

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE QUITO**

**CARRERA:**  
**INGENIERÍA MECÁNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:**  
**INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA:**  
**“ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS  
(RECOCIDO Y REVENIDO), EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA  
ALEACIÓN DE ALUMINIO 7075-T651 MEDIANTE ENSAYOS DE  
TRACCIÓN”.**

**AUTORES:**  
**LUIS RAFAEL CALDERÓN CENTENO**  
**GARY FRANCISCO MORILLO ORTEGA**

**TUTOR:**  
**MILTON SALOMÓN JAMI LEMA**

**Quito, Agosto del 2019**

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros Luis Rafael Calderón Centeno y Gary Francisco Morillo Ortega, con documentos de identidad N° 1721864948 y N° 0401593884, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: **“ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS (RECOCIDO Y REVENIDO), EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 7075-T651 MEDIANTE ENSAYOS DE TRACCIÓN”**, mismo que ha sido desarrollado para optar el título de Ingenieros Mecánicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra consideración de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que haga entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



---

Luis Rafael Calderón Centeno  
1721864948



---

Gary Francisco Morillo Ortega.  
0401593884

Quito, Agosto del 2019

## DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Proyecto Técnico, “ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS (RECOCIDO Y REVENIDO), EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 7075-T651 MEDIANTE ENSAYOS DE TRACCIÓN”, realizado por Luis Rafael Calderón Centeno y Gary Francisco Morillo Ortega, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Agosto del 2019

  
MILTON SALOMÓN JAMI LEMA  
1707254171

## **DEDICATORIA**

En el transcurso de esta etapa de mi vida, he encontrado grandes personas que han forjado el ser humano que soy ahora, es difícil nombrarlos a todos; pero aun así cada uno de ellos siempre estarán en mi mente. Quiero agradecer el apoyo incondicional de mi padre Amílcar que, aunque hemos pasado por varias cosas sé que siempre va estar a mi lado y siempre voy a poder contar con él. También al motor de mi alma mi madre Rubiela que siempre ha sido la persona que me ha motivado a seguir adelante y dar lo mejor de mí en todo lo que me proponga. En el último transcurso de esta etapa tengo que agradecerle a mi novia Natalie que me ha ensañado a cambiar mi perspectiva sobre lo que me rodea y poder ver lo que verdaderamente es importante en la vida.

**Gary Francisco Morillo Ortega.**

Este presente proyecto es dedicado a mi madre Delia Marina C.C (†) pilar fundamental de mi vida, que a pesar de estar fuera del país nunca me faltaron sus palabras de motivación para seguir adelante, gracias por enseñarme valores y por todo el apoyo que me ha brindado y que, gracias a sus esfuerzos, y a su vida me ha permiti6 llegar a este punto de culminaci6n de mi profesi6n.

A mis abuelitos maternos que a pesar de encontrarme lejos de mi madre ellos tomaron el rol de mis segundos padres, y que no permitieron que me desvi6 en lo pasos que la vida interponía en mi camino.

A mi padre por las palabras que me ha brindado.

A mi tío Jorge, que me acogió desde pequeño y le brindó apoyo y ayuda incondicional hacia mi madre.

A mis abuelitos paternos, tíos en general, hermanos, primos y amigos que siempre me han sabido apoyar en todo momento gracias.

**Luis Rafael Calder6n Centeno**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos de una manera muy especial a la Universidad Politécnica Salesiana por permitirnos utilizar sus laboratorios para realizar parte de nuestra investigación.

Queremos agradecerle a nuestro Tutor Ingeniero Milton Jami, que con su ayuda y dedicación de tiempo nos permitió culminar el siguiente proyecto técnico y así nuestra carrera universitaria.

También queremos expresar nuestro agradecimiento a varias personas que hicieron posible que hayamos culminado este proyecto de tesis. El Ing. Xavier Vaca fue una de las personas que más apoyo nos brindó dentro del desarrollo de nuestros proyectos, así también brindar agradecimientos a los docentes de la Universidad Politécnica Salesiana Ing. Vinicio Coque, Ing. Esteban Ramírez, Ing. Isaac Simbaña que estuvieron brindando su ayuda cuando la necesitamos.

Gary Francisco Morillo Ortega

Luis Rafael Calderón Centen

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	ii
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR.....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTOS .....	v
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	ix
JUSTIFICACIÓN .....	x
OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	xi
Objetivo General .....	xi
Objetivo Específicos .....	xi
GLOSARIO.....	xii
CAPITULO I.....	1
MARCO TEORICO.....	1
1.1    Introducción.....	1
1.2. Aleaciones de aluminio .....	1
1.2.1. Propiedades .....	2
1.2.2. Clasificación de las aleaciones de aluminio según su composición.....	4
1.3. Aleación de aluminio 7075-T6.....	6
1.4. Tratamientos térmicos .....	7
1.4.1. Solubilización.....	9
1.4.2. Temple.....	9
1.4.3. Maduración.....	10
1.5. Tratamientos térmicos a someter .....	10
1.5.1. Recocido.....	11

1.5.2. Revenido.....	15
2. CAPITULO II .....	17
2.1. Desarrollo del proceso.....	17
2.1.1. Muestreo de materia prima.....	17
2.1.2. Desarrollo del proceso experimental.....	18
2.2. Selección de variables.....	21
2.4. Tratamiento de recocido.....	21
2.4.1. Temperatura recomendada para el tratamiento de recocido.....	21
2.4.2. Tiempo de residencia de las probetas.....	21
2.4.3. Enfriamiento posterior.....	21
2.5. Tratamiento de revenido .....	22
2.5.1. Temperatura recomendada para el tratamiento de revenido.....	22
2.5.2. Tiempo de residencia de las probetas.....	22
2.5.3. Enfriamiento posterior.....	23
2.6. Combinación de variables.....	23
2.7. Metodología experimental .....	25
2.7.1. Diseño de probetas .....	26
2.7.2. Aplicación de tratamientos térmicos .....	26
2.7.3. Ejecución de ensayos de tracción, microestructura y dureza.....	32
2.8. Resultados experimentales.....	32
2.8.1. Ensayos de tracción.....	32
2.8.2. Metalografía .....	37
CAPITULO III.....	38
3.1. Resultado de muestra de ensayo .....	38
3.1.1. Análisis de resultados de ensayos de tracción.....	38
3.2. Resultados de ensayos metalográficos.....	47
3.3. Resultados de ensayos de dureza .....	50

3.3 Costos.....	50
Conclusiones.....	52
Recomendaciones.....	53
Bibliografía.....	54



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades relevantes del aluminio .....	3
Tabla 2. Clasificación de las aleaciones de aluminio según su composición. ....	4
Tabla 3 Composición en porcentajes de la aleación 7075-T6 .....	6
Tabla 4 Propiedades mecánicas del aluminio 7075-T651 .....	6
Tabla 5. Propiedades físicas del aluminio 7075-T651 .....	7
Tabla 6. Transformación de fases AL-Zn . ....	9
Tabla 7. Tratamientos de recocido recomendados para aleaciones de aluminio forjado según normas ASTM B918 .....	12
Tabla 8. Tabla recomendada para revenido de aceros comerciales . ....	16
Tabla 9. Datos técnicos de CNC EMCOMAT E-200 .....	18
Tabla 10. Parámetros de funcionamiento de máquina herramienta TESTRESOURCES Serie 315 .....	19
Tabla 11. Parámetros de funcionamiento de máquina herramienta Horno de recocido N7/H .....	20
Tabla 12. Tipos de enfriamiento establecidos .....	22
Tabla 13. Tiempos establecidos para el revenido. ....	23
Tabla 14. Tipos de enfriamiento establecidos .....	23
Tabla 15. Tabla de variables combinadas para recocido.....	24
Tabla 16. Tabla de variables combinadas para revenido. ....	24
Tabla 17. Combinación de ensayos a realizar. ....	25
Tabla 18. Propiedades mecánicas principales probeta base de aluminio 7075-T651.33	
Tabla 19. Resultados finales de cargas máximas de revenido, recocido y respectivos ensayos. ....	34
Tabla 20. Resultados finales de esfuerzos máximos de revenido, recocido y respectivos ensayos. ....	34
Tabla 21. Resultados finales de módulo de elasticidad de revenido, recocido y respectivos ensayos. ....	35
Tabla 22. Resultados finales de carga a la fluencia de revenido, recocido y respectivos ensayos .....	35
Tabla 23. Resultados finales de esfuerzo de fluencia de revenido, recocido y respectivas combinaciones. ....	36

Tabla 24. Resultados finales de porcentaje de elongación de revenido, recocido y respectivas combinaciones. ....	36
Tabla 25. Valores promedios de las propiedades mecánicas. ....	38
Tabla 26. Comparación entre valores base y valores de revenido de 6h enfriados en temperatura ambiente. ....	45
Tabla 27. Identificación de muestra ....	47
Tabla 28. Análisis metalográfico. ....	47
Tabla 29. Valores de dureza obtenidos. ....	50
Tabla 30. Costos.....	50

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Variación de la microestructura de una aleación de aluminio.....	3
Figura 2. Diagrama de fase Al-Zn .....	8
Figura 3. Tratamiento térmico de bonificado para las aleaciones de aluminio .....	10
Figura 4. Representación esquemática del proceso de recocido. a) Restauración. b) Recristalización. c) Crecimiento de grano .....	13
Figura 5. Representación micrográfica del proceso de recocido en un aluminio . ....	14
Figura 6. Marca comercial del proveedor del material. ....	17
Figura 7. Material en estado base remarcado.....	17
Figura 8. Máquina herramienta tipo torno modelo CNC EMCOMAT E-200 .....	18
Figura 9. Máquina herramienta TESTRESOURCES Serie 315 .....	19
Figura 10. Máquina herramienta horno de recocido N7/H . ....	20
Figura 11. Máquina herramienta horno de revenido N15/65HA .....	20
Figura 12. Diseño de probeta según norma ASTM E8/E8M.....	26
Figura 13. Probetas ubicadas en el contenedor especial del horno Nabertherm.....	27
Figura 14. a) Temperatura [centígrados] programada en el horno de recocido, b) Tiempo [horas] de residencia de las probetas en el horno. ....	27
Figura 15. Iniciando evacuación de las probetas del horno para respectivo enfriamiento. ....	28
Figura 16. a) Enfriamiento de las probetas en el horno. ....	28
Figura 17. b) Enfriamiento de las probetas a temperatura ambiente.....	28
Figura 18. c) Enfriamiento de las probetas en arena silica. ....	29
Figura 19. Ubicación de probetas en el horno de revenido.....	29
Figura 20. a) Temperatura para revenido. b) Tiempo de residencia de primer grupo de las probetas para revenido.....	30
Figura 21. a) Probetas enfriadas en horno. b) Probetas enfriadas en arena. c) Probetas enfriadas en ambiente.....	30
Figura 22. a) Temperatura de revenido. b) Tiempos de residencia de segundo grupo de probetas para revenido. ....	30
Figura 23. a) Probetas enfriadas en horno. b) Probetas enfriadas en arena. c) Probetas enfriadas en ambiente.....	31

Figura 24. a) Temperatura de revenido. b) Tiempos de residencia de tercer grupo de probetas para revenido. ....	31
Figura 25. a) Probetas enfriadas en horno. b) Probetas enfriadas en arena. c) Probetas enfriadas en ambiente.....	32
Figura 26. Comprobación de propiedades mecánicas de material en estado base.....	33
Figura 27. Resultados comparativos de carga máxima. ....	39
Figura 28. Resultados comparativos de esfuerzo máximo.....	40
Figura 29. Resultados comparativos módulo de elasticidad. ....	41
Figura 30. Resultados comparativos carga a la fluencia. ....	42
Figura 31. Resultados comparativos esfuerzo a la fluencia. ....	43
Figura 32. Resultados comparativos porcentaje de elongación. ....	44
Figura 33. Nuevas propiedades mecánicas. ....	45
Figura 34. MB, la microestructura que presenta corresponde a un aluminio con presencia de precipitados de segunda fase e inclusiones de cobre (Cu).....	48
Figura 35. MB, matriz aluminio, detalle de los precipitados de segunda fase (puntos negros) e inclusiones de cobre (Cu). ....	48
Figura 36. Revenido 6h, la microestructura no homogénea, que corresponde a un aluminio con presencia de precipitaciones de segunda fase .....	49
Figura 37. Revenido 6h, detalle de los precipitados en forma de dendritas y microrechupes. Revenido 6h, detalle de los precipitados en forma de dendritas y microrechupes. ....	49
Figura 38. Revenido 6h, matriz de aluminio, presencia de precipitados en forma de dendritas y microrechupes.....	49
Figura 39. Ácido utilizado en análisis metalográfico según norma ASTM E407. ...	50

## RESUMEN

En el Ecuador, uno de los problemas en la industria nacional es la falta conocimiento general sobre la aleación de aluminio 7075-T651. Este tipo de material no lleva más de tres décadas de uso en el medio nacional, por lo tanto, las empresas distribuidoras tienen un desconocimiento de las posibles aplicaciones que se podrían obtener con esta aleación. De esta manera; con el siguiente proyecto técnico se proporcionará en detalle las características mecánicas de este material y seguidamente aplicando los tratamientos térmicos de recocido y revenido a probetas de este aluminio, que después serán intervenidos por diferentes tipos de ensayo como son: tracción, metalografía y dureza. Se obtendrán diferentes datos que serán analizados para poder identificar si existe una mejora en general a este material y de esta forma determinar las posibles aplicaciones en el medio industrial. Por este motivo, los ejemplares de aleación de aluminio 7075-T651 sometidos al proceso de revenido con un tiempo de residencia en el horno de 6 horas a una temperatura de 120°C y enfriados a temperatura ambiente, mostrarán que una vez concluidos los ensayos se logrará obtener resultados positivos, como también resultados no favorables, los cuales se detallarán posteriormente en esta investigación con relación a los datos obtenidos del material base.

**Palabras Claves:** Aleación, propiedades mecánicas, tratamientos térmicos, recocido, revenido.

## **ABSTRACT**

In Ecuador, one of the problems in the national industry is the lack of general knowledge about the 7075-T651 aluminum alloy. This type of material has not been used in the national environment for more than three decades, and distribution companies have a lack of knowledge of the possible applications for this aluminum alloy. Therefore; the following technical project will provide in detail the mechanical characteristics of this material, and will demonstrate the application of the thermal treatments of annealing and tempering of it, with the implementation of different types of tests such as: traction, metallography and hardness. Different data will be obtained and analyzed in order to determine if there is an overall improvement for this material, this way we can determine the possible applications in the industrial environment. For this reason, the 7075-T651 aluminum alloy specimens, submitted to a tempering process of six hours in the oven at a temperature of 120 ° C and then cooled to room temperature, demonstrated that positive as well as negative results were obtained. In which it will be detailed in this investigation in relation to the data obtained from the base material

**Keywords:** Alloy, mechanical properties, heat treatments, annealing, tempering.

## JUSTIFICACIÓN

Es de interés proporcionar información de los distintos tratamientos térmicos que se le permite aplicar en la aleación de aluminio 7075-T651 y así determinar las ventajas y desventajas de los mencionados tratamientos (recocido, revenido).

La presente investigación es original ya que favorecerá con el reemplazo de materiales como el acero en la implementación de moldes de soplado, el mismo que cumplirá las propiedades mecánicas adecuadas para realizar dicha función.

De esta forma, este proyecto técnico es de importancia, debido a que pretende obtener un rango de aplicación y ejecución extensa en el campo metal metálico, que generará beneficios económicos, ya que sus propiedades mecánicas no permitirán un desgaste agresivo con las herramientas utilizadas para dar las formas requeridas.

Los beneficiarios serán los estudiantes y las industrias, que promuevan y proporcionen nuevas aleaciones de aluminio, cuyo objetivo es generar un conocimiento detallado y amplio en las diversas industrias.

Justamente la presente investigación es factible ya que se cuenta con la materia prima para elaborar las diversas probetas, laboratorios, talento humano y autoridades, quienes nos brindarán toda su confianza para desarrollar el trabajo de investigación, los mismos que nos concederán las disposiciones para elaborar de forma eficiente y precisa.

## **OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **Objetivo General**

Analizar la influencia de los tratamientos térmicos (Recocido y Revenido), en las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 7075-T651 mediante ensayo de tracción.

### **Objetivo Específicos**

- Establecer las aplicaciones actuales de la aleación de aluminio 7075-T651.
- Definir las propiedades mecánicas iniciales de la aleación de aluminio 7075-T651.
- Determinar las modificaciones a las propiedades mecánicas (esfuerzo de tracción, esfuerzo de fluencia, dureza y microestructura) de la aleación de aluminio 7075-T651 sometida a los tratamientos térmicos de revenido y recocido, mediante ensayos de tracción.
- Especificar los potenciales usos de la aleación de aluminio 7075-T651 en la industria ecuatoriana, una vez obtenidas las nuevas propiedades mecánicas.



## GLOSARIO

**Aleación:** Es una mezcla sólida homogénea de dos o más elementos donde por lo menos uno es un metal y posee un conjunto de propiedades metálicas únicas [1].

**Tratamiento Térmico:** Es el proceso que se aplica a un metal o aleación donde se realiza aumentos y descensos controlados de temperatura y se obtiene modificación de las propiedades mecánicas y estructura metalográfica [2].

**Recocido:** Es un tratamiento térmico que utiliza una temperatura y tiempos de enfriamiento controlados, que permite disminuir la dureza. [2].

**Revenido:** El revenido modifica los efectos causados por temple, disminuyendo algunas sus propiedades y alivia sus tensiones [3].

**Ensayo de tracción:** Son procesos que se los realiza en laboratorio con probetas metálicas y de esta forma obtener resultados de sus reacciones ante cargas axiales, para lograr un análisis de la curva esfuerzo vs deformación que se forma al someterlo a estas cargas, gráfica que al final mostrará los resultados de dicho comportamiento [4].

