicos de esta investigación, se realizaron los ensayos necesarios para la caracterización del material, de allí se obtuvieron una serie de datos, que permitieron, por medio de análisis, comparaciones y observaciones, caracterizar el material y así evaluar la energía absorbida por esta aleación de aluminio sometida a ensayo Charpy.

4.1 Caracterización del material, mediante análisis químico y ensayos mecánicos.

Entre ellos:

4.1.2 Análisis de los resultados del ensayo espectrométrico: De este análisis se obtuvieron los datos mostrados en la tabla 5.

Tabla 5. Datos obtenidos del ensayo espectrométrico.

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	1,169	0,566	>0,480	0,113	>1,44	>0,216	0,0911	0,300
2	0,171	0,572	>0,480	0,114	>1,44	>0,216	0,0936	0,300
3	0,174	0,609	>0,480	0,115	>1,44	>0,216	0,0956	0,300
4	0,168	0,582	>0,480	0,115	>1,44	>0,216	0,0933	0,300

Fuente: Restrepo, Suarez (2017)

Continuación Tabla 5. Datos obtenidos del ensayo espectrométrico.

	Ti	B	Bi	Ca	Ga	Li	Na	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0,076	0,00045	0,00026	0,00046	0,0127	<0.00001	<0,00010	0,0014
2	0,0683	0,00046	0,00026	0,00046	0,0127	<0,00001	<0,00010	<0,0014
3	0,0670	0,00053	0,00024	0,00047	0,0124	<0,00001	<0,00010	0,0015
4	0,0718	0,00045	0,00028	<0,00010	0,121	<0,00001	<0,00010	0,0014
	Sn	Sr	V	Al				
	%	%	%	%				
1	<0,00010	<0,00001	0,0065	96,5				
2	<0,00010	<0,00001	0,0064	96,5				
3	<0,00010	<0,00001	0,0064	96,5				
4	<0,00010	<0,00001	0,0064	96,5				

Fuente: Restrepo, Suarez (2017)

De los resultados obtenidos mostrados en la tabla 4, se pudo observar la composición química del material en estudio por cada chispazo, de estos resultados se obtuvo un promedio general de dicha composición química, a continuación se muestra en la tabla 4 dichos resultados.

Tabla 6. Promedio de la composición química de la aleación de aluminio en estudio.

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn
	%	%	%	%	%	%	%	%
	0,170	0,583	>0,480	0,114	>1,44	>0,216	0,0934	0,300
	Ti	B	Bi	Ca	Ga	Li	Na	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%
<x>	0,0694	0,00046	0,00025	0,00031	0,0124	<0,00001	<0,00010	0,0015
	Sn	Sr	V	Al				
	%	%	%	%				
<x>	<0,00010	<0,00001	0,0065	96,5				

Fuente: Restrepo, Suarez (2017).

De acuerdo a los resultados obtenidos en el ensayo espectrométrico, se pudo establecer una comparación con la composición química de distintas aleaciones de aluminio, esta comparación se realizó de manera detallada utilizando el manual DELMETAL, Metales no ferrosos, de este cotejo se pudo observar la similitud de la composición química del material en estudio con las tabuladas en el manual antes mencionado, la siguiente tabla muestra los valores similares a la aleación en estudio:

Tabla 7. Composición química de la aleación de Al - Cu

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti		Otros	Al
Mínimo	0,50	0,50	3,80	0,30	1,20	0,10	0,25	0,15	Zr+Ti	0,15	Resto
Máximo			4,90	4,90	1,80				0,20		

Fuente: Manual DELMETAL Metales no ferrosos.

Una vez realizado el cotejo entre los valores promedios obtenidos del estudio espectrométrico realizado en la empresa CVGALUCASA y el manual DELMETAL, Metales no ferrosos, se pudo obtener una similitud correspondiente a una aleación de aluminio – cobre, de la serie 2xxx.

4.1.4 Análisis de los resultados del ensayo de tracción: tres probetas, con las mismas características, mecanizadas según lo establecido en la norma ASTM E8 (ver figura 26), se utilizaron para llevar a cabo este ensayo.



Figura 26. Probeta para ensayo de tracción.

Fuente: Restrepo, Suarez (2017)

En las curvas esfuerzo – deformación obtenidas, se presentaron cuatro zonas diferenciadas, las cuales fueron, zona de deformación elástica, zona de fluencia o

cedencia, zona de deformación plástica y zona de estricción. En la zona de deformación elástica se obtuvo el módulo de elasticidad, el límite de fluencia; en la zona de fluencia se observa la deformación brusca de la probeta superando el límite de fluencia; analizando las dos zonas restantes se puede apreciar el límite elástico, la fuerza máxima y la fuerza de rotura, valores que al ser vaciados en una tabla (ver tabla 8), permitió realizar una comparación con las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio, mostradas en la tabla 10.

Para realizar esta comparación se tuvo en cuenta los resultados del análisis espectrométrico que define la composición química del material estudiado y van estrechamente relacionados con el comportamiento mecánico del mismo, además el espesor de la probeta que eran 10 mm, y la temperatura a la cual fue realizado el ensayo, que en este caso fue a temperatura ambiente.

Probeta A



Figura 27. Probeta A, luego del ensayo a tracción

Fuente: Restrepo, Suarez (2017)

