

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
UNIDAD VALLE DE LAS PALMAS – CAMPUS TIJUANA**



**Estudio del Efecto de los tratamientos Termo-Mecánicos de (Solubilizado –
Envejecido – Trabajo en frío) en las propiedades Mecánicas de Aluminios, para
su uso en aplicaciones Ingenieriles**

TESIS

**Que para obtener el título de:
INGENIERA MECÁNICA**

Presenta:

Claudia Michelle Hidalgo Najar

Directores de Tesis:

M. en C. Benjamín González Vizcarra

Tijuana, Baja California

Agosto, 2019

Agradecimientos

La realización de una tesis derivada de un trabajo de investigación constantemente es fruto de ideas, proyectos y esfuerzos previos correspondientes a otras personas.

Se agradece al CA de "Optimización de sistemas Mecánicos" con apoyo de los proyectos de la Convocatoria Interna de Proyectos sin financiamiento 351/2285 Determinación De Principales Parámetros T, V I De Deposición De Películas Delgadas De TiB2 En Sustratos Metálicos De Aluminio 6061, M.C. Benjamín González Vizcarra, Dra. Miriam Siqueiros Hernández, M.C. Alberto Delgado Hernández, M.C. José Navarro Torres y Med. Miguel Ávila Puc.

En este caso ofrezco mi más grande agradecimiento a quien también se desempeñó como mi tutor a lo largo de mis estudios profesionales y como director de mi tesis, el M. C. Benjamín González, por la motivación, dedicación, apoyo y dirección que me ha brindado en este trabajo. Gracias por la confianza y mentoría ofrecida.

De igual manera, por su orientación y atención a mis consultas, mi gratitud a la Dra. Miriam Siqueiros. Gracias por su amabilidad, su tiempo, consejos e ideas.

Al CNyN Israel Gradilla Martínez por su apoyo en el análisis de MEB y a Martha Eloisa Aparicio Ceja por su apoyo en el análisis de DRX.

Al Instituto de Investigaciones de Materiales de la UNAM, en especial al Dr. Ignacio Alejandro Figueroa Vargas.

Gracias a mis padres Claudia y Miguel por darme el ejemplo del trabajo duro y la dedicación, y a hermanos por haber sido mi parte de mi crecimiento durante toda mi carrera universitaria.

Gracias a mis amigos, en especial a mi gran amiga Jasmin por ser parte significativa de mi vida, por siempre brindarme su apoyo moral, ayudarme a ver el lado positivo en los momentos difíciles que se presentaron en el camino, por siempre confiar y creer en mí.

A todos, muchas gracias.

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a la memoria de mi abuelo Marcos Hidalgo, un hombre dedicado y luchador por su familia. Gracias por siempre estar presente en los primeros años de mi vida, por todo el amor, por haber sido un gran ejemplo a seguir, y por tus enseñanzas.

A mi madre, por ser el pilar más importante y por siempre demostrar su cariño y apoyo incondicional in importar nuestras diferencias de opiniones.

A mi padre, a pesar de nuestra distancia física, te siento siempre, sé que este momento es tan especial para ti como lo es para mí.

Michelle Hidalgo

“Soy de las que piensan que la ciencia tiene una gran belleza. Un científico en su laboratorio no es solo un técnico: es también un niño colocado ante fenómenos naturales que le impresionan como un cuento de hadas.”

- Marie Curie

“Science is beautiful when it makes simple explanations of phenomena or connections between different observations. Examples include the double helix in biology and the fundamental equations of physics”

- Stephen Hawking

Resumen

Se comparan las propiedades mecánicas tensiles y de dureza de aluminio 6061-T6 respecto a la norma ASTM B 308-10 y fichas técnicas de dos proveedores locales. Los valores obtenidos de las curvas de esfuerzo-deformación, resultantes de los ensayos de tensión tales como; tensión de ruptura, esfuerzos máximos, porcentaje de elongación y límite elástico, muestran que ambos proveedores cumplen con la norma y ficha técnica del mismo.¹

En la segunda etapa del trabajo se realizó la modificación de las propiedades mecánicas de las muestras maquinadas con el mismo material. Siguiendo un proceso en el que se llevaron a cabo tratamientos térmicos de solubilización, envejecido y endurecimiento por deformación. Para después ensayarlas a tensión para obtener los datos resultantes de los tratamientos aplicados y determinar la temperatura de envejecido con la que se obtiene un mejor resultado en las propiedades mecánicas.

Los tratamientos térmicos aplicados a los aluminios son de bastante importancia para modificar sustancialmente sus propiedades, en la serie 6xxx, el fenómeno conocido como envejecimiento natural afecta las aleaciones de aluminio a una temperatura ambiente, si este proceso se realiza a una mayor temperatura se le conoce como envejecimiento artificial. Este tipo de tratamiento afecta significativamente las propiedades del material.

El objetivo de los tratamientos térmicos es mejorar las propiedades del material al que se le apliquen con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, especialmente la dureza, resistencia y elasticidad. El material utilizado en este trabajo se clasifica como un tipo de aleación forjada; debido al tipo de aleación (Al-Mg-Si) corresponde a la serie 6xxx que es endurecible por envejecimiento.

Abstrac

The mechanical properties of tensile and hardness of 6061-T6 aluminum respect to ASTM B 308-10 and technical specifications of two local suppliers are compared. The values obtained from the stress-strain curves obtained from tests such as stress; breakdown voltage, maximum efforts, percent elongation and yield strength, show that both of the suppliers is compliant with the standards and technical specifications of the same.

In the second stage of the work, the mechanical properties of the samples machined with the same material were modified. Following a process in which thermal treatments such as solubilization, aging and work hardening were carried out. To then test them under tension to obtain the data resulting from the treatments applied and determine the aging temperature with which a better result in the mechanical properties were obtained.

The heat treatments applied to aluminum are of considerable importance to substantially modify their properties, in the 6xxx series, the phenomenon known as natural aging affects aluminum alloys at an ambient temperature, and if this process is carried out at a higher temperature it is known like artificial aging. This type of treatment significantly affects the properties of the material.

The objective of heat treatments is to improve the properties of the material to which they are applied in order to improve their mechanical properties, especially hardness, strength and elasticity. The material used in this work is classified as a type of forged alloy; Due to the type of alloy (Al-Mg-Si) it corresponds to the 6xxx series that is hardenable by aging.

I. INTRODUCCIÓN

Nuestro entorno tecnológico está compuesto por diferentes materiales. Éstos han sido de gran importancia para el bienestar de la humanidad a lo largo de la historia, desde la edad de piedra, donde los primeros homínidos cortaban piedras con el fin de utilizarlas como armas de caza. Pasando después a la edad de bronce, la cual se reconoce como el principio de la metalurgia, por el descubrimiento de la aleación de cobre y estaño para producir mejores armas y herramientas.²

Hoy en día, la mayoría de los productos son hechos con materiales compuestos. Estos son materiales multifase, que conservan una proporción significativa de las propiedades de las fases constituyentes, de manera que presente la mejor combinación posible.³ Para la fabricación de un nuevo material, se tiene que tomar en cuenta su microestructura, función y costo del material.

En la elaboración de un producto se debe de tomar en cuenta el desempeño del material, su composición química y la manera de fabricar el producto. Estos aspectos están muy ligados, ya que deben de equilibrarse para transformar el, o los materiales, en un producto útil. Otro factor muy importante a considerar en la elaboración de dicho producto, es la estructura del material, ya que tiene una gran influencia en sus propiedades, debido a que, si se presenta algún cambio en su estructura interna, dichas propiedades serán modificadas, pero estos cambios son microscópicos, por lo tanto, para su análisis se deben utilizar microscopios electrónicos.⁴

Un campo de la industria, en la que los materiales son de crucial importancia, es la industria aeroespacial, en la cual, la selección de materiales, y procesos para su uso en la producción de plataformas aeroespaciales, es de gran importancia considerar el costo de los materiales que se van a utilizar, para disminuir el peso de los aviones, y que éstos sean más ligeros, resistentes, duraderos, confiables y a bajo costo. Lo anterior también puede hacer que tengan un menor consumo de combustible. Un material que ayuda en varios de los requisitos anteriores, es el aluminio. Es por eso que las aleaciones de aluminio son cada vez más usadas en la industria, debido a sus características, tales como: su peso, resistencia a la corrosión, su alta conductividad térmica y eléctrica. El costo y la resistencia del aluminio, así como de sus aleaciones, lo colocan entre los materiales más versátiles desde el punto de vista de la fabricación.⁵

Un tipo especial de aleación de aluminio (Al-Mg-Si-Cu), es el caracterizado como 6061-T6. Es de gran importancia evidenciar que las características de esta aleación, que suministra el proveedor en el mercado, concuerden con las designadas en la literatura, ya que este material es el más utilizado en las

aplicaciones aeroespaciales, debido a las propiedades antes mencionadas, además de bajo peso, proporción de resistencia mecánica, buena maleabilidad y resistencia a la corrosión.

Durante esta investigación, se realizan pruebas en las que se miden las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 6061-T6, para obtener las características del mismo, ofertado por los proveedores de la región, y hacer comparaciones, para así tener la garantía que el producto es el requerido según la norma ASTM B 308-10.⁶

Una vez realizada la caracterización del material adquirido con los proveedores A y B se realizó una serie de tratamientos térmicos (solubilizado y envejecido) y un proceso de trabajo en frío fueron realizados sobre muestras de Al 6061-T6 con el objetivo de estudiar el efecto de la temperatura y la deformación plástica en las propiedades mecánicas de la aleación. Para ello, las muestras tratadas fueron caracterizadas mediante ensayos de tensión y dureza. Por medio de dichas pruebas se pretende determinar los cambios en la tenacidad, ductilidad, resistencia, dureza, esfuerzo de cedencia, y esfuerzo máximo del material.

Los procesos de solubilizado y envejecido fueron aplicados con objetivos distintos. El primer tratamiento busca conseguir una solución sólida homogénea, mientras que el segundo, trata de mejorar y estabilizar las propiedades mecánicas del material favoreciendo la precipitación de pequeñas fases de Al, Mg o Si, entre otras.

A partir de una barra de aluminio 6061-T6 con un grosor de 6.35 mm, se maquinaron un total de veinticuatro probetas rectangulares tipo subsize bajo la norma ASTM E8-16 ⁷ , ver imagen. Esta presentación comercial fue seleccionada en base a los positivos resultados de su caracterización en comparación con la norma ASTM B308M-10 ⁸ presentes en el estudio **“Análisis comparativo de las propiedades mecánicas del aluminio 6061-T6 con base a la norma ASTM B 308-10 y fichas técnicas de proveedores locales”**.⁹

II. OBJETIVO GENERAL

Caracterizar una aleación de aluminio 6061-T6, mediante el análisis mecánico y dureza, con el fin de comparar los resultados con la norma ASTM B 308-10 y los del proveedor (aluminio comercial), y así validar que el aluminio que se comercializa en la región, sea el indicado para aplicaciones aeroespaciales.

Determinar los parámetros óptimos de Temperatura y porcentaje de acritud para lograr un cambio significativo en las propiedades mecánicas del Aluminio a partir de la materia prima utilizada, siendo esta el Aluminio de la serie 6061-T6 para una obtener un aluminio con mejores propiedades mecánicas (mayor dureza, menos fragilidad) aplicando métodos de tratamientos térmicos (normalizado, temple y revenido).

II.1 Objetivos Específicos

- Conocer y determinar los tratamientos térmicos necesarios para obtener un aluminio con mayor dureza.
- Contrastar y determinar los parámetros óptimos de esta técnica de normalizado, revenido y endurecimiento por deformación.
- Estudiar los parámetros establecidos de temperatura, tiempo y porcentaje de endurecimiento por deformación.
- Estudiar las curvas de esfuerzo – deformación obtenidas de ensayar a tensión las muestras del aluminio.
- Determinar la influencia de los parámetros establecidos y la combinación adecuada para la obtención de un aluminio con mayor dureza y menor fragilidad.

III. JUSTIFICACIÓN

Se va a caracterizar material aluminio 6061-T6 de los dos principales proveedores de este material en la región de Tijuana para hacer comparaciones de los resultados obtenidos durante las pruebas mecánicas y microestructurales con los datos de las fichas técnicas expedidas por cada proveedor y comparar también con la norma ASTM B-308, para así saber que proveedor cumple con las especificaciones dictadas en la norma y ver su fiabilidad con la ficha que expide, si es o no realmente el material que se está vendiendo.

La importancia de este estudio es corroborar el material vendido por los dos proveedores ya que el aluminio 6061-T6 es un material muy común empleado en la industria aeroespacial y en otras aplicaciones, la cual tiene que cumplir con las especificaciones dictadas en la norma ASTM B-308 para que dicho material pueda ser empleado por la cual siempre se buscan propiedades mecánicas específicas dependiendo de la aplicación que se le vaya a dar.

Para poder realizar el presente estudio del aluminio se tiene que conocer las propiedades mecánicas en la cual se realizaron pruebas de tensión y dureza, y para poder conocer la microestructura del aluminio se utilizaron técnicas de microscopía electrónica de barrido y ataque químico con ácido fluorhídrico.

La literatura determina que para eliminar las tensiones internas sufridas tras una conformación mecánica en el aluminio 6061 es necesario llevar a cabo el tratamiento de normalizado en un horno a una temperatura de 555°C, por un periodo de 1 hora, para lograr que su estructura interna se vuelva más uniforme y su tenacidad aumente considerablemente; por otra parte al realizar el proceso de temple en agua la dureza de nuestro material aumentara pero será muy frágil y poco dúctil debido a las tensiones internas generadas. Lo anterior se puede evitar realizando el tratamiento de revenido en un horno a tres temperaturas 150, 175 y 200°C, por un periodo de 1 hora, con este tratamiento lograremos reducir las tensiones internas de nuestro aluminio y evitaremos que sea frágil, sacrificando un poco de su dureza.

Después de realizar los tratamientos térmicos antes mencionados se procede a efectuar el endurecimiento por deformación en frío, por medio del cual nuestro aluminio aumentara su dureza y resistencia, sacrificando un poco de su ductilidad, a medida que es deformado plásticamente.

INDÍCE

Agradecimientos.....	II
Dedicatoria.....	III
Resumen	IV
Abstrac.....	II

I. INTRODUCCIÓN	III
II. OBJETIVO GENERAL	V
II.1 Objetivos Específicos	V
III. JUSTIFICACIÓN	VI

CAPITULO I - ANTECEDENTES TEÓRICOS

1.1 HISTORIA DE LOS MATERIALES.....	19
1.1.1 Edad de Piedra.....	20
1.1.2 Edad de bronce	20
1.1.3 Edad del hierro	21
1.1.4 Época contemporánea	22
1.1.4.1 Polímeros	23
1.1.4.2 Titanio	24
1.1.4.3 Uranio.....	25
1.1.4.4 Aluminio	26
1.2 CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES	28
1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES.....	30
1.3.1 Metales	30
1.3.2 Cerámicos.....	31
1.3.3 Polímeros.....	32
1.3.4 Materiales compuestos.....	32
1.3.5 Semiconductores	32

1.4 ESTRUCTURA, PROPIEDADES Y PROCESAMIENTO DE LOS MATERIALES	33
1.4.1 Propiedades físicas de los materiales	34
1.4.2 Propiedades mecánicas de los materiales	34
1.4.3 Estructura	35
1.4.4 Procesamiento	35
1.5 PROPIEDADES DE LOS METALES	36
1.5.1 Propiedades físicas de los metales	36
1.5.1.1 Propiedades volumétricas y de fusión	36
1.5.1.2 Propiedades Térmicas	38
1.5.1.3 Difusión de Masa	39
1.5.1.4 Propiedades Eléctricas y Magnéticas.....	41
1.5.1.5 Propiedades Químicas.....	42
1.5.1.6 Propiedades ópticas.....	42
1.5.1.7 Propiedades acústicas.....	42
1.5.2 Propiedades mecánicas de los metales.....	43
1.6 CLASIFICACIÓN DE LA DEFORMACIÓN DE LOS MATERIALES.....	44
1.6.1 Deformación Unitaria	44
1.6.2 Deformación Elástica.....	44
1.6.3 Deformación Plástica	45
1.7 TRATAMIENTOS TÉRMICOS	45
1.7.1 Temple.....	46
1.7.2 Templabilidad	47
1.7.3 Revenido	47
1.7.4 Martempering.....	48
1.7.5 Temple Superficial.....	48
1.8 MODIFICACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS PARTIR DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS	48

CAPITULO II - ESTADO DEL ARTE

2.1 GENERALIDADES DEL ALUMINIO	51
2.1.1 Características físicas.....	51
2.1.2 Características mecánicas	52
2.2 SERIES DE ALUMINIO SEGÚN SUS ALEANTES	52
2.3 CLASIFICACIÓN DEL ALUMINIO SEGÚN SU PROCESO.....	53
2.3.1 Series de aluminio para fundición.....	54
2.3.2 Series de aluminio para forja.	55
2.3.2.1 Aleaciones de forja no tratadas térmicamente (acritud)	56
2.3.2.2 Aleaciones de forja tratadas térmicamente:.....	58
2.3.2.3 Endurecimiento por acritud	59
2.4 ESTADOS DE TRATAMIENTO DEL ALUMINIO	59
2.5 CURVA ESFUERZO DEFORMACION - PROPIEDADES MECÁNICAS	62
2.5.1 Concepto de esfuerzo	63
2.5.2 Curva de esfuerzo-deformación ingenieril.....	63
2.5.3 Resistencia de los materiales.....	65
2.5.4 Ductilidad.....	66
2.6 ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN.....	66
2.6.1 Exponente del endurecimiento por deformación (n)	67
2.6.2 Sensibilidad a la velocidad de deformación (m).....	67
2.6.3 Efecto Bauschinger	67
2.7.1 Norma ASTM B-308	68
2.7.2 Norma ASTM B-557	69
2.7.3 Norma ASTM E-8.....	70

CAPITULO III - METODOLOGÍA Y EXPERIMENTACIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN	75
3.2 DESARROLLO	76

3.3 ETAPA I: CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL	77
3.3.1 Material empleado en la Experimentación	77
3.3.2 Maquinado de probetas	77
3.3.3 Ensayo de Tensión	79
3.3.4 Adecuación de muestras para metalografía y dureza.....	81
3.3.5 Ataque Químico	84
3.3.6 Metalografía	85
3.3.7 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).....	85
3.3.8 Sub-Etapa I: Metodología experimental	86
3.3.11 Sub-Etapa II: Desarrollo experimental	87
3.4 ETAPA II: APLICACIÓN DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS Y DIFORMACIÓN PLÁSTICA PARA MODIFICACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS.....	88
3.4.1 Preparación de la Muestra.....	88
3.4.2 Tratamientos Térmicos	89
3.4.2.1 Solubilizado	90
3.4.2.2 Enfriamiento Rápido	90
3.4.2.3 Envejecido.....	91
3.4.3 Deformación Plástica	92
3.4.4 Ensayo de Tracción.....	94
3.4.5 Pruebas de Dureza.....	94

CAPITULO IV - DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DE LA PRIMERA ETAPA	97
4.1.1 Ensayo de Tracción.....	97
4.1.2 Metalografía	100
4.1.2.1 Proveedor A	100
4.1.1.2 Proveedor B	102
4.1.4 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	103

4.1.4.1 Proveedor A	103
4.1.4.2 Proveedor B	104
4.2 RESULTADOS DE LA SEGUNDA ETAPA	106
4.2.1 Muestras Testigo	106
4.2.1.1 Curva de esfuerzo-deformación ($\sigma - \epsilon$) de muestra testigo.	106
4.2.2 Solubilizado.....	107
4.2.2.1 Curva de esfuerzo-deformación ($\sigma - \epsilon$) de muestra solubilizada con TT 555°C	107
4.2.2 Solubilizado con Envejecido.....	108
4.2.2.1 Curva de esfuerzo-deformación ($\sigma - \epsilon$) de muestra solubilizada con TT 555°C y envejecida a 150°C.....	108
4.2.2.1 Curva de esfuerzo-deformación ($\sigma - \epsilon$) de muestra solubilizada con TT 555°C y envejecida a 175°C	109
4.2.2.1 Curva de esfuerzo-deformación ($\sigma - \epsilon$) de muestra solubilizada con TT 555°C y envejecida a 200°C	110
4.2.3 Endurecimiento por Deformación (Trabajo en Frío).....	111
4.2.3.1 Curva de esfuerzo-deformación ($\sigma - \epsilon$) de muestra solubilizada con TT 555°C, envejecida a 150°C y trabajo en frío.	111
4.2.3.1 Curva de esfuerzo-deformación ($\sigma - \epsilon$) de muestra solubilizada con TT 555°C, envejecida a 175°C y trabajo en frío.	112
4.2.3.1 Curva de esfuerzo-deformación ($\sigma - \epsilon$) de muestra solubilizada con TT 555°C, envejecida a 200°C y trabajo en frío.	113
4.2.4 Concentrado de Datos	114
4.2.4.1 Curva de esfuerzo-deformación ($\sigma - \epsilon$) de todas las muestras caracterizadas y tabla de promedios.	114
4.2.5 Resultados de Dureza.....	117
4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS	119
CAPITULO V - CONCLUSIÓN	
5.1 CONCLUSIÓN	122