**Ensayo de metalografía:** Es el proceso que se encarga de examinar y determinar los componentes de las muestras de un metal, haciendo uso de varios niveles de magnificación [5].

**Ensayo de dureza:** Este proceso se lo aplica para realizar mediciones de dureza de los materiales, es muy frecuente que estos resultados se tomen como base para la aceptación o rechazo de piezas terminadas [6].

# CAPITULO I

## MARCO TEÓRICO

### 1.1 Introducción

El aluminio y los derivados del mismo, como es el caso de sus aleaciones, se utilizan en una variedad de formas fundidas, forjadas y en condiciones de tratamiento térmico. Por más de 70 años, se ubica junto al hierro y el acero en el mercado del metal como uno de los elementos más utilizados en diferentes ramas de la industria. De esta forma el uso del aluminio crece rápidamente debido a los distintos elementos químicos que lo conforman y así realizan mejoras únicas en sus de propiedades mecánicas, lo que lo convierte en uno de los materiales de ingeniería y construcción más versátiles [7].

En la actualidad existe una gran variedad de combinaciones del aluminio con otros metales, a todo este conjunto de combinaciones de materiales se las conoce como aleaciones, debido a esto y al crecimiento agigantado de avances tecnológicos, surge un gran consumo de este tipo de productos a nivel global.

Los tratamientos térmicos en los aluminios son muy utilizados y tienen gran importancia para así poder modificar en forma significativa sus propiedades; como caso puntual de este tema, los parámetros que afecta las aleaciones de aluminio son el tiempo y la temperatura a las que cuales serán sometidas, a este fenómeno se lo conoce como envejecimiento natural; por otra parte, el tratamiento térmico conocido como precipitación ocurre cuando se pretende aumentar las propiedades de dureza y resistencia de la aleación a partir de una solución sólida. Para este tipo de ejemplo puntual, el proceso de precipitación puede afectar las aleaciones de la serie 6XXX, 2XXX y 7XXX [8].

Por consiguiente, el objetivo de la presente tesis es de caracterizar las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 7075-T651, una vez sometida a los tratamientos térmicos de revenido y recocido.

### 1.2. Aleaciones de aluminio

El aluminio en estado base, se caracteriza por ser blando, dúctil y de poca resistencia mecánica con su símbolo químico referencial Al, al agregarle cantidades pequeñas de

otros elementos químicos, estas aleaciones tienden a mejorar en sus propiedades mecánicas como son la resistencia y la dureza [9].

De los elementos químicos más utilizados frecuentemente para formar aleaciones con el aluminio tenemos: Ti, Zn, Cr, Zr, Fe, Mg, Si, Cu, Li, B, W, Ni. Los resultados finales en cuanto a las propiedades resultantes dependen principalmente de cuál sea el uso, requerimientos y aplicaciones que se le quiere dar a la aleación [9].

A este tipo de aleaciones se las conoce en el entorno industrial como ligeras, ya que tienen un porcentaje de densidad mucho menor en comparación que el del acero. Esta densidad ha llevado a que sean empleadas principalmente en la industria del transporte, las ventajas que proporcionan este tipo de aleación son de ser ligera y liviana, generar un menor peso en los vehículos y reducir el consumo de combustibles. Las aleaciones de aluminio ofrecen grandes capacidades; por lo cual, se consideran como el material idóneo para las numerosas aplicaciones en la industria metal mecánica [9].

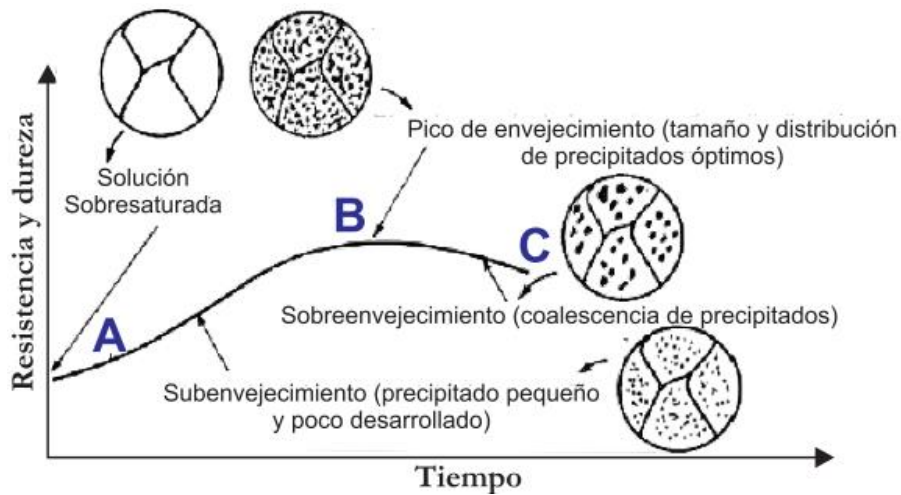
Las aleaciones de aluminio se dividen en dos grandes categorías:

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

Estas aleaciones se basan en los tratamientos térmicos de solubilización de fases, lo que conlleva que incluyan el endurecimiento, solubilizado, temple. Tanto las aleaciones para moldear como las aleaciones para conformar pueden ser termo tratables [10].

### **1.2.1. Propiedades**

El aluminio obtenido por el proceso de electrólisis en baño de criolita, hace que obtenga pureza entre un 99.5% y un 99.7% de aluminio, obteniendo que el silicio y el hierro sean consideradas como las impurezas más usuales del aluminio extraído. El aluminio es muy llamativo por sus características y su versatilidad en cuanto a las propiedades químicas, físicas y mecánicas que se pueden desarrollar [11]. Estas variaciones de propiedades son el resultado de la estructura interna que presenta este material ver Figura 1.



**Figura 1.** Variación de la microestructura de una aleación de aluminio [8].

### 1.2.1.1. Propiedades físicas

De las propiedades físicas más relevantes del aluminio en estado puro, se destaca su gran ligereza, elevada conductividad térmica y buen conductor eléctrico. Posee una densidad de 2,7 g/cm<sup>3</sup>, lo cual equivale a un tercio de la del acero (7,83 g/cm<sup>3</sup>); con dichas propiedades que distinguen este material, permitirá la construcción de elementos estructurales y mecánicos más livianos[11].

### 1.2.1.2. Propiedades mecánicas

Uno de los principales problemas del aluminio es su baja resistencia mecánica, lo cual puede cambiar o mejorarse con los distintos elementos químicos que se puede agregar a la aleación. Una vez obtenida dicha aleación de aluminio, se puede realizar los diferentes tratamientos térmicos y/o procesos de forja y así lograr mejoras en las propiedades mecánicas[11].

En la tabla 1 se da a conocer las propiedades mecánicas del aluminio sin ningún tipo de tratamiento.

**Tabla 1.** Propiedades relevantes del aluminio [11].

Características	Valores
Módulo de elasticidad (Grado de pureza 99.99%)	64.200 N/mm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad (Grado de pureza 99.95%)	69.00 N/mm <sup>2</sup>
Módulo de rigidez	17.00 N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0.32 ÷ 0.36

### 1.2.2. Clasificación de las aleaciones de aluminio según su composición

Las distintas aleaciones de aluminio se pueden clasificar según sea el proceso de manufactura y el tratamiento térmico. Según la clasificación se puede conocer el tipo de aleación, componentes principales y su dureza. Existen dos tipos de aleaciones: las trabajadas en frío, que están conformadas por cuatro grupos que son las series, 1xxx, 3xxx, 4xxx y 5xxx y las aleaciones trabajadas en caliente que son 2xxx, 6xxx y 7xxx las mismas que pueden ser tratadas térmicamente y así mejorar sus propiedades mecánicas [12].

El primer dígito hace referencia al principal elemento presente en la aleación (Xxxx); el segundo dígito indica la modificación en la aleación (xXxx); el número cero significa una aleación pura, si se tiene valores entre el uno y nueve indica que existen modificaciones menores; el tercero y cuarto dígito (xxXX); representan la consecución de la aleación. En la Tabla 2, se mencionan las principales aleaciones de aluminio para fundición, su designación, así como su elemento predominante de aleación.

**Tabla 2.** Clasificación de las aleaciones de aluminio según su composición [13].

<b>Aleación</b>	<b>Principal elemento de aleación</b>
Serie 1xxx	Aluminio sin alear
Serie 2xxx	Aluminio – Cobre
Serie 3xxx	Aluminio – Manganeso
Serie 4xxx	Aluminio – Silicio
Serie 5xxx	Aluminio – Magnesio
Serie 6xxx	Aluminio - Magnesio - Silicio
Serie 7xxx	Aluminio – Zinc
Serie 8xxx	Aluminio - otros elementos

**Serie 1xxx:** Esta serie es conocida porque el aluminio tiene una pureza del 99.0%, contiene cantidades pequeñas de impurezas de silicio, cobre, hierro y zinc. La cualidad de estas aleaciones es que cuentan con una excelente resistencia a la corrosión, bajas propiedades mecánicas, alta conductividad eléctrica y térmica, puede mejorar la resistencia cuando se realizan trabajos en frío [12].

**Serie 2xxx:** El principal elemento aleante dentro de la aleación es el Cu, también se puede añadir componente químico como lo es el Mg. Estas aleaciones muestran

propiedades mecánicas superiores a los aceros de bajo contenido de carbono, en esta serie se puede emplear el tratamiento térmico de envejecimiento, logrando conseguir aumentar aún más las propiedades mecánicas. Este tratamiento aumenta la tensión de fluencia, pero se generan pérdidas en alargamiento y en resistencia a la tracción [3].

**Serie 3xxx.** En estas aleaciones el principal elemento aleante es el manganeso, que al fundirse con el aluminio le da una alta resistencia a la tracción con un valor de 110 MPa. Este tipo de serie no es apta para ser sometida a tratamiento térmico. El manganeso dentro de esta serie de aleación solo puede añadirse de forma efectiva hasta en un 1.5% [10].

**Serie 4xxx.** El Si es principal elemento aleante dentro de esta serie, se suele añadirse en cantidades elevadas (hasta 12%). Esta serie se utiliza como elemento de soldadura por el bajo punto de fusión del silicio, pero no es tratable térmicamente, son usadas comúnmente para soldar aleaciones que si son tratables térmicamente [3].

**Serie 5xxx.** En esta aleación es el magnesio el principal aleante, con una variación del 2 al 5%. A esta serie se la conoce también como aleaciones de aluminio forjado la misma que cuenta con tratamiento térmico [15].

Entre las ventajas que cuenta esta serie de aleaciones es de poseer buena resistencia para la soldadura y a la corrosión[3].

**Serie 6xxx.** Este tipo de aleación cuenta con dos elementos aleantes que son el magnesio y silicio. Se caracteriza por contar con un tratamiento térmico de grado T6, alcanzando una resistencia a la tracción de 42 ksi (290MPa) y es utilizada para perfiles y estructuras[15].

**Serie 7xxx.** El elemento que predomina en esta aleación es el Zn, el cual va desde el 1 al 8 %; a este porcentaje de Zn se le añaden cantidades pequeñas de Mg, con lo cual se logra aumentar la resistencia mecánica siempre y cuando sea tratada térmicamente. Se puede añadir otros elementos químicos como Cr o Cu en cantidades pequeñas. Esta aleación se caracteriza por su alta dureza, cuando son sometidas a un tratamiento grado T6 [12].

**Serie 8xxx:** El estaño y cantidades pequeñas de cobre y níquel son las que caracterizan a esta aleación, las cuales se emplean para la construcción de cojinetes, husillos,

chumaceras y en partes que componen los husillos para cigüeñales, debido a su bajo coeficiente de fricción [12].

### 1.3. Aleación de aluminio 7075-T6

La utilización de este material es muy variada, pero por sus grandes propiedades su empleo se centra en un grupo específico. El aluminio 7075-T6 se emplea principalmente en la fabricación de componentes de las industrias aeroespacial, aeronáutica, naval y automotriz [16], todo esto se debe a que posee un mayor porcentaje de zinc como se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3** Composición en porcentajes de la aleación 7075-T6 [17].

Al	Zn	Mg	Cu	Cr	Mn	Fe	Si
Base	5,62	2,32	1,47	0,2	0,08	0,25	0,15

La aleación 7075-T651, según varias investigaciones tiene una resistencia a la tracción de entre 67 – 78 kpsi (462 a 538 MPa) y una resistencia a la fluencia de 54 – 67kpsi (372-462 MPa), adicionalmente su valor de rotura tras el proceso de elongación esta entre 3 y 9%. Muy aparte a sus propiedades principales una de las características de este material es que el sufijo 51 indica que el material es liberado de tensiones por el control de estiramiento [16]. En las tablas 4 y 5 se muestran las propiedades mecánicas y físicas del aluminio 7075.T651

**Tabla 4** Propiedades mecánicas del aluminio 7075-T651 [18].

<b>Propiedades mecánicas</b>	
Carga de rotura (N/mm <sup>2</sup> )	540
Limite elástico (N/mm <sup>2</sup> )	480
Alargamiento (%)	11
Resistencia a la cizalladura (N/mm <sup>2</sup> )	330

**Tabla 5.** Propiedades físicas del aluminio 7075-T651 [12].

<b>Propiedades físicas</b>	
Densidad ( $gr/cm^3$ )	2.80
Rango de fusión ( $^{\circ}C$ )	475-630
Módulo de elasticidad (Mpa)	72000
Coefficiente de Poisson	0.33
Calor específico (0 a 1000 $^{\circ}C$ )	915
Dureza	158 HB/152 - 168 HV
Tenacidad a la Fractura (Mpa )	31

Las aleaciones de aluminio de la serie 7000 tienen aplicaciones importantes en transportistas, aéreos comerciales y militares, debido a su peso ligero asociado, alta resistencia y buenas características de maquinabilidad. El material 7075-T6 posee la mayor resistencia entre todas las aleaciones de aluminio, esto se debe a su alta tenacidad a la fractura y bajo crecimiento de grietas, por lo que es de gran uso en el fuselaje primario y el revestimiento del ala; hablando exclusivamente en la rama aeronáutica [19]. Adicionalmente, la aleación 7075 se está colocando en componentes ligeros para prótesis de extremidades inferiores [20].

Por otra parte, esta aleación debido a su resistencia y ligereza lo hace atractivo a diversos campos de la industria especialmente la rama de matricería y también en moldes de soplado e inyección, que se utiliza en la fabricación de elementos termoplásticos. Esta tipo de aleación se ha utilizado también en campos y aplicaciones deportivas entre las que podemos citar la escalada y el ciclismo [21].

#### **1.4. Tratamientos térmicos**

El análisis de los efectos de los tratamientos térmicos son muy importantes, ya que permite obtener varios conocimientos sobre las variaciones en las propiedades físicas y mecánicas, por lo que después de haber realizado estos procesos se podría proporcionar recomendaciones para el trabajo industrial con estos materiales [22].

De esta manera, se torna imprescindible obtener información básica sobre la aleación de aluminio 7075 o como también es conocida aleación de aluminio-zinc.

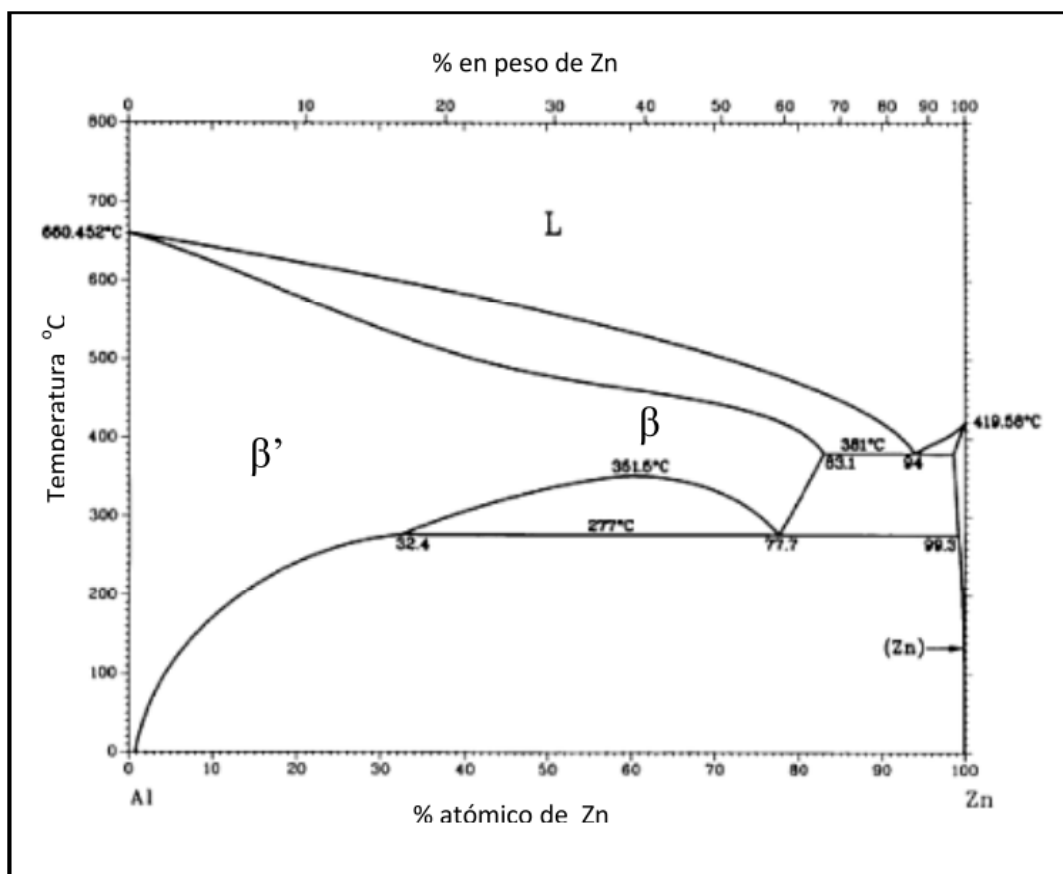
La aleación de aluminio y zinc es una de las más importante; este proceso se lo realiza con diversas finalidades, una de ellas es impedir la formación de capas o fases Zn-Fe,



que algunas veces son compuestos frágiles y empeora el valor de la resistencia mecánica del recubrimiento y la ductilidad [23].