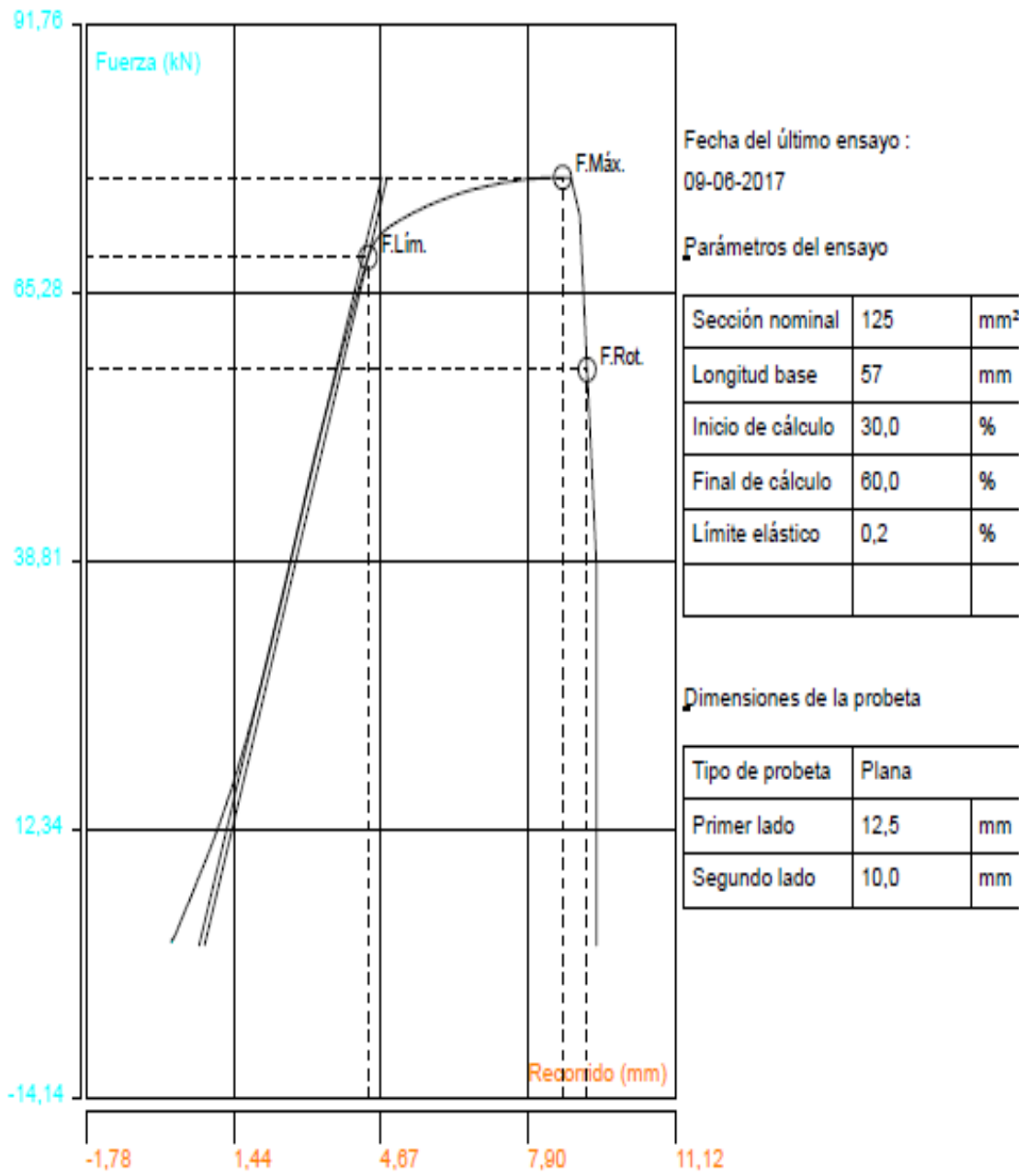


Gráfico 1. Gráfica Fuerza – Desplazamiento, parámetros y dimensiones probeta A.

Fuente; Restrepo, Suarez (2017)

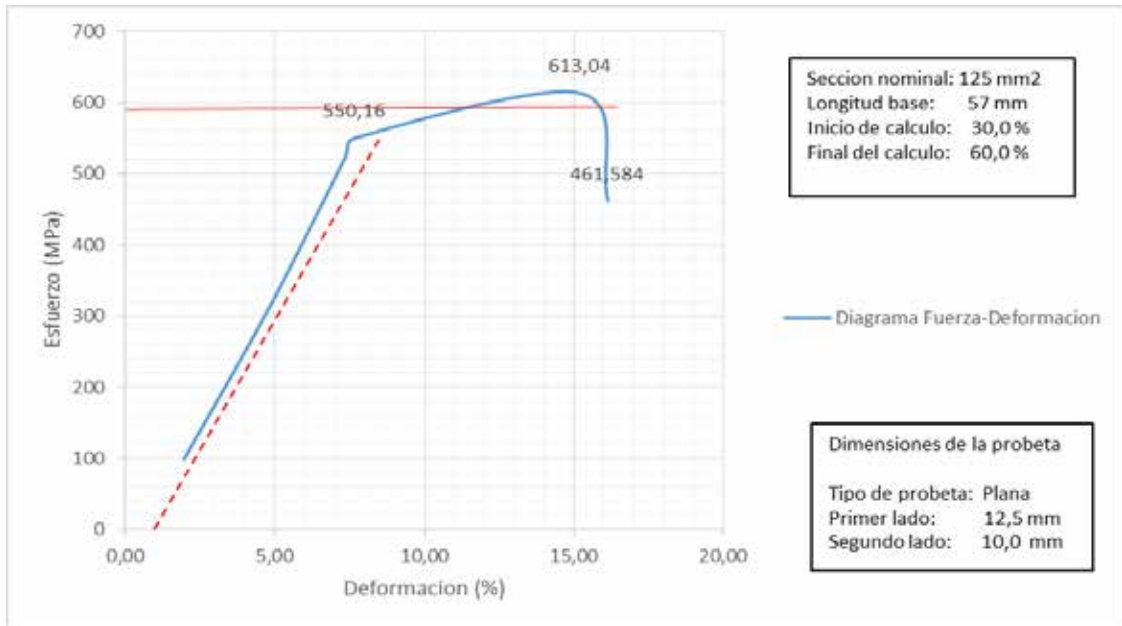


Gráfico 2. Gráfica Esfuerzo - Deformación, parámetros y dimensiones probeta A.

Fuente: Restrepo, Suarez (2017)

Probeta B.



Figura 28. Probeta B, luego del ensayo a tracción

Fuente: Restrepo, Suarez (2017)