5.2 TRABAJOS FUTUROS	125
----------------------------	-----

CAPITULO VI - BIBLIOGRAFÍA

6.1 BIBLIOGRAFÍA.....	127
-----------------------	-----

Concentrado de Figuras

Figura 1.1 (a) Realización de herramientas y armas de piedra, cuarzo, obsidiana, etc. (b) Hombre fabricando herramienta de piedra.....	20
Figura 1.2 El bronce es un metal idóneo para la fabricación de armas y joyería. (a) Mascara de bronce y (b) Joyería hecha de bronce.	21
Figura 1.3 (a) Herramientas fabricadas de hierro, (b) Casco usado para pelea elaborada de hierro.....	22
Figura 1.4 Mano de obra en la industria durante la revolución industrial.	23
Figura 1.5 Relación de la ciencia e ingeniería de los materiales con otras disciplinas.	29
Figura 1.6 Ejemplos representativos, aplicaciones y propiedades para cada categoría de materiales. ¹³	30
Figura 1.7 Resistencias representativas de diversas categorías de materiales.....	33
Figura 1.8 Relación tripartita entre estructura, propiedades y método de procesamiento	34
Figura 1.9 Tabla de propiedades volumétricas en unidades tradicionales de Estados Unidos para materiales selectos de la ingeniería	38
Figura 1.10 Valores de propiedades térmicas comunes para materiales seleccionados. Los valores son para la temperatura ambiente, y cambian para temperaturas diferentes	39
Figura 1.11 Difusión de masa: a) modelo de átomos en dos bloques sólidos en contacto: 1) al principio, cuando las dos piezas se juntan, cada una tiene su composición individual; 2) después de cierto tiempo ha ocurrido un intercambio de átomos; y 3) finalmente, sucede una condición de concentración uniforme. El gradiente de concentración dc/dx para el metal A, está graficado en el inciso b) de la figura. referecna	40
Figura 1.12 Resistividad de materiales selectos	42
Figura 1.13 a) Esfuerzos de tensión, compresión y corte; F es la fuerza aplicada. b) Ilustración que muestra cómo se define el módulo de Young en el caso de un material elástico. c) Material elástico no lineal	45
Figura 1.14 Gráfica de la resistencia de los materiales conforme el aumento de temperatura	46

Figura 1.15 Propiedades mecánicas modificadas según el tratamiento térmico aplicado.	49
Figura 2.1 Clasificación del aluminio según sus aleantes	53
Figura 2.2 Sistema de clasificación de aleaciones de aluminio	54
Figura 2.3 Diagrama de fases de Al-Mg. Las líneas discontinuas indican límites inciertos de solubilidad	57
Figura 2.4 Comparación del comportamiento elástico del acero y aluminio. Ante un esfuerzo dado, el aluminio se deforma de manera elástica tres veces más que el acero.....	64
Figura 2.5 El módulo elástico se determina a partir del esfuerzo-deformación expandiendo la escala para la deformación inicial	65
Figura 2.6 Desarrollo del endurecimiento por deformación a partir del diagrama de esfuerzo-deformación. Espécimen se esfuerza más allá de la resistencia de fluencia S_y antes de que se elimine el esfuerzo	66
Figura 2.7 Medidas para probeta cilíndrica en base a norma ASTM-E8	70
Figura 2.8 Dimensiones para especímenes en base a norma ASTM-E8	71
Figura 3.1 Diagrama de Flujo del proceso	76
Figura 3.2 Barra de aluminio para ser cortada en la sierra.	78
Figura 3.3. Haciendo mediciones con el vernier para hacer el marcado para realizar probetas.....	78
Figura 3.4 Probetas en el torno rebajando la parte central.....	79
Figura 3.5 a) probetas terminadas. b) probetas clasificadas y etiquetadas para cada uno de los proveedores.....	79
Figura 3.6. Ensayo de tensión a probeta.	80
Figura 3.7. Software de Máquina Universal de Ensayos Mecánicos SHIMADZU.	80
Figura 3.8 Se carean cada una de las muestras, respectivamente para cada proveedor.	81
Figura 3.9 Ambas muestras se encuentran careadas y con etiquetas para su identificación.	82
Figura 3.10 Material necesario para el desgaste de las muestras. Lijas del número 400 al 2000, agua potable y base de vidrio.....	82

Figura 3.11 Muestra de aluminio lista para ser desgastada.	83
Figura 3.12 Superficie desgastada de ambas muestras, finalización de lijado. ...	83
Figura 3.13 Muestra en proceso de pulido.	84
Figura 3.14 Ácido fluorhídrico al 0.5% (HF 0.5%).	85
Figura 3.15 Microscopio metalográfico Olympus	85
Figura 3.16. Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) en las muestras de aluminio 6061-T6.	86
Figura 3.17 Diseño de probeta en base a Norma ASTM-E8.	88
Figura 3.18 Horno para térmico para tratamiento de metales C1228/PM4.	90
Figura 3.19 Muestras pasando del horno al recipiente con agua para realizar el enfriamiento rápido.	91
Figura 3.20. Muestras después del normalizado introducidas nuevamente.	91
al horno para realizar el tratamiento de envejecido.	91
Figura 3.21 Colocación de probeta en Máquina Universal	92
de Ensayos Mecánicos SHIMADZU.	92
Figura 3.22 Máquina Universal de Ensayos Mecánicos SHIMADZU aplicando fuerza a probeta.	93
Figura 3.23 Probeta con deformación plástica aun en mordazas de la Shimadzu.	93
Figura 3.24 Cara lateral de muestra A13 después del ensayo de tensión.	94
Figura 3.25 Cara trasera de muestra A13 después del ensayo de tensión.	94
Figura 4.1 a) Metalografía de muestra a 50X atacada con HF 0.5% b) Vista cercana de la superficie del aluminio 6061-T6, MEB a 2000X. .	103
Figura 4.2 Espectrograma correspondiente a la zona 1, con elementos encontrados de Fe-Si-Al.	104
Figura 4.3 Espectrograma correspondiente a la zona 2, con elementos encontrados de Al-Mg-O-Si-K.	104
Figura 4.4 a) Metalografía de muestra a 50X atacada con HF 0.5% b) Vista cercana de la superficie del aluminio 6061-T6, MEB a 2000X. .	105
Figura 4.5 Espectrograma correspondiente a la zona 1, con elementos encontrados de Fe-Si-Al.	105

Figura 4.6 Espectrograma correspondiente a la zona 2, con elementos encontrados de Al-Si-O-Cl.	106
---	-----

Concentrado de Tablas

Tabla 2.1 Propiedades físicas más comunes del aluminio	51
Tabla 2.2 Límites de Composición Química	68
Tabla 2.3 Límites de Propiedad de Tensión.....	69
Tabla 2.4 Valores de Prueba de Dureza	69
Tabla 2.5 Pautas para Selección de Muestras Redondas y Extensibles, para sistema métrico	69
Tabla 2.6 Medidas para probeta cilíndrica en base a norma ASTM-E8.....	70
Tabla 2.7 Dimensiones para especímenes en base a norma ASTM-E8.....	71
Tabla 3.1 Control de muestras	89
Tabla 4.1 Propiedades mecánicas obtenidas de las muestras del proveedor A, y comparación de los datos obtenidos con la norma ASTM B 308-10 con la ficha técnica expedida del mismo proveedor.....	99
Tabla 4.2 Propiedades mecánicas obtenidas de las muestras del proveedor B, y comparación de los datos obtenidos con la norma ASTM B 308-10 con la ficha técnica expedida del mismo proveedor.....	99
Tabla 4.3 Resultados de la metalografía realizada a las muestras del proveedor A.	100
Tabla 4.4 Resultados de la metalografía realizada a las muestras del proveedor B.....	102
Tabla 4.5 Concentrado del promedio de las propiedades mecánicas de las 24 muestras.	116
Tabla 4.6 Valores de dureza promedio obtenidas con equipo Shimadzu Wilson.	117

Concentrado de Gráficas

Gráfica 4.1 Resultados de tensión obtenidos de las seis muestras del proveedor A.....	98
Gráfica 4.2 Resultados de tensión obtenidos de las seis muestras del proveedor B.....	98
Gráfica 4.3 Curva de Esfuerzo – Deformación ($\sigma - \epsilon$) de muestra testigo (A11 Y A21))de aluminio 6061 T6.	107
Gráfica 4.8. Curva de Esfuerzo – Deformación ($\sigma - \epsilon$) de muestra (B14 y B24) solubilizada con TT 555°C, envejecida a 150 °C y trabajo en frío.....	112
Gráfica 4.9. Curva de Esfuerzo – Deformación ($\sigma - \epsilon$) de muestra (B14 y B24) solubilizada con TT 555°C, envejecida a 175 °C y trabajo en frío.....	113
Gráfica 4.10. Curva de Esfuerzo – Deformación ($\sigma - \epsilon$) de muestra (B15 y B25) solubilizada con TT 555°C, envejecida a 200 °C y trabajo en frío.....	114
Gráfica 4.11 Curva de Esfuerzo – Deformación ($\sigma - \epsilon$) de todas las muestras.	115
Gráfica 4.12 Comportamiento de dureza Vs tratamiento térmico con equipo Shimadzu. (UNAM).....	117
Gráfica 4.13 Comportamiento de dureza Vs tratamiento térmico con equipo WILSON (ECITEC)	118
Gráfica 4.14. Dispersión de dureza Vs tratamiento térmico con equipo Shimadzu. (UNAM).....	118
Gráfica 4.15 Dispersión de dureza Vs tratamiento térmico con equipo WILSON (ECITEC)	119

CAPITULO I

ANTECEDENTES TEÓRICOS

1.1 HISTORIA DE LOS MATERIALES

Históricamente, el desarrollo y la evolución de las sociedades han estado íntimamente vinculados a la capacidad de sus miembros para producir y conformar los materiales necesarios para satisfacer sus necesidades. Los prehistoriadores han encontrado útil clasificar las primeras civilizaciones a partir de algunos materiales usados: Edad de Piedra, Edad del Cobre, Edad del Bronce, Edad de hierro. Esta última secuencia parece universal en todas las áreas, ya que el uso del hierro requiere una tecnología más compleja que la asociada a la producción de bronce, que a su vez requiere mayor tecnificación que el uso de la piedra.

Las primeras civilizaciones tuvieron una disponibilidad bastante más reducida de diferentes materiales que las civilizaciones más tecnificadas. Inicialmente sólo se disponía de materiales naturales o seminaturales como piedras, madera, arcilla, pieles, etc. Los metales no-preciosos raramente se encuentran en la naturaleza, sino que están en formas de minerales y se requiere un proceso de separación del metal puro a partir del mineral correspondiente. Con el transcurso del tiempo, en diversas áreas del planeta se llegó a técnicas para producir materiales con nuevas propiedades superiores a las de los naturales (principalmente aleaciones).

Hace relativamente poco tiempo que los científicos llegaron a comprender la relación entre elementos estructurales de los materiales y sus propiedades. Este conocimiento, adquirido en los últimos 200 años aproximadamente, los ha capacitado, en alto grado, para modificar o adaptar las características de los materiales. Quizá uno de los científicos más relevantes en este campo haya sido Willard Gibbs al demostrar la relación entre las propiedades de un material y su microestructura.

Se han desarrollado decenas de miles de materiales distintos con características muy especiales para satisfacer las necesidades de nuestra moderna y compleja sociedad, se trata de metales, plásticos, vidrios y fibras. Una de las grandes revoluciones de esta ciencia fue el descubrimiento de las diferentes fases térmicas de los metales y, en especial, del acero.

Actualmente los adelantos electrónicos más sofisticados se basan en componentes denominados materiales semiconductores. La historia de la humanidad ha estado ligada estrechamente a el tipo de materiales que cada sociedad ha desarrollado. Es por esto que se conocen varias etapas históricas en este sentido, sin que necesariamente exista una fecha exacta, o incluso, dándose en diferentes momentos en las diferentes sociedades humanas.³

1.1.1 Edad de Piedra

La Edad de Piedra (3000 a.C.) es el período de la prehistoria que abarca desde que los seres humanos empezaron a elaborar herramientas de piedra hasta el descubrimiento y uso de metales. La madera, los huesos y otros materiales también fueron utilizados (cuernas, cestos, cuerdas, cuero, etc.), pero la piedra (y, en particular, diversas rocas de rotura concoidea, como el sílex, el cuarzo, la cuarcita, la obsidiana) fue utilizada para fabricar herramientas y armas, de corte o percusión (figura 1.1).¹⁰

El hombre del neolítico descubrió que la arcilla (barro) se ablandaba al mezclarse con agua, y se endurecía al secarse. Este ciclo de ablandamiento – endurecimiento se podía repetir una y otra vez al ir añadiendo agua. Cuando se introducían los bloques de arcilla húmeda dentro de una hoguera por un determinado tiempo, éstos quedaban permanentemente endurecidos al enfriarse y eran resistentes al agua.



(a)



(b)

Figura 1.1 (a) Realización de herramientas y armas de piedra, cuarzo, obsidiana, etc. (b) Hombre fabricando herramienta de piedra.

1.1.2 Edad de bronce

La edad de bronce (2000 - 0 a.C.), a la cual algunos se refieren como "edad de los metales" se refiere al uso de metales y aleaciones, cuya importancia radica en que la obtención de ellos requiere de la adquisición de tecnologías metalúrgicas complejas. El bronce es la más famosa de

las aleaciones a las que se refiere la historia para referirse a la aparición de culturas clásicas y el acero para la era de la revolución industrial (figura 1.2).

El hombre neolítico descubrió que el cobre natural podía ser suavizado al calentarlo, y endurecido al deformarlo mediante martilleo. El cobre desplazó progresivamente a la piedra y se posicionó como el material preferido por el hombre para la fabricación de herramientas y objetos ceremoniales, sin embargo, una vez que el cobre natural escaseó, el hombre se vio obligado a poner su atención en los metales contenidos en los minerales.

Los metales puros eran demasiado suaves para ser empleados como armas, descubrieron que, al mezclar mineral de estaño y mineral de cobre, previo al proceso de fundición, el producto resultante presentaba ventajas significativas en relación con todos los metales conocidos hasta entonces.

El bronce era más fácil de fundir que el cobre, podía fluir más fácilmente dentro de los moldes (sin burbujas), se endurecía más rápido después de ser vaciado y se podía endurecer más mediante el martilleo.

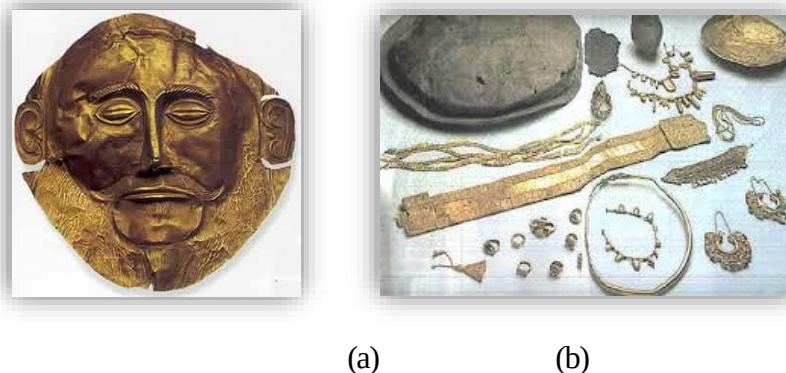


Figura 1.2 El bronce es un metal idóneo para la fabricación de armas y joyería. (a) Mascara de bronce y (b) Joyería hecha de bronce.

1.1.3 Edad del hierro

La Edad del Hierro (1000 a.c. – 1950 d.c.) es el período en el cual se descubre y populariza el uso del hierro como material para fabricar armas y herramientas (figura 1.3). Es el último de los tres principales períodos en el sistema de las tres edades, utilizado para clasificar las sociedades prehistóricas, y está precedido por la Edad del Bronce. La fecha de su aparición, duración y contexto varía según la región estudiada.

La Edad de Hierro se dio aproximadamente cuando su producción se constituyó en la forma más sofisticada de la metalurgia. Si bien requiere una alta temperatura de fusión, su dureza y la abundancia de fuentes de mineral de hierro lo convirtieron en un material mucho más deseable y barato de obtener que el bronce, lo que contribuyó de forma decisiva a su adopción como el metal más usado.



(a)



(b)

Figura 1.3 (a) Herramientas fabricadas de hierro, (b) Casco usado para pelea elaborada de hierro.

1.1.4 Época contemporánea

Edad Contemporánea es el nombre con el que se designa al periodo histórico comprendido entre la Revolución francesa y la actualidad, entre 1700 y el presente. En este período, la humanidad experimentó una transición demográfica, concluida para las sociedades más avanzadas (el llamado primer mundo) y aún en curso para la mayor parte los países subdesarrollados y los países industrializados, que ha llevado su crecimiento más allá de los límites que le imponía históricamente la naturaleza, consiguiendo la generalización del consumo de todo tipo de productos, servicios y recursos naturales que han elevado para una gran parte de los seres humanos su nivel de vida, pero que han agudizado las desigualdades sociales y espaciales y dejan planteadas para el futuro próximos graves incertidumbres medioambientales.

Los acontecimientos de esta época se han visto marcados por transformaciones aceleradas en la economía, la sociedad y la tecnología que han merecido el nombre de Revolución Industrial (figura 1.4).



Figura 1.4 Mano de obra en la industria durante la revolución industrial.

Algunos aspectos importantes de los materiales durante la revolución industrial:

- Mano del hombre desplazada por maquinas construidas en su mayoría de hierro.
- La metalurgia cobró nuevos horizontes.
- Desarrollo de medios de transporte como el ferrocarril y barcos de vapor.
- El hierro y el acero se utilizaron en la construcción de puentes.

1.1.4.1 Polímeros

El primer polímero totalmente sintético se obtuvo en 1907, cuando el químico belga Leo Hendrik Baekeland fabrica la baquelita a partir de formaldehído y fenol. Con este material se fabricaron carcasas de teléfonos y de radios, artículos de escritorio, ceniceros, cubierta de las cámaras Kodak. Otros polímeros importantes se sinterizaron en años siguientes, por ejemplo, el poliestireno (PS) en 1911 o el poli (cloruro de vinilo) PVC en 1912. Todo esto acontece en una fase en que tenía lugar la industrialización y el crecimiento de la comercialización de algunos polímeros como el acetato o las resinas urea-formaldehído con las cuales se podían elaborar objetos transparentes. Otro momento clave en la historia de los plásticos tuvo lugar en 1915 cuando se descubre la formación de polímeros por el encadenamiento molecular de dos o más monómeros de diferente naturaleza, lo que recibió el nombre de copolimerización. De 1930 a 1935 nació la técnica de los termoplásticos. Cabe destacar que a la vez se siguen descubriendo nuevos polímeros: Wallace Carothers, trabajando en la empresa DuPont desde 1928, desarrolló un gran número de nuevos polímeros: poliésteres, poliamidas, neopreno, etc. Después en 1938, nació casualmente gracias a Roy S. Plunkett el politetrafluoroetileno cuyo nombre comercial será Teflón.

Durante la Segunda Guerra Mundial, se descubrieron los elastómeros sintéticos para suplir esa falta de caucho natural, nace el neopreno para fabricar neumáticos de aviones y vehículos militares. Las aplicaciones militares también disparan el uso de los plásticos.

A partir de la segunda mitad del siglo XX destacamos que las investigaciones se centran en el descubrimiento de nuevos modos de síntesis de polímeros, los ingenieros de materiales potencian las características de los polímeros ya existentes, nacen otros que pueden considerarse como derivados de los que ya se conocen.