Un cambio que se produce en el aluminio por agregarle porcentajes de zinc a su estructura intermolecular, es mejorar el brillo; no obstante, reduce la oxidación del baño de zinc y también la obtención de un recubrimiento dúctil al eliminar la formación de compuestos intermetálicos [23].

Posteriormente a esto, las aleaciones de Aluminio-Zinc poseen un sistema de fase o sistema binario, como se muestra en la Figura 2.



**Figura 2.** Diagrama de fase Al-Zn [24].

Según el diagrama de fase se observa los cambios de fases que sufre el sistema, como se muestra en la tabla 6.

**Tabla 6.** Transformación de fases AL-Zn [24].

<b>Transformación de fase</b>	<b>Composición % peso (%at. Zn)</b>	<b>Temp. (°C)</b>	<b>Tipo de transformación</b>
$L = \beta + \eta$	95.0 (88.7)	381	Eutéctico
$\beta = \beta' + \eta$	77.7 (59.0)	277	Eutectoide
$(Al) = \beta + \beta'$	61.3 (39.5)	351.5	Crítica
$L = (Al)$	0 (0)	660.45	Congruente
$L + \eta$	100 (100)	419.58	Congruente

Se puede identificar que en las fases  $\beta'$  y  $\beta$  presentan grandes cantidades de Al y Zn, de una solución sólida que tiene una estructura molecular FCC. En la fase  $\eta$  se muestra una solución sólida final con abundante Zn. Se puede observar la existencia de una zona crítica que no consigue formar algún tipo de espacio homogéneo en las fases  $\beta'$  y  $\beta$ , donde se inicia la transformación monotectoide a la temperatura de 277 ° C [24].

#### **1.4.1. Solubilización**

Conocido como tratamiento térmico de solución, es el procedimiento donde se debe calentar el metal rápidamente a una temperatura determinada y mantener a esta temperatura durante un tiempo, para producir una solución sólida sobresaturada de fase  $\alpha$  para luego templearlo, esto se hace para retener el soluto de fase  $\alpha$  en solución de fase ( $\gamma + \beta$ ); la temperatura que se encuentra es crítica, esta debe mantenerse dentro de un rango de más o menos 5°C [22].

Este tratamiento se realiza en entre 450 y 575 °C; (más aconsejable a 510°C), después se realiza un enfriamiento rápido en agua (tomando en cuenta la temperatura de esta), solución de agua y polímero (glicol), pulverización de agua o aire forzado [25].

#### **1.4.2. Temple**

Es el proceso de enfriamiento brusco desde la temperatura de solubilización, con la finalidad de congelar el equilibrio existente, obteniéndose a temperatura ambiente una solución sólida metaestable supersaturada, que, con posteriores tratamientos de precipitación, se logra obtener una mejora considerable en las propiedades mecánicas. Se realiza de una manera rápida introduciendo el material desde la temperatura de solubilización en un medio de temple que permita enfriarlo, usualmente es agua o aceite. En algunas ocasiones se utiliza otro medio de enfriamiento como el aire [26].

### 1.4.3. Maduración

Para mejorar más las propiedades mecánicas a partir del proceso de temple, se realiza un endurecimiento por precipitado o envejecido que consisten en la precipitación de un grupo de partículas pequeñas de material de la aleación, ya sea a temperatura ambiente o una temperatura controlada [27].

En la Figura 3, se puede observar el ciclo con las variaciones en temperatura que tiene que pasar el aluminio al ser tratado por uno de los procesos mencionados.

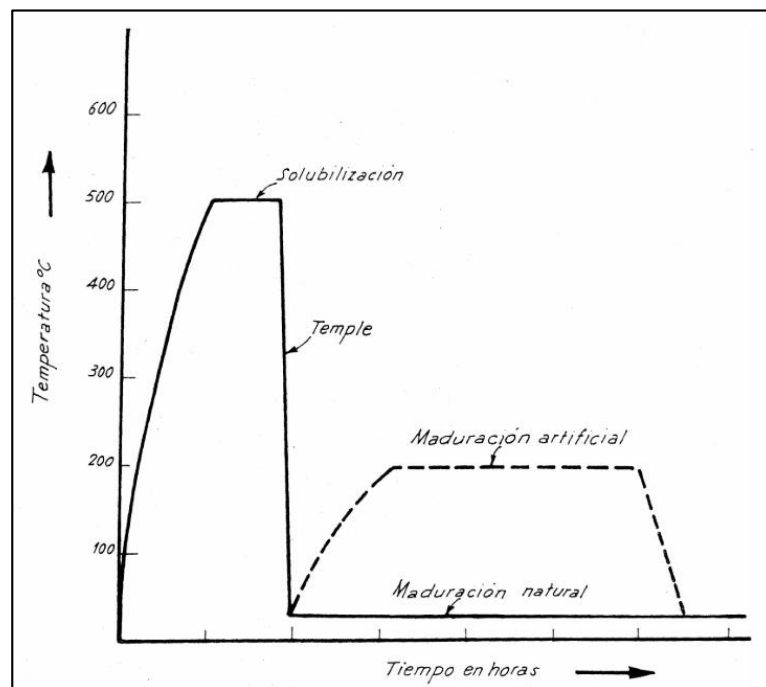


Figura 3. Tratamiento térmico de bonificado para las aleaciones de aluminio [28].

Para la presente investigación se ha optado por utilizar dos procesos térmicos muy comunes en el medio y definir el potencial uso de este nuevo material. Además, las constantes necesidades de mejorar los actuales procesos de manufactura, en donde cada vez se observa un grado mayor de importancia en las condiciones que van a ser sometidas los materiales, otorga un conocimiento profundo de las propiedades mecánicas y el encontrar nuevos procesos que otorguen un material con mejores y mayores aplicaciones sea cada vez indispensable [29].

### 1.5. Tratamientos térmicos a someter

Como se pudo detallar con anterioridad, existe una gran variedad de tratamientos térmicos diferentes, pero cabe mencionar que en este trabajo se propone aplicar dos de

ellos que son el recocido y el revenido. Para esto se propone profundizar en estos procesos y captar el mayor número de información posible.

### **1.5.1. Recocido**

El proceso de recocido se lo puede utilizar para eliminar totalmente el endurecimiento que se causa por deformación que se consigue durante el proceso de trabajo en frío; este componente final será blando y dúctil, pero aun así se conservará el acabado superficial del material [30]. Los tratamientos térmicos de recocido se utilizan comúnmente para reducir el contenido inicial de defectos de los materiales de macro escala, lo que los hace más blandos y dúctiles, para esto, este tratamiento térmico rara vez se lo realiza a microescala [31].

Por otra parte, Kiener et al. [32]. Encontró que el recocido conduce a un aumento marcado en la tensión de rendimiento, seguido de un ablandamiento. La aparición de un punto de rendimiento se atribuyó a la falta de fuentes de dislocación disponibles en la deformación inicial, de modo que los esfuerzos de rendimiento medidos son característicos de los mecanismos de nucleación de la dislocación. A medida que la estructura de dislocación en la muestra se desarrolla durante la deformación, las tensiones de flujo se vuelven similares a las de las muestras no recocidas deformadas de manera similar.

Las aleaciones forjadas tratadas térmicamente pueden ser recocidas parcialmente para facilitar el conformado moderado calentando a 650 a 750 ° F (nunca exceda 775 ° F) como se muestra en la tabla 6 y manteniéndolas a temperatura hasta que se alcance una temperatura uniforme, seguida de enfriamiento por aire ambiente o horno. Si se va a realizar una conformación severa, debe usarse un recocido completo de acuerdo a la norma ASTM B918, mostrado en la tabla 7 [33].

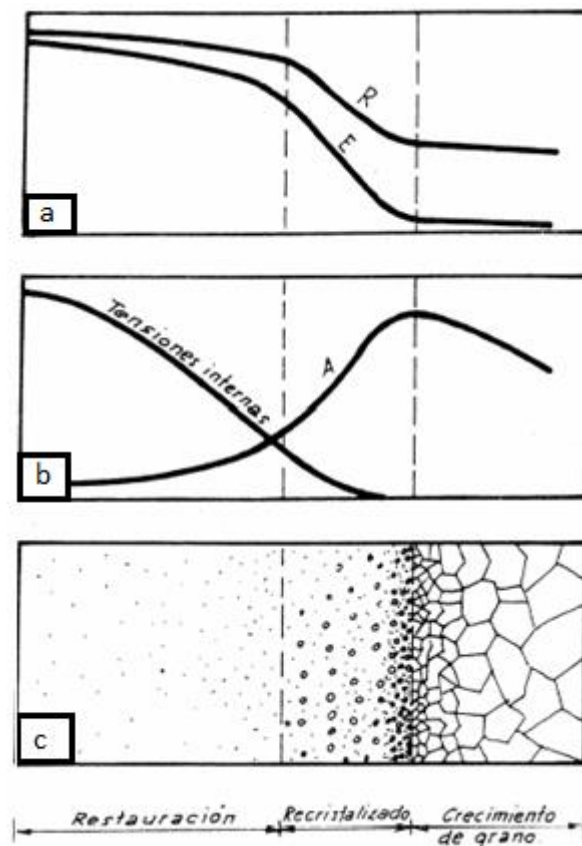
**Tabla 7.** Tratamientos de recocido recomendados para aleaciones de aluminio forjado según normas ASTM B918 [33].

<b>Alloy</b>	<b>Metal Temperature, <math>\pm</math> 10°F</b>	<b>Time at Temperature, h</b>	<b>Temper Designation</b>
1060	650	s	-O
1100	650	s	-O
1350	650	s	-O
2014	760	2 to 3	-O
2017	760	2 to 3	-O
2014	760	2 to 3	-O
217	760	2 to 3	-O
2219	775	2 to 3	-O
3003	650	s	-O
3004	650	s	-O
3105	650	s	-O
505	650	s	-O
5050	650	s	-O
5052	650	s	-O
5056	650	s	-O
5083	650	s	-O
5086	650	s	-O
5154	650	s	-O
5254	650	s	-O
5454	650	s	-O
5456	650	s	-O
5457	650	s	-O
5652	650	s	-O
6053	765	2 to 3	-O
6061	765	2 to 3	-O
6063	765	2 to 3	-O
6066	765	2 to 3	-O
7001	765	2 to 3	-O
7050	765	2 to 3	-O
7075	765	2 to 3	-O
7178	765	2 to 3	-O

Cuando se calienta un material en estado de elevada dureza se obtiene después del enfriamiento un nuevo estado estructural. Este estado depende de la dureza inicial, de la temperatura alcanzada y del tiempo a dicha temperatura. Al efectuar los recocidos a

temperaturas crecientes, para una dureza determinada y un tiempo fijo, se presentan diversas etapas esquematizadas en la Figura 4 [28].

En la imagen a) se observa como disminuye ligeramente el límite elástico, la resistencia a la tracción y dureza y simultáneamente se amortiguan las tensiones internas, aumentando el alargamiento. Esta primera etapa se conoce con el nombre de restauración, y para las aleaciones de aluminio, todas estas variaciones son ya apreciables por encima de 100°C [28].

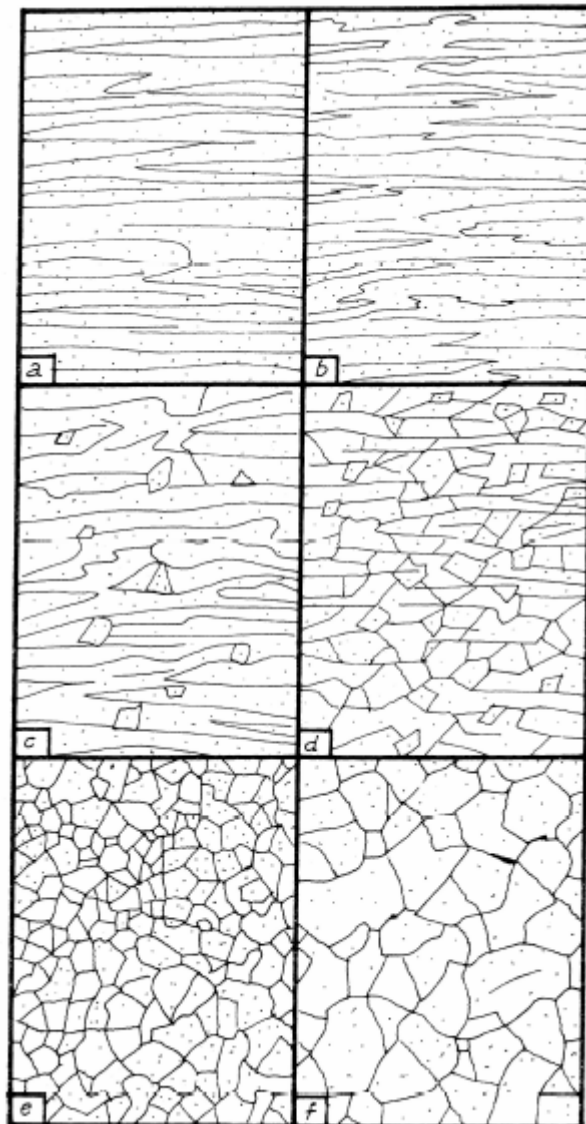


**Figura 4.** Representación esquemática del proceso de recocido. a) Restauración. b) Recristalización. c) Crecimiento de grano [28].

En la sección b) se puede determinar que la variación de propiedades disminuye sensiblemente la relación límite elástico/carga rotura y se observa la aparición de nuevos granos cristalinos, entrándose en la etapa clásica de recristalización, que puede ser parcial o total [28].

En la parte c) se observa que a temperaturas superiores a la de recristalización total se produce un lento crecimiento, de los granos cristalinos a expensas de sus vecinos, lo que conlleva a un descenso de las propiedades mecánicas y en determinadas

condiciones puede producirse una recristalización secundaria, caracterizada por la formación de granos gigantes [28].



**Figura 5.** Representación micrográfica del proceso de recocido en un aluminio [28].

En la siguiente secuencia se identificará los estados de la micrografía del proceso de recocido en el aluminio. La Figura 5 (a) representa al material en estado de dureza inicial y revela granos alargados en el sentido de la deformación. La figura 5 (b) representa la etapa de restauración; la orientación propia del estado de dureza se conserva sensiblemente y las variaciones estructurales solo se manifiestan en el seno de los granos cristalinos, sin que exista jamás la aparición de nuevos cristales. Las figuras 5 (c) y (d) corresponden a la recristalización parcial, se observa la aparición de nuevos granos cristalinos, de orientación algunas veces muy diferentes a los primitivos y que desarrollándose a expensas de ellos van aumentando en tamaño y número a

medida que se emplean temperaturas de recocido elevadas. La figura 5 (e), representa la estructura micrográfica de una aleación de aluminio con una recristalización total. Los nuevos granos se han desarrollado suficientemente para entrar en contacto con sus adyacentes, habiendo desaparecido totalmente los granos primitivos. Por último, y a temperaturas superiores, los granos cristalinos tienden a crecer lentamente a expensas de sus vecinos, con formación de granos de tamaño muy superior, según se representa en la figura 5 (f) [28].

En el tratamiento de recristalización total se desea obtener un grano fino ya que este proporciona mejor ductilidad [28].

El tamaño de grano obtenido por recristalización es un factor muy importante y debe ser sometido a alguna medida de control. Es primordial la influencia que sobre las dimensiones del grano ejercen los factores de fabricación; la homogeneidad del material, el grado de acritud, la temperatura y tiempo de recocido [28].

### **1.5.2. Revenido**

El revenido no se lo realiza para eliminar los efectos del temple, sino por lo contrario buscar un equilibrio entre ellos, es por eso que disminuyendo algunas de sus propiedades, como dureza y resistencia, se aumenta la tenacidad y se elimina las tensiones internas [3].

En el proceso de revenido es de mucha importancia la temperatura; ya que genera varios tipos de cambios en estructuras y propiedades. Este proceso consiste en un calentamiento dentro de un rango de temperaturas, que aproximadamente puede ser entre 120 a 675°C [34]. Existen varios cambios estructurales que se generan en todo el proceso de revenido como se muestra en la tabla 8.



**Tabla 8.** Tabla recomendada para revenido de aceros comerciales [3].

<b>Intervalos de Temperatura °C</b>	<b>Reacción</b>	<b>Observación</b>
0 a 100	Agrupamiento de 2 a 4 átomos de carbono en sitios octaedrales provenientes de la segregación desde la martensita en los límites de las dislocaciones.	El agrupamiento (clustering) se asocia con manchas difusas alrededor del patrón de manchas de difracción de electrones.
20 a 100	Clusters modulados de átomos de carbono, sobre los planos (102) de la martensita.	Identificada a través de manchas de satélites alrededor del patrón de difracción de electrones de las martensitas.
60 a 80	Fase ordenada de largo alcance con arreglo de átomos de carbono ordenados	Se identifica por la formación de manchas de superred en el patrón de difracción de electrones de la martensita.
100 a 200	Precipitación de carburos de transición como partículas alineadas de 2 nm	Trabajos recientes lo identifican como carburos $\eta$ (eta, ortorrómbico Fe <sub>2</sub> C)
200 a 350	Transformación de austenita retenida ferrita y cementita	Se le asocia con fragilidad de martensita revenida en aceros bajo y medio carbono
250 a 700	Formación de ferrita de cementita, eventual desarrollo de carburos bien esferoidizados en una matriz de ferrita equiaxial	Aparentemente esta etapa comienza con la formación de carburo $\lambda$ en aleaciones FeC de alto carbono
500 a 700	Formación de carburos de aleación en aceros que contienen Cr, Mo, V y W. La mezcla de carburos puede cambiar significativamente con el tiempo	Los carburos de aleantes producen endurecimiento secundario y retardación de ablandamiento durante la exposición por periodos de tiempo largos a temperaturas alrededor de 500°C
350 a 500	Segregación y consegregación de átomos de impurezas y sustitucionales de elementos aleantes.	Responsable de la fragilidad por revenido

Según Davis et al. Debido a su resistencia, el revenido al aluminio T6 también se le conoce como la condición de "máximo envejecimiento". El procedimiento que se aplicará en este tratamiento térmico estándar para su producción, es un máximo envejecimiento de 24 a 48 horas a 121° C [35].