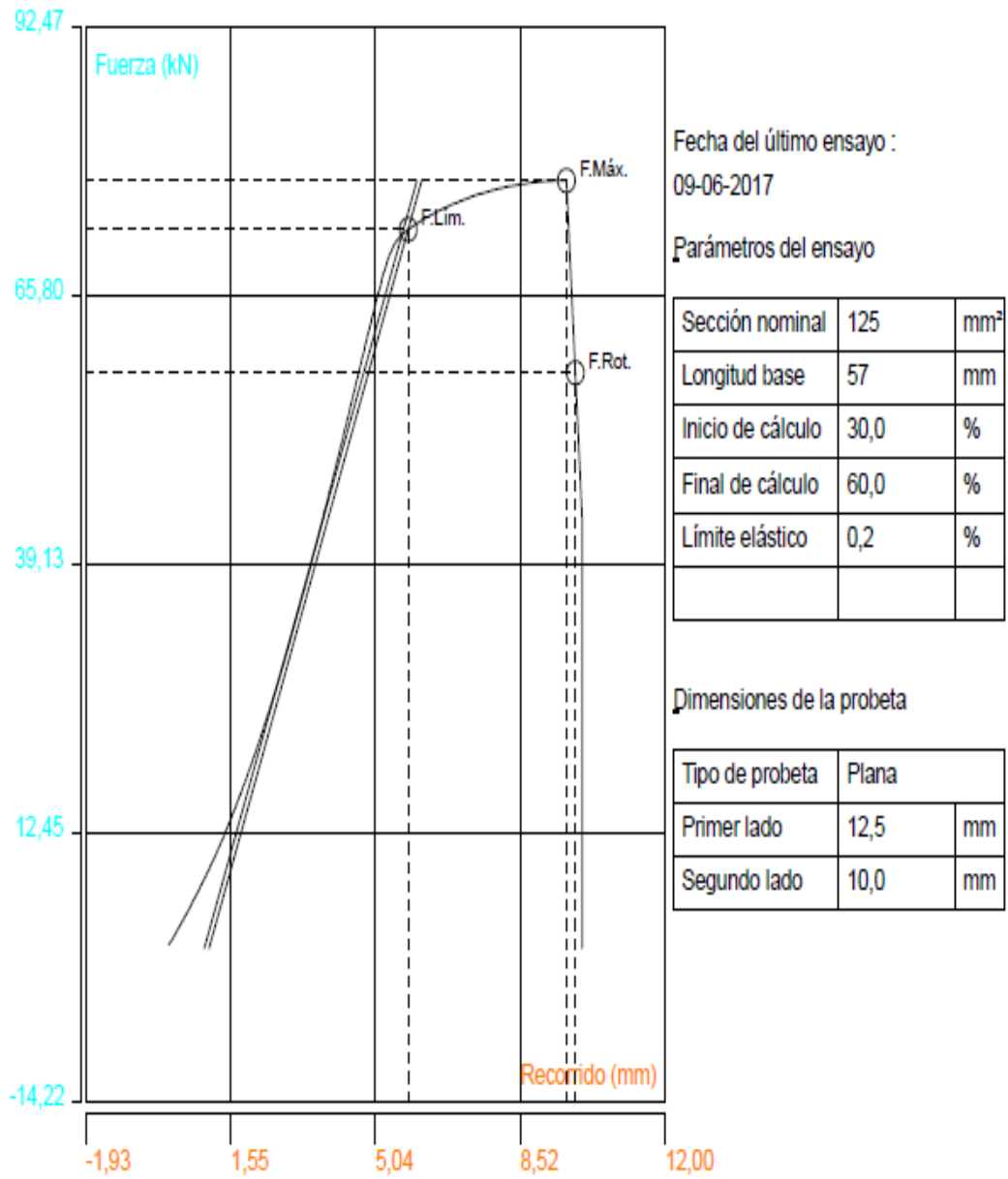


Gráfico 3. Gráfica Fuerza – Desplazamiento, parámetros y dimensiones probeta B.

Fuente; Restrepo, Suarez (2017)

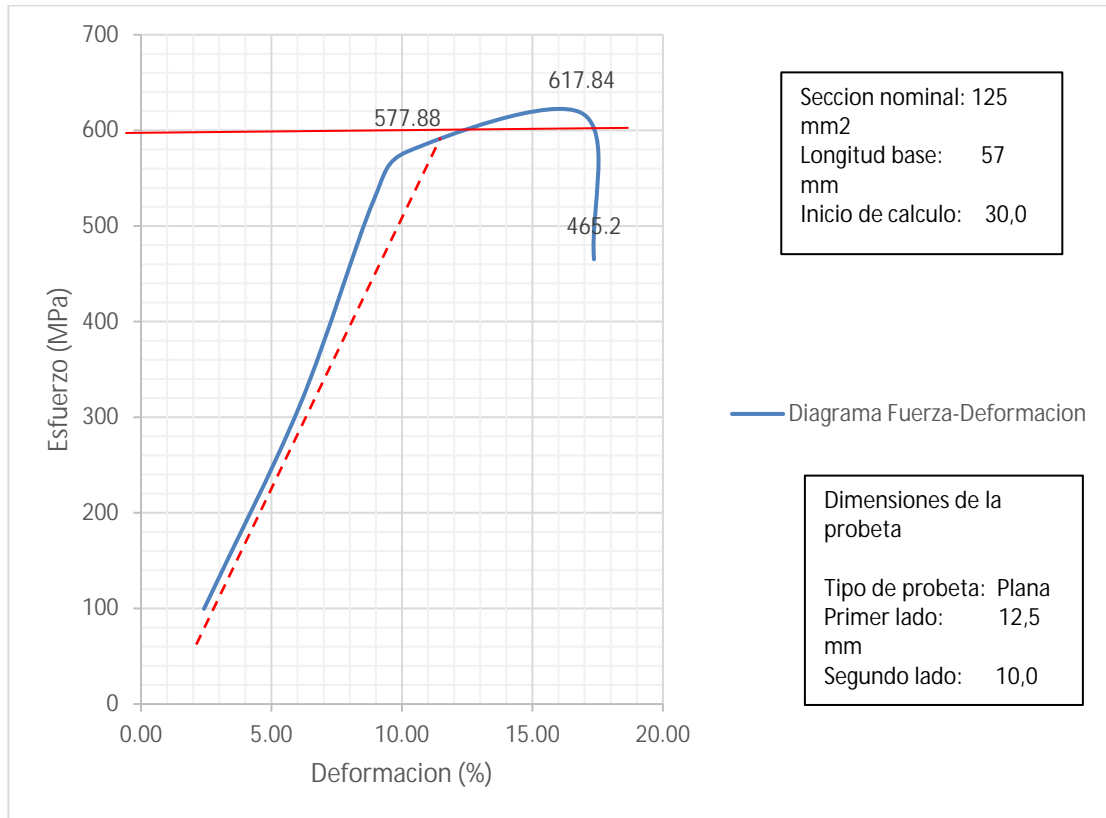


Gráfico 4. Gráfica Esfuerzo - Deformación, parámetros y dimensiones probeta B.

Fuente: Restrepo, Suarez (2017)

Probeta C.

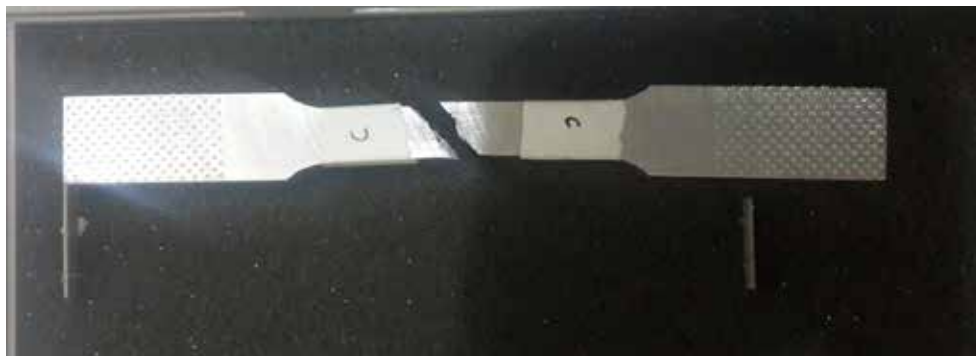


Figura 29. Probeta C, luego del ensayo a tracción

Fuente: Restrepo, Suarez (2017)