En 1973 el desarrollo de los plásticos sufre un colapso debido a la crisis energética provocada por los países árabes que embargaron el petróleo a aquellos que apoyaron a Israel en la guerra de Yom Kippur, como a los Estados Unidos y a Holanda, lo que derivó en una desestabilización total de la economía mundial y el encarecimiento de los plásticos pues las materias primas para su elaboración, se obtienen a partir del “oro negro”.

A partir de los años 70 los laboratorios de fuerzas aéreas y otras tantas de todo el mundo, fomentan la investigación de nuevos polímeros para mezclar o alear algunos entre sí, gracias a los programas de I+D (investigación + desarrollo). Se perfeccionan la maquinaria y los medios productivos para los plásticos, se suceden avances en cuanto a los plásticos reforzados y materiales reforzados (“composites”), se descubren nuevos tipos de aditivos para polímeros y los que han nacido recientemente tienen sus propiedades aún más potenciadas como la aplicación a temperaturas más elevadas, resistencia al dañado por el uso, con mayores resistencias mecánicas y módulos elásticos así como más resistencia a los agentes químicos y a la corrosión. Este periodo se conoce como la era de los superpolímeros.

1.1.4.2 Titanio

El titanio recibe el nombre de títanos, del griego antiguo tierra blanca (su óxido es de los blancos más puros), no de los titanes como popularmente se cree. Fue descubierto en 1791 por el químico inglés William Gregor, al analizar un material que había encontrado. En 1795, el químico alemán Martin Klaproth, descubridor del uranio, le dio el nombre de titanio.

Es el cuarto metal más común en la naturaleza. Las rocas ígneas, los materiales formados por descomposición de rocas ígneas, muchos minerales, principalmente los que tienen hierro y todos los organismos vegetales y animales, contienen titanio.

El titanio se extrae en primer lugar del rutilo (óxido de titanio), abundante en las arenas costeras. Para ello, el titanio debe someterse antes a un proceso de refinado, para prevenir su reacción con sustancias tales como el nitrógeno, el oxígeno y el hidrógeno.

El titanio como metal no se empleó hasta 1946 en que William Justin Kroll desarrolló un método para poder producirlo industrialmente. Este método, llamado Método de Kroll, se sigue utilizando actualmente. En este proceso el metal se debe mantener en una atmósfera de gas inerte, como argón o helio, para impedir la reacción con otros elementos.

En la década de 1950 y 1960 la Unión Soviética lo empleó en usos militares. En los EE. UU., el Departamento de Defensa (DOD) entendió la importancia estratégica del metal y durante la guerra fría el gobierno estadounidense lo consideró un material estratégico y las reservas de esponja de titanio fueron mantenidas por el Centro de Reservas Nacional de Defensa, que desapareció en 2005. Hoy el mayor productor mundial es el consorcio ruso VSMPO-AVISMA, que supone el 29 % de la producción mundial.

En 2006, la Agencia de Defensa estadounidense subvencionó con 5,7 millones de dólares a dos empresas para desarrollar un nuevo proceso de fabricación de polvo de titanio. Pues con calor y presión, el polvo de titanio de peso ligero sirve para revestir y fortalecer superficies como armaduras o componentes del sector aeroespacial, el transporte o industrias de tratamiento químico.¹¹

1.1.4.3 Uranio

El uranio fue descubierto como óxido en 1789 por el químico alemán Martin Heinrich Klaproth, mientras analizaba la mineral pechblenda extraído de una mina de oro de Bohemia. Pudo separar un polvo negro y creyendo haber descubierto un nuevo metal, lo añadió a los 14 ya conocidos con el nombre de uranio, en honor al descubrimiento que años atrás había realizado su compatriota William Herschel: el planeta Urano, en 1781. Aunque Klaproth no lo sabía, lo que realmente acaba de descubrir era óxido de uranio, concretamente del isótopo U-238, que es la forma natural del uranio. El primero que consiguió aislar el uranio en estado metálico fue E.M. Peligro, en 1841, que redujo con potasio y cloruro anhidro el óxido de uranio. Con todo no sería hasta 1896 cuando el físico francés Antoine Henri Becquerel demostró las propiedades radiactivas del nuevo elemento. Las investigaciones sobre la radioactividad que siguieron a los experimentos de Becquerel condujeron al descubrimiento del radio y a nuevos conceptos sobre la organización de la materia.

El principal uso del uranio en la actualidad es como combustible para los reactores nucleares que producen el 3% de la energía generada por el ser humano en el mundo. El uranio empobrecido (con una proporción de U-235 inferior a la natural), producido como producto de desecho tras la utilización del uranio en centrales nucleares, es usado en la producción de municiones perforadoras y blindajes de alta resistencia; debido principalmente a su elevada densidad (unos 19 g/cm³), su fragmentación en trozos afilados y sobre todo a que es pirofórico (entra en combustión de forma espontánea al entrar en contacto con el aire a 600°C aproximadamente). Su uso además conlleva la dispersión de contaminación radiactiva como ocurrió durante la Primera Guerra del Golfo.¹²

Otros usos incluyen:

- Por su alta densidad, se utiliza el uranio en la construcción de estabilizadores para aviones, satélites artificiales y veleros (balastos/quillas).
- Se ha utilizado uranio como agregado para la creación de cristales de tonos fluorescentes verdes o amarillos.
- El ²³⁸U se convierte en plutonio en los reactores reproductores. El plutonio puede ser usado en reactores o en armas nucleares.
- Algunos accesorios luminosos utilizan uranio, del mismo modo que lo hacen algunos químicos fotográficos (nitrato de uranio).
- Su alto peso atómico hace que el ²³⁸U pueda ser utilizado como un eficaz blindaje contra las radiaciones de alta penetración.
- El uranio en estado metálico es usado para los blancos de rayos X, para hacer rayos X de alta energía.
- El uranio empobrecido se usa como blindaje de tanques de guerra, también los misiles llevan uranio empobrecido en su espólón.
- Fertilizantes de fosfato a menudo contienen altos contenidos de uranio natural, debido a que el mineral del cual son hechos es típicamente alto en uranio.

1.1.4.4 Aluminio

El nombre del aluminio deriva del latín alumen para referirse al alumbre (sulfato de aluminio y potasio). En 1761 el químico francés Louis-Bernard Guyton de Morveau propuso el termino "Alúmina" para el material base del alumbre. De Morveau fue una figura clave en el

desarrollo de un sistema estandarizado de nomenclatura química y fue un colaborador habitual de Antoine Lavoisier, quien, en 1787, sugirió que la alúmina era el óxido de un metal todavía sin descubrir. En 1808 Sir Humphrey Davy propuso el termino "Alusión" para el metal. Este nombre fue rápidamente reemplazado por "Aluminum" y posteriormente el termino aluminio (Aluminium en inglés) fue adoptado por la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) con la finalidad de cumplir con la terminación "io (ium)" de la mayoría de los elementos.¹¹

El aluminio es el metal más abundante en la corteza terrestre, por encima del hierro. Sin embargo, hasta principios del siglo XIX no se tuvieron los conocimientos químicos necesarios para reducir los compuestos químicos en los que se presenta. Oersted fue capaz de aislar el metal de aluminio en 1825, pero hasta 1888 no se produjo la obtención a gran escala, gracias al desarrollo del método Hall-Heroult de la electrolisis de alúmina fundida. Desde entonces el aluminio se ha obtenido a partir de la bauxita (mineral compuesto de una mezcla de óxidos de aluminio, hierro y silicio, entre otros) por descomposición electrolítica de la alúmina (Al_2O_3), después de haber extraído este de la bauxita. Es necesario un tratamiento posterior para purificar el aluminio líquido obtenido, y aunque no es posible eliminar por completo las impurezas, es importante porque determinan la calidad del aluminio (las fases inter-metálicas de Fe y Si deterioran la tenacidad del material). Por otra parte, el proceso de obtención del aluminio es muy contaminante y consume gran cantidad de energía. Sin embargo, en ciertas industrias, como el sector aeroespacial, solo se consume aluminio de primera fusión (no reciclado).¹²

El termino bauxita, es con el que se denomina a una mezcla natural de minerales ricos en óxidos de aluminio, y es la materia prima de la cual se extrae prácticamente toda la alúmina utilizada en la elaboración de aluminio primario.

Entre las clasificaciones del aluminio se distinguen el aluminio para moldeo y las aleaciones de aluminio para forja. Las aleaciones de aluminio para moldeo se diseñan para una adecuada colada de metal líquido en moldes que reproducen directamente la forma de la pieza.

En las aleaciones de aluminio para forja la colada se realiza en lingotes que, posteriormente, son deformados, por ejemplo, por laminación o extrusión. Estas aleaciones tienen mayor calidad que las de moldeo, por poseer menos defectos y ser estos menos agresivos. Son utilizados mayoritariamente para aplicaciones estructurales.

El sistema AISI de asociación de aluminio es el más ampliamente reconocido en los Estados Unidos. Su sistema de identificación de aleaciones emplea diferentes nomenclaturas para aleaciones de

forjado. Por eso divide las aleaciones en familias de cuatro dígitos, donde el primer dígito indica el elemento que se encuentra en mayor cantidad en la aleación.

Hay diferentes denominaciones para los tratamientos térmicos que reciben las aleaciones de aluminio. Las aleaciones de aluminio se dividen en dos grandes categorías: fundición y forjado.

La designación del aluminio forjado y de las aleaciones forjadas al aluminio fue estandarizada por The Aluminium Association en 1954, Consta de un sistema de numeración de cuatro dígitos. El primero indica el grupo de aleación, el segundo señala el cambio de la aleación original o límites de impurezas; el cero se utiliza para la aleación original, y los enteros del 1 al 9 indican las modificaciones de la aleación. En el grupo 1xxx para aluminio con un mínimo de purezas del 99% y mayores, los dos últimos dígitos son los mismos que los dos a la derecha del punto decimal en el porcentaje del mínimo de aluminio cuando se expresa a casi el 0.01%. De este modo, 1060 indica un material de 99.60% mínimo de pureza de aluminio y ningún control especial sobre las impurezas individuales.

1.2 CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES

La ciencia de materiales es el campo científico encargado de investigar la relación entre la estructura y las propiedades de los materiales. Paralelamente, conviene matizar que la ingeniería de materiales se fundamenta en esta, las relaciones propiedades-estructura-procesamiento-funcionamiento, y diseña o proyecta la estructura de un material para conseguir un conjunto predeterminado de propiedades.

La ciencia de materiales es, por ello mismo, un campo multidisciplinar que estudia los conocimientos fundamentales sobre las propiedades físicas macroscópicas de los materiales y los aplica en varias áreas de la ciencia y la ingeniería.

La ciencia e ingeniería de los materiales es un campo interdisciplinario que se ocupa de inventar nuevos materiales y mejorar los ya conocidos, mediante el desarrollo de un conocimiento más profundo de las relaciones entre microestructura, composición, síntesis y procesamiento.¹³

- **Composición:** indica la constitución química del material.
- **Estructura:** descripción del arreglo atómico del material.

- **Síntesis:** Manera de fabricar los materiales a partir de elementos naturales.
- **Procesamiento:** Modo en que se conforman los materiales en componentes útiles y para causar cambios en las propiedades de distintos materiales.

En la figura 1.5 se muestra un diagrama de la aplicación de la ciencia e ingeniería de los materiales con otras ramas o disciplinas.

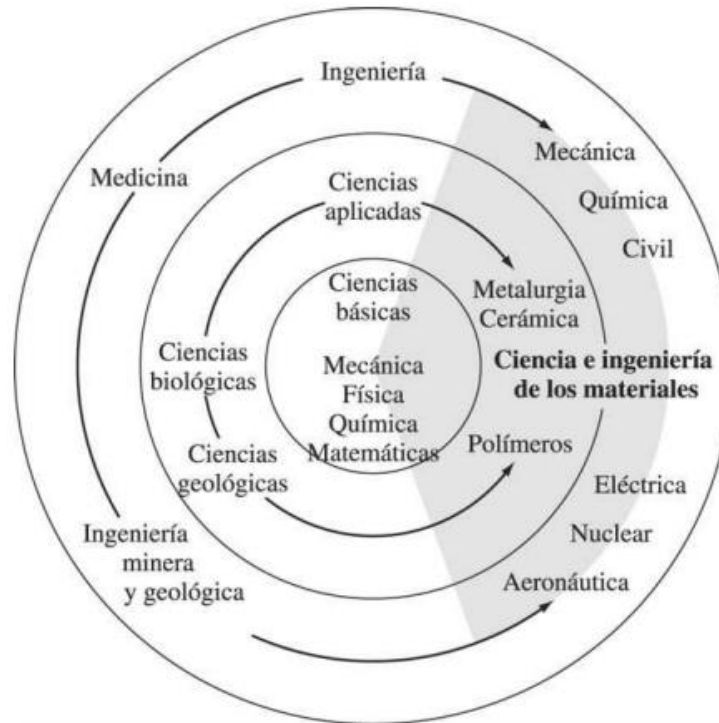


Figura 1.5 Relación de la ciencia e ingeniería de los materiales con otras disciplinas.

1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES

Los materiales se clasifican según su uso en 5 grupos por sus propiedades que son: metales, cerámicos, polímeros, semiconductores y materiales compuestos (figura 1.6).

	Ejemplos de aplicaciones	Propiedades
Metales y aleaciones		
Cobre	Alambre conductor eléctrico	Conductividad eléctrica alta, buena conformabilidad
Hierro fundido gris	Bloques de motores de automóviles	Moldeable, torneable, amortiguador de vibraciones
Aceros de aleación	Llaves inglesas, chasis de automóviles	Endurecimiento significativo por tratamiento térmico
Cerámicas y vidrios		
$\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaO}$	Vidrios de ventanas y vidrios de sosa-cal	Ópticamente transparente, aislante térmico
Al_2O_3 , MgO , SiO_2	Refractarios (es decir, recubrimientos resistentes al calor de hornos) para contención de metal fundido	Aislantes térmicos, soportan altas temperaturas, relativamente inertes al metal fundido
Titanato de bario	Capacitores para microelectrónica	Alta capacidad de almacenamiento de carga
Sílice	Fibras ópticas para tecnología de la información	Índice refractivo, pérdidas ópticas bajas
Polímeros		
Polietileno	Empaquetamiento de alimentos	Fácilmente convertible en películas delgadas, flexibles y herméticas
Epoxi	Encapsulación de circuitos integrados	Aislante eléctrico y resistente a la humedad
Fenólicos	Adhesivos para unir capas en madera laminada	Resistente, repelente a la humedad
Semiconductores		
Silicio (Si)	Transistores y circuitos integrados	Comportamiento eléctrico único
GaAs	Sistemas optoelectrónicos	Convierte señales eléctricas a luz, láseres, diodos láser, etcétera
Compuestos		
Grafito-epoxi	Componentes para aviones	Razón resistencia-peso alta
Carburo de tungsteno cobalto	Herramientas de corte de carburo para maquinado	Dureza alta, pero buena resistencia al impacto
Acero revestido con titanio	Contenedores de reactores	Bajo costo y alta resistencia del acero, con la resistencia a la corrosión del titanio

Figura 1.6 Ejemplos representativos, aplicaciones y propiedades para cada categoría de materiales.¹³

1.3.1 Metales

Incluyen aceros, aluminio, magnesio, zinc, hierro colado, titanio, cobre y níquel. En general, los metales tienen buena conductividad eléctrica y térmica. Los metales y las aleaciones tienen

resistencia relativamente alta, gran rigidez, ductilidad o formabilidad y buena resistencia a los choques térmicos. Tienen utilidad especial en aplicaciones estructurales o bajo cargas dinámicas. Aunque a veces se usan metales puros, las mezclas de metales llamadas aleaciones permiten mejorar determinadas propiedades o mejores combinaciones de propiedades.¹³

- **Metales ferrosos:** Son aquellos cuyo componente principal es el hierro. Entre ellos se encuentran el hierro puro, el acero y las fundiciones.
- **Metales no ferrosos:** Son materiales metálicos que no contienen hierro o que lo contienen en muy pequeñas cantidades. En general los metales no ferrosos son blandos y tienen poca resistencia mecánica, para mejorar sus propiedades, se alean con otros metales. Los metales no ferrosos, de acuerdo al grado de utilización se los puede ordenar: Cobre, aluminio, estaño, plomo, cinc, níquel, cromo, titanio, magnesio.

1.3.2 Cerámicos

Los cerámicos se pueden definir como materiales cristalinos inorgánicos. Es posible que sean los materiales más “naturales”. La arena de la playa y las rocas son ejemplo de cerámicos naturales. Los cerámicos avanzados son materiales obtenidos refinando cerámicos naturales y con otros procesos especiales. Se usan en sustratos que albergan chips de computadora, sensores y actuadores, capacitadores, comunicaciones inalámbricas, bujías de motores, inductores y aislantes eléctricos. Algunos cerámicos se usan como recubrimientos, actuando como barrera para proteger sustratos metálicos en motores de turbina. También se usan en productos para el consumo como pinturas, plásticos y neumáticos, así como aplicaciones industriales como losetas para transbordadores espaciales, soporte de catalizador y en los sensores de oxígeno que usan los automóviles. Las cerámicas tradicionales se usan para fabricar ladrillos, vajillas, artículos sanitarios, refractarios (materiales resistentes al calor) y abrasivos. En general, debido a la presencia de porosidad, no conducen bien el calor y deben calentarse a temperaturas muy altas para que se fundan. Los cerámicos son resistentes y duros, pero también muy frágiles. Normalmente, se preparan polvos finos de cerámico para moldearlos en diversas formas. Las nuevas técnicas de procesamiento obtienen cerámicos con la resistencia suficiente a la fractura como para usarlos en aplicaciones bajo cargas dinámicas.¹³

1.3.3 Polímeros

Los polímeros son materiales orgánicos comunes. Se producen con un proceso llamado polimerización. Muchos polímeros tienen una resistividad eléctrica muy buena. También pueden proporcionar un buen aislamiento térmico, aunque tienen menos resistencia, tienen una relación de resistencia a peso muy buena. Normalmente no son adecuados para usos a altas temperaturas. Muchos polímeros tienen muy buena resistencia a las sustancias corrosivas.

Los polímeros termoplásticos, cuyas largas cadenas moleculares no están unidas en forma rígida, tiene buena ductilidad y formabilidad; los polímeros termofijos son más resistentes, pero más frágiles porque las cadenas moleculares están estrechamente enlazadas.

Los termoplásticos se fabrican conformándolos en estado fundido. Los termofijos se cuecen en moldes.¹³

1.3.4 Materiales compuestos

Los materiales compuestos son aquellos materiales que se forman por la unión de dos materiales para conseguir la combinación de propiedades que no es posible obtener en los materiales originales y los cuales se dividen en tres grandes grupos los Materiales Compuestos reforzados con partículas, Materiales Compuestos reforzados con fibras y los Materiales compuestos estructurales. Por su cristalinidad en: Amorfo y cristalino.

La idea principal de materiales compuestos es combinar las propiedades de materiales distintos. Se forman a partir de dos o más materiales y se obtienen propiedades que no posee un solo material. El concreto, la madera terciada y los plásticos reforzados con fibras de vidrio son ejemplos de materiales compuestos. Con materiales compuestos se pueden fabricar herramientas de corte duras, pero resistentes al choque, que se romperán de no usar esos materiales. Los vehículos aéreos y aeroespaciales dependen mucho de materiales compuestos como, por ejemplo, los polímeros reforzados con fibra de carbono.¹³

1.3.5 Semiconductores

Los semiconductores base silicio, germanio y arseniuro de galio, como los que usan las computadoras y en electrónica, son parte de una clase más amplia, la de los materiales electrónicos. La conductividad electrónica de los materiales semiconductores es intermedia entre la

de los aisladores cerámicos y los conductores metálicos. Los semiconductores han activado la era de la información. En alguno de ellos, se puede controlar el valor de la conductividad, lo que permite usarlos en dispositivos electrónicos como transistores, diodos y circuitos integrados. En muchas aplicaciones, se necesitan monocristales grandes de material semiconductor. Estos se cultivan de materiales fundidos. Con frecuencia, también se fabrican películas delgadas de materiales semiconductores mediante procesos especializados.¹³

En la figura 1.7 se encuentran las diferencias de resistencia de cada grupo de materiales en el que poseen distintas estructuras y propiedades.