## CAPITULO II

### MARCO EXPERIMENTAL

#### 2.1. Desarrollo del proceso

##### 2.1.1. Muestreo de materia prima.

En este punto se procedió con la búsqueda de los posibles establecimientos en la ciudad de Quito que distribuyan el material requerido para los ensayos a realizarse; obteniendo como proveedor para el presente proyecto técnico a la empresa Importcom como se muestra en la Figura 6. Este establecimiento cuenta con el aluminio 7075-T651 o Duraluminio como comúnmente se lo conoce en la industria. La empresa cumple con todos los requisitos que se solicita para el presente proyecto, como la guía comercial de importación y también cuenta con una grabación impresa del material indicado en la Figura 6 y Figura 7.



**Figura 6.** Marca comercial del proveedor del material.



**Figura 7.** Material en estado base remarcado.

### 2.1.2. Desarrollo del proceso experimental.

Para este proyecto técnico se procedió a utilizar los laboratorios de: Máquinas Herramientas, Metalografía y Resistencia de material de la Universidad Politécnica Salesiana.

#### 2.1.2.1. Torno modelo CNC EMCOMAT E-200

Dentro de las máquinas y herramientas que se utilizaron para la elaboración de las probetas necesarias para el presente proyecto se tiene el torno CNC EMCOMAT E-200 figura 8, el cual cuenta con los parámetros establecido en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Datos técnicos de CNC EMCOMAT E-200 [36].

Accionamiento principal	Motor trifásico	
Avance	Ejes	[x,y,z ]
Potencia al 100%	7,5	[Kw]
Torque nominal máximo	108	[Nm]
Revoluciones de husillo	50-4000	[rev/min]
Tanque refrigerante	20	[litros]
Presión del refrigerante	4	[bar]



**Figura 8.** Máquina herramienta tipo torno modelo CNC EMCOMAT E-200 [36].

#### 2.1.2.2. TESTRESOURCES Serie 315

El ensayo de tracción de todas las probetas se realizó bajo la norma ASTM E8M, en la máquina de pruebas electromecánica TESTRESOURCES Figura 9, en la cual se puede realizar ensayos mecánicos de: tracción, compresión, flexión, fractura, corte y rasgadura.

Esta máquina presenta una tabla de resultados donde se obtiene los valores de: carga máxima, esfuerzo máximo, módulo de elasticidad, carga a la fluencia y esfuerzo a la fluencia, los cuales serán de análisis en este proyecto. La apreciación de los parámetros básicos de esta máquina está señalada en la Tabla 10.

**Tabla 10.** Parámetros de funcionamiento de máquina herramienta  
TESTRESOURCES Serie 315 [37].

Modelo	315-1120		
Aplicaciones	Ensayos de metales, aleaciones y mucho mas		
Máxima fuerza	150		[KN]
Máxima velocidad	300		[mm/min]
Recorrido de la cruceta	1220		[mm]
Espacio entre columnas	550		[mm]



**Figura 9.** Máquina herramienta TESTRESOURCES Serie 315 [37].

### 2.1.2.3. Horno de recocido N 7/H y horno de revenido N15/65HA.

Para resistir la elevada temperatura con la cual trabaja este tipo de máquinas, siendo más concreto en el tratamiento térmico de metales, es necesario tener un robusto aislamiento de ladrillos refractarios. Los modelos N 7/H Figura10, están hechos con todas las condiciones para solucionar este tipo de problema, como se menciona en la Tabla 11.



**Figura 10.** Máquina herramienta horno de recocido N7/H [38].

**Tabla 11.** Parámetros de funcionamiento de máquina herramienta Horno de recocido N7/H [38].

Modelo	N 7/H	
T máx.	1280	[°C]
Dimensiones interiores en mm	an (250) p(250) al(120)	[mm]
Volumen	7	[L]
Potencia	3	[Kw]
Peso	60	[Kg]
Minutos hasta T máx.	180	[min]

Para el horno de revenido los parámetros son casi similares al horno anterior mencionado en la Figura 11; la peculiaridad es que este tipo de horno trabajó a una temperatura diferente; teniendo como máxima temperatura de trabajo 650°C.



**Figura 11.** Máquina herramienta horno de revenido N15/65HA [38].

## **2.2. Selección de variables.**

Para aplicar los tratamientos térmicos que se propusieron en este trabajo, se debe tomar en cuenta que esta investigación está basada en el artículo científico: “Effect of Heat Treatment on Some Mechanical Properties of 7075 Aluminium Alloy” [7]. De esta forma, se decidió realizar un cambio y complementar el proyecto realizando los tratamientos de recocido y revenido.

Para esto, la Universidad Politécnica Salesiana ha permitido utilizar los laboratorios de Ciencia de materiales, donde se encuentran los hornos especiales para dichos tratamientos. Por lo tanto, las variables que se tomaron en cuenta son: temperatura recomendada para cada tratamiento térmico, el tiempo de residencia de las probetas en los hornos y el enfriamiento posterior de las probetas.

De igual manera, se tomó como referencia utilizar el modelo de trabajo del artículo científico mencionado con anterioridad. Por lo tanto, para este proyecto técnico se utilizará 3 probetas para cada tratamiento térmico.

## **2.4. Tratamiento de recocido**

### **2.4.1. Temperatura recomendada para el tratamiento de recocido.**

En esta variable se va especificar la temperatura máxima que debe llegar a tener el horno especial para el tratamiento térmico de recocido. Para esto, se tomó como argumento trabajar con la norma ASTM B918 [26], que fue mencionada en el capítulo anterior, la temperatura establecida de recocido para este trabajo es de 407°C.

### **2.4.2. Tiempo de residencia de las probetas**

De acuerdo con lo dicho anteriormente, el proceso de recocido se basa en la norma ASTM B918, que sugiere un tiempo de permanencia de la probeta de entre 2 a 3 horas [26]. De esta forma se estableció un tiempo exacto de 3 horas para este tratamiento.

### **2.4.3. Enfriamiento posterior**

Las formas de enfriamiento más comunes para los tratamientos térmicos son por aire, ambiente o en el horno mismo [26]. Por tanto, se seleccionó tres diferentes tipos de enfriamientos que complementarían a estos tratamientos térmicos, indicados en la Tabla 12.

**Tabla 12.** Tipos de enfriamiento establecidos.

---

En el horno a enfriamiento uniforme  
A temperatura ambiente  
Inmersión en arena sílica

---

Elaborado por: Gary Morillo y Luis Calderón

Para una de las formas de enfriamiento de las probetas se va utilizar arena sílica o sílice como también se lo llama. Este material otorga grandes beneficios en la industria, debido a sus propiedades inherentes. Tiene un rango de PH, lo que permite su adherencia de forma más compacta, ocasionando que no deje residuos ajenos a la mezcla. De esta forma, puede conservar sus características físicas, aún en condiciones de trabajo, cuando se le aplica una carga y también puede mantener temperatura refractaria. Es así que el material está en posibilidades de soportar temperaturas de 1710° a 1730° C. También puede utilizarse en condiciones de seguridad en estructuras, llegando aproximadamente a 1650° C (3002° F) [39]. Debido a que este material tiene la capacidad de mantener temperaturas altas, es una gran forma de realizar un proceso de enfriamiento más estable.

## **2.5. Tratamiento de revenido**

### **2.5.1. Temperatura recomendada para el tratamiento de revenido.**

Como se mencionó en el capítulo anterior, los rangos de temperatura que afectan a este proceso son de mucha importancia, porque cada gradiente de temperatura causa varios cambios a la estructura del material. Según Davis et al. menciona que el procedimiento adecuado para este proceso térmico, es un máximo envejecimiento de 24 a 48 horas a 121° C [29].

Por lo tanto, se seleccionó variar en un grado a esta temperatura referenciada mencionada antes. Este cambio se lo realiza con la disposición de tener un valor más concreto a la hora de la programación del horno, siendo la temperatura de revenido seleccionada a 120°C.

### **2.5.2. Tiempo de residencia de las probetas.**

Muy aparte a lo que se comentó en el capítulo anterior sobre el proceso de revenido, se optó por realizar modificaciones importantes; puesto que los tiempos de residencia

del material bordean las 24 horas [29]. Adicionalmente, se tomó en cuenta que el tiempo máximo de trabajo del horno de revenido es de 12 horas continuas.

Debido a esto; se realizó un cambio con los tiempos de residencia del material en el horno con el fin de tener precaución sobre el funcionamiento de la máquina y sobre todo para conseguir una serie de datos con menos grado de error mencionado en la Tabla 13.

**Tabla 13.** Tiempos establecidos para el revenido.

<u>Tiempo empleado para el revenido</u>
3 horas
6 horas
9 horas

Elaborado por: Gary Morillo y Luis Calderón

### **2.5.3. Enfriamiento posterior**

De la misma forma que en el proceso anterior; para el tratamiento de revenido se utilizará las mismas condiciones de enfriamiento dichas en la Tabla 14.

**Tabla 14.** Tipos de enfriamiento establecidos

<u>Tipos de enfriamientos establecidos</u>
En el horno a enfriamiento uniforme
A temperatura ambiente
Inmersión en arena sílica

Elaborado por: Gary Morillo y Luis Calderón.

### **2.6. Combinación de variables.**

Después de haber detallado las variables que se van a utilizar para esta investigación se aplicó la combinación adecuada de las mismas. Luego, se juntaron todos los valores identificados de la investigación y se desarrolló el plan de trabajo para realizar esta tesis.

Para el tratamiento térmico de recocido, el plan de trabajo queda estipulado, como se indica en la tabla 15.



**Tabla 15.** Tabla de variables combinadas para recocido.

<b>Número de probetas</b>	<b>Temperatura programada en el horno[°C]</b>	<b>Tiempo de residencia de las probetas [horas]</b>	<b>Tipos de enfriamientos</b>
3	407° C	3 horas	En el horno a enfriamiento uniforme
3	407° C	3 horas	A temperatura ambiente
3	407° C	3 horas	Inmersión en arena sílica

Elaborado por: Gary Morillo y Luis Calderón

De la misma forma, para el proceso de revenido se deberá seguir con lo indicado en la tabla 16.

**Tabla 16.** Tabla de variables combinadas para revenido.

<b>Número de probetas</b>	<b>Temperatura programada en el horno[°C]</b>	<b>Tiempo de residencia de las probetas [horas]</b>	<b>Tipos de enfriamientos</b>
3	120°C	3 horas	En el horno a enfriamiento uniforme
3	120°C	3 horas	A temperatura ambiente
3	120°C	3 horas	Inmersión en arena sílica
3	120°C	6 horas	En el horno a enfriamiento uniforme
3	120°C	6 horas	A temperatura ambiente
3	120°C	6 horas	Inmersión en arena sílica
3	120°C	9 horas	En el horno a enfriamiento uniforme
3	120°C	9 horas	A temperatura ambiente
3	120°C	9 horas	Inmersión en arena sílica

Elaborado por: Gary Morillo y Luis Calderón

Cabe mencionar que este proceso se vio extendido debido a que se ha realizado un cambio a la temperatura de residencia de las probetas, motivado a un limitante

presentado en el horno especial. De esta forma se ramificó y se generó tres subvariantes en los tiempos de residencia.

En la tabla 17 se da a conocer de forma más simplificada las combinaciones de las variables que se utilizarán en el presente proyecto.

**Tabla 17.** Combinación de ensayos a realizar.

<b>N° Ensayo</b>	<b>N° de probetas</b>	<b>Descripción del ensayo</b>	<b>Abreviatura</b>
Ensayo 1	3	Recocido 3 horas a 407°C, enfriadas en el horno de recocido uniformemente.	Rec-3h/407-horno
Ensayo 2	3	Recocido 3 horas a 407°C, enfriadas a temperatura ambiente.	Rec-3h/407-amb.
Ensayo 3	3	Recocido 3 horas a 407°C, enfriadas en arena sílica.	Rec-3h/407-arena.
Ensayo 4	3	Revenido 3 horas a 120°C, enfriadas en el horno de recocido uniformemente.	Rev-3h/120-horno.
Ensayo 5	3	Revenido 3 horas a 120°C, enfriadas a temperatura ambiente.	Rev-3h/120-amb.
Ensayo 6	3	Revenido 3 horas a 120°C, enfriadas en arena sílica.	Rev-3h/120-arena.
Ensayo 7	3	Revenido 6 horas a 120°C, enfriadas en el horno de recocido uniformemente.	Rev-6h/120-horno.
Ensayo 8	3	Revenido 6 horas a 120°C, enfriadas a temperatura ambiente.	Rev-6h/120-amb.
Ensayo 9	3	Revenido 6 horas a 120°C, enfriadas en arena sílica.	Rev-6h/120-arena.
Ensayo 10	3	Revenido 9 horas a 120°C, enfriadas en el horno de recocido uniformemente.	Rev-9h/120-horno.
Ensayo 11	3	Revenido 9 horas a 120°C, enfriadas a temperatura ambiente.	Rev-9h/120-amb.
Ensayo 12	3	Revenido 9 horas a 120°C, enfriadas en arena sílica.	Rev-9h/120-arena.

Elaborado por: Gary Morillo y Luis Calderón

## **2.7. Metodología experimental**

El estudio de los tratamientos térmicos aplicados a cualquier tipo de material, se caracteriza porque luego de que los materiales son sometidos a estos procesos, siempre se obtendrá un material con nuevas propiedades que lo hacen idóneo para un determinado trabajo. Por esta razón, en este trabajo se pretende obtener datos que proporcionen mayor información sobre las aleaciones de aluminio 7075-T6 y sobre

todo que se pueda determinar las aplicaciones más apropiadas con respecto a este material.

### 2.7.1. Diseño de probetas

Como primera parte de la investigación, se procedió a mecanizar el material adquirido y de esta manera obtener probetas adecuadas que son sometidas a los diferentes ensayos. Para esto las probetas están sujetas a la norma ASTM E8, Figura 12.

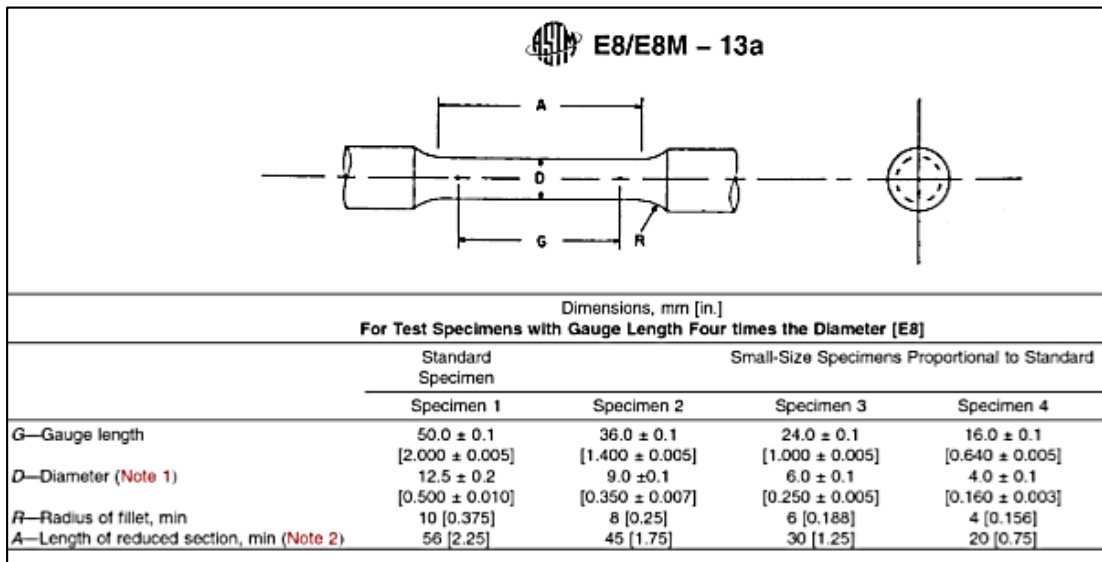


Figura 12. Diseño de probeta según norma ASTM E8/E8M

Se seleccionó el espécimen 1 de la norma ASTM E8/E8M, ya que estas medidas se adecuan a las dimensiones del strain gauge que cuenta el laboratorio de resistencia de materiales de la Universidad Politécnica Salesiana, donde se realizó y se ejecutó la programación necesaria para obtener las probetas.

### 2.7.2. Aplicación de tratamientos térmicos

#### 2.7.2.1. Proceso de recocido

En primera instancia se aplicó el tratamiento térmico de recocido. Las probetas preseleccionadas para este proceso se colocaron de manera adecuada Figura 13, para que no se produzca cualquier tipo de problema en su instancia en el horno.



**Figura 13.** Probetas ubicadas en el contenedor especial del horno Nabertherm.

Con la ayuda del personal encargado de este laboratorio, se procedió a programar el horno con las variables con las cuales se va efectuar el proceso de revenido indicado en la figura 14.



**Figura 14.** a) Temperatura [centígrados] programada en el horno de recocido, b) Tiempo [horas] de residencia de las probetas en el horno.

Seguido a esto se colocaron las probetas en el horno y se esperó a que culmine el proceso. Una vez terminado el tratamiento se efectuó los enfriamientos que previamente fueron mencionados como se observa en las Figuras 15 – 18.