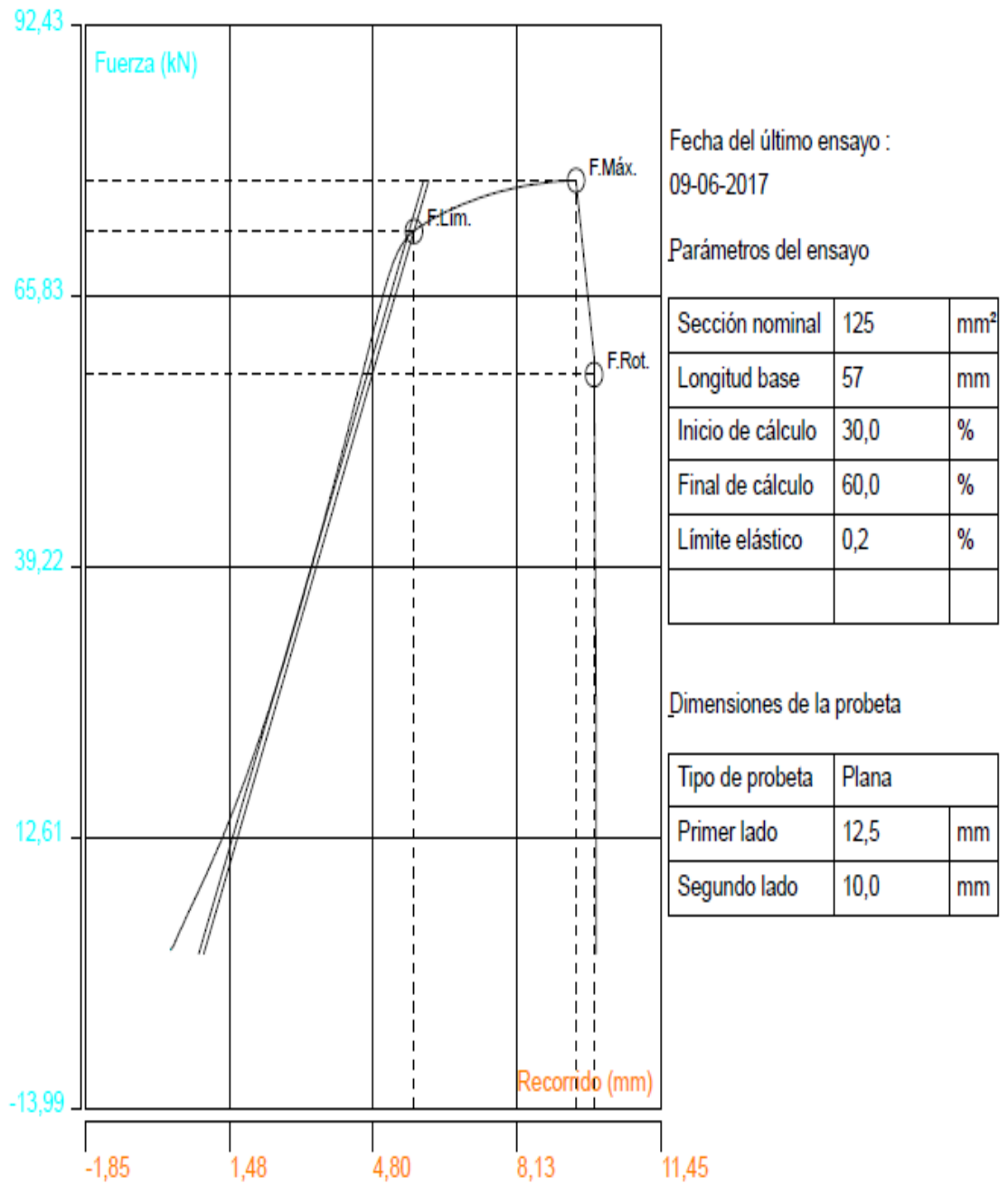


Gráfico 5. Gráfica Fuerza – Desplazamiento, parámetros y dimensiones probeta C.

Fuente; Restrepo, Suarez (2017)

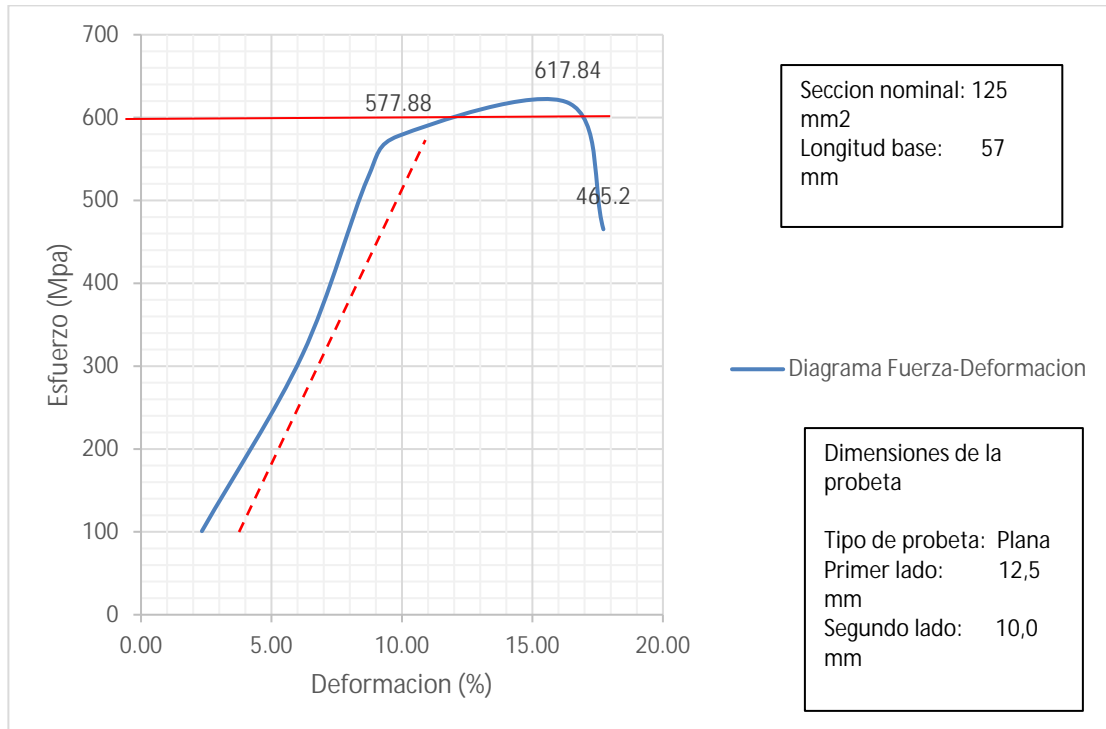


Gráfico 6. Gráfica Esfuerzo - Deformación, parámetros y dimensiones probeta C.