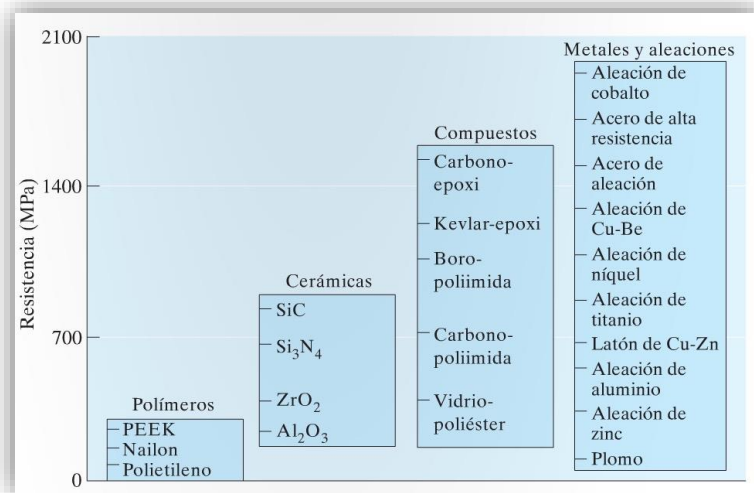


Figura 1.7 Resistencias representativas de diversas categorías de materiales.¹³

1.4 ESTRUCTURA, PROPIEDADES Y PROCESAMIENTO DE LOS MATERIALES

Para realizar su función durante su ciclo de vida esperado, un componente debe tener la forma correcta. El ingeniero en materiales debe cumplir este requisito aprovechando la relación compleja entre la estructura interna del material, su procesamiento y las propiedades finales del mismo (figura 1.8). Cuando el ingeniero de materiales modifica alguno de estos tres aspectos de la relación, cualquiera de los restantes, o ambos, también cambian.

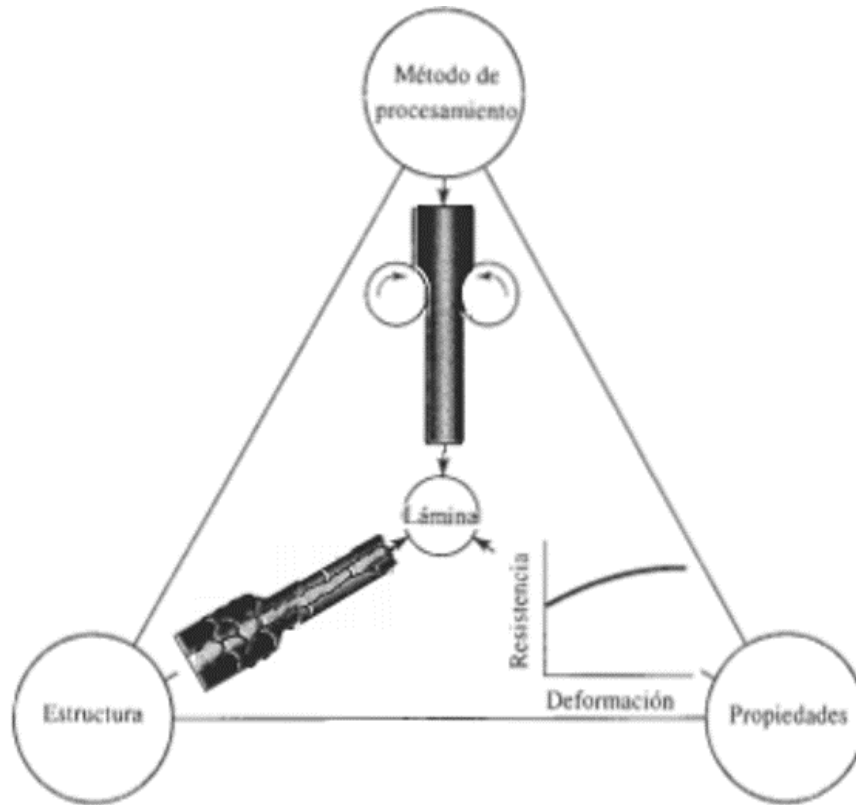


Figura 1.8 Relación tripartita entre estructura, propiedades y método de procesamiento.⁴

1.4.1 Propiedades físicas de los materiales

Incluyen el comportamiento eléctrico, magnético, óptico, térmico, elástico y químico dependen tanto de la estructura como del procesamiento de un material. Incluso minúsculas modificaciones de la estructura causan cambios profundos en la conductividad eléctrica de muchos materiales semiconductores.

1.4.2 Propiedades mecánicas de los materiales

Podemos considerar las propiedades de un material en dos categorías: mecánicas y físicas. Las propiedades mecánicas, que describen la forma que el material responde a una fuerza aplicada, incluyen resistencia, rigidez y ductilidad. Sin embargo, a menudo estamos interesados en la manera en que se comporta un material al ser expuesto a un golpe repentino e intenso (impacto), sometido a la aplicación de cargas cíclicas en el tiempo (fatiga), expuesto a altas temperaturas (termo fluencia) o sujeto a condiciones abrasivas (desgaste). Las propiedades mecánicas también

determinan la facilidad con la cual se puede deformar un material para llegar a una forma útil. A menudo unos pequeños cambios estructurales tienen un efecto en las propiedades mecánicas de un material.

1.4.3 Estructura

La estructura de un material se puede considerar en diferentes niveles. La disposición de los electrones que rodean al núcleo de los átomos individuales afecta el comportamiento eléctrico, magnético, térmico, y óptico.

El siguiente nivel, se toma en consideración la disposición o arreglo de los átomos. Los metales, semiconductores, muchos cerámicos y algunos polímeros tienen una organización de átomos, muy regular, es decir una estructura cristalina. Otros materiales cerámicos y muchos polímeros no tienen una organización atómica ordenada. Estos materiales amorfos o vítreos se comportan de manera muy distinta a los materiales cristalinos. En la mayor parte de los metales, de los semiconductores y de los cerámicos se encuentra una estructura granular. El tamaño y la forma de los granos influye en el comportamiento del material.¹³ Finalmente, en la mayoría de los materiales se presenta más de una fase, teniendo cada una de ellas su arreglo atómico y propiedades únicas. El control del tipo, tamaño, distribución y cantidad de estas fases dentro del material es otra de las principales formas de controlar las propiedades.

1.4.4 Procesamiento

El procesamiento de los materiales produce la forma deseada de un componente a partir de un material inicialmente sin forma. Los metales se pueden procesar vertiendo metal en un molde (fundición), uniendo piezas individuales del metal (soldadura) conformando el metal sólido en formas útiles mediante alta presión (forja, trefilado, extrusión, laminado, doblado), compactando pequeñas partículas de polvo metálico en una masa sólida (metalurgia de polvos, o eliminando material excedente (maquinado). De manera similar, los materiales cerámicos pueden conformarse mediante procesos como colado, formado, extrusión o compactación, a menudo mientras están húmedos, seguido por un tratamiento térmico a altas temperaturas. Los polímeros se producen mediante inyección de plástico blando en moldes (similar a la fundición), extrusión, y conformado. A menudo un material se trata térmicamente por debajo de su temperatura de fusión para lograr modificar su estructura. El

procesamiento que utilizaremos dependerá, por lo menos de manera parcial, de las propiedades y por lo tanto de la estructura del material.

1.5 PROPIEDADES DE LOS METALES

La gran cantidad de aplicaciones que presentan los metales se debe a sus notorias propiedades, principalmente las físicas, mecánicas y químicas. Cada una de estas propiedades características permite una serie de usos concretos. Al tacto, los materiales metálicos son duros, no adherentes, fríos y muy suaves si su superficie ha sido pulida o tratada. Además, muchos metales presentan un característico “brillo metálico”.

1.5.1 Propiedades físicas de los metales

Las propiedades físicas son aquellas que logran cambiar la materia sin alterar su composición. Son las que describen características como color, elasticidad, conductividad eléctrica o térmica, magnetismo y el comportamiento óptico, que en general no están influidas en forma significativa por las fuerzas que actúan sobre un material.

El término de propiedades físicas, es usado para definir el comportamiento de los materiales en respuesta a fuerzas físicas. Estas incluyen las propiedades volumétricas, térmicas, eléctricas y electroquímicas.¹⁴

1.5.1.1 Propiedades volumétricas y de fusión

Este tipo de propiedades están relacionadas con el volumen de los sólidos y la manera en que son afectados por la temperatura incluyendo:

- **Densidad:** la densidad de un material es su peso por unidad de volumen (ρ , g/cm^3 [lb/in^3]). La densidad se determina por su número atómico, radio atómico y la manera en la que sus átomos se comparan.
- **Expansión térmica:** este es el nombre que se le da al efecto que la temperatura tiene sobre la densidad. Se expresa como coeficiente de expansión térmica, el cual mide el cambio de longitud por grado de temperatura, como $\text{mm/mm}^\circ\text{C}$ [$\text{in/in}^\circ\text{F}$]

- **Características de fusión:** en física, se denomina fusión al cambio de estado de la materia que pasa del estado sólido al líquido.
 - **Elemento puro:** el punto de fusión (T_m) es la temperatura a la que el material pasa de un estado sólido a líquido. La transformación inversa, de líquido a sólido, ocurre a la misma temperatura y se denomina punto de enfriamiento. La cantidad de energía calorífica requerida para efectuar la transformación de sólido a líquido es llamada calor de fusión.
 - **Elemento Metálico:** cuando la fusión de un elemento metálico no supone condiciones de equilibrio, por ejemplo, cuando se enfría un metal fundido, este permanece en estado líquido por debajo de su punto de enfriamiento si la formación de núcleos cristales no se inicia de inmediato, en esta situación se dice que el líquido este superfrio.
 - **Materiales distintos:** a diferencia de los materiales puros, la mayor parte de las aleaciones metálicas no tienen un solo punto de fusión. Su fusión comienza a cierta temperatura, llamada solidus, y continua conforme la temperatura aumenta hasta que se convierten por completo a estado líquido, a esta temperatura se le llama liquidus.

Estas propiedades se explican en la figura 1.9, con una lista de valores típicos para materiales seleccionados de la ingeniería.¹⁴

Material	Densidad, ρ ,		Coeficiente de expansión térmica, α		Punto de fusión, T_m	
	g/cm ³	lb/in ³	°C ⁻¹ × 10 ⁻⁶	°F ⁻¹ × 10 ⁻⁶	°C	°F
Metales						
Aluminio	2.70	0.098	24	13.3	660	1 220
Cobre	8.97	0.324	17	9.4	1 083	1 981
Hierro	7.87	0.284	12.1	6.7	1 539	2 802
Plomo	11.35	0.410	29	16.1	327	621
Magnesio	1.74	0.063	26	14.4	650	1 202
Níquel	8.92	0.322	13.3	7.4	1 455	1 651
Acero	7.87	0.284	12	6.7	a	a
Estaño	7.31	0.264	23	12.7	232	449
Tungsteno	19.30	0.697	4.0	2.2	3 410	6 170
Zinc	7.15	0.258	40	22.2	420	787
Cerámicos						
Vidrio	2.5	0.090	1.8–9.0	1.0–5.0	b	b
Alúmina	3.8	0.137	9.0	5.0	ND	ND
Sílice	2.66	0.096	ND	ND	b	b
Polímeros						
Resinas fenólicas	1.3	0.047	60	33	c	c
Nailon	1.16	0.042	100	55	b	b
Teflón	2.2	0.079	100	55	b	b
Caucho natural	1.2	0.043	80	45	b	b
Polietileno:						
Baja densidad	0.92	0.033	180	100	b	b
Alta densidad	0.96	0.035	120	66	b	b
Poliestireno	1.05	0.038	60	33	b	b

Figura 1.9 Tabla de propiedades volumétricas en unidades tradicionales de Estados Unidos para materiales selectos de la ingeniería.¹⁴

1.5.1.2 Propiedades Térmicas

Debido a que la temperatura determina el nivel de energía térmica de los átomos, la expansión térmica, fusión y temperatura de fusión son propiedades térmicas. A continuación, se examinarán varias propiedades térmicas adicionales relacionadas con el almacenamiento y flujo de calor dentro de una sustancia.

- **Calor Específico (C):** es la cantidad de energía calorífica que es requerida para incrementar la temperatura de unidad de masa del material en un grado. Para determinar la energía necesaria para calentar un peso en específico de metal a cierta temperatura, se utiliza la ecuación 1.1.

$$\bullet \quad H = CW(T_2 - T_1) \quad (1.1)$$

Donde H es la cantidad de energía calorífica, J [Btu]; C es el calor específico del material, J/kg°C [Btu/lb°F]; W es su peso, kg [lb] y (T₂-T₁) es el cambio de temperatura °C [F°].

- **Calor Específico Volumétrico:** es la energía calorífica requerida para elevar en un grado la temperatura por unidad de volumen del material, J/mm³°C [Btu/in³°F].

- **Coefficiente de Conductividad Térmica (k):** la conductividad térmica de una sustancia es la capacidad del material para transferir calor a través de sí misma por medio del mecanismo físico. Se utiliza el coeficiente de conductividad térmica, k, sus unidades son J/s mm °C [Btu/in h °F]. se conoce que el coeficiente de conductividad térmico es elevado en los metales y bajo en cerámicos y plásticos.
- **Difusión Térmica:** es la razón de conductividad térmica a calor específico volumétrico y determina mediante la ecuación 1.2.

$$K = \frac{k}{\rho c} \quad (1.2)$$

Donde k corresponde a la conductividad térmica, y ρc (capacidad de almacenamiento calorífico volumétrico), que se determina mediante la densidad multiplicada por el calor específico.

En la figura 1.10 se enlistan algunos valores comunes de calor específico y conductividad térmica para materiales seleccionados.

Material	Calor específico	Conductividad térmica		Material	Calor específico	Conductividad térmica	
	Cal/g °C ^a o Btu/lbm °F	J/s mm °C	Btu/hr in °F		Cal/g °C ^a o Btu/lbm °F	J/s mm °C	Btu/hr in °F
Metales				Cerámicas			
Aluminio	0.21	0.22	9.75	Alúmina	0.18	0.029	1.4
Hierro colado	0.11	0.06	2.7	Concreto	0.2	0.012	0.6
Cobre	0.092	0.40	18.7	Polímeros			
Hierro	0.11	0.072	2.98	Fenólicos	0.4	0.00016	0.0077
Plomo	0.031	0.033	1.68	Polietileno	0.5	0.00034	0.016
Magnesio	0.25	0.16	7.58	Teflón	0.25	0.00020	0.0096
Níquel	0.105	0.070	2.88	Caucho natural	0.48	0.00012	0.006
Acero	0.11	0.046	2.20	Otros			
Acero inoxidable ^b	0.11	0.014	0.67	Agua (líquida)	1.00	0.0006	0.029
Estaño	0.054	0.062	3.0	Hielo	0.46	0.0023	0.11
Zinc	0.091	0.112	5.41				

Figura 1.10 Valores de propiedades térmicas comunes para materiales seleccionados. Los valores son para la temperatura ambiente, y cambian para temperaturas diferentes.¹⁴

1.5.1.3 Difusión de Masa

La difusión de masa involucra el movimiento de átomos o moléculas dentro de un material o a través de una frontera entre dos materiales en contacto. Esto ocurre en los metales puros, en aleaciones y

entre los materiales que comparten una interfase común. Debido a la agitación térmica de los átomos de un material, los átomos se mueven en forma continua. En los sólidos, el movimiento atómico se facilita por los vacíos y otras imperfecciones de la estructura cristalina.

Para los metales que entran en contacto cercano de súbito, la difusión se ilustra en la figura 1.11. iniciando ambos metales tienen su propia estructura atómica; con el tiempo se va presentando un intercambio de átomos desde su frontera hasta la parte interna de las piezas. Con el tiempo suficiente, el ensamble de las piezas alcanzara una composición uniforme en todo el conjunto.¹⁴

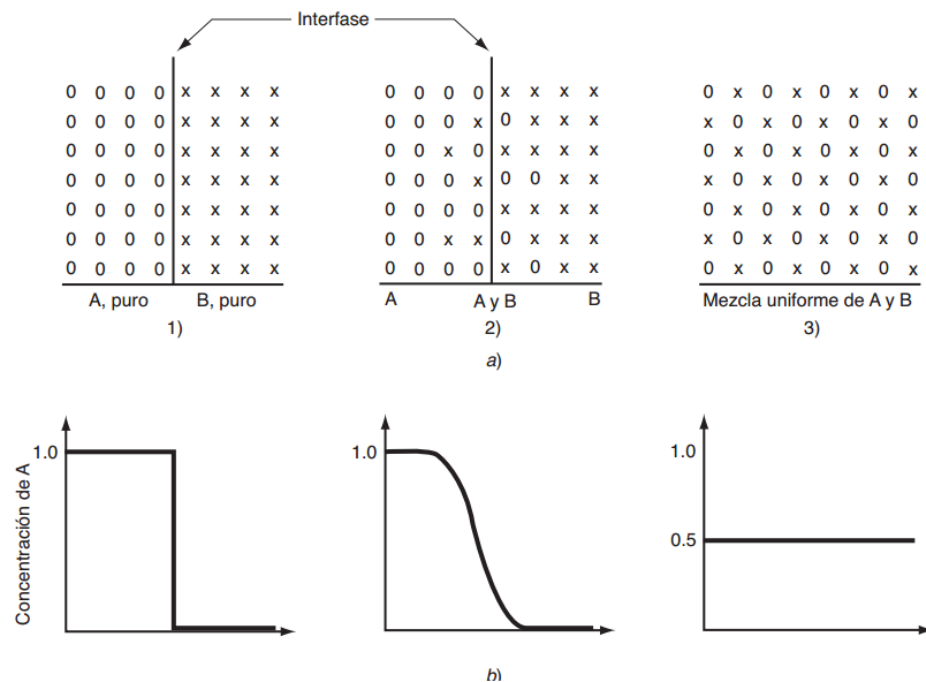


Figura 1.11 Difusión de masa: a) modelo de átomos en dos bloques sólidos en contacto: 1) al principio, cuando las dos piezas se juntan, cada una tiene su composición individual; 2) después de cierto tiempo ha ocurrido un intercambio de átomos; y 3) finalmente, sucede una condición de concentración uniforme. El gradiente de concentración dc/dx para el metal A, está graficado en el inciso b) de la figura.¹⁴

La primera ley de Fick (ecuación 1.3) nos ayuda a describir la difusión de masa es:

$$\bullet \quad dm = -D \left(\frac{dc}{dx} \right) A dt \quad (1.3)$$

Donde dm es la cantidad de material transferido, D es el coeficiente de difusión de metal, que incrementa con la temperatura, dc/dx es el gradiente de concentración. A es el área de frontera y da representa un incremento de tiempo.¹⁴

1.5.1.4 Propiedades Eléctricas y Magnéticas

Los metales permiten el paso de la corriente eléctrica con facilidad, es decir, ofrecen una baja resistencia eléctrica; por tanto, son buenos conductores de la electricidad. La más baja conductividad eléctrica la tiene el bismuto, y la más alta a temperatura ordinaria la plata. La conductividad en los metales puede reducirse mediante aleaciones.

Algunos metales presentan un característico comportamiento magnético, que consiste en su capacidad de atraer a otros materiales metálicos. El hierro y otros metales tienen la importante propiedad del ferromagnetismo, que consiste en la capacidad de convertirse en imanes permanentes cuando se les coloca en el interior de un campo magnético (zona del espacio donde se manifiestan las propiedades magnéticas). Esta propiedad se utiliza en los electroimanes, que constan de un núcleo cilíndrico de un material ferromagnético rodeado de una bobina eléctrica de gran tamaño. Se consiguen así imanes muy potentes que tienen numerosos usos industriales.

El flujo de una corriente eléctrica involucra el movimiento de portadores de carga. En los sólidos, esos portadores de carga son los electrones. El movimiento de los portadores de carga está favorecido por la presencia de voltaje eléctrico, y se le oponen las características inherentes del material, tales como la estructura atómica y los límites entre los átomos y moléculas. La siguiente es la relación familiar definida por la ley de Ohm:

$$\bullet \quad I = \frac{E}{R} \quad (1.4)$$

Donde I es la corriente, en A; E es el voltaje, en V; y R es la resistencia eléctrica, en Ω .