**Figura 15.** Iniciando evacuación de las probetas del horno para respectivo enfriamiento.



**Figura 16.** a) Enfriamiento de las probetas en el horno.



**Figura 17.** b) Enfriamiento de las probetas a temperatura ambiente.

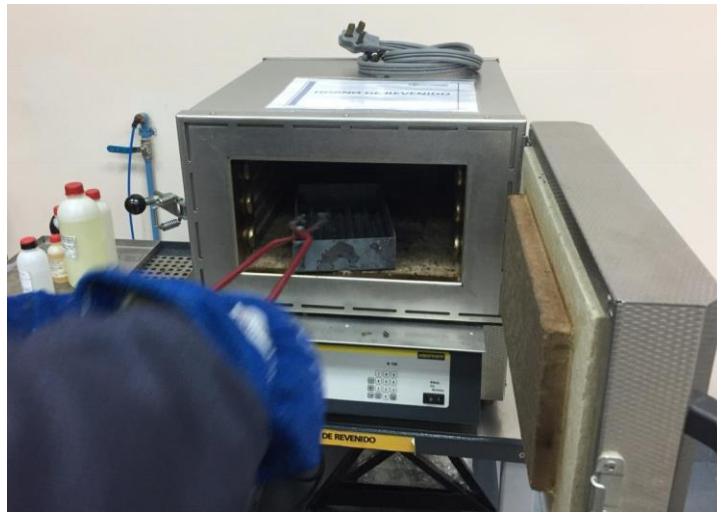


**Figura 18. c)** Enfriamiento de las probetas en arena sílica.

Una vez culminado los procesos de enfriamiento, las probetas fueron almacenadas de forma segura en un espacio hermético, para que así no sufran cualquier tipo de alteración debido a agentes externos al proceso.

#### **2.7.2.2. Proceso de revenido**

Se deposita el primer grupo de probetas que van hacer sometidas a revenido dentro del horno como se indica en la Figura 19.



**Figura 19.** Ubicación de probetas en el horno de revenido.

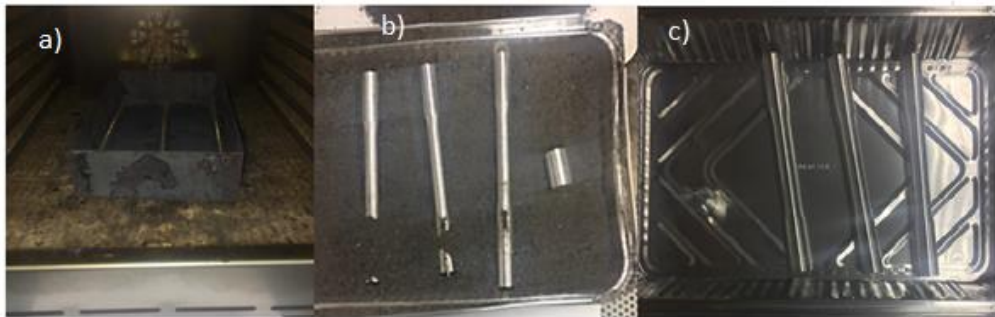
Para el proceso de revenido se utilizó el otro horno especial que posee el laboratorio de metalografía. El primer paso, como en el proceso anterior, es programar el horno con las variables especificadas, según Figura 20. Para esto el proceso de revenido consta de 3 subgrupos mencionadas anteriormente.





**Figura 20.** a) Temperatura para revenido. b) Tiempo de residencia de primer grupo de las probetas para revenido.

Después de esperar que termine el cronómetro del horno se dispone a realizar los enfriamientos propuestos para cada grupo de probetas, de acuerdo a la Figura 21.



**Figura 21.** a) Probetas enfriadas en horno. b) Probetas enfriadas en arena. c) Probetas enfriadas en ambiente.

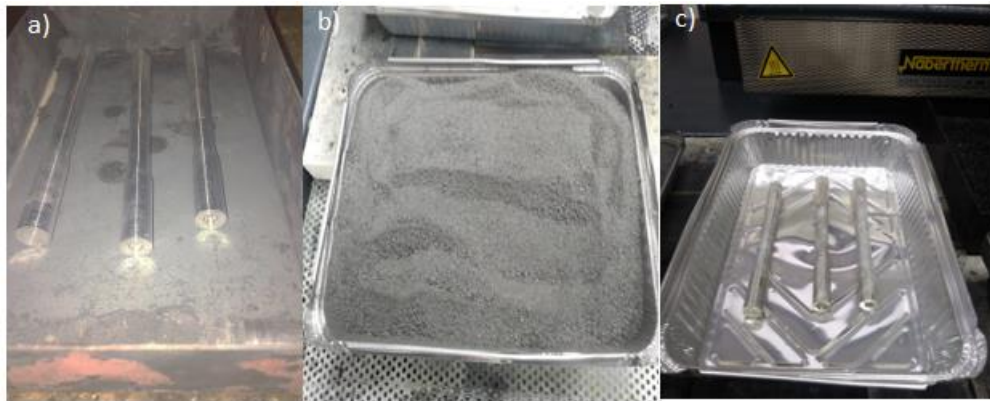
Cuando las probetas se encontraron completamente frías fueron almacenadas de manera segura.

A continuación, se realizó el segundo subgrupo del proceso de revenido, para este caso las probetas estuvieron en el horno un tiempo de 6 horas como se menciona en el postulado anterior, Figura 22.



**Figura 22.** a) Temperatura de revenido. b) Tiempos de residencia de segundo grupo de probetas para revenido.

Al terminar el cronómetro del horno se inició con los enfriamientos preestablecidos al segundo grupo de probetas de revenido, indicado en la Figura 23.



**Figura 23.** a) Probetas enfriadas en horno. b) Probetas enfriadas en arena. c) Probetas enfriadas en ambiente

Después del proceso de enfriamiento se procedió a almacenar las probetas de forma segura.

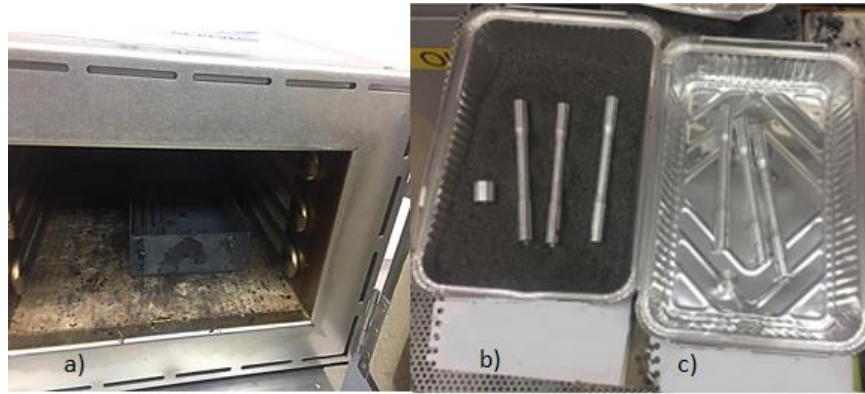
Finalmente se aplica revenido al tercer grupo de las probetas. Cabe mencionar que este grupo de probetas estarán en el horno durante 9 horas, como se presenta en la Figura 24.



**Figura 24.** a) Temperatura de revenido. b) Tiempos de residencia de tercer grupo de probetas para revenido.

Una vez concluido el proceso en el horno, se llevó a cabo el enfriamiento de las probetas de las formas ya mencionadas, como se indica en la Figura 25.





**Figura 25.** a) Probetas enfriadas en horno. b) Probetas enfriadas en arena. c) Probetas enfriadas en ambiente.

Una vez que se enfriaron todas las probetas de este grupo estas fueron almacenadas.

### **2.7.3. Ejecución de ensayos de tracción, microestructura y dureza.**

El ensayo de tracción en todas las probetas se realizó bajo la norma ASTM E8M, que se ejecutó en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana, la cual cuenta con una máquina de pruebas electromecánicas TESTSOURCES, mencionada anteriormente, en la que se puede realizar ensayos mecánicos de: tracción, compresión, flexión, fractura, corte y rasgadura. Esta máquina presenta una tabla de resultados donde se obtiene los valores de: carga máxima, esfuerzo máximo, módulo de elasticidad, carga a la fluencia y esfuerzo a la fluencia, los cuales serán de análisis en este proyecto.

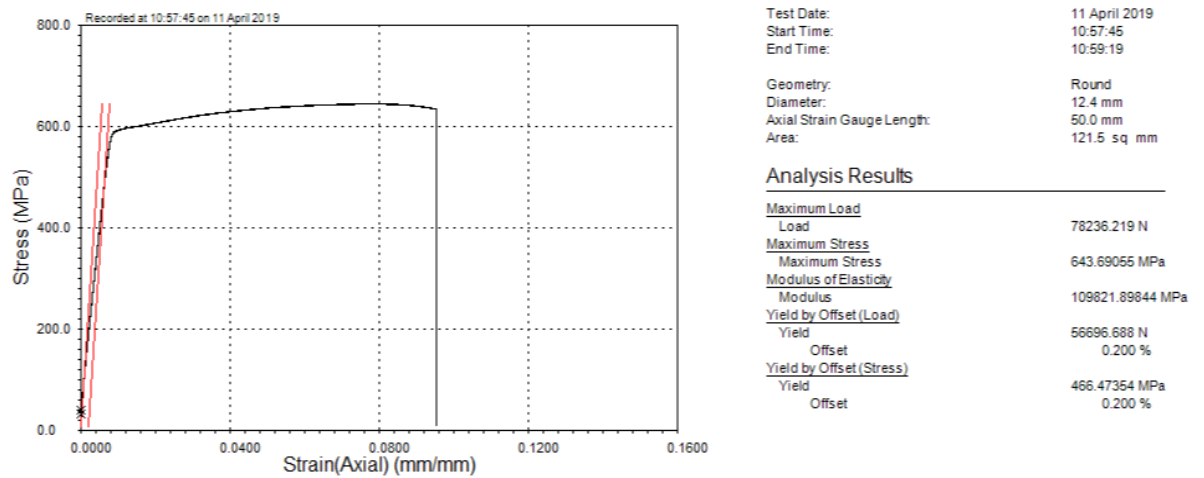
## **2.8. Resultados experimentales**

### **2.8.1. Ensayos de tracción**

En primer lugar, se realizó un estudio de las propiedades mecánicas iniciales del material base, para esto se efectuó un ensayo de tracción a una probeta del material, sin ser afectado por un tratamiento térmico y fue denominado tabla base. Después de que las probetas de aluminio 7075-T6 fueron sometidas a los ensayos de tracción, se agruparon haciendo referencia a cada tratamiento que se les aplicó; de esta manera, se establecerá una serie de datos obtenidos después de haber sido sometidos a recocido y revenido, donde cada una de estas tendrán subgrupos dependiendo a las variables de trabajo. Así se obtendrá los valores de las propiedades mecánicas de cada una de las probetas.

### 2.8.1.1. Tabla base

Se realizó una comprobación de las propiedades mecánicas iniciales del material adquirido por el proveedor, para la verificación de que sea el material solicitado indicado en la Figura 26.



**Figura 26.** Comprobación de propiedades mecánicas de material en estado base.

En la tabla 18 se da a conocer las propiedades mecánicas principales del material que se pueden obtener de la máquina de ensayos TESTRESOURCES.

**Tabla 18.** Propiedades mecánicas principales probeta base de aluminio 7075-T651.

Carga máxima[N]	Esfuerzo máximo [Mpa]	Módulo de elasticidad [Mpa]	Carga a la fluencia[N]	Esfuerzo a la fluencia [Mpa]	Porcentaje de elongación [%]
78326,2	643,7	109821,9	56696,7	466,5	10

Elaborado por: Gary Morillo y Luis Calderón.

Posteriormente en las tablas 19-24 se darán a conocer una serie de datos promedios que mostrará los resultados de las combinaciones de los ensayos realizados con respecto a las propiedades mecánicas que serán analizadas en este proyecto.

**Tabla 19.** Resultados finales de cargas máximas de revenido, recocido y respectivos ensayos.

<b>Carga máxima [N]</b>				
<b>N° de Ensayo</b>	<b>Probeta 1</b>	<b>Probeta 2</b>	<b>Probeta 3</b>	<b>Promedio</b>
Ensayo 1	31035,0	30544,9	12570,3	24716,7
Ensayo 2	42821,1	43148,7	41675,8	42548,5
Ensayo 3	31179,4	50002,7	48333,7	43171,9
Ensayo 4	79433,1	78837,3	78349,7	78873,4
Ensayo 5	80444,3	79247,4	80315,4	80002,4
Ensayo 6	79845,9	80039,4	80343,7	80076,3
Ensayo 7	79974,9	79670,5	78158,8	79268,1
Ensayo 8	80833,9	80441,8	80452,1	80575,9
Ensayo 9	77663,6	76778,8	79768,5	78070,3
Ensayo 10	77606,8	77495,9	70861,2	75321,3
Ensayo 11	77746,1	78602,5	77624,9	77991,2
Ensayo 12	78274,9	78187,2	78380,7	78280,9

Elaborado por: Gary Morillo y Luis Calderón.

**Tabla 20.** Resultados finales de esfuerzos máximos de revenido, recocido y respectivos ensayos.

<b>Esfuerzo máximo [Mpa]</b>				
<b>N° de Ensayo</b>	<b>Probeta 1</b>	<b>Probeta 2</b>	<b>Probeta 3</b>	<b>Promedio</b>
Ensayo 1	252,9	248,9	102,4	201,4
Ensayo 2	346,2	348,8	336,9	344,0
Ensayo 3	254,1	407,5	393,9	351,8
Ensayo 4	657,8	652,8	638,5	649,7
Ensayo 5	666,1	656,2	654,5	658,9
Ensayo 6	660,6	652,2	654,7	655,9
Ensayo 7	651,7	649,2	636,9	645,9
Ensayo 8	648,3	645,1	645,2	646,2
Ensayo 9	632,9	625,6	650,0	636,2
Ensayo 10	632,4	631,5	577,4	613,8
Ensayo 11	633,5	640,5	632,5	635,5
Ensayo 12	637,8	637,1	638,7	637,9

Elaborado por: Gary Morillo y Luis Calderón.

**Tabla 21.** Resultados finales de módulo de elasticidad de revenido, recocido y respectivos ensayos.

<b>Módulo de elasticidad [Mpa]</b>				
<b>N.º de Ensayo</b>	<b>Probeta 1</b>	<b>Probeta 2</b>	<b>Probeta 3</b>	<b>Promedio</b>
Ensayo 1	156713,5	132227,5	52786,2	113909,1
Ensayo 2	109000,9	80374,1	73766,0	87713,7
Ensayo 3	79593,5	71749,3	113514,1	88285,6
Ensayo 4	75487,6	94452,3	85631,9	85190,6
Ensayo 5	96054,7	88501,6	83409,9	89322,1
Ensayo 6	80202,2	85955,6	85373,3	83843,7
Ensayo 7	75432,9	87069,8	79827,7	80776,8
Ensayo 8	84194,3	81452,1	89133,1	84926,5
Ensayo 9	81007,6	76126,9	86513,7	81216,1
Ensayo 10	78321,4	78969,6	75189,3	77493,5
Ensayo 11	84378,0	80926,7	77475,5	80926,7
Ensayo 12	87329,1	76261,4	96992,6	86861,0

Elaborado por: Gary Morillo y Luis Calderón.

**Tabla 22.** Resultados finales de carga a la fluencia de revenido, recocido y respectivos ensayos.

<b>Carga a la fluencia[N]</b>				
<b>Nº de Ensayo</b>	<b>Probeta 1</b>	<b>Probeta 2</b>	<b>Probeta 3</b>	<b>Promedio</b>
Ensayo 1	17105,2	16640,9	2424,8	12057,0
Ensayo 2	23964,3	23881,8	22780,3	23542,1
Ensayo 3	10398,3	29151,9	27500,9	22350,4
Ensayo 4	73157,0	72176,8	68944,6	71426,1
Ensayo 5	68067,5	70206,0	72571,5	70281,6
Ensayo 6	72623,0	70884,4	71008,2	71505,2
Ensayo 7	73531,1	71650,5	71488,0	72223,2
Ensayo 8	73172,5	73399,5	70817,3	72463,1
Ensayo 9	70616,1	70327,2	71789,8	70911,1
Ensayo 10	71118,8	71129,4	64528,3	68925,5
Ensayo 11	71379,7	27163,0	71281,7	56608,1
Ensayo 12	70917,9	71539,6	68124,2	70193,9

Elaborado por: Gary Morillo y Luis Calderón.

**Tabla 23.** Resultados finales de esfuerzo de fluencia de revenido, recocido y respectivas combinaciones.

<b>Esfuerzo a la fluencia [Mpa]</b>				
<b>N° de Ensayo</b>	<b>Probeta 1</b>	<b>Probeta 2</b>	<b>Probeta 3</b>	<b>Promedio</b>
Ensayo 1	139,4	135,6	19,8	98,2
Ensayo 2	193,7	193,1	184,2	190,3
Ensayo 3	84,7	237,6	224,1	182,1
Ensayo 4	605,8	597,7	561,8	588,4
Ensayo 5	563,6	581,4	591,4	578,8
Ensayo 6	591,8	577,6	578,6	582,7
Ensayo 7	599,2	583,9	582,5	588,5
Ensayo 8	586,8	588,7	567,9	581,1
Ensayo 9	575,4	573,1	585,0	577,8
Ensayo 10	580,1	579,6	525,8	561,8
Ensayo 11	581,7	221,3	580,9	461,3
Ensayo 12	577,9	583,0	555,1	572,0

Elaborado por: Gary Morillo y Luis Calderón.

**Tabla 24.** Resultados finales de porcentaje de elongación de revenido, recocido y respectivas combinaciones.

<b>Porcentaje de elongación [%]</b>				
<b>N° de Ensayo</b>	<b>Probeta 1</b>	<b>Probeta 2</b>	<b>Probeta 3</b>	<b>Promedio</b>
Ensayo 1	20%	19%	18%	19%
Ensayo 2	15%	13%	16%	14%
Ensayo 3	12%	12%	13%	12%
Ensayo 4	7%	10%	12%	10%
Ensayo 5	9%	9%	11%	10%
Ensayo 6	11%	10%	10%	10%
Ensayo 7	11%	11%	12%	11%
Ensayo 8	11%	11%	12%	11%
Ensayo 9	11%	12%	11%	11%
Ensayo 10	11%	10%	11%	10%
Ensayo 11	11%	11%	13%	11%
Ensayo 12	10%	12%	12%	11%

Elaborado por: Gary Morillo y Luis Calderón.