Fuente: Restrepo, Suarez (2017)

Tabla 8. Datos obtenidos del ensayo de tracción de las probetas A, B y C

	PROBETA A		PROBETA B		PROBETA C	
Fuerza Máxima (Fm)	N	76630	77230		77230	
Resistencia tracción (Rm)	MPa	613,0	617,8		617,8	
Alarg. Carga máxima (Agt)	%Lo	15,00	16,89		15,96	
Fuerza rotura (Frot)	N	57698	58150		58150	

Fuente: Restrepo, Suarez (2017)

Continuación Tabla 8. Datos obtenidos del ensayo de tracción de las probetas A, B y C

	PROBETA A		PROBETA B		PROBETA C	
Resistencia tracción (Rm)	MPa	613,0	77230		77230	
Resistencia a la rotura (At)	MPa	461,6	465,2		465,2	
Alargamiento rotura (Rt)	%Lo	15,93	17,27		16,67	
Alargamiento remanente	%Lo	0,00	0,00		0,00	
F. Límite elástico (Flim)	N	68770	72375		72236	
Límite elástico (Rp)	MPa	550,2	579,0		577,9	
Def. Lim. Elástico (Alim)	%Lo	7,59	10,21		9,62	
Módulo elástico (E)	MPa	8714,7	6794,7		6900,8	
Rel. Fza. Máx/ fza. Lím		1,11	1,07		1,07	

Fuente: Restrepo, Suarez (2017)

Analizando los resultados obtenidos por el ensayo de tracción en la probeta se logró observar que las probetas A, B y C, presentaron una fractura dúctil con comportamiento frágil, ya que se nota que la fractura en las tres probetas se produjo formando un ángulo de 45° bien definido, de este ensayo también se desprendieron valores de las propiedades mecánicas que permitieron establecer una comparación con las propiedades mecánicas de un aluminio de la serie 2xxx.

Al realizar el cotejo de los valores obtenidos en el ensayo con los valores contenidos en la tabla B se estableció que a pesar de que las propiedades mecánicas no coinciden y la aproximación no es cercana, se debe tomar en cuenta el tiempo de

servicio y las condiciones de servicio a la cual estuvo sometida el material, para que sus propiedades mecánicas variaran con respecto a las propiedades características de una aleación de la serie 2024

4.1.3 Análisis de los resultados obtenidos por el ensayo de Microdureza Vickers.

De este ensayo se obtuvieron los siguientes datos (ver tabla 5).

Tabla 9. Valores obtenidos de la Microdureza Vickers.

MUESTRA	HV 1	HV 2	HV 3	HV 4	HV 5	HV 6	HV 7	HV 8
CARA 1	135,1	133	136	138,2	137,2	133	134	135,1
CARA 2	138,2	140,4	142,6	143,7	141,5	143,7	140,4	141,5
CARA 3	135,1	134	133	136,1	137,2	138,1	132	136,1

Fuente: Restrepo, Suarez (2017)

Tabla 10. Valores promedios de la Microdureza Vickers.

MUESTRA	HV
CARA 1	135,2
CARA 2	141,5
CARA 3	134,95

Fuente: Restrepo, Suarez (2017)

De acuerdo a los resultados obtenidos en el ensayo de microdureza Vickers, se pudo establecer una comparación con la microdureza de distintas aleaciones de aluminio (ver tabla 2) y tomando en cuenta que las tablas de las propiedades mecánicas expresan los valores de dureza en función de la dureza Brinell, se efectuó una conversión del valor de la dureza obtenida en el ensayo Vickers mediante una tabla (Anexo 1), que contiene los valores equivalentes en dureza Brinell según la

norma ASTM E140 (Tablas de conversión de dureza estándar para metales Brinell, Vickers, Rockwell, superficial, Knoop, Leeb).

Una vez realizada la conversión se obtuvieron valores entre 75 y 77,5 HB, con este resultado se efectuó una comparación de la dureza Brinell de la aleación de aluminio 2024 –T6, dicho valor fue 125 HB.

A pesar de que microestructuralmente se pudo inferir que la aleación corresponde a una aleación 2024 con un tratamiento térmico T6, existen divergencias en los valores de dureza, se puede deducir que las propiedades mecánicas de la aleación, pudieran variar por el tiempo de servicio o por un tratamiento

4.1.1 Análisis de los resultados de microscopía.

El ensayo metalográfico se realizó de manera longitudinal y transversal, para poder determinar si, según el corte las propiedades mecánicas de la aleación pudieran cambiar:

Microscopía y macroscopía longitudinal: A continuación en las figuras 30 y 31, se muestran las micrografías a 200X y 400 X obtenidas del corte longitudinal de la probeta



Figura 30. Microscopía longitudinal del material con un tratamiento térmico. 200X.

Fuente: Restrepo, Suarez (2017)



Figura 31. Microscopía longitudinal del material con un tratamiento térmico. 400X.

Fuente: Restrepo, Suarez (2017)

En las micrografías de la sección longitudinal de la probeta se observa el sentido de laminación del material, dado por la dirección de alargamiento de los granos, adicionalmente se observan unos precipitados de color oscuro que se infiere pueden ser CuMgAl_2 .

Microscopía y macroscopía transversal: A continuación en las figuras 32 y 33, se muestran las micrografías a 100X, 200 X, obtenidas de la sección transversal de la probeta.



Figura 32. Microscopía transversal del material con un tratamiento térmico y un ataque químico de 20 segundos. 100X.

Fuente: Restrepo, Suarez (2017)

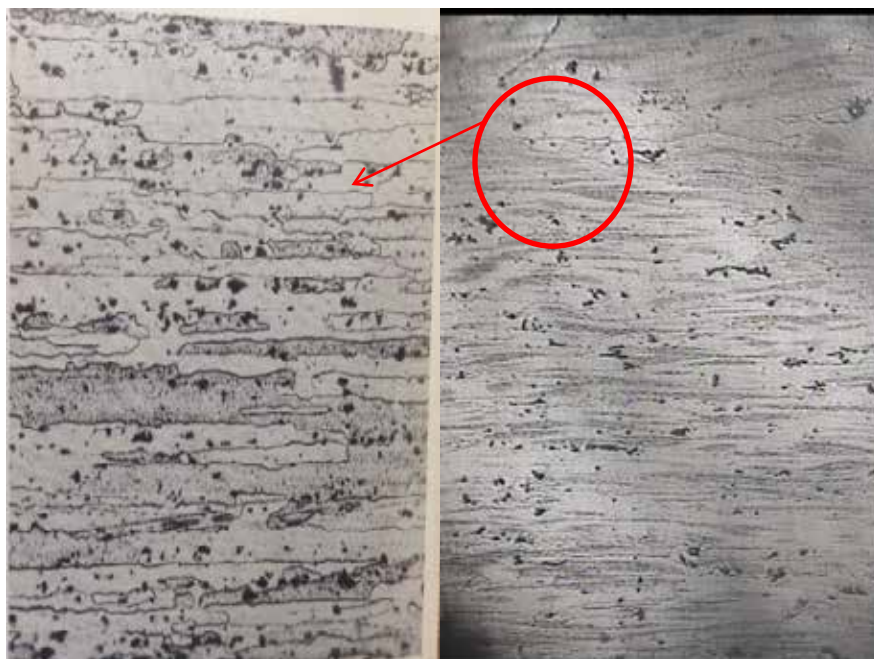


Figura 33. Microscopía transversal del material con un tratamiento térmico y un ataque químico de 30 segundos. 200X.