- **Resistividad:** es la propiedad básica que define la capacidad que un material tiene para oponerse al flujo de la corriente. La resistividad depende de R es la resistencia; L es su longitud y A es el área de la sección transversal, así.

$$\bullet \quad r = R \frac{A}{L} \quad (1.5)$$

- **Conductividad:** la conductividad de un material es el recíproco de la resistividad:

$$\bullet \text{ concavidad eléctrica} = \frac{1}{r} \quad (1.6)$$

Donde la conductividad se expresa en las unidades de $(\Omega\text{-m})^{-1} [(\Omega\text{-in})^{-1}]$.

La figura 1.12 enlista los valores de resistividad para materiales selectos de ingeniería.¹⁴

Material	Resistividad		Material	Resistividad	
	$\Omega\text{-m}$	$\Omega\text{-in}$		$\Omega\text{-m}$	$\Omega\text{-in}$
Conductores	$10^{-6} - 10^{-8}$	$10^{-4} - 10^{-7}$	Conductores (continúa)		
Aluminio	2.8×10^{-8}	1.1×10^{-6}	Acero, bajo C	17.0×10^{-8}	6.7×10^{-6}
Aleaciones de aluminio	4.0×10^{-8} a	1.6×10^{-6} a	Acero, inoxidable	70.0×10^{-8} a	27.6×10^{-6}
Hierro colado	65.0×10^{-8} a	25.6×10^{-6} a	Estaño	11.5×10^{-8}	4.5×10^{-6}
Cobre	1.7×10^{-8}	0.67×10^{-6}	Zinc	6.0×10^{-8}	2.4×10^{-6}
Oro	2.4×10^{-8}	0.95×10^{-6}	Carbono	5000×10^{-8} b	2000×10^{-6} b
Hierro	9.5×10^{-8}	3.7×10^{-6}	Semiconductores	$10^1 - 10^5$	$10^2 - 10^7$
Plomo	20.6×10^{-8}	8.1×10^{-6}	Silicio	1.0×10^3	
Magnesio	4.5×10^{-8}	1.8×10^{-6}	Aislantes	$10^{12} - 10^{15}$	$10^{13} - 10^{17}$
Níquel	6.8×10^{-8}	2.7×10^{-6}	Caucho natural	1.0×10^{12} b	0.4×10^{14} b
Plata	1.6×10^{-8}	0.63×10^{-6}	Polietileno	100×10^{12} b	40×10^{14} b

Compilada a partir de varias fuentes estándar.

^a El valor varía con la composición de la aleación.

^b El valor es aproximado.

Figura 1.12 Resistividad de materiales selectos.¹⁴

1.5.1.5 Propiedades Químicas

La propiedad química más importante de los metales es su elevada capacidad de oxidación, que consiste en su facilidad para reaccionar con el oxígeno y cubrirse de una capa de óxido al poco tiempo de estar a la intemperie. Por lo general, se intenta combatir la formación de esta capa de óxido, pues hace que se pierda el brillo y el tacto de la pieza original y puede dañar su interior y provocar un deterioro en sus propiedades magnéticas.

1.5.1.6 Propiedades ópticas

Consecuencia de la alta reflectividad de la luz visible. Como los metales poseen estructuras muy densas, son opacos. Y además reflejan la luz.

1.5.1.7 Propiedades acústicas

Los metales son muy buenos conductores de las ondas acústicas, es decir, transmiten muy bien el sonido.

1.5.2 Propiedades mecánicas de los metales

Son las propiedades de un material, como la resistencia, que describen qué tanto resiste las fuerzas aplicadas, incluyendo fuerzas de tensión o de compresión, de impacto, cíclicas o de fatiga, o las fuerzas a altas temperaturas.¹³ Los materiales tienen diferentes propiedades mecánicas, las cuales están relacionadas con las fuerzas exteriores que se ejercen sobre ellos, dichas propiedades son: elasticidad, plasticidad, maleabilidad, ductilidad, dureza, tenacidad y fragilidad.

- **Elasticidad:** Cualidad que presenta un material para recuperar su forma original después de haberse aplicado un esfuerzo que lo deformó.
- **Plasticidad:** Capacidad que tiene un material de mantener su forma que adquirió al estar sometido a un esfuerzo que lo deforma, es decir, al deformarse este no regresa a su forma original.
- **Maleabilidad:** Propiedad de un material duro de adquirir una deformación mediante descompresión sin romperse.
- **Ductilidad:** Materiales que pueden ser estirados y conformados en hilos finos o alambre.
- **Dureza:** Resistencia que opone un material a ser penetrado por otro.
- **Tenacidad:** Resistencia de rotura de un material cuando está sometido a esfuerzos lentos de deformación.
- **Fragilidad:** Facilidad con la que se rompe un material sí que se produzca deformación. Ejemplo: vidrio.

1.6 CLASIFICACIÓN DE LA DEFORMACIÓN DE LOS MATERIALES

Al estudiar las propiedades mecánicas de los materiales nos encontramos con los distintos tipos de fuerzas o esfuerzos existentes. El esfuerzo se puede definir como la fuerza que actúa por unidad de área sobre la que se aplica la fuerza. En la figura 1.13 a) se ilustran los esfuerzos de tensión, compresión y corte.

1.6.1 Deformación Unitaria

La deformación unitaria es el cambio en dimensión por unidad de longitud. Este esfuerzo se expresa en Pa [psi], la deformación unitaria no tiene dimensiones y se puede expresar como cm/cm [in/in].

1.6.2 Deformación Elástica

La deformación elástica se define como la deformación recuperable por completo que resulta a partir de que se aplica un esfuerzo. Es de tipo reversible, esto quiere decir que el cuerpo recupera su forma original al retirar la fuerza que le provoca la deformación. En este tipo de deformación el sólido varía su estado tensional y aumenta su energía interna en forma de energía potencial elástica.

En muchos materiales, el esfuerzo elástico y la deformación elástica se relacionan linealmente. La pendiente de una curva de esfuerzo de tensión-deformación en el régimen lineal define el módulo de Young o módulo de Elasticidad (E) de un material. Las unidades del módulo de elasticidad se miden en Pa [psi]. El módulo cortante “G” se define como la pendiente de la parte lineal de la curva esfuerzo cortante-deformación cortante.

En la figura 1.13 b) se muestra una ilustración de la deformación de un material elástico, cuando se utiliza un material elástico no lineal, se utiliza la pendiente de la tangente en cualquier valor dado de esfuerzo o deformación y se considera que es una cantidad variable que reemplaza al módulo de Young (figura 1.13 c).

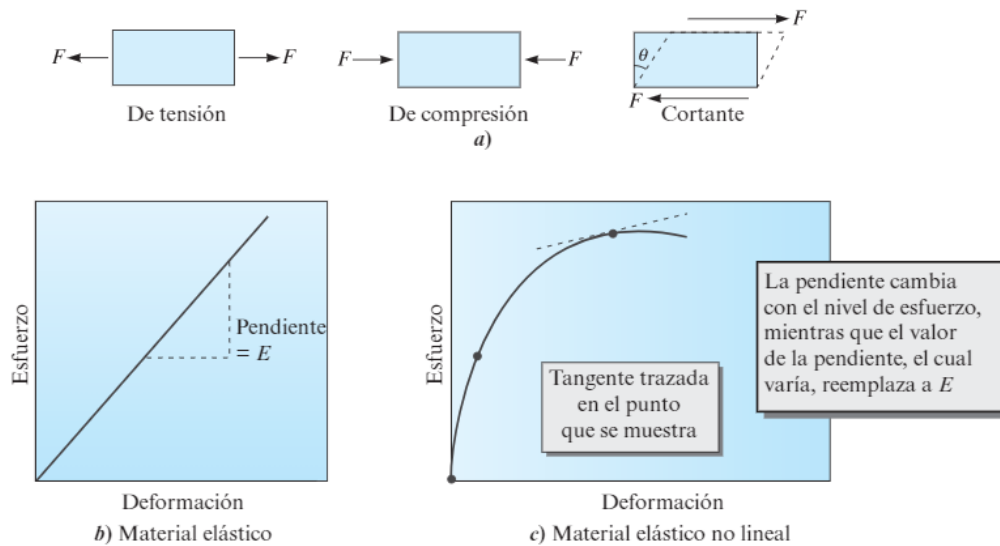


Figura 1.13 a) Esfuerzos de tensión, compresión y corte; F es la fuerza aplicada. b) Ilustración que muestra cómo se define el módulo de Young en el caso de un material elástico. c) Material elástico no lineal.¹³

1.6.3 Deformación Plástica

La deformación plástica o permanente de un material, es de tipo irreversible, lo que nos indica que el cuerpo no recuperara su forma original al retirar la fuerza que le provoca la deformación. En los materiales metálicos, la deformación plástica ocurre mediante la formación y movimiento de dislocaciones.

La rapidez a la que se desarrolla la deformación de un material se define como la rapidez de deformación. Cuando los materiales se someten a alta rapidez de deformación, este tipo de carga se conoce como carga de impacto. Un material viscoso es en el que se desarrolla la deformación durante un tiempo y el material no vuelve a su forma original después de que se elimina el esfuerzo. El desarrollo de la deformación toma tiempo y no está en fase con el esfuerzo aplicado. Una vez eliminado el esfuerzo aplicado el material permanecerá deformado. El termino inelástico es utilizado para referirse a los metales.¹³

1.7 TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Los cambios de temperatura modifican profundamente las propiedades de los materiales (figura 1.14). Los metales y las aleaciones que se hayan endurecido con ciertos tratamientos térmicos o técnicas de formado pueden perder repentinamente su resistencia al calentarlos. Las temperaturas elevadas

cambian la estructura de las cerámicas y funden o carbonizan los polímeros. Las temperaturas muy bajas pueden hacer que un metal o un polímero falle por fragilidad, aun cuando las cargas aplicadas sean bajas.¹³

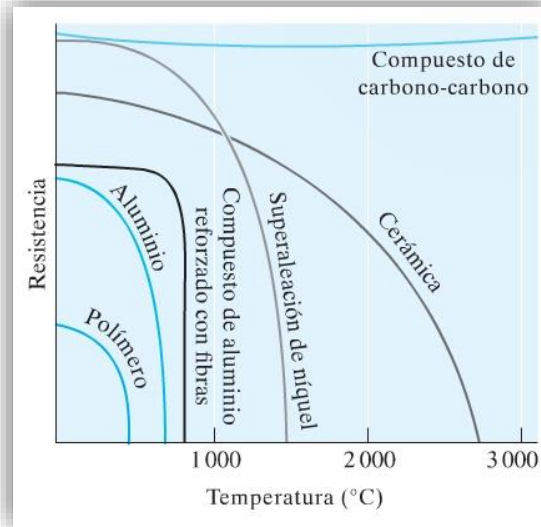


Figura 1.14 Gráfica de la resistencia de los materiales conforme el aumento de temperatura.¹³

El objetivo de los tratamientos térmicos es mejorar las propiedades y características de diversos materiales, estos consisten en calentar y mantener las piezas o herramientas del material seleccionado a temperaturas adecuadas, durante un cierto tiempo y enfriarlas luego en condiciones convenientes. De esta manera, se modifica la estructura microscópica del material, se verifican las transformaciones físicas y en ocasiones también se presentan cambios en la composición del metal.

Los principales factores en los tratamientos térmicos son el tiempo y la temperatura, estos serán establecidos de acuerdo con la composición del metal, la forma y tamaño de las muestras; y las características que se desean obtener.¹⁵ Los tratamientos térmicos más importantes son: temple, recocido, revenido y normalizado.

1.7.1 Temple

Este se caracteriza por sus enfriamientos rápidos en un medio adecuado: agua, aceite o aire. Mediante el temple se consigue:

- Disminuir la tenacidad.
- Disminuir el alargamiento unitario.

- Modificar algunas propiedades eléctricas, magnéticas y químicas.
- Aumentar la dureza y resistencia mecánica.

El temple se realiza en base a los siguientes pasos:

1. **Calentamiento de metal:** Se realiza en horno, siendo lento al hasta la temperatura especificada según el metal trabajado y rápido hasta la temperatura de temple.
2. **Homogeneización de la temperatura:** Se mantiene a la temperatura de temple durante un determinado tiempo a la pieza para que se homogenice en todo el volumen de la pieza a templar. Este tiempo se estima experimentalmente para cada pieza, aunque se puede calcular aproximadamente.
3. **Enfriamiento rápido:** Se saca la pieza del horno y se enfría el material en un fluido denominado medio de temple a una velocidad superior a la crítica de temple con objeto de obtener una estructura martensítica, y así mejorar la dureza y resistencia del acero. El medio de temple puede ser:
 - *Agua:* se consiguen buenos temples con aceros al carbono. Las piezas se agitan dentro del agua para eliminar las burbujas de gas.
 - *Aceite:* enfría más lentamente que el agua.
 - *Aire:* se enfrían las piezas con corrientes de aire.

1.7.2 Templabilidad

Se puede definir la templabilidad como la aptitud de un acero para endurecerse por formación de martensita, como consecuencia de un tratamiento térmico. Para ello, se calienta en general el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior y se enfría luego más o menos rápidamente en un medio conveniente.

1.7.3 Revenido

Es un tratamiento que se da a las piezas de acero que han sido previamente templados. Con este tratamiento, que consiste en un calentamiento a temperatura inferior a la crítica, se disminuye la dureza y resistencia de los aceros templados, se eliminan las tensiones creadas en el temple y mejora la tenacidad, quedando con la dureza o resistencia deseada.¹⁶

1.7.4 Martempering

Es un tratamiento relativamente nuevo, se le conoce como temple escalonado en el que el material caliente, a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior, se enfría en un baño de sales, también caliente, a temperaturas entre 200° y 400°, permaneciendo en las piezas durante un tiempo que debe controlarse cuidadosamente y que debe ser suficiente para que iguale la temperatura en toda la masa, y se enfría al aire.

1.7.5 Temple Superficial

Recientemente se ha desarrollado este procedimiento en el que se endurece únicamente la capa superficial de las piezas. El calentamiento se puede hacer por llama o por corrientes inducidas de alta frecuencia, pudiéndose regular en ambos casos perfectamente la profundidad del calentamiento y con ello la penetración de la dureza.¹⁵

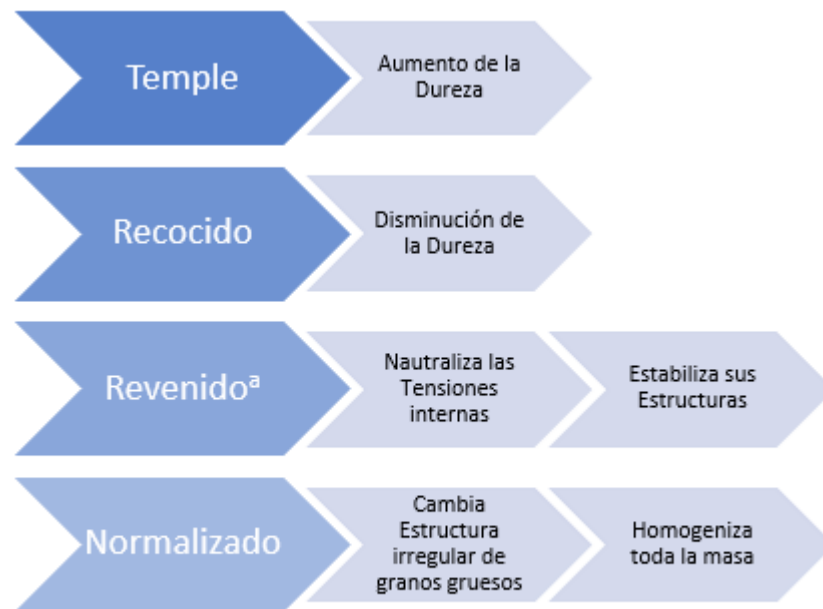
1.8 MODIFICACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS PARTIR DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Debido a la necesidad a lo largo de los años en la industria se han requerido materiales con propiedades específicas y de bajo costo. Dado que de modo natural no existen metales con todo tipo de características específicas se ha recurrido a la creación de aleaciones. una aleación se puede definir como la mezcla homogénea de un metal en estado fundido con, al menos, otro elemento metálico o no, obteniendo un producto final que presenta características metálicas.

Las aleaciones se obtienen fundiendo los diversos metales en un crisol y dejando solidificarse lentamente, consiguiendo así un material con una estructura granular cristalina formada por diferentes microconstituyentes como: cristales simples, cristales de elementos compuestos, cristales de solución sólida. Las propiedades de las aleaciones dependerán de su composición y del tamaño, forma y distribución de sus fases o microconstituyentes.

Uno de los métodos más efectivos para mejorar las propiedades mecánicas de los metales es someterlos a tratamientos térmicos. Dependiendo el objetivo principal que tenemos es el tipo de tratamiento térmico que se deberá usar, los más importantes y sencillos se muestran en la figura

1.15, en la cual vemos la propiedad mecánica a modificar y el tratamiento térmico que le corresponde.



Este proceso es indispensable aplicarlo a un material previamente

Figura 1.15 Propiedades mecánicas modificadas según el tratamiento térmico aplicado.

Comprendiendo la relación entre la microestructura, composición, síntesis y procesamiento es posible el desarrollo del conocimiento a profundidad de los materiales. Clasificando estos en cinco grupos según sus propiedades, estos son: metales, cerámicos, polímeros, semiconductores y materiales compuestos. Se debe tener en cuenta que, al modificar algún aspecto de la relación entre estructura interna, procesamiento y propiedades del material, cualquier otra o ambas, también cambiarán. Los metales es el grupo con mayor trascendencia para este trabajo ya que mediante tratamientos térmicos se puede modificar sus propiedades mecánicas.

En síntesis, se puede decir que los tratamientos térmicos ayudan a mejorar las propiedades y características de diversos materiales, afectando la estructura microscópica del metal, e incluso podrían presentarse en la composición de dicho metal.

Para los materiales no ferrosos, como lo es el aluminio utilizado en este trabajo, es común que se realice el envejecido como tratamiento térmico, además de poder ser tratadas por medios de recocidos y deformación en frío.

CAPITULO II

ESTADO DEL ARTE

2.1 GENERALIDADES DEL ALUMINIO

El aluminio es un metal que posee una apariencia agradable a la vista, es un buen conductor de calor y corriente eléctrica, se considera un metal liviano, no tóxico y resistente a la oxidación, en su estado puro posee propiedades mecánicas bajas.

Debido a estas bajas propiedades mecánicas es necesario alearlo con otros elementos, los más comunes en estas aleaciones son el cobre, manganeso, magnesio, silicio y zinc. Una vez aleado este aumentará su resistencia mecánica en base a la deformación o mediante tratamientos térmicos.¹⁶

2.1.1 Características físicas

El aluminio es un metal ligero, cuya densidad es de 2.700 kg/m³, la cual es mucho menos comparada el acero esta equivale a un tercio de su densidad. Tiene un punto de fusión bajo: 660 °C (933 °K); en la tabla 2.1 podemos apreciar las propiedades físicas más comunes del aluminio.

Su estructura es cúbica centrada en caras. peso atómico del aluminio es de 26,9815 u. Es de color blanco brillante, con buenas propiedades ópticas y un alto poder. Resistente a la corrosión, a los productos químicos, a la intemperie y al agua de mar, gracias a la capa de Al₂O₃ formada. Es buen conductor sin elementos aleantes. Posee alta absorbancia y reflectancia.

El aluminio es abundante en la naturaleza, es el tercer elemento más común en la corteza terrestre, tras el oxígeno y el silicio. Su producción metalúrgica a partir de minerales es muy costosa y requiere gran cantidad de energía eléctrica, sin embargo, en las últimas décadas su obtención es más barata. Una vez desechado el material pasa a ser fácil de reciclar.

Tabla 2.1 Propiedades físicas más comunes del aluminio.¹⁷

PROPIEDAD FÍSICA	ALUMINIO
Símbolo	Al
Número atómico	13.0
Peso atómico	26.98154
Red espacial	Cúbica de caras centradas
Diámetro atómico (Å)	2.8
Parámetro de red	4.04

Densidad (gr/cm³)	2.7
Punto de fusión (°C)	660.0
Módulo de elasticidad (MPa)	70.0
Calor específico prom. 0-100°C (J·kg⁻¹K⁻¹)	917.0
Conductividad térmica 20-100°C (Wm⁻¹K⁻¹)	238.0
Coef. de expansión térmica 0-100°C (10⁻⁶K⁻¹)	23.5
Resistividad eléctrica a 20°C (μ ohm cm⁻¹)	2.67

2.1.2 Características mecánicas

El aluminio es de fácil mecanizado debido a su baja dureza. Se considera un material muy maleable, es bastante dúctil, se puede utilizar para soldadura. En conjunto con CO₂ absorbe el doble del impacto.