### **2.8.2. Metalografía**

Culminados los tratamientos térmicos se tomaron muestras de las probetas para ser aplicadas al proceso de metalografía, el cual debe seguir un orden de pulido mediante una serie de lijados.

La morfología de la microestructura se caracteriza luego por microscopía óptica, después de que a las muestras se le aplicase un ácido llamado KELLER'S, el cual es utilizado para en el proceso de metalografía para aluminio y sus aleaciones según la norma ASTM E407.

## CAPITULO III

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1. Resultado de muestra de ensayo

Al aplicar los tratamientos térmicos de recocido y revenido al material de aluminio 7075-T651 y después de realizar los ensayos propuestos; tracción, metalografía y dureza, se obtuvo los datos donde se muestra si existió un incremento o decrecimiento en las propiedades mecánicas del material en estado base.

##### 3.1.1. Análisis de resultados de ensayos de tracción.

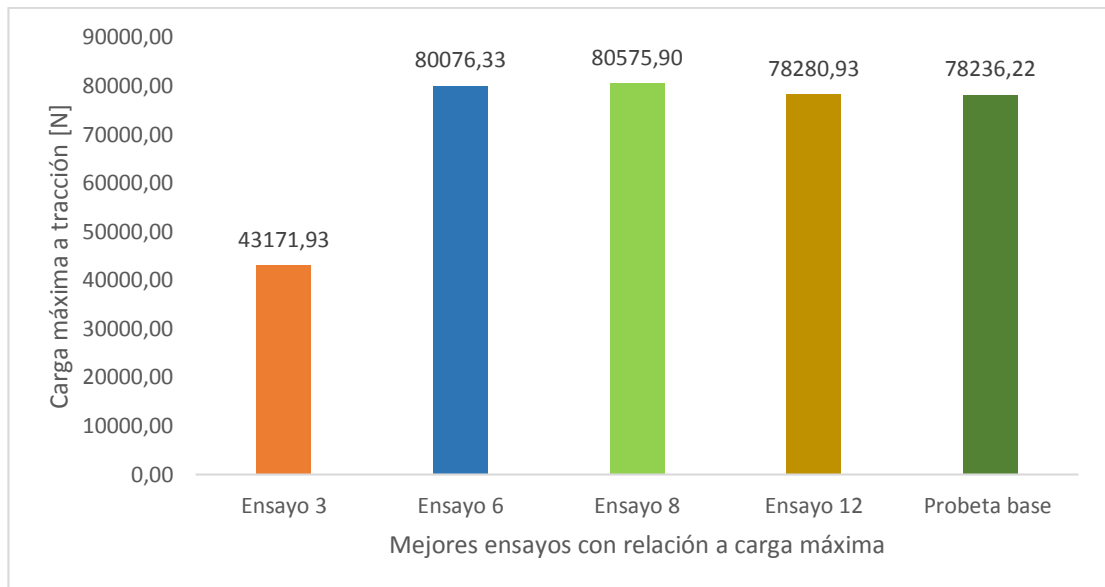
Como se mencionó en capítulo anterior, los ensayos de tracción fueron realizados con tres probetas a cada proceso térmico, de las cuales se realizó un promedio de los mejores resultados, indicados en la tabla 25.

**Tabla 25.** Valores promedios de las propiedades mecánicas.

N° de Ensayos	Carga máxima [N]	Esfuerzo máximo [Mpa]	Módulo de elasticidad [Mpa]	Carga a la fluencia [N]	Esfuerzo a la fluencia [Mpa]	Elongación [%]
Ensayo 1	24716,7	201,4	113909,1	12057,0	98,2	19
Ensayo 2	42548,5	344,0	87713,7	23542,1	190,3	14
Ensayo 3	43171,9	351,8	88285,6	22350,4	182,1	12
Ensayo 4	78873,4	649,7	85190,6	71426,1	588,4	10
Ensayo 5	80002,4	658,9	89322,1	70281,6	578,8	10
Ensayo 6	80076,3	655,9	83843,7	71505,2	582,7	10
Ensayo 7	79268,1	645,9	80776,8	72223,2	588,5	11
Ensayo 8	80575,9	646,2	84926,5	72463,1	581,1	11
Ensayo 9	78070,3	636,2	81216,1	70911,1	577,8	11
Ensayo 10	75321,3	613,8	77493,5	68925,5	561,8	10
Ensayo 11	77991,2	635,5	80926,7	56608,1	461,3	11
Ensayo 12	78280,9	637,9	86861,0	70193,9	572,0	11

Elaborado por: Gary Morillo y Luis Calderón.

Seguidamente, se realizó gráficas de comparación de cada propiedad mecánica anteriormente mencionadas versus el valor promedio más alto de cada uno de los ensayos realizados.



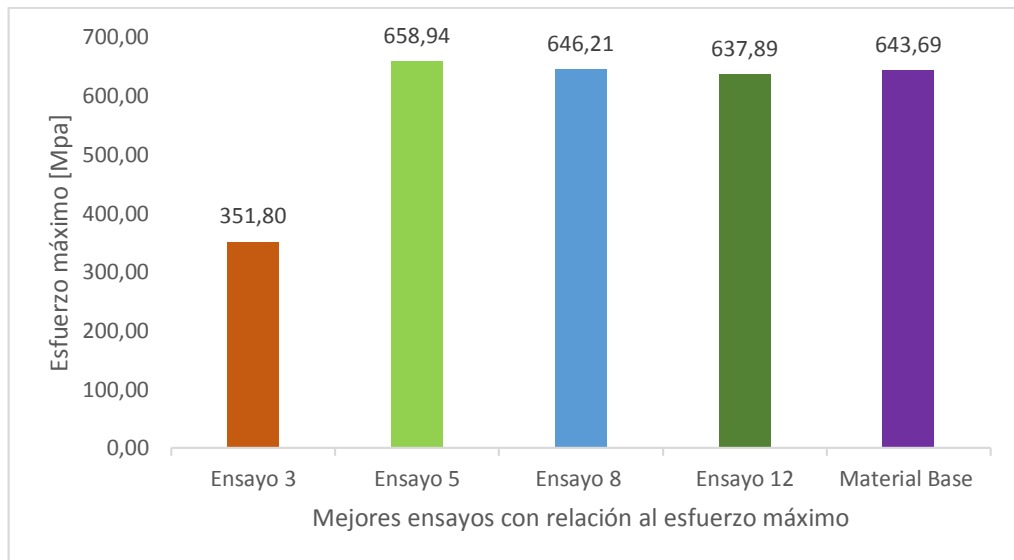
**Figura 27.** Resultados comparativos de carga máxima. Elaborador por: Gary Morillo y Luis Calderón

La Figura 27, permite determinar que, en la propiedad mecánica de carga máxima de tracción, el ensayo número 8 obtuvo un valor de 80576,9 [N] y realizando una comparación con el valor del material base 78236,2 [N], se logró conseguir una mejora del 3%.

A su vez, el ensayo número 3, consiguió el valor de 43171,9 [N]. Esto significa que perdió un 45% de dicha propiedad.

Según los resultados anteriores se puede determinar que en el proceso de revenido no existe una variación relativamente alta en el valor de la carga máxima, pero se puede predecir que mientras exista tiempos de residencia más altos este valor tenderá a bajar. Por otra parte, el proceso de recocido muestra que el valor de la carga máxima es casi el 50% de los valores obtenidos con el proceso de revenido.



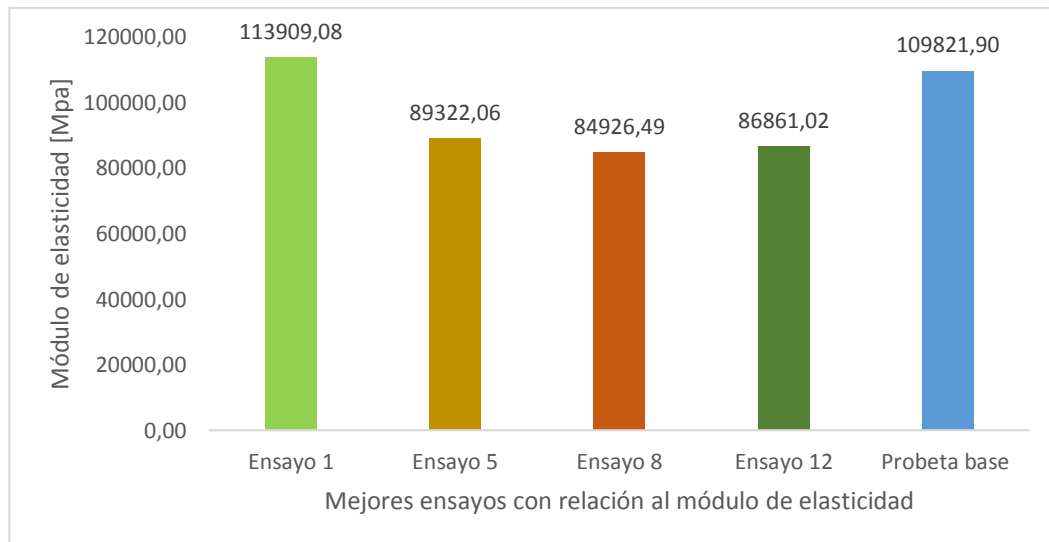


**Figura 28.** Resultados comparativos de esfuerzo máximo. Elaborado por: Gary Morillo y Luis Calderón.

Como se muestra en la Figura 28, el valor de esfuerzo máximo más alto es el ensayo número 5 con un valor de 658,9 [Mpa]; lo cual significa que haciendo una relación de este valor con el del material base 644 [Mpa] se logró una mejoría del 2%.

Por lo contrario, el ensayo número 2, obtuvo un valor de 343,0[N], esto significa que tiene una pérdida del 47%.

Este proceso está sujeto a condiciones similares que las del caso anterior, donde se muestra que en el proceso de revenido mientras más tiempo tengan las probetas en el horno su valor empieza a disminuir. Para el proceso de recocido no se muestran mejoras y por lo contrario se reduce a la mitad con relación a las estadísticas del material base.

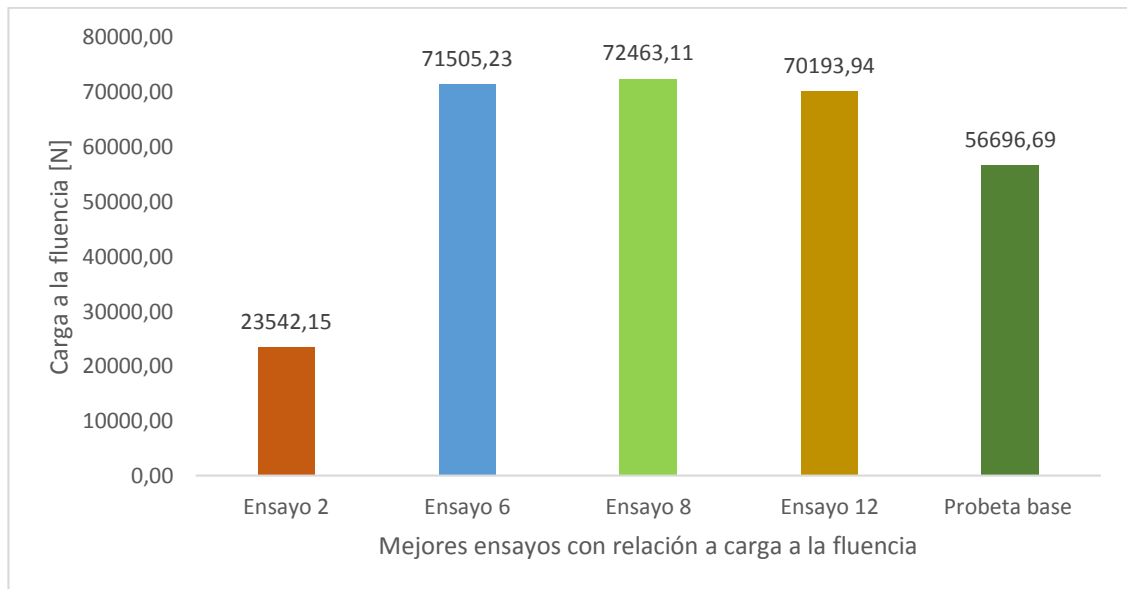


**Figura 29.** Resultados comparativos módulo de elasticidad. Elaborado por: Gary Morillo y Luis Calderón.

De acuerdo a la Figura 29, el valor de módulo de elasticidad más alto conseguido es del ensayo número 1, con una cantidad de 113909,1 [Mpa] en comparación con el valor del material base que es de 109821,9 [Mpa], dando como resultado una mejora del 4%.

Así mismo el ensayo número 8, obtuvo un resultado de 84926,5 [Mpa], lo que significa que tienen una pérdida del 23% en dicha propiedad.

Haciendo referencia a la Figura 29, en el tratamiento térmico de revenido se observa que existe una similitud de los valores de módulo de elasticidad, estos valores llegan a ser más bajos que los de tratamiento térmico de recocido, de esta forma si se desea mejorar el módulo de elasticidad de la aleación de aluminio 7075-T651 se debe realizar un proceso extra de recocido.

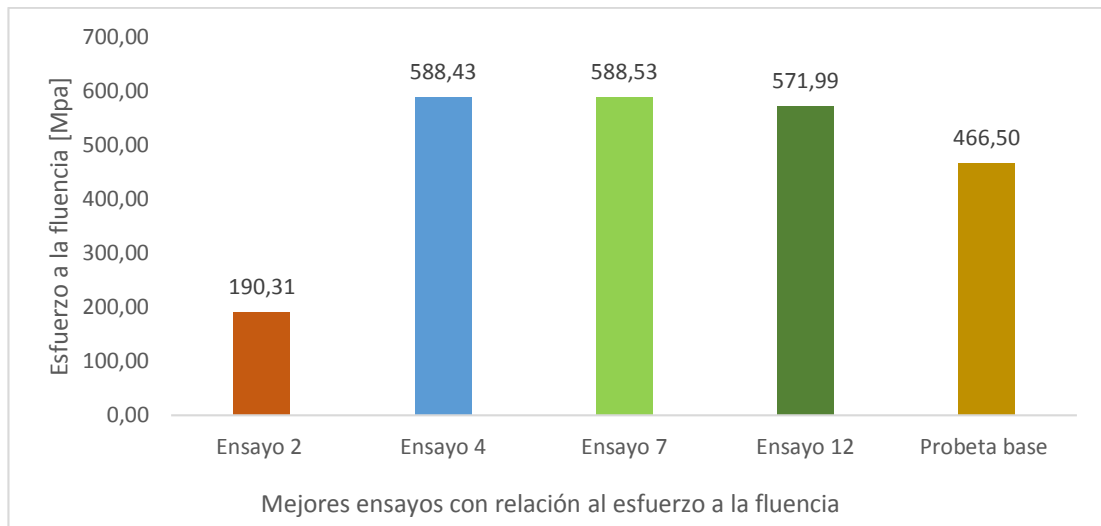


**Figura 30.** Resultados comparativos carga a la fluencia. Elaborado por: Gary Morillo y Luis Calderón.

Con respecto a la propiedad mecánica de carga a la fluencia (Figura 30), el mejor resultado fue el ensayo número 8 con un valor de 72463,112 [N]. Realizando una comparación del resultado obtenido con el valor de material base 56696,7 [N], se alcanzó una mejora del 28% en dicha propiedad.

Mientras tanto, el ensayo número 2, obtuvo un valor de 23542,1 [N], lo que significa que tuvo una pérdida de 66% en comparación del material base.

Como análisis general en este caso, el proceso de revenido tiende a ser excelente a la hora de mejorar la carga a la fluencia y desde otro punto de vista el proceso de recocido perjudica a más de la mitad el valor de la carga a la fluencia, haciendo que sea completamente nulo realizar recocido a este material.

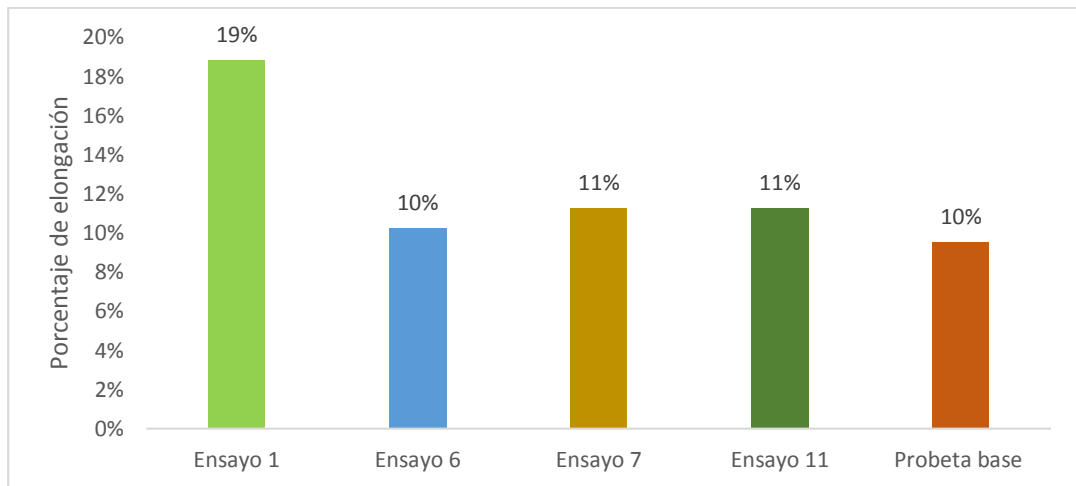


**Figura 31.** Resultados comparativos esfuerzo a la fluencia. Elaborado por: Gary Morillo y Luis Calderón.

Como se observa en la Figura 31, se puede concluir que, en la propiedad mecánica de Esfuerzo a la fluencia, existe una similitud de valores entre el ensayo número 7 de 588,5[Mpa] y el ensayo número 4 de 588,4[Mpa], dando como resultado una mejora de entre (26 – 25 %) con el valor del material base 466,5 [Mpa].