Fuente: Restrepo, Suarez (2017)

En las micrografías de la sección longitudinal (figura 32 y 33) se notó la forma de los granos, adicionalmente se infiere que existen unos precipitados de color oscuro de forma irregular. La morfología de los granos y distribución de los precipitados en esta sección varían con respecto a la sección longitudinal, ya que las propiedades mecánicas cambian de acuerdo a la distribución de los granos, por lo que se pudieran obtener propiedades mecánicas diferentes para este material, dependiendo de la sección u orientación de los ensayos que se practiquen.

Para poder determinar el tipo de aleación de aluminio con la cual se trabajó se estableció una comparación de ésta aleación aluminio con otra de microestructura similar (ver figura 34).



(a) (b)

Figura 34. Comparación longitudinal de las microscopías de la aleación 2024 – T6 con el material de estudio. (a) Microscopia 2024 – T6 Orrego G & Echavarría A (2012), (b) Microscopia de material en estudio.

Fuente: Restrepo, Suarez (2017).

Al establecer una comparación entre la figura 34a y 34b, se puede observar que el comportamiento de los precipitados de color oscuro en función de la línea de flujo del material en estudio (figura 34b) están dispersos en ambas, a pesar de que en la figura 30a la formación de los granos es más notoria, en la 30b se puede apreciar levemente, esto debido a una posible falta de tiempo y temperatura en el tratamiento térmico aplicado al material en estudio o en su defecto el tiempo y condiciones de servicio del material. Dicho esto, se puede inferir que la aleación en estudio microestructuralmente corresponde a una aleación de aluminio 2024 – T6

A pesar de que hubo similitud en la microscopía de la aleación en estudio con la aleación 2024 –T6, fue necesario llevar el material a su estado original para nuevamente establecer una comparación de la microestructura de un aluminio 2024 en estado O con la microscopía de la aleación de aluminio evaluada, que fue sometida a un tratamiento de recocido.

Luego del recocido (ver figura 35), los pasos a seguir para el análisis metalográfico de esta muestra fueron exactamente los mismos que están definidos en la fase I del capítulo III, de este ensayo metalográfico se obtuvo el análisis longitudinal (ver figura 36, 37, 38 y 39)



Figura 35. Probetas para análisis metalográfico luego de un recocido.

Fuente: Restrepo, Suarez (2017)

Del análisis longitudinal se obtuvo:

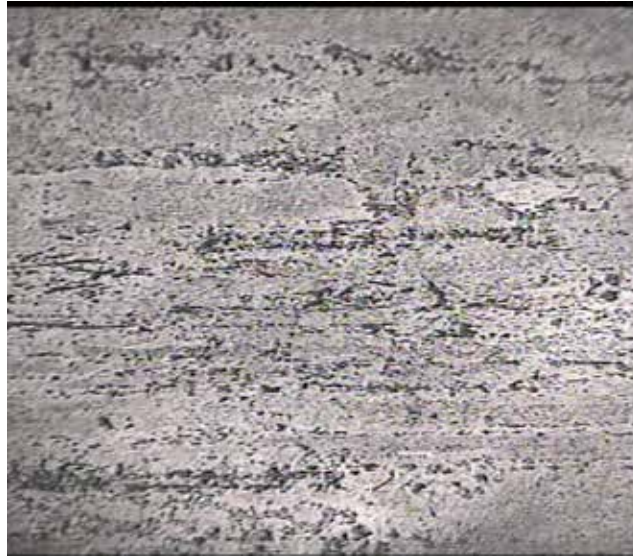


Figura 36: Microscopía longitudinal de la aleación en estudio luego de un recocido 100X.

Fuente: Restrepo, Suarez (2017)

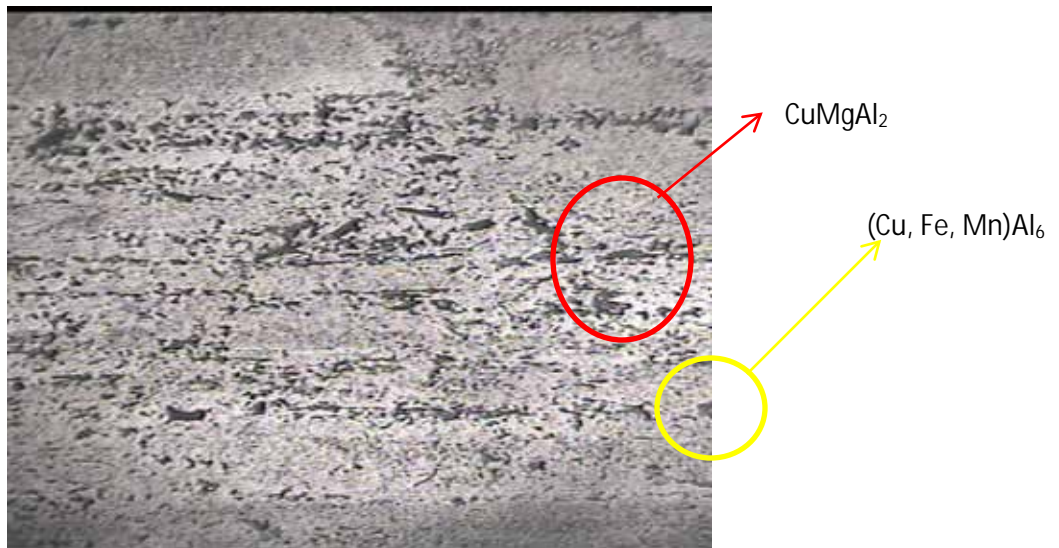


Figura 37. Microscopía longitudinal de la aleación en estudio luego de un recocido 200X.

Fuente: Restrepo, Suarez (2017)

Se observa que los constituyentes están fragmentados, deformados y encadenados en una misma dirección, la estructura consiste en partículas insolubles de color gris claro, por lo fundamentado en el marco teórico de este trabajo en estudio las partículas de color gris (ver figura 37) corresponden a $(\text{Cu}, \text{Fe}, \text{Mn}) \text{Al}_6$, además de partículas no disueltas de color negro (ver figura 37 y 38) se asocian con CuMgAl_2 y finas partículas que precipitan durante el recocido.



Figura 38. Microscopía longitudinal de la aleación en estudio luego de un recocido 400X.

Fuente: Restrepo, Suarez (2017)

De manera más detallada aparecen nuevamente los precipitados de color oscuro, que, como ya fue mencionado pudieran pertenecer a CuMgAl_2 , (ver figura 38 círculo rojo), además se observa como los compuestos intermetálicos presentes en la aleación se alinean de manera uniforme.

En la figura 39, se observan de manera más detallada los precipitados de color obscuro, que basado en el fundamento teórico, se pudo inferir que pertenecen a CuMgAl_2 , precipitados característicos de una aleación 2024.