Para su uso como material estructural se necesita alearlo con otros metales para mejorar las propiedades mecánicas, así como aplicarle tratamientos térmicos. Permite la fabricación de piezas por fundición, forja y extrusión.

2.2 SERIES DE ALUMINIO SEGÚN SUS ALEANTES

Las aleaciones de aluminio se clasifican en función del elemento aleante usado, como se muestra en la figura 2.1.

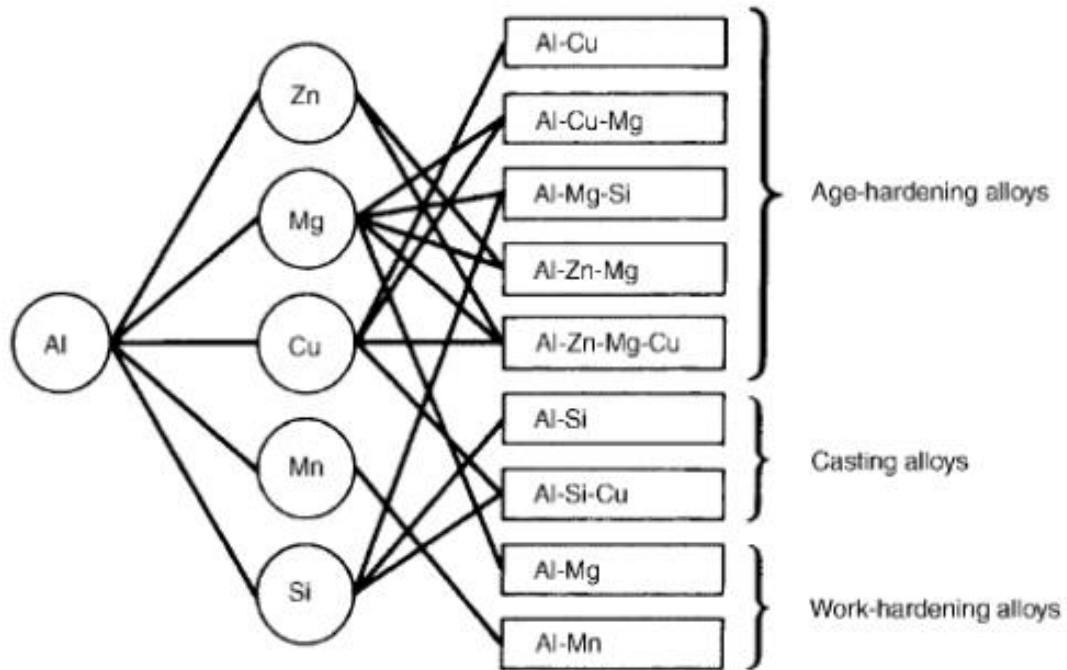


Figura 2.1 Clasificación del aluminio según sus aleantes.¹⁸

2.3 CLASIFICACIÓN DEL ALUMINIO SEGÚN SU PROCESO

Las aleaciones de aluminio se clasifican en:

- Aleaciones de aluminio para molde (fundido).
- Aleaciones de aluminio para forja.

Las aleaciones de aluminio para moldeo se diseñan para una adecuada colada del metal líquido en moldes que reproducen directamente la forma de la pieza. Con este tipo de aleaciones se pueden fabricar piezas complejas. El inconveniente del proceso de moldeo es la menor calidad micro-estructural (poros, cavidades de concentración, rechupes, segregación).

En las aleaciones de aluminio para forja la colada se realiza en lingotes que serán deformados en laminación o extrusión, obteniendo distintos semiproductos (chapas, barras, planchas, alambres). Estas aleaciones tienen mayor calidad que las de moldeo, debido a que poseen menos defectos y al ser menos agresivos. Se utilizan para aplicaciones estructurales. En la figura 2.2 podemos apreciar el sistema de clasificación de las aleaciones de aluminio.

Aleaciones forjadas:		
1xxx ^a	Al comercialmente puro (>99% Al)	No endurecible por envejecimiento
2xxx	Al-Cu y Al-Cu-Li	Endurecible por envejecimiento
3xxx	Al-Mn	No endurecible por envejecimiento
4xxx	Al-Si y Al-Mg-Si	Endurecible por envejecimiento si contiene Mg
5xxx	Al-Mg	No endurecible por envejecimiento
6xxx	Al-Mg-Si	Endurecible por envejecimiento
7xxx	Al-Mg-Zn	Endurecible por envejecimiento
8xxx	Al-Li, Sn, Zr, o B	Endurecible por envejecimiento
9xxx	No usada actualmente	
Aleaciones fundidas:		
1xx.x. ^b	Al comercialmente puro	No endurecible por envejecimiento
2xx.x.	Al-Cu	Endurecible por envejecimiento
3xx.x.	Al-Si-Cu o Al-Mg-Si	Algunas son endurecible por envejecimiento
4xx.x.	Al-Si	No endurecible por envejecimiento
5xx.x.	Al-Mg	No endurecible por envejecimiento
7xx.x.	Al-Mg-Zn	Endurecible por envejecimiento
8xx.x.	Al-Sn	Endurecible por envejecimiento
9xx.x.	No usada actualmente	

^aEl primer dígito muestra el elemento principal de aleación, mientras que el segundo muestra modificación; los últimos dos dígitos muestran el porcentaje decimal de la concentración de Al (p. ej., 1060 será una aleación con 99.6% de Al).

^bEl último dígito indica la forma del producto, 1 o 2 es lingote (depende de la pureza) y 0 para fundición.

Figura 2.2 Sistema de clasificación de aleaciones de aluminio.¹³

2.3.1 Series de aluminio para fundición.

Se basan en los mismos sistemas de aleación de las aleaciones de aluminio laminado y se clasifican de manera similar en cuanto a los tipos tratables y no tratables térmicamente. La principal diferencia consiste en que se presenta en forma de piezas moldeadas.

Las características que la industria busca en el aluminio son de moldeo, son una buena colabilidad, es decir la aptitud para llenar correctamente alguna cavidad de un molde, una contracción relativamente pequeña y la no formación de fisuras, las cuales son causadas por la fragilidad del material.

Gracias a que las temperaturas de fusión del aluminio son relativamente bajas, permiten utilizar, además de moldes de arena, moldes metálicos, donde el material se introduce bien sea por la gravedad por presión (moldeo por inyección).

- **Serie 1xx.x:** Fundición de aluminio puro (99.0 de pureza). Este tipo de aleación tiene una ductilidad y resistencia a la corrosión excelente, aunque su resistencia eléctrica es baja. Es empleada en piezas moldeadas en arena y raramente en inyección.

- **Serie 2xx.x:** Se compone principalmente de aluminio aleado con cobre. Las aleaciones de este grupo tienen las características mecánicas más elevadas de todos los aluminios para moldeo: resistencia a la tracción, límite elástico, tenacidad y resistencia al desgaste.
- **Serie 3xx.x:** Aluminio aleado principalmente con silicio y adiciones de cobre y/o magnesio. Las aleaciones de esta familia tienen una gran variedad de aplicaciones sobre todo si las características mecánicas exigidas son más altas que las de otros grupos de aleaciones, incluso a temperaturas altas. Se funde fácilmente lo que posibilita al trabajo del material para formas complicadas, tiene buena maquinabilidad, pero no presentan la misma resistencia a la corrosión y a los agentes químicos.
- **Serie 4xx.x:** fundición de aluminio aleado principalmente con silicio que le confiere fluidez al material fundido, disminución de la fisuración y de la contracción en enfriamiento, características que permiten diseñar piezas complejas con cambios importantes en cada sección. Tienen buena soldabilidad y ductilidad.
- **Serie 5xx.x:** Fundición de aluminio con magnesio, la cual se caracteriza por una gran resistencia a la corrosión, incluso en agua de mar y en atmósfera salina. Tienen muy buena maquinabilidad, pueden pulirse muy bien.
- **Serie 7xx.x:** Fundición de aluminio aleado con zinc, La característica mas importante es la capacidad que tiene de auto-templarse sin necesidad de solubilización, seguido de una maduración natural (diversas semanas) o artificial (diversas horas), lo cual facilita la fabricación de piezas grandes con buenas características mecánicas: tenacidad, maquinabilidad, y resistencia a la corrosión.¹⁹

2.3.2 Series de aluminio para forja.

Las aleaciones de forja se suelen agrupar en aleaciones no tratables térmicamente. Estas únicamente se pueden endurecer por acritud (series 1xxx, 3xxx, 5xxx), y las aleaciones tratables térmicamente, que son aquellas en las que se puede obtener una mejora de las propiedades mecánicas (2xxx, 6xxx, 7xxx).

2.3.2.1 Aleaciones de forja no tratadas térmicamente (acritud)

- Aluminio sin alear (serie 1XXX)

El aluminio puro tiene baja dureza y resistencia (por lo que no tiene aplicación estructural). Estas características pueden elevarse significativamente por acritud. Posee un excelente comportamiento a corrosión. Tiene aplicaciones en arquitectura y en la industria química, además de aplicaciones domesticas comunes, como el papel de aluminio.

Debido a que es un buen conductor eléctrico, el aluminio se usa como conductor, sobre todo en aplicaciones en las que el peso es un factor a tener en cuenta. Hay versiones de alta pureza para conductores eléctricos, que normalmente incorporan bajos niveles de (Ti + Cr + V + Mn), porque disminuyen la conductividad, y que incorporan boro, para hacer precipitar los elementos anteriores.

- Aleaciones Al-Mn (serie 3XXX)

La adición de manganeso al aluminio mejora la resistencia mecánica, manteniendo un excelente comportamiento a corrosión y una alta ductilidad. El manganeso no se disuelve en el aluminio a temperatura ambiente, pero a altas temperaturas, puede disolverse hasta un máximo de 1,8% de Mn. Sin embargo, nunca se llega a estas concentraciones porque existe el riesgo de aparición de fases grandes $MnAl_6$, que no son deseables.

Tras la solidificación, la aleación queda sobresaturada en Mn. Un calentamiento posterior a temperatura elevada favorece la precipitación de dispersiones, ricos en manganeso, que proporcionan un pequeño endurecimiento adicional. La forma realmente eficaz de aumentar la dureza en estas aleaciones es por acritud. La adición de magnesio produce un efecto de refuerzo por solución sólida, además de acelerar el endurecimiento por acritud, aumentando la densidad de dislocaciones y haciendo que se distribuyan de manera más homogénea. Son soldables. Su principal aplicación es en envases y latas del sector alimentario (ya que pesan poco, son fácilmente reciclables y la alta conductividad térmica del aluminio hace que el producto contenido en ellas se enfríe rápidamente).

- Aleaciones Al-Mg (serie 5XXX)

El diagrama Al-Mg presenta una gran variación de solubilidad del magnesio con la temperatura, desde un 15% que es posible disolver a 450°C, hasta un 1% a temperatura ambiente. A pesar de esta amplia variación de solubilidad, muestran una pobre respuesta ante los tratamientos térmicos, debido a que los precipitados que se forman (Al_3Mg_2) son muy grandes y poco numerosos. Por ello, se consideran no tratables térmicamente y el proceso de endurecimiento utilizado generalmente es la acritud.

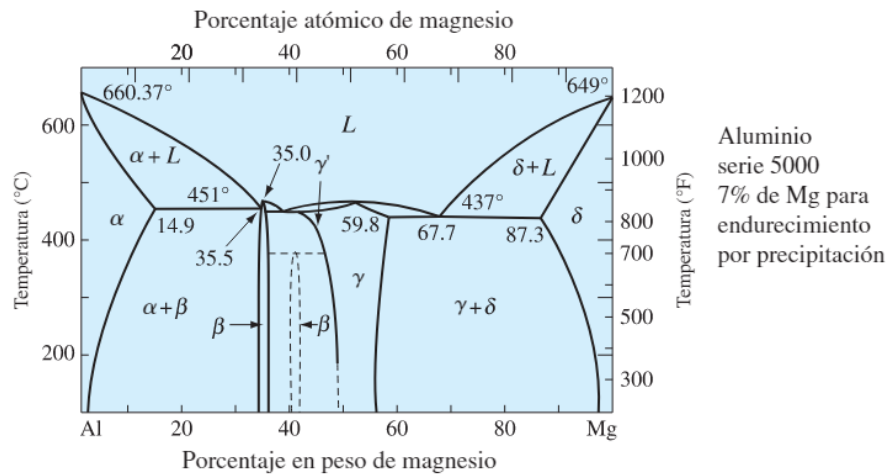


Figura 2.3 Diagrama de fases de Al-Mg. Las líneas discontinuas indican límites inciertos de solubilidad.^{13,20}

La adición del magnesio al aluminio es favorable porque endurece por solución sólida al quedar el Mg atrapado en la red. Además, el magnesio interacciona con las dislocaciones durante la acritud, favoreciendo el endurecimiento, y mejora el comportamiento a corrosión, sobre todo en los ambientes marinos, siendo el comportamiento incluso mejor que el del propio aluminio puro. En ocasiones se añaden aleantes formadores de dispersiones para elevar la temperatura de re-cristalización y subir ligeramente la resistencia.

Estas aleaciones, en estado H1, no son estables y con el tiempo van perdiendo dureza y resistencia, con un consecuente aumento de la plasticidad, por la reordenación de dislocaciones y soluto buscando minimizar la energía del sistema, que atrae como consecuencia una menor distorsión global y una mayor facilidad para el movimiento de las dislocaciones. Como se comentó previamente, es muy peligroso que esta pérdida de propiedades tenga un lugar en servicio, por lo que a las aleaciones Al-Mg se les da un tratamiento H3 (estabilización) para que la disminución de propiedades se produzca en un tratamiento controlado y ya no haya variación en servicio.

También aparecen problemas de inestabilidad en el caso de soluciones con un porcentaje en magnesio superior al 3%, debido a la tendencia a precipitar Al_2Mg_3 en el borde de grano (tendencia que se acelera al aumentar la acritud y la temperatura), lo que a su vez aumenta el riesgo de corrosión intergranular, por exfoliación o bajas tensiones. Como consecuencia, no se usan aleaciones con un porcentaje superior al 5,5% de Mg.

Estas aleaciones se utilizan en los sectores de alimentación, la industria química, y en aplicaciones marinas y criogénicas. También son soldables.

2.3.2.2 Aleaciones de forja tratadas térmicamente:

- Aleaciones Al-Mg-Si (serie 6XXX)

Las aleaciones de Al-Mg no son tratadas térmicamente, pero la adición de silicio si permite realizar tratamientos de solución y maduración. Cuando ambos elementos están presentes en el aluminio, forman un compuesto Inter metálico de valencia normal, el SiMg_2 , que cumple una relación $\% \text{Mg} \% \text{Si}$ (en peso) $= 1,73$. El compuesto SiMg_2 se comporta como un único componente, por lo que puede trabajarse con el diagrama pseudobinario Al- SiMg_2 , en el que hay variación de solubilidad con la temperatura (no es soluble a temperatura ambiente y se disuelve el 1,8% a elevadas temperaturas).

La solución solida sobresaturada se descompone durante la maduración según una secuencia: $\text{SS} \rightarrow \text{zonas G-P (aciculares)} \rightarrow \beta' \rightarrow \beta$. El precipitado β' (SiMg_2 hexagonal) es semi-coherente, mientras que el precipitado de equilibrio es incoherente (Si Mg_2 cubico centrado en caras). En cuanto al tratamiento que se da a estas aleaciones, pueden ser enfriamientos directos desde la temperatura de extrusión (T_1 , T_5) o con posterior solución (T_4 , T_6). La maduración natural es débil, por lo que se suelen someter a maduración artificial.

Las aleaciones Al-Mg-Si poseen propiedades mecánicas medias dentro del conjunto de las aleaciones de aluminio, además de buena forjabilidad y facilidad de extrusión, buena soldabilidad y buen comportamiento a corrosión. Su aplicación más habitual es en arquitectura, mobiliario y carpintería metálica de aluminio, en ventanas y puertas. También existen aleaciones específicas para conductores eléctricos.

Cuando mayor sea la cantidad de presente (hasta un 1,8%), mayor es el límite elástico y la resistencia. Un exceso de magnesio respecto de la relación ideal mejora poco las características mecánicas e incluso puede ser negativo, ya que puede reducir la solubilidad del SiMg_2 . Un exceso

de silicio eleva la resistencia y el límite elástico, pero empeora ligeramente el comportamiento a corrosión y disminuye la tenacidad. La adición de cobre eleva la resistencia mecánica y retrasa la cinética de maduración natural que, en ocasiones, si se produce antes de realizar una maduración artificial, conduce a unas menores propiedades mecánicas. También se pueden añadir elementos formadores de dispersiones (Mn, Cr, Zr) con la finalidad de conseguir un efecto anti-recristalización y una mejora en la tenacidad. La adición de Pb y Bi facilita el mecanizado de estas aleaciones. Por otra parte, la capacidad de extrusión es menor cuanto mayor sea el contenido de SiMg₂. Los excesos tanto de Si como de Mg son perjudiciales desde este punto de vista, sobre todo en el caso del Mg. También es negativa la presencia de formadores de dispersores.

2.3.2.3 Endurecimiento por acritud

La aplicación de deformación plástica en frío (conocido como estado H1) mejora significativamente las propiedades mecánicas del aluminio puro o de una aleación de aluminio: se produce un notable incremento del límite elástico y la dureza, un aumento de la resistencia a tracción, y al mismo tiempo una pérdida de plasticidad y tenacidad en el material.

Tras la deformación plástica puede aplicarse un recocido contra acritud, para producir una evolución de la microestructura y de las propiedades en función de la temperatura y del tiempo. Al aumentar la temperatura de recocido, para un tiempo dado, bajan la dureza y el límite elástico, aumentan la plasticidad del material. La presencia de elementos aleantes, disueltos o precipitados, modifica la cantidad y velocidad de endurecimiento por acritud. Tras la acritud puede darse un recocido parcial, quedando el material en un estado H2.

2.4 ESTADOS DE TRATAMIENTO DEL ALUMINIO

El aluminio y sus aleaciones pueden someterse a diferentes tratamientos térmicos y mecánicos con el fin de mejorar sus características mecánicas. Las designaciones de los estados de tratamientos básicos en los que se encuentran las diferentes aleaciones de aluminio son las siguientes:

- **F: Estado bruto.** Es el material tal como sale del proceso de fabricación.
- **O: Recocido.** Se aplica a materiales ya sea de forja como de fundición que han sufrido un recocido completo.

- **O1:** Recocido a elevada temperatura y enfriamiento lento.
- **O2:** Sometido a tratamiento termo mecánico.
- **O3: Homogeneizado.** Esta designación se aplica a los alambrones y a las bandas de colada continua, que son sometidos a un tratamiento de difusión a alta temperatura.
- **W: Tratamiento térmico de solución y temple.** Solución tratada térmicamente. Se aplica a materiales que después de recibir un tratamiento térmico quedan con una estructura inestable y sufren envejecimiento natural.
- **H: Acritud.** Viene con materiales a los que se ha realizado un endurecimiento por deformación.
- **H1: Acritud solamente.** Endurecido por deformación hasta obtener el nivel deseado y sin tratamiento posterior.
- **H2: Acritud y recodado parcial.** Endurecido en exceso por deformación y recocido parcial para recuperar suavidad sin perder ductilidad.
- **H3: Acritud y estabilizado.** Aplicado a las aleaciones que son endurecidos por deformación plástica en frío y cuyas características mecánicas han sido estabilizadas posteriormente por un tratamiento térmico a baja temperatura. La estabilización generalmente disminuye la resistencia mecánica y aumenta la ductilidad. Esta denominación es únicamente aplicable a aquellas aleaciones que si no son estabilizadas sufren un ablandamiento a temperatura ambiente, como las de AlMg.
- **H4: Acritud y lacado o pintado.** Son aleaciones endurecidas en frío y que pueden sufrir un cierto recocido en el tratamiento de curado de la capa de pintura o laca dada.¹² En esta clasificación se usa un segundo dígito (en ocasiones es necesario un tercer dígito) que indica el grado de endurecimiento por deformación.
- **T: Tratamiento térmico de endurecimiento estructural.** Denomina a las aleaciones que han sido endurecidos por tratamiento térmico con o sin endurecimiento por deformación posterior. Las designaciones de W y T solo se aplican a aleaciones de aluminio ya de forja o de fundición que sea termo tratables.
- **T1: Tratamiento de temple desde la temperatura de extrusión y maduración natural.** Aplicado a las aleaciones, que desde la temperatura de extrusión reciben un enfriamiento a velocidad suficiente (temple), de manera que, con una maduración natural posterior, se incrementan sus propiedades mecánicas. Se incluyen en este estado las aleaciones que después del enfriamiento

son sometidos a un aplanado o enderezado por tracción sin efectos sensibles sobre las propiedades mecánicas.