A su vez, el ensayo número 2 consiguió el valor de 190,3 [N], lo cual significa que perdió un 60% de dicha propiedad.

En un análisis general, se determinó que ninguno de los tratamientos térmicos muestra un resultado superlativo en relación al valor de la probeta base; es más, como se puede ver en el recocido el valor disminuye de una forma muy dramática, haciendo que este proceso sea completamente rechazado. Adicionalmente, aplicando un proceso de revenido se ganó valores tan pequeños en comparación al material base, que a nivel industrial no otorgan un impacto grande como para realizar este proceso.



**Figura 32.** Resultados comparativos porcentaje de elongación. Elaborado por: Gary Morillo y Luis Calderón.

Analizando la Figura 32, se determinó que el ensayo 1, adquirió un 19 % de elongación. Esto significa que en comparación con el material base mejoró este valor, aumentando en un 9,33%.

Por consiguiente, en los dos procesos se pudo obtener una mejoría en el porcentaje de elongación; sin embargo, el proceso de recocido es más factible ya que el valor del porcentaje de elongación es casi el doble que el del material base, asumiendo que esta propiedad mecánica es la de mayor importancia para un trabajo puntual se considera de manera aceptable aplicar el tratamiento térmico aplicado en el ensayo 1.

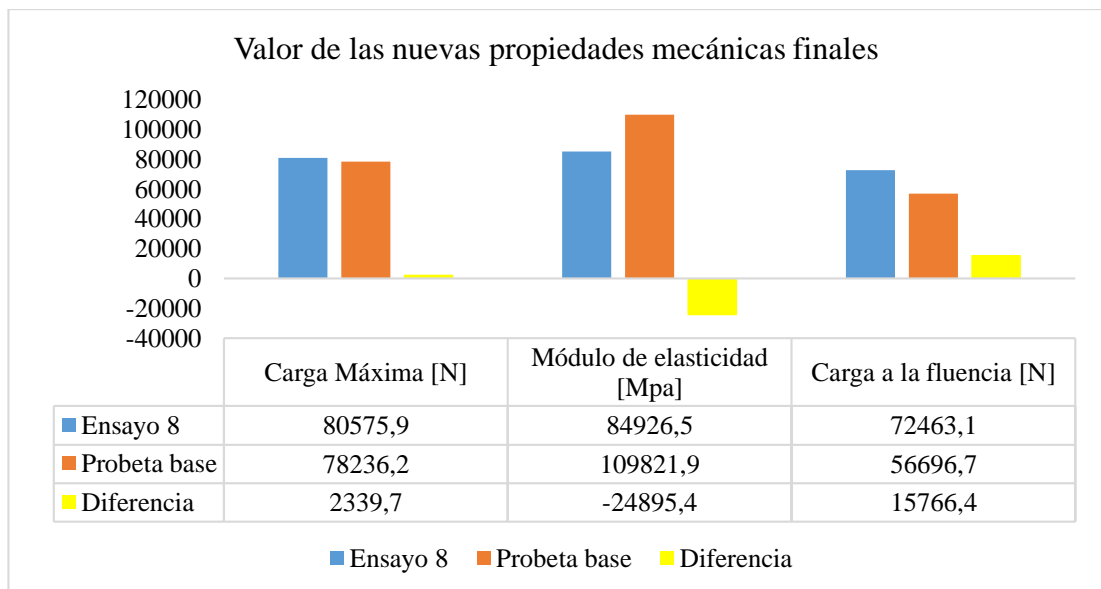
Haciendo una síntesis a todos los análisis realizados, se determinó que las probetas que fueron sujetas al ensayo 1 obtuvieron los mejores resultados en comparación a todos los ensayos mencionados anteriormente y al material base, en la tabla 26 se dará a conocer un detalle de comparación de resultados obtenidos. Posterior al análisis, se comparará los valores del material base con los del ensayo 8, el cual obtuvo mejores resultados de entre los ensayos realizados.

**Tabla 26.** Comparación entre valores base y valores de revenido de 6h enfriados en temperatura ambiente.

	Carga Máxima [N]	Esfuerzo máximo [Mpa]	Módulo de elasticidad [Mpa]	Carga a la fluencia [N]	Esfuerzo a la fluencia [Mpa]	Porcentaje de elongación %
<b>Ensayo 8</b>	80575,9	646,2	84926,5	72463,1	581,1	11
<b>Probeta base</b>	78236,2	643,7	109821,9	56696,7	466,5	10
<b>Diferencia</b>	2339,7	2,5	-24895,4	15766,4	114,7	1
<b>Porcentaje de variación</b>	3%	0%	-23%	28%	25%	1

Elaborado por: Gary Morillo y Luis Calderón.

Por motivo de diferentes tipos de escalas numéricas entre los valores de los resultados finales, se realizó solamente una gráfica que muestra los valores más grandes mostrados en la Figura 33, que indican de manera visual las variaciones que se obtuvo en los resultados de las propiedades mecánicas de: carga máxima, módulo de elasticidad y carga a la fluencia, entre el ensayo 8 y los valores de la probeta base.



**Figura 33.** Nuevas propiedades mecánicas. Elaborado por: Gary Morillo y Luis Calderón.

En consecuencia, se realizó un análisis teórico desde el enfoque de resistencia de materiales.

Para este análisis se tiene la ecuación de esfuerzo normal [40].

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4)$$

Donde:

$\sigma$  presenta esfuerzo normal.

P representa carga admisible.

A representa área sección transversal.

Como se muestra en la tabla 26, la carga máxima es mayor en el ensayo 8 en comparación a los valores base, lo cual significa que la carga admisible es directamente proporcional al valor del esfuerzo normal, independientemente de los valores que pueda asumir cualesquiera de las variables involucradas. El valor de esfuerzo normal para el caso del ensayo 8 siempre va ser mayor que este mismo valor en el estado base.

$$\sigma_{ensayo\ 8} > \sigma_{material\ base} \quad (5)$$

Se puede concluir que las probetas tratadas por revenido a 6 horas y enfriadas a temperatura ambiente sean más resistentes que el aluminio 7075-T651.

A continuación se analiza la fórmula de módulo de elasticidad [40].

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (6)$$

Donde:

$E$  significa módulo de elasticidad

$\sigma$  significa esfuerzo normal

$\varepsilon$  significa deformación unitaria

Según los resultados que se obtuvo, el valor de módulo de elasticidad del ensayo 8 es menor al valor del módulo de elasticidad del material base. En otras palabras, esto se traduce en que el material base es más rígido que los ejemplares del ensayo 8.

$$E_{ensayo\ 8} < E_{material\ base} \quad (7)$$

Despejando la deformación unitaria de la ecuación 6, se puede identificar que este valor es inversamente proporcional con respecto al valor de módulo de elasticidad; es decir, que el valor de deformación unitaria del ensayo 8 es mucho mayor al valor de deformación unitaria del material base.

$$\varepsilon_{ensayo\ 8} > \varepsilon_{material\ base} \quad (8)$$

Por ende, los ejemplares del ensayo 8 sufren mayor deformación que las probetas del material base.

### 3.2. Resultados de ensayos metalográficos.

Para el ensayo metalográfico se seleccionó el material en estado base y las probetas de revenido de 6 horas a 120°C y enfriadas a temperatura ambiente, ver tabla 27.

**Tabla 27.** Identificación de muestra

<b>Muestra</b>	<b>Simbología</b>	<b>Observaciones</b>
Aleación aluminio 7075T651 material base	MB	Diámetro $\phi = 19,9$ mm y altura 20mm
Aleación aluminio 7075T651 tratado térmicamente	Revenido 6h	Diámetro $\phi = 19,9$ mm y altura 28mm

Elaborado por: Gary Morillo y Luis Calderón.

Los resultados mostrados en la tabla 28 son los obtenidos posteriormente realizados en análisis metalográfico.

**Tabla 28.** Análisis metalográfico.

<b>Muestra</b>	<b>Observaciones</b>
<b>MB</b>	100X La microestructura corresponde a un aluminio con presencia de microrechupes e inclusiones de cobre (Cu) y precipitados de segunda fase (puntos negros), Figura 34.
	500X Matriz de aluminio, detalle de los microrechupes e inclusiones de cobre (Cu), Figura 35.
<b>Revenido 6h</b>	100X La microestructura es no homogénea, corresponde a un aluminio con presencia de microrechupes y precipitados de segunda fase (puntos negros), Figura 36.
	500X Matriz de aluminio, presencia de precipitados en forma de dendritas y microrechupes, Figura 37.
	1000X Detalle de los precipitados en forma de dendritas y microrechupes, Figura 38.

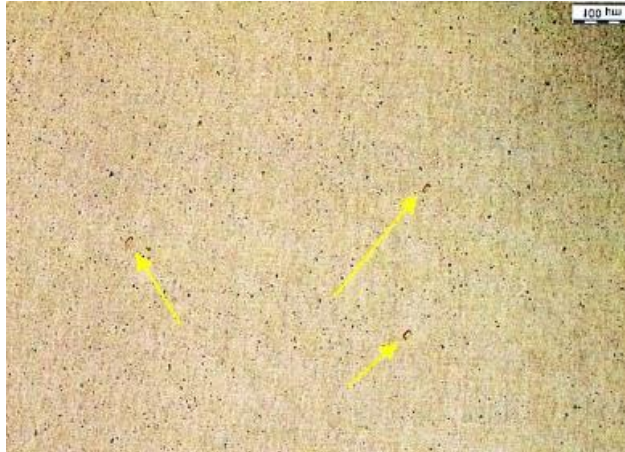
Elaborado por: Gary Morillo y Luis Calderón.

Como se muestra en la tabla 27, para el material base se aplicó un estudio con tres tipos de lentes; donde se puede observar que existe rechupes que no son más que porosidades que están provocados por la formación de gases en núcleo del metal líquido o también se forman por contracción volumétrica del propio material metálico



en el proceso de enfriamiento y finalizada la solidificación [41]. También se encuentra precipitados en este material y se originan cuando una solución de sólido saturado desarrolla agrupaciones soluto, que luego participarán en su transición [42].

Al material que se le aplicó revenido se observa que posee características similares a las del material base, con la gran diferencia que los precipitados ahora se encuentran en tamaños más grandes, formando dendritas.



**Figura 34.** MB, la microestructura que presenta corresponde a un aluminio con presencia de precipitados de segunda fase e inclusiones de cobre (Cu).



**Figura 35.** MB, matriz aluminio, detalle de los precipitados de segunda fase (puntos negros) e inclusiones de cobre (Cu).



**Figura 36.** Revenido 6h, la microestructura no homogénea, que corresponde a un aluminio con presencia de precipitaciones de segunda fase



**Figura 37.** Revenido 6h, detalle de los precipitados en forma de dendritas y microrechupes. Revenido 6h, detalle de los precipitados en forma de dendritas y microrechupes.



**Figura 38.** Revenido 6h, matriz de aluminio, presencia de precipitados en forma de dendritas y microrechupes

Para revelar el estado microestructural de las dos probetas seleccionadas para este estudio se utilizó el ácido Keller según la norma ASTM E407, como se indica en la Figura 39.



**Figura 39.** Ácido utilizado en análisis metalográfico según norma ASTM E407.

### 3.3. Resultados de ensayos de dureza

Se realizó cinco tipos de ensayos o puntos como también es conocido este tipo de pruebas como se muestra en la tabla 29.

**Tabla 29.** Valores de dureza obtenidos.

Muestra	Número de pruebas					Promedio *HRB	Promedio *HB
	1	2	3	4	5		
MB	89	89	89	88	90	89	178
Revenido 6h	89	89	90	90	89	90	184

Elaborado por: Gary Morillo y Luis Calderón.

Realizando una conversión del valor promedio en Dureza Brinell, se observa que las probetas de revenido aumentaron su valor de dureza en 3,37 %.

### 3.3 Costos

En la tabla 30 se da a conocer el detalle de los costos que se mantuvieron durante el desarrollo de este proyecto técnico. Cabe mencionar que los análisis metalográficos se desarrollaron solamente del material base y la probeta que mejor resultado dio, pues realizar los análisis de las 12 probetas tendría un valor aproximado de \$ 1411,20.

**Tabla 30.** Costos

<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario [USD]</b>	<b>Costo total [USD]</b>
1	Análisis metalográfico	2	117,6	235,2
2	Elaboración de probetas	36	10	360
3	Adquisición de material	2	45	90
4	Tutorías externas	3	75	150
5	Extras	1	75	75
<b>Total [USD]</b>				<b>910,2</b>

Elaborado por: Gary Morillo y Luis Calderón.

## **Conclusiones.**

En base a la literatura encontrada en libros, artículos científicos y sitios web se obtuvo que el aluminio 7075-T651 es empleado en la fabricación de componentes en la industria aeronáutica (en el fuselaje primario y el revestimiento del avión), naval y automotriz; debido a que el valor de resistencia a la tracción es de 540 [Mpa], siendo un material resistente, el porcentaje de Zn = 5,62 % agrega dureza superficial y la densidad de 2,80 [gr/cm<sup>3</sup>] que hace que sea un material liviano. También es utilizado en la construcción de matrices y moldes de soplado de elementos termoplásticos debido a que es un material dúctil por tener módulo de elasticidad 72000 [Mpa]; de igual forma, tiene aplicaciones deportivas de alta exigencia como son equipos para escalada y también para la construcción de partes en el ámbito del ciclismo por tener una buena resistencia a la fractura = 310 [Mpa].

Los valores de la aleación aluminio 7075-T651 de las principales propiedades mecánicas son: Carga máxima = 78326,22 [N]; esfuerzo máximo = 643,69 [Mpa]; módulo de elasticidad = 109821,89 [Mpa]; carga a la fluencia = 56696,69 [N]; esfuerzo a la fluencia = 466,47 [Mpa]; porcentaje de elongación = 10%.

Finalizados los tratamientos térmicos de revenido y recocido, se da a conocer el aumento de manera porcentual en las propiedades mecánicas como: carga máxima en un 3%, carga a la fluencia en un 28%, esfuerzo a la fluencia en un 25%, porcentaje de elongación en un 2%, dureza mejoró en un 3,37% y en cuanto a las microestructuras se evidenció la aparición de precipitados de dendritas, así mismo se experimentó una pérdida en el módulo de elasticidad del 23%.

Debido a que los resultados obtenidos con el proceso de revenido de 6 horas a 120°C enfriadas a temperatura ambiente no brindan una mejora considerable en las propiedades mecánicas mencionadas, este material en la industria ecuatoriana se lo puede utilizar en aplicaciones exclusivas para matricería, mas no en moldes de soplado, debido a que en esta rama de la industria se necesitan materiales dúctiles y en este caso el módulo de elasticidad reduce su valor en 23%. También este material puede reemplazar a los elementos que sean construidos en acero dulce como; chapas decorativas y todo tipo de elementos mecánicos, debido a que el valor de dureza = 184 [HB], es mayor a la dureza de los aceros bajo en carbono que es aproximadamente de 150 [HB].

## **Recomendaciones**

No se recomienda aplicar un tratamiento térmico de recocido o revenido, debido a que las variaciones en los resultados de las propiedades mecánicas son demasiados pequeñas a nivel industrial, esto quiere decir que no es viable invertir económicamente en un proceso extra al material y ganar porcentajes tan pequeños en sus propiedades y que en el aspecto laboral no van a significar un gran impacto. Sin embargo, aunque estos resultados sean relativamente mínimos, esta aleación de aluminio 7075-T651 está en condiciones de reemplazar al acero AISI 420 en los moldes para soplado ya que este tipo de aceros tiene un costo muy elevado, el precio en el mercado industrial ecuatoriano por metro tiene un valor de \$ 58,97 c/m, en diámetro 20mm, comparándolo con el aluminio que tiene un valor de \$ 15 c/m, con similar diámetro.

Para futuras investigaciones no se aconseja realizar el proceso de recocido porque en los resultados obtenidos se evidenció que existió pérdidas en la gran mayoría de propiedades mecánicas. Carga máxima en un 45%, esfuerzo máximo en un 47%, carga a la fluencia en 22%, esfuerzo a la fluencia en 66% y solo consiguió mejorar en módulo de elasticidad en 4% y en elongación en 9% que prácticamente hace que este material baje su consideración en el campo laboral.

Si se requiere obtener una senda de valores más amplia, se sugiere que la duración de los tratamientos térmicos se realice con rangos de temperatura e intervalos de tiempo muchas mayores a los presentados. El motivo por el cual no se implementó estos aspectos es que las condiciones de las máquinas que cuentan el laboratorio de metalografía de la Universidad Politécnica Salesiana solo pueden operar en los rangos establecidos en los capítulos anteriores.