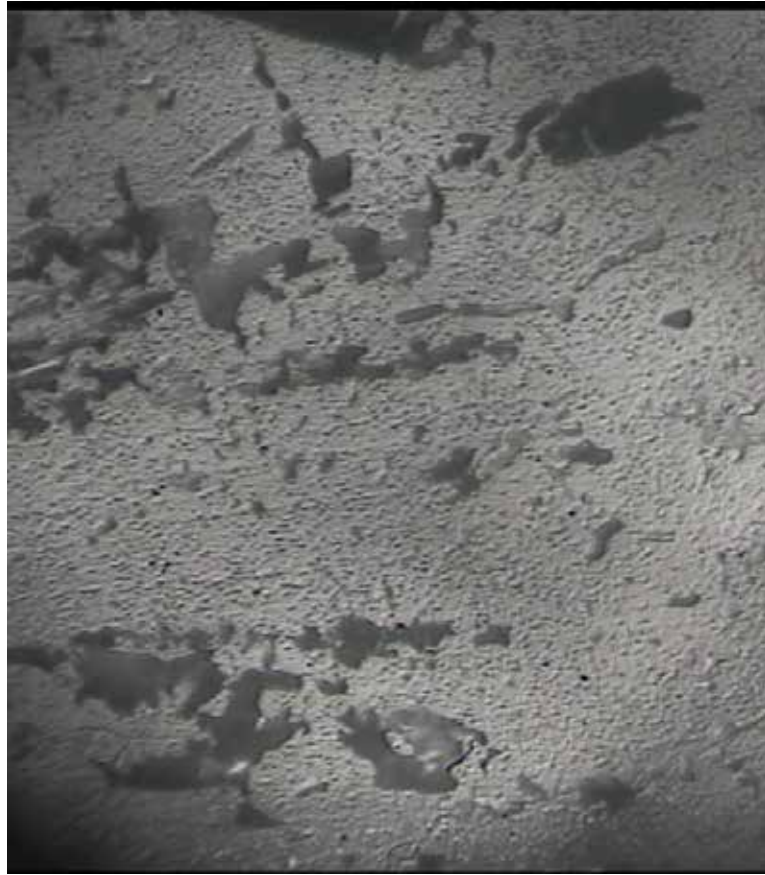


Figura 39. Microscopía longitudinal de la aleación en estudio luego de un recocido 1000X.

Fuente: Restrepo, Suarez (2017)

De los resultados obtenidos con la microscopia de la muestra sometida a recocido, se pudo establecer una comparación con la microscopia de una aleación de aluminio 2024 –O.

En la figura 40 se puede notar una gran similitud entre la imagen 40a y 40b, en ambas imágenes se puede observar que los constituyentes están fragmentados, deformados y encadenados en la dirección de laminación, la estructura consiste en partículas insolubles de color gris claro, que corresponden a $(\text{Cu}, \text{Fe}, \text{Mn}) \text{Al}_6$, además de partículas no disueltas de color negro que se asocian con CuMgAl_2 y finas partículas que precipitan durante el recocido.

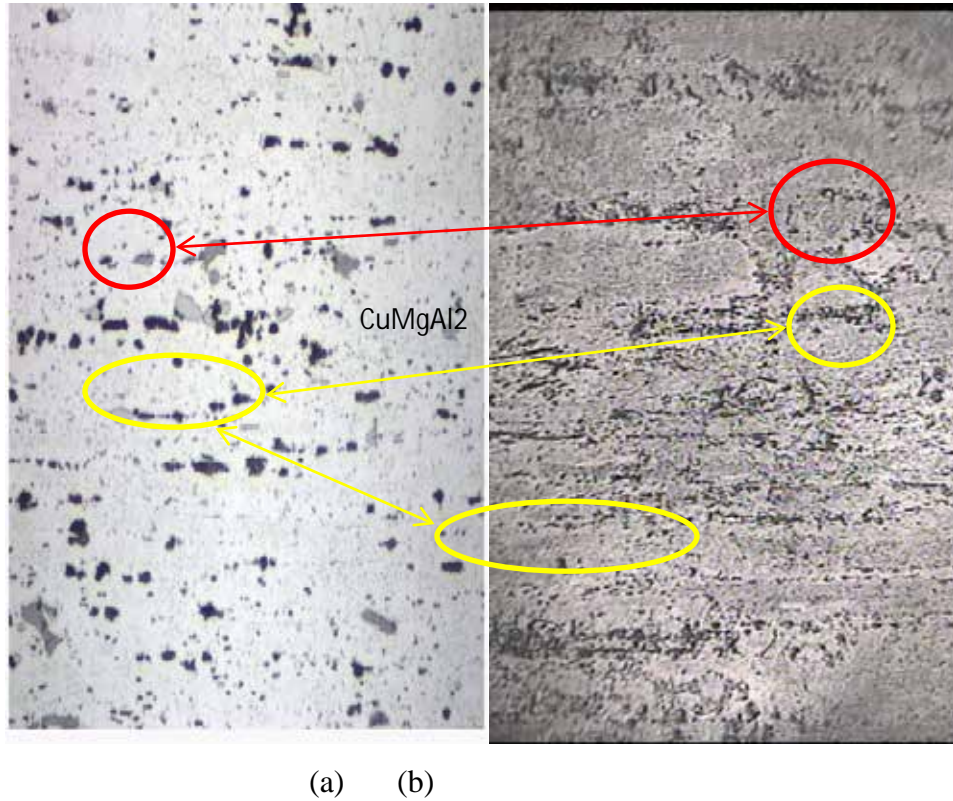


Figura: 40. Comparación longitudinal de las microscopías de la aleación 2024 – T6 con el material de estudio. (a) Microscopia 2024 – O, (b) Microscopia de material en estudio.

Fuente: Restrepo, Suarez (2017).

4.3 Análisis de la selección de las probetas.

Luego de introducir los valores necesarios para la selección de probetas para el ensayo Charpy, el software arrojó un resultado de 23 probetas para una efectividad de 99%.

4.2 Análisis de los resultados del ensayo Charpy.

Al tener la cantidad de probetas necesarias se cortaron y se mecanizaron de acuerdo a lo establecido en la norma y como se explicó con detalle en el capítulo anterior (ver figura 41)



Figura 41. Probetas para ensayo Charpy.

Fuente: Restrepo, Suarez (2017)

En el ensayo Charpy se rompieron 23 probetas (ver figura 42), en ellas se observó que las probetas presentan una fractura frágil característica del impacto, además se nota la usencia de deformación



Figura 42. Probetas luego de ensayo Charpy.

Fuente: Restrepo, Suarez (2017)

Luego de romper las probetas mediante el ensayo de impacto Charpy se tomaron los valores del ángulo final para calcular la energía absorbida, donde se

utilizó la ecuación 2, a continuación, se muestra los resultados obtenidos del ensayo en la tabla 11.