- **T2: Tratamiento de temple desde la temperatura de extrusión, acritud y maduración natural.** Aplicado a las aleaciones que después de un enfriamiento a velocidad suficiente (temple) desde la temperatura de extrusión (o laminación) reciben una acritud determinada seguida de un madurado natural con objeto de mejorar su resistencia mecánica. Se incluyen en este estado las aleaciones que después del temple son sometidos a un aplanado o enderezado por tracción con efectos sobre las propiedades mecánicas.
- **T3: Tratamiento térmico de solución, temple, acritud y madurado natural.** Aplicado a las aleaciones que después de un tratamiento de solución o temple, reciben una acritud determinada seguida de una maduración natural con objeto de mejorar su resistencia mecánica. Se incluyen en este estado las aleaciones que después del temple son sometidos a un aplanado o enderezado por tracción con efecto sobre sus propiedades mecánicas.
- **T4: Tratamiento térmico de solución, temple y maduración natural.** Aplicado a las aleaciones que después de un tratamiento de solución, temple y maduración natural mejoran sus propiedades mecánicas. Se incluyen en este estado los productos que después del temple son sometidos a un aplanado o enderezado por tracción sin efecto sobre las propiedades mecánicas.
- **T5: Tratamiento térmico de temple desde la temperatura de extrusión y maduración artificial.** Aplicado a las aleaciones que desde la temperatura de extrusión reciben un enfriamiento con aire forzado a velocidad suficiente (temple), de manera que con una maduración artificial posterior se incrementan sus propiedades mecánicas. Se incluyen en este estado las aleaciones que después del enfriamiento son sometidos a un aplanado o enderezado por tracción, sin efectos sensibles sobre las propiedades mecánicas.
- **T6: Tratamiento térmico de solución, temple y maduración artificial.** Solución tratada térmicamente y envejecida artificialmente. Son designados de esta forma las aleaciones que después de un proceso de conformado a alta temperatura (moldeo o extrusión) no son endurecidos en frío, sino que sufren un envejecimiento artificial.
- **T7: Solución tratada térmicamente y sobre envejecida para su completa estabilización.** Aplicado a las aleaciones que son madurados artificialmente después del tratamiento de solución y temple, más allá del límite correspondiente a la máxima resistencia con el fin de controlar alguna característica significativa.

- **T8: Térmicamente tratada por disolución, trabajada en frío y envejecida artificialmente.** Aplicado a las aleaciones que reciben una acritud determinada entre el temple y la maduración artificial para mejorar su resistencia. Se incluyen en este estado las aleaciones que después del temple son sometidos a un aplanado o enderezado por tracción con efecto sobre las propiedades mecánicas.
- **T9: Tratamiento térmico de solución, temple, maduración artificial y acritud.** Aplicado a las aleaciones que son deformados en frío después del tratamiento de solución, temple y maduración artificial, para mejorar su resistencia mecánica.
- **T10: Tratamiento térmico de temple desde temperatura de extrusión, acritud y maduración artificial.** Enfriado desde un proceso de fabricación realizado a una elevada temperatura, trabajado en frío y envejecido artificialmente hasta una condición sustancialmente estable.

Existen variantes del estado T, a estas variantes se les añaden a la T dos dígitos. Estos dos dígitos son específicos para cada producto y se usan para estado de alivio de tensiones en productos fabricados mediante el proceso de forja.

2.5 CURVA ESFUERZO DEFORMACION - PROPIEDADES MECÁNICAS

Si alargamos (deformamos) un material, el material responderá oponiendo resistencia al estímulo de alargamiento. La resistencia se manifiesta en el esfuerzo o la fuerza que debemos ejercer para alargar el material. Esto se expresa como sigue:

Esfuerzo = (Módulo de Young) (Deformación)

$$\bullet \quad \sigma = E \cdot \epsilon \quad (2.1)$$

Como veremos pronto, la deformación es el estímulo de alargamiento normalizado y el esfuerzo es la fuerza de respuesta normalizada. En el caso de deformaciones muy pequeñas, esta relación se conoce como ley de Hooke para la tensión o compresión simple. La constante de proporcionalidad E de la ecuación se denomina módulo elástico de Young y es una propiedad del

material. Antes de considerar la relación de E (módulo elástico de Young) con los enlaces, necesitamos presentar los conceptos de esfuerzo y deformación.

2.5.1 Concepto de esfuerzo

Si una fuerza, F , aplicada en dirección normal a la sección transversal de una barra, se divide entre la sección transversal, A , de la barra, se obtiene un término normalizado que se llama esfuerzo; por tanto,

$$\bullet \quad \sigma = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

Esto da la intensidad de la fuerza que el material experimenta, donde se aplica la misma fuerza normal a dos materiales con secciones transversales A_1 y A_2 , con $A_2 > A_1$. Aunque la fuerza es la misma, la intensidad (esfuerzo) de la fuerza en A_1 es mayor que en A_2 ; Cuando el esfuerzo alarga los filamentos de un material, se le denomina esfuerzo de tensión. Cuando el esfuerzo oprime los filamentos para acortarlos, se le llama esfuerzo de compresión. Por convención, el esfuerzo de tensión se toma como positivo, en tanto que el esfuerzo de compresión es negativo. Ambos esfuerzos se describen como esfuerzos normales porque las fuerzas actúan en dirección perpendicular al área.

En estas ecuaciones, las fuerzas en unidades SI están en newton, N, por lo que los esfuerzos se miden en newton por metro cuadrado, $N \cdot m^{-2}$. Esta unidad se llama pascal (Pa), y es pequeña. Por lo común, el esfuerzo se informa en mega newton por metro cuadrado o mega pascales ($MN \cdot m^{-2}$ o MPa).

En general, el esfuerzo sobre un cuerpo no es normal ni paralelo a la superficie. En este caso, la fuerza que ejerce sobre el cuerpo se resuelve en fuerzas normal y paralela a la superficie para obtener los esfuerzos normal y cortante.

2.5.2 Curva de esfuerzo-deformación ingenieril

La curva de esfuerzo-deformación ingenieril se obtiene a partir de los datos de carga-elongación, $P-\Delta L$, de la manera siguiente. El esfuerzo ingenieril se obtiene dividiendo la carga, P , en cada momento, entre el área original del espécimen, A_0 . La deformación ingenieril se obtiene dividiendo la elongación, ΔL , en cada instante, entre la longitud de calibre original, L_0 . Por tanto, cada punto de la curva de $P-\Delta L$ se convierte en s y y mediante las fórmulas tal y como se muestra en la figura 2.4.

$$\bullet \quad S = \frac{P}{A_0} \quad (2.3)$$

- $$e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.4)$$

Los puntos convertidos que se utilizan para trazar la curva s-e, que tiene fundamentalmente la misma forma que la curva P-ΔL

Las curvas s-e de los materiales dúctiles muestran tres partes características: una porción lineal inicial que se conoce como la región elástica; una porción cuya pendiente disminuye continuamente a medida que el esfuerzo aumenta hasta que la pendiente se hace cero (conocida como la región de endurecimiento por deformación), y una porción donde el esfuerzo se reduce y donde el espécimen se adelgaza y exhibe deformación no uniforme hasta que se rompe. La porción inicial lineal refleja la respuesta del material de acuerdo con la ley de Hooke (ecuación 2.5) para deformaciones pequeñas tal como se muestra en la figura 2.4.

- $$E = \frac{s}{e} \quad (2.5)$$

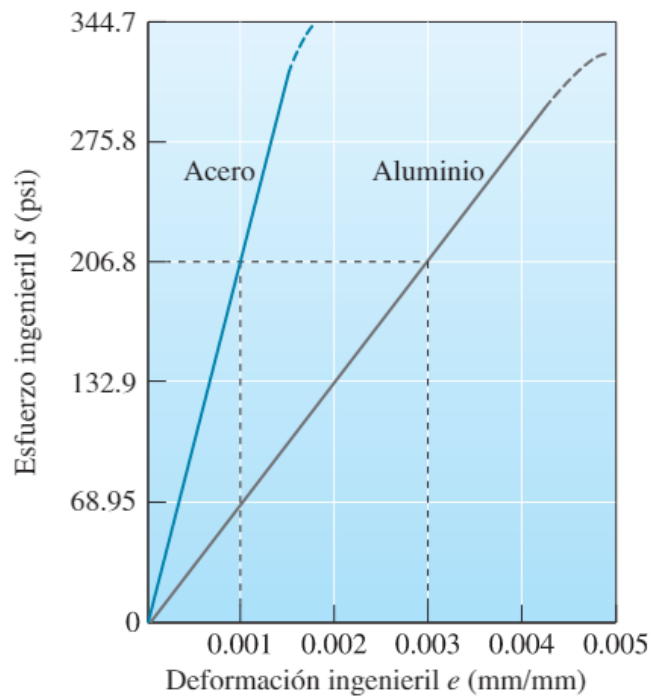


Figura 2.4 Comparación del comportamiento elástico del acero y aluminio. Ante un esfuerzo dado, el aluminio se deforma de manera elástica tres veces más que el acero.¹³

Por tanto, si se incrementa la sensibilidad de la deformación en esta región, el módulo de Young del material es la pendiente de esta porción lineal inicial. Si el material se alarga en esta región, se comporta elásticamente, lo que significa que el material recuperará su forma original

cuando se elimine el esfuerzo. En otras palabras, un material no cambia de forma si el esfuerzo aplicado está en esta porción lineal.

2.5.3 Resistencia de los materiales

La resistencia mecánica de un material determina la cantidad de fuerza o carga que puede soportar antes de ceder. El criterio de falla que se utiliza en el diseño puede ser diferente para distintos materiales y, por consiguiente, existen múltiples criterios de resistencia. En el caso de los metales y de los polímeros termoplásticos, el criterio de diseño se fundamenta habitualmente en el esfuerzo de fluencia. Sin embargo, debido a que los materiales pueden haber experimentado un trabajo en frío o una deformación plástica previa, las resistencias a la cedencia puede variar desde el esfuerzo de fluencia para el caso de un material recocido, hasta el esfuerzo de fluencia para un material que ha sido endurecido por deformación. Para la mayor parte de los fines de diseño, se supone que el esfuerzo de fluencia es el mismo cuando se aplica tensión como cuando se aplica compresión.

Como se observa en la figura 2.5 el esfuerzo de fluencia corresponde a la indicación del esfuerzo máximo que se puede desarrollar en un material sin causar una deformación plástica. Es el esfuerzo en el que un material exhibe una deformación permanente especificada y es una aproximación práctica del límite elástico.

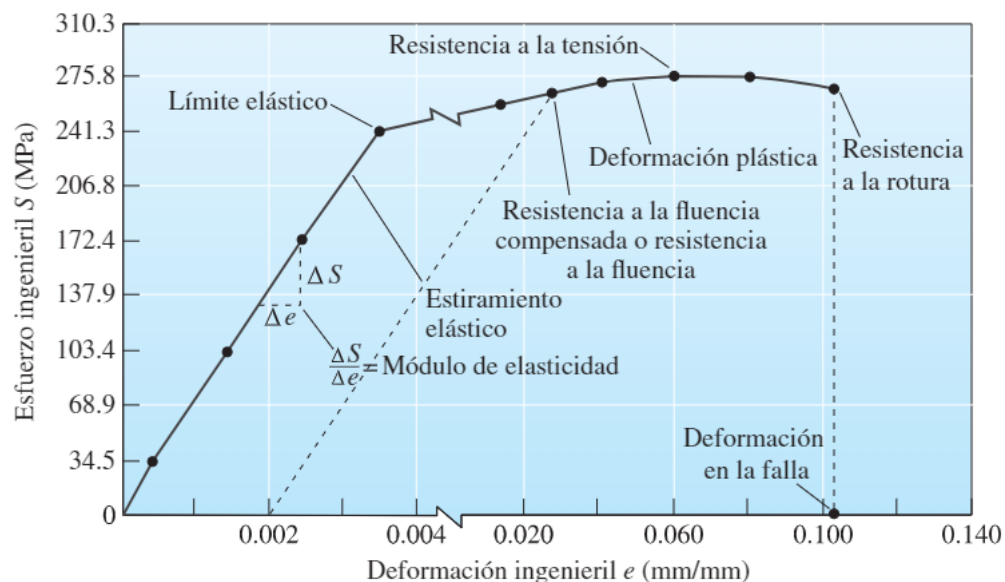


Figura 2.5 El módulo elástico se determina a partir del esfuerzo-deformación expandiendo la escala para la deformación inicial.¹³

2.5.4 Ductilidad

La ductilidad es la propiedad de un material que permite impartirle diferentes formas sin que se rompa. Un material que puede hacer esto, se dice que es dúctil, en tanto que un material que no cambia de forma o lo hace con dificultad o se rompe es frágil o quebradizo. Por lo que toca a consideraciones de diseño, la ductilidad influye directamente en la tenacidad a la fractura y en la capacidad de fabricar un componente: un material dúctil tiene mayor tenacidad a la fractura que un material frágil. Por otra parte, la selección de un material para aplicaciones de ingeniería depende de modo importante de su capacidad para recibir la forma del componente o producto deseado. Esto explica la importancia y el uso en ingeniería de los metales en comparación con las cerámicas, porque los metales se comportan mejor en la producción en masa que las cerámicas.

2.6 ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN

Aplicando un esfuerzo S_1 que sea mayor que la resistencia a la fluencia S_y , se provoca una torcedura o deformación permanente. Cuando se elimina el esfuerzo, permanece una deformación e_1 , tal como se muestra en la curva de esfuerzo-deformación unitaria de un material metálico dúctil (figura 2.6).

Cuando se aplica un esfuerzo que supera a resistencia a la fluencia original del material metálico, este se endurece por deformación o trabajo en frío, de manera simultánea se deforma.

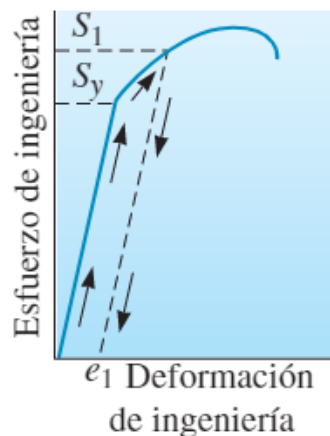


Figura 2.6 Desarrollo del endurecimiento por deformación a partir del diagrama de esfuerzo-deformación. Espécimen se esfuerza más allá de la resistencia de fluencia S_y antes de que se elimine el esfuerzo.¹³

El trabajo en frío es una manera eficaz de moldear materiales metálicos mientras, de manera simultánea, se incrementa su resistencia. El inconveniente de este proceso es la pérdida de ductilidad. El aluminio puede perder casi 70% su resistencia como resultado del endurecimiento por deformación.¹³

2.6.1 Exponente del endurecimiento por deformación (n)

El exponente del endurecimiento por deformación (n) es la respuesta de un material metálico sometido a este. Este exponente está gobernado por el comportamiento de la ley de potencias basado en la ecuación 2.6 la cual corresponde a la relación entre el esfuerzo verdadero σ , la deformación verdadera ϵ y el exponente del endurecimiento por deformación. El coeficiente de resistencia (K) es igual al esfuerzo cuando $\epsilon=1$. Al aplicar el logaritmo en ambos lados de la ecuación 2.6 se obtiene la ecuación 2.7.

$$\bullet \quad \sigma = K\epsilon^n \quad (2.6)$$

$$\bullet \quad \ln \sigma = \ln K + n \ln \epsilon \quad (2.7)$$

2.6.2 Sensibilidad a la velocidad de deformación (m)

La sensibilidad de deformación del esfuerzo se define como:

$$\bullet \quad m = \left[\frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial(\ln \dot{\epsilon})} \right] \quad (2.8)$$

Esta se define como cambia el esfuerzo de flujo con la rapidez (velocidad) de deformación $\dot{\epsilon}$. por lo general, la sensibilidad de la velocidad de deformación de los metales cristalinos es menor de 0.1, pero aumenta con la temperatura.

2.6.3 Efecto Bauschinger

Al hecho de que la resistencia en compresión de un material sujeto a la tensión se reduzca se le conoce como efecto Bauschinger. El fenómeno al observar que, en determinados metales sometidos a cargas de compresión precedidas de una deformación plástica aplicada mediante una carga de tracción superior al límite elástico del material, el régimen plástico se iniciaba a tensiones inferiores a las obtenidas durante la aplicación de la tracción, i.e. la preformación plástica producía una reducción del límite elástico en compresión.²¹

2.7 Normas Aplicadas en el trabajo realizado

La aplicación de normas es necesaria en cualquier trabajo en el que se busque la aplicación en el sector industrial, esto se debe a que al querer aplicarse en algún sector de la industria será necesario que el proyecto a realizar se mantenga al margen de las normas que debe seguir la empresa en la cual se llevara a cabo.

2.7.1 Norma ASTM B-308

Norma donde se dictan las especificaciones para la aleación de aluminio 6061-T6, en donde se hace referencia de su composición química, propiedades de tensión y valores de dureza con la que debe de contar.

Tabla 2.2 Límites de Composición Química.⁸

Límites de Composición Química

Aleación 6061	Composición %
Silicon	0.40-0.8
Hierro	0.7
Cobre	0.15-0.4
Manganeso	0.15
Magnesio	0.8-1.2
Cromo	0.04-0.35
Zinc	0.25
Titania	0.15
Otros elementos	0.05
Total	0.15
Aluminio	restante

Tabla 2.3 Límites de Propiedad de Tensión.⁸

Límites de Propiedad de Tensión

6061-T6	
Resistencia a la Tracción, min, ksi [MPa]	38.0 [260]
Limite Elástico, min, ksi, [MPa]	35.0 [240]
Elongación, min, %	
in 2 in, [50mm]	10 [10]
in 4D [5D or $5.65\sqrt{A}$]	10 [9]

Tabla 2.4 Valores de Prueba de Dureza.⁸

Valores de Prueba de Dureza

Espesor		Número de Dureza, min		
in	mm	Webster	Barcol	Rockwell E
0.050 hasta 0.075	más de 1.20 hasta 2.00	15	76	89
0.076 hasta 0.499	más de 2.00 hasta 12.15	15	76	90
0.500 y más	más de 12.15	...	76	...

2.7.2 Norma ASTM B-557

La norma ASTM B-557 es el estándar para métodos de prueba de ensayos de tensión de aluminio forjado y fundido, y productos de aleación de magnesio, exceptuando la lámina de aluminio.

Este método nos ayuda determinar la resistencia y ductilidad de los materiales bajo tensiones de tracción uniaxiales. Se debe usar una máquina de prueba universal de alta capacidad, para este trabajo se utilizó la Máquina Universal de Ensayos Mecánicos SHIMADZU modelo: AG-IC1000kN. Aunque se pueden usar varios tipos de agarres para sujetar las muestras, los agarres recomendados por la norma son agarres en forma de cuña con inserciones dentadas.

A menos que se determine lo contrario en la especificación del producto, la selección de especímenes de tracción redonda debe ser como se especifica en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Pautas para Selección de Muestras Redondas y Extensibles, para sistema métrico.²²

Grosor Especificado para el	Espesor Mínimo de la	Diámetro del
Material, mm	Sección del Material,	Espécimen

Más de	Hasta	Longitud o Ancho	
6.30	9.50	40	4
9.50	12.50	60	6
12.50	16.00	80	9
16.00		120	12.5

2.7.3 Norma ASTM E-8

La Norma ASTM E-8 se enfoca en el ensayo de tracción de materiales metálicos usando extensómetros automáticos. Esta norma describe los métodos de ensayo para determinar la resistencia en el límite elástico, alargamiento al límite elástico, resistencia a la tracción, alargamiento y reducción del área en diversos productos de metal.