## **Bibliografía.**

- [1] J. Cárdenas Fernández and F. Del Castillo Rodríguez, *SUPERALEACIONES*, no. 23. Mexico, 2015.
- [2] J. F. . S. E. Obando, “Tratamientos térmicos para aluminios,” *Metal Actual*, pp. 36–43, 2014.
- [3] V. Aguilar Garcia and V. Cruz Escamilla, “Obtención de parámetros de operación para el tratamiento térmico de temple y revenido en aceros comerciales,” INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL, 2016.
- [4] J. Esteban and J. Wilchez, “Tracción de probetas metálicas,” 2018.
- [5] C. D. E. Materiales, “Metalografía protocolo,” 2011.
- [6] A. E. Ramirez, “Trazabilidad y Unificación de las escalas de Dureza en México,” pp. 1–8, 1998.
- [7] A. D. Isadare, B. Aremo, M. O. Adeoye, O. J. Olawale, and M. D. Shittu, “Effect of heat treatment on some mechanical properties of 7075 aluminium alloy,” *Mater. Res.*, vol. 16, no. 1, pp. 190–194, 2013.
- [8] M. S. Cetina, J. Lemus, and C. A. Bohórquez, “Influencia del tratamiento térmico de envejecimiento en las propiedades mecánicas de los aluminios,” Colombia, 2011.
- [9] A. De la cruz Cardona, “Análisis del comportamiento metalúrgico y propiedades mecánicas en uniones de aleaciones de aluminio 6061-T6 y 7075-T6 para aplicaciones en industria de transporte unidas mediante el proceso de soldadura GTAW,” Corporacion Mexicana de investigacion en materiales, 2015.
- [10] E. G. Maffia, “Estructura y Propiedades - Aluminio y sus aleaciones,” 2013.
- [11] M. A. Palas Zúñiga, “Reconocimiento de fases en aleaciones de aluminio en estado modelado,” Universidad de Piura, 2012.
- [12] E. S. Benavides, “Diseño de un dispositivo experimental de maquinado para aleaciones de aluminio silicio,” Universidad Autonoma de Nuevo León, 2012.

- [13] J. Alberto and A. Schafer, “Aluminio.”
- [14] P. Ing and E. Gustavo, “ESTRUCTURA Y PROPIEDADES Aluminio y sus aleaciones,” 2013.
- [15] C. Construcci, “El Aluminio,” pp. 1–43, 2015.
- [16] M. G. Navarro Rodríguez, “Efecto del tratamiento térmico de rehomogeneizado y reenvejecido RRA para la microestructura y dureza de un Aluminio 7075 - T6.”
- [17] J. . Badía, J. M. Antoranz, P. Tarín, A. . Simón, and N. M. Piris, “Influencia del medio de ensayo y dirección de aplicación de la carga en el comportamiento a corrosión bajo tensiones de la aleación de aluminio 7075,” no. c, 2004.
- [18] Broncesval SL, “Aluminio,” 2015. [Online]. Available: <http://www.broncesval.com/productos/aluminio/96-aluminio-aleacion-zinc-7075-t-651>.
- [19] K. Senthil, M. A. Iqbal, P. S. Chandel, and N. K. Gupta, “Study of the constitutive behavior of 7075-T651 aluminum alloy,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 108, pp. 171–190, 2017.
- [20] N. Mahathaninwong, T. Plookphol, J. Wannasin, and S. Wisutmethangoon, “T6 heat treatment of rheocasting 7075 Al alloy,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 532, pp. 91–99, 2012.
- [21] A. V. Coque Paucarima, “ANÁLISIS DEL DESGASTE POR FILO DE APORTACION EN HERRAMIENTAS DE MECANIZADO PARA EL ALUMINIO AA 7075-T6 (Prodax) EN EL PROCESO DE FRESADO PLANO EN UN CENTRO DE MECANIZADO,” Universidad de las Fuerzas Armadas, 2018.
- [22] J. L. Marulanda and A. Zapata, “Tratamientos Térmicos Aplicables a Las Aleaciones Hipereutectoides Zinc-Aluminio Con Un 22-27 % De Aluminio,” 2007.
- [23] Y. R. O and E. Carrasquero, “Efecto de la composición química en el comportamiento mecánico de recubrimientos galvanizados por inmersión en



caliente : una revisión The Effect of Chemical Composition on Mechanical Behavior Of Galvanized Coatings By Hot Dip : A Review,” pp. 30–39, 2017.

- [24] G. González and Y. Rico, “CAMBIOS MICROESTRUCTURALES Y QUÍMICOS DE LA ALEACIÓN Zn-10Al,” *Acta Microsc.*, vol. 22, no. 1, pp. 118–125, 2013.
- [25] J. M. Antoranz Pérez, “DESARROLLO DE NUEVOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS PARA ALEACIONES AVANZADAS DE INTERÉS AEROSPAIAL,” UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, 2012.
- [26] A. Conde del Campo, “Estudio electroquímico del proceso de corrosión de las aleaciones de aluminio-litio de interés aeroespacial,” UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID, 2002.
- [27] R. Barrera Gutierrez, “Como abordar los daños Estructurales no contenidos en el Manual de Reparaciones Estructurales,” INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, 2015.
- [28] M. Roldán Gálan, “Técnicas de Obtención de Grano Metalográfico en el Rango Milimétrico y Centimétrico Mediante Diversos Tratamiento Térmicos y Mecánicos,” 2007.
- [29] F. Pareira *et al.*, “Propiedades mecánicas en torsión de la aleación de aluminio AA6061 con diferentes tratamientos térmicos,” Valencia, No. 2, 2010.
- [30] M. Alejandro, S. Alonso, L. Guadalupe, and C. Ávila, “Rolado en frío y tratamiento térmico de recocido en aceros bajo carbono,” Mexico, pp. 1–10, 2017.
- [31] S. Verheyden, L. Pires Da Veiga, L. Deillon, and A. Mortensen, “The effect of size on the plastic deformation of annealed cast aluminium microwires,” *Acta Materialia Inc.*, 2019.
- [32] D. Kiener, Z. Zhang, S. Šturm, S. Cazottes, and P. J. Imrich, “Advanced nanomechanics in the TEM : effects of thermal annealing on FIB prepared Cu samples,” San Francisco, 2012.
- [33] ASTM American Society for Testing and Materials Standards, “Standard

- Practice for Heat Treatment of Wrought Aluminum Alloys, B918,” vol. 02, 2002.
- [34] J. A. Perez Patiño, “Tratamientos Térmicos de los Aceros,” Universidad Autonoma de Nuevo Leon, 1996.
- [35] V. M. Arana Aburto and N. D. Huaman Meléndres, “Influencia de los Tratamientos Térmicos T6, T73 Y RRAs sobre la resistencia a la corrosión intergranular de la aleación de aluminio AA7075,” Universidad Nacional de Trujillo, 2015.
- [36] emco group, “EMCOMAT E-200 MC for the manual or cycle-controlled machining of large workpieces.” .
- [37] TESTRESOURCES GROUP, “Universal Test Machines R Series Computerized Controller.” .
- [38] Nabertherm Group., “Maquinaria de Laboratorio.” .
- [39] G. D. E. D. Minero, “Perfil del mercado de Silice,” 2014.
- [40] J. Eduardo, S. Trujillo, and A. De, “RESISTENCIA DE MATERIALES BASICA PARA ESTUDIANTES DE INGENIERIA,” Primera ed., Colombia: Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia, 2007.
- [41] A. Loizaga and J. Sertucha, “Investigación Química Defectos metalúrgicos generados por la presencia de gases en el metal fundido,” 2008.
- [42] V. G. Martinez Cabezas and D. F. Rodriguez Gomez, “ESTUDIO DE LA FORMACION DE PRECIPITADOS EN LA MICROESTRUCTURA DE UN ALUMINIO 6063-T5 ENVEJECIDO A UNA TEMPERATURA DE 170 ° C DURANTE TIEMPOS DE 12 , 18 , 24 , 48 , 72 Y 96 HORAS USANDO MICROSCOPIA OPTICA Y ELECTRONICA DE BARRIDO.” ,2015.

## ANEXOS

### Anexo 1. Factura de realización de ensayos de microestructura y dureza.

#### EPN FACTURA ELECTRÓNICA

Para: francisco199193@hotmail.com  
Asunto: EPN FACTURA ELECTRÓNICA



**Estimado(a):**

GARY FRANCISCO MORILLO ORTEGA

**Una nueva Factura Electrónica está disponible para usted**

#### REFERENCIAS

**Factura Número:** 001-003-0050705

**Total Factura:** 235.2 USD

**Fecha Factura:** 2019/04/02

**Ambiente:** PRODUCCION

**Clave de Acceso:** 0204201901176000562000120010030000507051722023712

**Estado:** AUTORIZADO

**Fecha Aut:** 02/04/2019 12:11:42

**Usted puede revisar este comprobante en:**

<http://www.epn.edu.ec/sistema-integrado-de-informacion/facturacion-electronica/>

**Usuario:** 0401593884

**Contraseña:**

**Si tiene alguna inquietud no dude en contactarnos:**

[asistencia.tecnica@epn.edu.ec](mailto:asistencia.tecnica@epn.edu.ec)

**DIRECCION DE GESTION DE LA INFORMACION Y PROCESOS**

1

## Anexo 2. Informe de orden de trabajo ensayos micro estructura dureza.



**ESCUELA POLITECNICA NACIONAL**  
**DEPARTAMENTO DE MATERIALES**  
**LABORATORIO DE METALOGRAFÍA,**  
**DESGASTE Y FALLA**

### Orden de Trabajo No. 0006232

**Solicitado por:** Gary Morillo  
Luis Calderón

**Muestras Suministradas por:** Gary Morillo  
Luis Calderón

**Tipo de trabajo:** Análisis metalográfico y medición de dureza.

**Fecha:** Quito, 03 de Abril del 2019

#### 1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la Escuela Politécnica Nacional, dos probetas de aluminio, según especificaciones del cliente aluminio 7075T651, con la finalidad de realizar el análisis metalográfico y ensayo de dureza como parte complementaria del proyecto de titulación de Ingeniería Mecánica "Análisis de la influencia de los tratamientos térmicos (recocido-revenido) de las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 7075T651 mediante ensayos de tracción". Fotografía N°1.

#### 2. IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS.

Los elementos a los cuales se les realizó el análisis se los identifica de la siguiente manera. Tabla N° 1.

Tabla N° 1. Identificación la de muestra

Muestra	Simbología	Observaciones
Aleación de aluminio 7075T651 material base	MB	Diámetro $\Phi = 19,9$ mm y altura de 20 mm.
Aleación de aluminio 7075T651 tratada térmicamente	Revenido 6h	Diámetro $\Phi = 19,9$ mm y altura de 28 mm

#### 3. MAPEO DE DUREZAS

El mapeo de durezas se lo realizó en la superficie de las muestras de manera transversal, obteniendo los resultados que se observan en la Tabla N° 2.



### Anexo 3. Resultados de ensayo de dureza.

Tabla N° 2. Valores de dureza obtenidos.

Muestra	1	2	3	4	5	Promedio *HRB
MB	89	89	89	88	90	89
Revenido 6h	89	89	90	90	89	90

\* HRB= dureza rockwell B

#### 4. RESULTADO METALGRÁFICO

Tabla N° 3. Análisis Metalográfico

Muestra		OBSERVACIONES
MB	100X	La microestructura corresponde a un aluminio con presencia de microrechupes e inclusiones de cobre (Cu) y precipitados de segunda fase (puntos negros). Fotografía N° 2.
	500X	Matriz de aluminio, detalle de los microrechupes e inclusiones de cobre (Cu). Fotografía N° 4.
Revenido 6h	100X	La microestructura es no homogénea, que corresponde a un aluminio con presencia de microrechupes y precipitados de segunda fase (puntos negros). Fotografía N° 3.
	500X	Matriz de aluminio, presencia de precipitados en forma de dendritas y microrechupes. Fotografía N° 5.
	1000X	Detalle de los precipitados en forma de dendritas y microrechupes. Fotografía N° 6.

**Nota:** Se anexa 6 fotografías.

**Atentamente:**  
Informe

Elaborado por

  
Ing. Patricia Prpaño

Especialista del Laboratorio de Metalografía,  
Desgaste y Falla.

Revisado por:





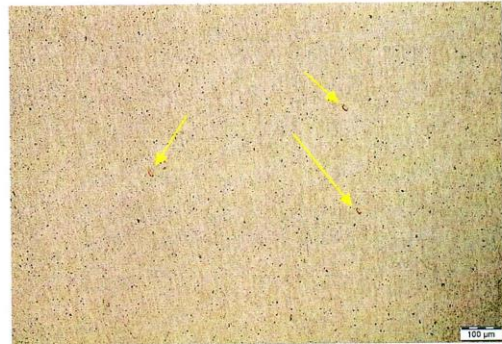
Jefe del Laboratorio de Metalografía,  
Desgaste y Falla.



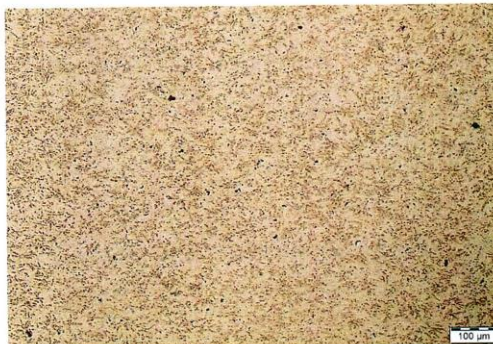
**Anexo 4. Resultados de ensayo de microestructura.**



**Fotografía N° 1.** Probetas proporcionadas por el cliente al Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla.



**Fotografía N° 2.** MB, la microestructura que presenta corresponde a un aluminio con presencia de precipitados de segunda fase e inclusiones de cobre (Cu).



**Fotografía N° 3.** Revenido 6h, la microestructura no homogénea, que corresponde a un aluminio con presencia de precipitados de segunda fase.



**Fotografía N° 4.** MB, matriz de aluminio, detalle de los precipitados de segunda fase (puntos negros) e inclusiones de cobre (Cu).



**Fotografía N° 5.** Revenido 6h, matriz de aluminio, presencia de precipitados en forma de dendritas y microrechupes.



**Fotografía N° 5.** Revenido 6h, detalle de los precipitados en forma de dendritas y microrechupes.



Orden de Trabajo No. 0006232

Anexo 5. Factura comercial de adquisición del aluminio 7075 - T651



AV. DE LA PRENSA N42-50 - SECTOR LA "Y"  
 TELEFAX: 2466 113 • 2433 826  
 www.importcom.com.ec  
 e-mail: ventas@importcom.com.ec  
 QUITO - ECUADOR

**CERTIFICADO DE CONFORMIDAD CON EL PEDIDO ESTABLECIDO POR  
 TRAIID VILLARROYA HNOS, S.L. SEGÚN EN10204-2,2**

Certificate of conformity according to EN10204-2.2

Cliente / Customer : **LEÓN REA VÍCTOR HUMBERTO (IMPORTCOM)**  
 Factura / Invoice : **4558**  
 Fecha emisión / Date : **10.10.2018**  
 Producto / Product : **DURALUMINIO 7075 Ø20, Ø25, Ø35, Ø40, Ø50, Ø65, Ø130, Ø180**

**ANÁLISIS QUÍMICO / CHEMICAL ANALYSIS**

material	% mín.	% máx.	material	% mín.	% máx.	material	% mín.	% máx.	material	% mín.	% máx.
Si		0.40	Mg	2.10	2.90	IMPUR		0.15			
Fe		0.50	Cr	0.18	0.28	Al	RESTO				
Cu	1.20	2.00	Zn	5.10	6.10						
Mn		0.30	Ti		0.20						

**CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS / MECHANICAL CHARACTERISTICS**

Limite de alargamiento Elongation limit N/mm2		Resistencia a la T. RM Tensile strength N/mm2		Alargamiento Elongation A5 A10		Dureza HBS Hardness	
mín.	máx.	mín.	máx.	%	%	mín.	máx.
460		525			6	157	

**Certificamos que los materiales indicados han sido fabricados conforme a las especificaciones del sistema de calidad UNE EN ISO 9001:2008 y cumplen plenamente con los parámetros técnicos especificados en su pedido.**

We hereby certify, that the material described above complies with the terms of the order contract

Pueden descargarse la ficha técnica y hoja de seguridad en la página web : [www.traidvillarroya.com](http://www.traidvillarroya.com)  
 You can download the technical specifications and material safety sheet from our website : [www.traidvillarroya.com](http://www.traidvillarroya.com)



Director de Calidad / Quality Manager

Los valores recogidos en este informe son en base a nuestra información recibida de los laboratorios especializados de nuestros proveedores principales de materia prima.  
 The values given in this certificate of conformity are based on information received by our raw material suppliers laboratories.



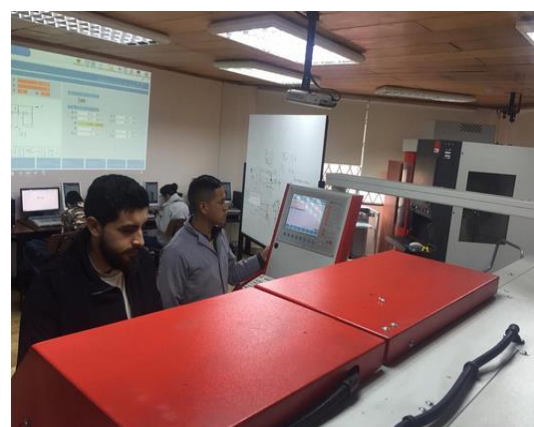
**Anexo 6.** Elaboración de probetas según norma ASTM –E8



**Anexo 7.** Proceso de mecanizado de probetas. Elaborado por Gary Morillo y Luis Calderón.



**Anexo 8.** Finalización de mecanizado de probetas. Elaborado por Gary Morillo y Luis Calderón.





**Anexo 9.** Tratamiento térmico de recocido. Elaborado por Gary Morillo y Luis Calderón.



**Anexo 10.** Enfriamiento en arena sílica. Elaborado por Gary Morillo y Luis Calderón.



**Anexo 11.** Tratamiento térmico de revenido. Elaborado por Gary Morillo y Luis Calderón.



**Anexo 12.** Enfriamiento dentro del horno de revenido. Elaborado por Gary Morillo y Luis Calderón.



**Anexo 13.** Colocación de probeta en máquina Testresources. Elaborado por Gary Morillo y Luis Calderón.



**Anexo 14.** Colocación de string gauge en las probetas. Elaborado por Gary Morillo y Luis Calderón.





**Anexo 15.** Calibración de string gauge. Elaborado por Gary Morillo y Luis Calderón.



**Anexo 16.** Inicio de ensayo de tracción. Elaborado por Gary Morillo y Luis Calderón.



**Anexo 17.** Culminación de ensayo de tracción. Elaborado por Gary Morillo y Luis Calderón.