Tabla 11. Ángulo final del péndulo, energía y tenacidad de la muestra de aluminio.

PROBETA	ANGULO	ENERGÍA (JOULE)	TENACIDAD (kJ/m²)
1	148	12,119	151,4875
2	152	8,015	100,1875
3	153	7,067	88,3375
4	153	7,067	88,3375
5	153	7,067	88,3375
6	154	6,151	76,8875
7	153	7,067	88,3375
8	154	6,151	76,8875
9	149	11,046	138,075
10	147	13,222	165,275
11	154	6,151	76,8875
12	154	6,151	76,8875
13	152	8,015	100,1875
14	154	6,151	76,8875
15	152	8,015	100,1875

Fuente: Restrepo, Suarez (2017)

Continuación Tabla 11. Ángulo final del péndulo, energía y tenacidad de la muestra de aluminio.

16	153	7,067	88,3375
17	154	6,151	76,8875
18	153	7,067	88,3375
19	153	7,067	88,3375
20	151	8,994	112,425
21	150	10,008	125,10
22	154	6,151	76,8875
23	153	7,067	88,3375
ENERGÍA ABSORBIDA Y TENACIDAD PROMEDIO		6,776	97,2972

Fuente: Restrepo, Suarez (2017).

En relación a la tenacidad, ésta se determinó como el cociente de la energía absorbida y el área de la sección transversal de la probeta, tomando en consideración la disminución de 2 mm correspondiente a la profundidad de la entalla. Por lo que el área es el producto del ancho de 10 mm por la altura de (10 mm – 2 mm de la entalla), obteniéndose un área de 80 mm².

En cuanto a la energía absorbida la ASM en su HandBook señala que la energía absorbida por una aleación de aluminio 2024 con tratamiento T6 es de 10 ± 5 J, esto quiere decir que la aleación en estudio no absorbe la cantidad de energía máxima según lo establecido, esto pudo ser consecuencia del tiempo de servicio del material y condiciones de uso.

4.4 Análisis de las condiciones favorables y desfavorables, establecidas durante el servicio.

Después de realizar todo el estudio y cumplir con el procedimiento metodológico, se pudo establecer como condiciones favorables que el material estudiado contiene propiedades y características empleadas en la industria aeroespacial, automotriz, en la fabricación de moldes para soplado de PET, en la fabricación de tornillos y remaches especiales, en la industria militar como los soportes de culata de algunos fusiles y en general para la fabricación de piezas de maquinaria por su excelente maquinabilidad.

Como condiciones desfavorables se pudo establecer que el material en estudio presento un estado, en cuanto a sus propiedades mecánicas, un poco bajas, debido a las condiciones y tiempo de servicio. También se presume que en el tratamiento térmico que presento, faltó tiempo o temperatura en cuanto a su aplicación, ya que en su microestructura se logró observar una recristalización incompleta.

CONCLUSIONES

De acuerdo al trabajo de investigación realizado aplicando todos los procesos metodológicos y cumpliendo paso a paso con los objetivos propuestos, se concluye:

- Mediante el análisis metalográfico se logró establecer que la microestructura del material en estudio corresponde a una aleación 2024 con un tratamiento térmico T6
- En el ensayo Charpy se calculó la energía absorbida por la aleación de aluminio 2024 – T6. Comparando el valor promedio obtenido en el ensayo, con el valor establecido que absorbe una aleación de la misma serie, con el mismo tratamiento térmico, se pudo interpretar que el material de estudio, a pesar de estar en el rango comprendido de valores referidos a la energía absorbida de la aleación de aluminio 2024 – T6, resulto un poco baja, esto se debió a las condiciones de y tiempo de servicio.
- Tomando en cuenta los valores obtenido de la energía que absorbió el material se puede establecer que al material le queda aproximadamente un tiempo de servicio menor al 50%
- Además se realizaron ensayos mecánicos, donde se obtuvieron valores que permitieron realizar una comparación entre las propiedades mecánicas de algunas aleaciones de aluminio, a pesar de que hubo coincidencia con algunas propiedades de otras aleaciones, se pudo notar que las propiedades mecánicas no son determinantes para la identificación de una aleación de aluminio.
- Se pudo constatar que la composición química de un material, junto a la microscopia que lo caracteriza, van directamente relacionados con la identificación del material, y que las propiedades mecánicas de este, son consecuencia directa de la composición química y microestructura del material.

- Las propiedades mecánicas de un material se pueden ver afectadas por los tratamientos térmicos que pudo haber presentado el material, y las condiciones (temperatura) y tiempo de servicio.

RECOMENDACIONES

Una vez logrado todos los objetivos establecidos en este trabajo de investigación, se tienen las siguientes recomendaciones:

- Realizar una microscopia con un microscopio electrónico de barrido, para obtener una microscopía más detallada.
- Practicar ensayo de espectroscopia de energía dispersiva, y así, de esta forma realizar un estudio químico más preciso.
- Realizar ensayo de fatiga. De esta manera, analizar la resistencia del material cuando trabaja bajo cargas variables.
- Evaluar el material en su estado virgen. De esta forma se puede tener mayor precisión en los resultados luego de realizar y cumplir con todos los objetivos de esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angiola, A. (1960). **Introducción a la química industrial**. Editorial Andrés Bello.
Santiago de Chile
- Bernau, R.L (1952): **Elementos de Metalografía y de Acero al Carbono**. Editorial **Andrés Bello**. Santiago de Chile.
- Berr, P., Johnston, r. & Cornwell, p. (2010): **Mecánica Vectorial para ingenieros**. México. D.F.
- Giachino, J &Weeks , W (2007). **Técnica y práctica de la soldadura**. Barcelona,
España
- Kalpakjain, S. &Schmid, S.R (2008): **Manufactura, Ingeniería y Tecnología**, 5ta edición. México. D.F.
- Mantell, C.L (2003): **Ingeniería Electroquímica**. Madrid, España.
- Matusevich, A., Mancini, R. &Giudici, A. (2012): **Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales: Determinación de la Tenacidad a la Fractura de un Material de un Gasoducto**. Caracas, Venezuela.
- Núñez, C., Roca, A. &Jorba, J. (2013): **Comportamiento Mecánico de los Materiales vol.2. Ensayos Mecánicos Ensayos no destructivos**. Barcelona, España.
- Organización de Naciones Unidas (ONU).**ATLAS DE PRODUCTOS BASICOS** (2004). Nueva York y Ginebra.

Ortega, Y. (2005): **Prueba de impacto: Ensayo Charpy**. Madrid, España.

Otegui, J &Rubertis, E. (2008): **Cañerías y Recipientes de Presión, tomo I**.
Universidad Nacional del Mar de plata, Argentina.

Rodríguez, Y. (2003). **Un sistema cliente para la educación superior. Tesis Doctoral no publicada. Universidad de Carabobo, Facultad de Ciencias de la Educación, Área de estudios de Postgrado, Doctorado en Educación.**
Valencia, Venezuela.