Esta se aplica a materiales metálicos en formas variadas, tales como: hoja, placa, alambre, varilla, barra, tubería y tubo. Para cada uno de estos tipos de muestras, la norma define convenientes geometrías y dimensiones, que requieren soluciones específicas de agarre que son esenciales para realizar un ensayo con éxito. Los tipos más comunes de muestras son redondos y rectangulares, los cuales fueron aplicados para la parte experimental de este trabajo y sus especificaciones se muestran en la tabla 2.6 y tabla 2.7 respectivamente.

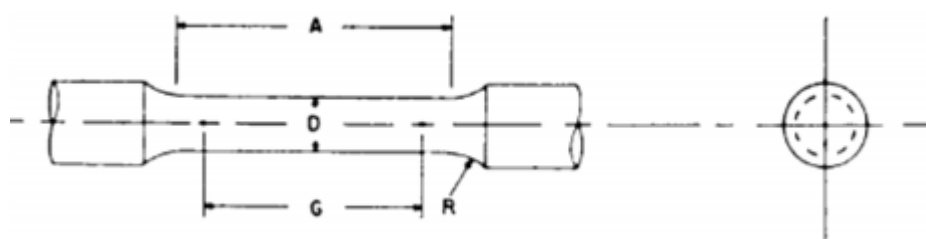


Figura 2.7 Medidas para probeta cilíndrica en base a norma ASTM-E8.⁷

Tabla 2.6 Medidas para probeta cilíndrica en base a norma ASTM-E8.⁷
Dimensiones, mm [in.]

Para Muestras de Prueba con una Longitud Calibración cuatro veces mayor que el diámetro [E8]

	Especímenes Estándar	Especímenes Reducidos Proporcionalmente al Estándar			
	Espécimen 1	Espécimen 2	Espécimen 3	Espécimen 4	Espécimen 5
G – Longitud Calibrada	50.0 ± 0.1 [2.00 ± 0.005]	36.0 ± 0.1 [1.400 ± 0.005]	24.0 ± 0.1 [1.00 ± 0.005]	16.0 ± 0.1 [0.640 ± 0.005]	10.0 ± 0.1 [0.450 ± 0.005]
D - Diámetro	12.5 ± 2.0 [0.500 ± 0.010]	9.0 ± 0.1 [0.350 ± 0.007]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]	4.0 ± 0.1 [0.160 ± 0.003]	2.5 ± 0.1 [0.113 ± 0.002]
R – Radio del Filete, min	10 [0.375]	8 [0.25]	6 [0.188]	4 [0.156]	2 [0.094]
A – Longitud de la Sección Reducida	56 [2.25]	45 [1.75]	30 [1.25]	20 [0.75]	16 [0.625]

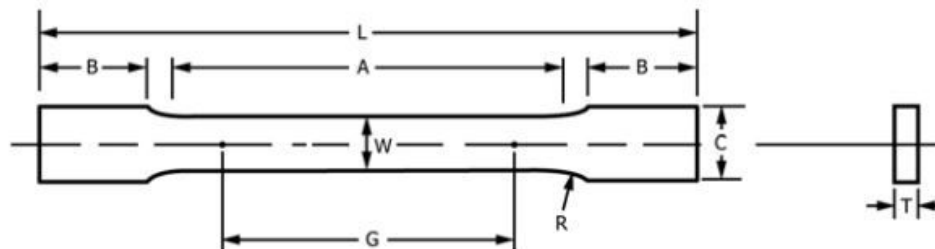


Figura 2.8 Dimensiones para especímenes en base a norma ASTM-E8.¹

Tabla 2.7 Dimensiones para especímenes en base a norma ASTM-E8.¹

Dimensiones

	Especímenes Estándar		Espécimen Subsize
	Tipo de Placa, 40 mm	Tipo de Lámina, 12.5	6mm [0.25 in.] de

	[1.5 in.] de ancho	mm [0.5 in.] de ancho	ancho
	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]
G – Longitud Calibrada	200.0 ± 0.2 [8.00 ± 0.01]	50.0 ± 0.1 [2.00 ± 0.005]	25.0 ± 0.1 [1.00 ± 0.003]
W – Ancho	40.0 ± 2.0 [1.500 ± 0.125, - 0.250]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]
T – Grosor	Grosor del material		
R – Radio del Filete, min	25 [1]	12.5 [0.500]	6 [0.250]
L – Longitud Total, min	450 [18]	200 [8]	100 [4]
A – Longitud de la Sección Reducida	225 [9]	57 [2.25]	32 [1.25]
B – Longitud de la Sección de Agarre, min	75 [3]	50 [2]	30 [1.25]
C – Ancho de la Sección de Agarre, aprox.	50 [2]	20 [0.750]	10 [0.375]

Los tratamientos térmicos aplicados a los aluminios son de bastante importancia para modificar sustancialmente sus propiedades, en la serie 6xxx, el fenómeno conocido como envejecimiento natural afecta las aleaciones de aluminio a una temperatura ambiente, si este proceso se realiza a una mayor temperatura se le conoce como envejecimiento artificial. Este tipo de tratamiento afecta significativamente las propiedades del material.

El objetivo de los tratamientos térmicos es mejorar las propiedades del material al que se le apliquen con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, especialmente la dureza, resistencia y elasticidad. El material utilizado en este trabajo se clasifica como un tipo de aleación forjada; debido al tipo de aleación (Al-Mg-Si) corresponde a la serie 6xxx que es endurecible por envejecimiento.

Si a esto se le suma la aplicación del endurecimiento por acritud se verá una mejora en sus propiedades, incrementando el límite elástico, dureza, resistencia a tracción, perdiendo plasticidad y tenacidad.

Es importante tener en cuenta las normas aplicables a estos procesos, en este caso la norma ASTM E-8 es nuestra base para manufacturar los especímenes que posteriormente serán utilizados en los ensayos de tracción necesarios para determinar la relación de esfuerzo-deformación de los mismos.

CAPITULO III

METODOLOGÍA Y

EXPERIMENTACIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo experimental de este trabajo se llevó a cabo en dos etapas como se muestra en el diagrama de flujo; en la primera el enfoque fue realizar la caracterización del Aluminio 6061-T6 mediante el ensayo de tracción, metalografía, ensayo de dureza, y la microscopia electrónica de barrido para los proveedores denominados en este trabajo como “Proveedor A” y “Proveedor B”, comparando la ficha técnica proporcionada por cada uno de estos con la información establecida en la Norma ASTM B-308 logrando establecer si ambos o cual de los proveedores cumple con lo establecido en la norma mencionada.

Una vez concluida la primera etapa, y habiendo determinado que el Proveedor A es el único de los dos en cumplir con la Norma ASTM B-308, se seleccionó a este para dar paso a la segunda etapa del trabajo como se muestra en el diagrama de flujo, en la cual se procedió a realizar el endurecimiento de la aleación mediante tratamientos térmicos específicos (solubilizado y envejecido) y deformación plástica, esto con el fin de modificar las propiedades mecánicas del material y lograr obtener un Aluminio 6061-T6, con un incremento en su dureza, provocando a su vez una reducción en su ductilidad.

3.2 DESARROLLO

La figura 3.1 muestra el desarrollo experimental de este trabajo en que se destacan dos etapas, la primera que corresponde a la caracterización del material, y una segunda parte en la que se realizó el trabajo de tratamientos térmicos y endurecimiento por deformación, después de esto las muestras fueron ensayadas a tensión bajo la norma ASTM E8.

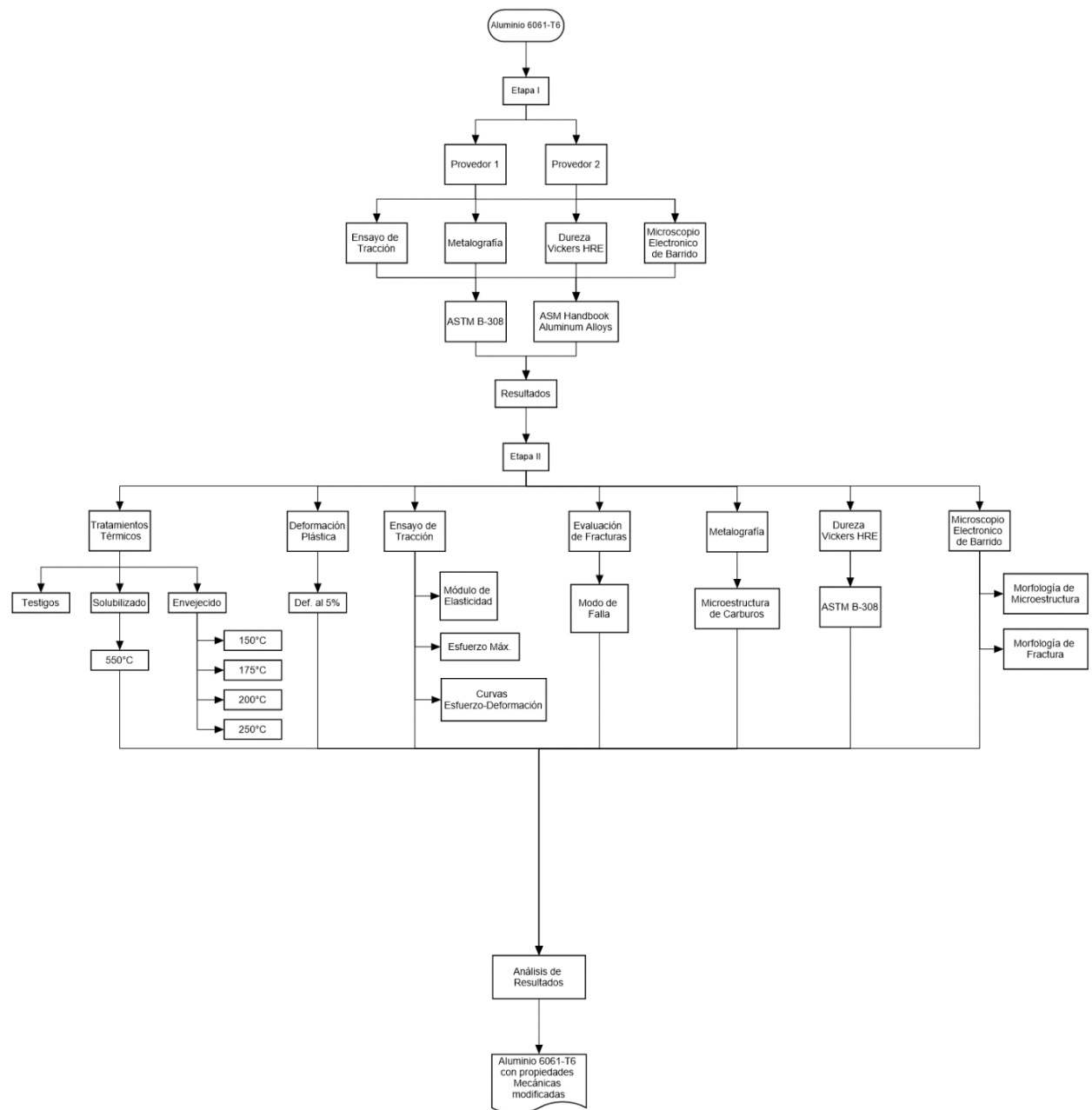


Figura 3.1 Diagrama de Flujo del proceso

3.3 ETAPA I: CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

Esta sección presenta los materiales utilizados, los procesos que se llevaron a cabo para el maquinado de las probetas, la preparación de las muestras y la metodología experimental que se realizó para este proyecto de investigación.

El maquinado de piezas, pruebas de tensión, ataque químico, microdureza y metalografía se realizaron en el área de talleres de la Escuela de ciencias de la ingeniería y tecnología de UABC unidad valle de las palmas. La microscopia electrónica de barrido (MEB) se realizó, con la ayuda del personal, en el Centro de nanociencias y Nanotecnología de la UNAM en Ensenada, Baja California.

3.3.1 Material empleado en la Experimentación

Se compró aluminio 6061-T6 de los dos grandes proveedores de la región de Tijuana, en forma de barra de ½ pulgada de diámetro, con la cual se realizarán ocho probetas de cada uno para hacerles las pruebas de tensión, y a otras muestras por separado, del mismo material, se le hará la microdureza y metalografía.

3.3.2 Maquinado de probetas

Antes de empezar con el maquinado, se tomaron las medidas estandarizadas de la norma ASTM E-8 como se muestra en la figura.

Es la norma para métodos de prueba estándar para las pruebas de tensión de los materiales metálicos. Estas Pruebas de tensión proporcionan información sobre la resistencia y la ductilidad de los materiales sometidos a esfuerzos de tracción uniaxial. Esta información puede ser útil en las comparaciones de los materiales, el desarrollo de la aleación, control de calidad, diseño y bajo ciertas circunstancias, en dicha norma se especifican las medidas normalizadas para cualquier tipo de probeta.

Estos métodos de ensayo cubren las pruebas de tensión de los materiales metálicos en cualquier forma a temperatura ambiente, específicamente, los métodos de determinación de la resistencia a la fluencia, el alargamiento límite de elasticidad, resistencia a la tracción, elongación y reducción de área.

Para iniciar con la manufactura de las probetas, se marcaron las barras del aluminio 6061-T6 de ambos proveedores conforme a las medidas especificadas en la norma ASTM E-8, y se procedieron a cortar en la sierra, obteniendo un total de ocho pedazos para cada proveedor, como se muestra en la figura 3.2.



Figura 3.2 Barra de aluminio para ser cortada en la sierra.

Al terminar de cortar las barras de aluminio, se proceden hacer las mediciones de cada una de ellas como se puede observar en la figura 3.3, con la ayuda de un vernier de mesa, para hacer el marcado con una línea roja conforme a las medidas de la norma antes mencionada. El marcado es para poder realizar el maquinado de las probetas en el torno.

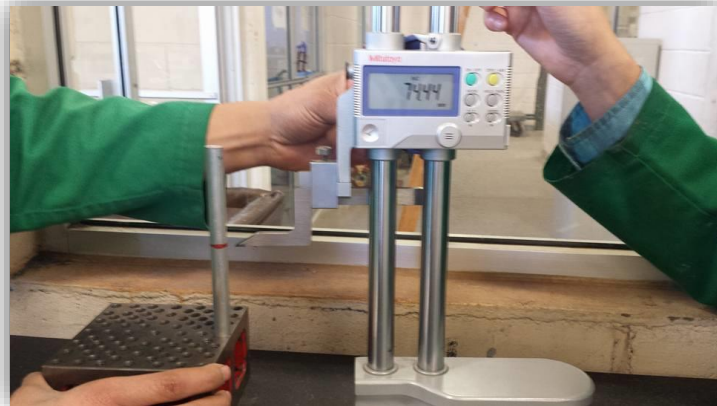


Figura 3.3. Haciendo mediciones con el vernier para hacer el marcado para realizar probetas.

Cada una de las barras cortadas, se colocan en el torno para rebajar la parte central y darle la forma del “cuello” a la probeta que es donde se producirá la zona de tensión, como se muestra en la figura 3.4

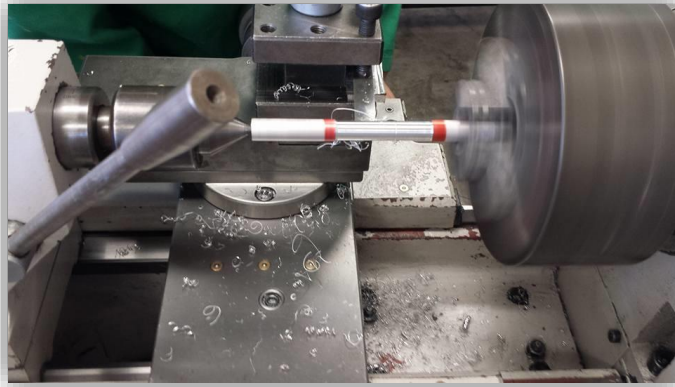


Figura 3.4 Probetas en el torno rebajando la parte central.

En la figura 3.5 a) se muestran las probetas con su forma final con las medidas estandarizadas y en la figura 3.5 b) se separaron y clasificaron las probetas correspondientes para cada proveedor, para al momento de realizar las pruebas, saber identificarlas. En las cajas pequeñas se encuentran secciones del mismo aluminio, de cada proveedor, para realizar la metalografía y microscopia electrónica de barrido (MEB), de la cual también se colocaron en el torno para carear las muestras.



a)



b)

Figura 3.5 a) probetas terminadas. b) probetas clasificadas y etiquetadas para cada uno de los proveedores.

3.3.3 Ensayo de Tensión

De las ocho probetas o especímenes que se maquinaron por proveedor, se colocaron en la Máquina Universal de Ensayos Mecánicos SHIMADZU y se procedió a realizar las pruebas de tensión a cada una de ellas, como se muestra en la figura 3.6.

El equipo utilizado cuenta con un software, en el cual se capturan las dimensiones de cada una de las probetas (longitud calibrada y diámetro del cuello) y va arrojando automáticamente durante el ensayo,

el desplazamiento y fuerza en una tabla de datos, así como una gráfica de esfuerzo-deformación, y el punto de ruptura.



Figura 3.6. Ensayo de tensión a probeta.

Antes de proceder con el ensayo de tensión, primero se tiene que tomar las medidas a cada una de las probetas ya que estas se capturan en el software para que este pueda arrojar los resultados.

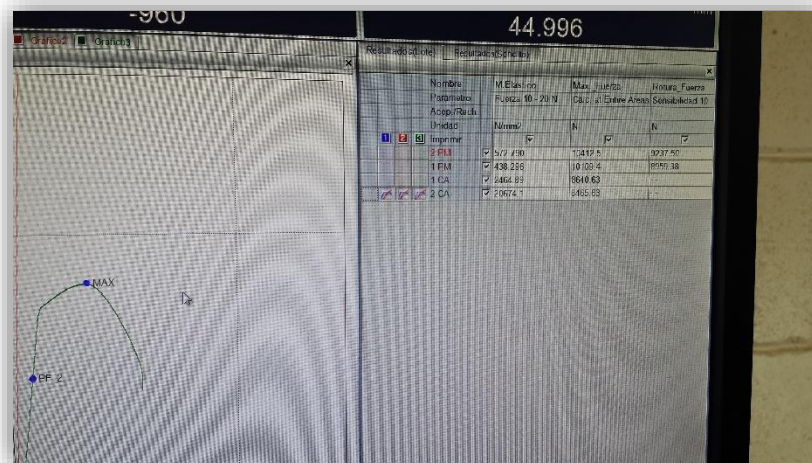


Figura 3.7. Software de Máquina Universal de Ensayos Mecánicos SHIMADZU.

3.3.4 Adecuación de muestras para metalografía y dureza

Para realizar la metalografía, se tomó un tramo de 3 cm de longitud del mismo material del que se realizaron las probetas para cada uno de los proveedores respectivamente, la metalografía se realizó con la finalidad para poder observar el tamaño de grano del material y poderla comparar con el ASM Handbook Metallography and Microstructures para corroborar si cumple o no con las especificaciones del material observado con el que indica en las imágenes del ASM Handbook Metallography and Microstructures.

A continuación, se muestra las imágenes y el procedimiento que se llevó a cabo para realizar la metalografía. En la figura 3.8 se puede observar el maquinado de una de las muestras, esto con la finalidad de que tengan una superficie plana por ambos lados y se pueda realizar la metalografía y dureza.



Figura 3.8 Se carean cada una de las muestras, respectivamente para cada proveedor.

Ya que se tienen ambas muestras careadas, se etiqueta cada una para su identificación con los nombres de P1-A y P2-A respectivamente para cada proveedor, como se muestra en la figura 3.9, para no confundir los resultados al momento de realizar la metalografía.



Figura 3.9 Ambas muestras se encuentran careadas y con etiquetas para su identificación.

El paso siguiente es seguir con el lijado de cada una de las muestras, se desgasto la superficie transversal de las muestras con lijas del número 400 al 2000, que van desde la más áspera (grano grueso) a la más fina (grano delgado) para después pulir con pasta diamante de 15, 9 y 6 μm .

Para realizar el desgaste de las muestras de la figura 3.10, se necesita lijarlas sobre una superficie completamente plana, de preferencia un vidrio, esto es para lograr un lijado uniforme en la superficie de la muestra, también se requiere el uso de agua potable que se tiene que verter durante el lijado.



Figura 3.10 Material necesario para el desgaste de las muestras. Lijas del número 400 al 2000, agua potable y base de vidrio.

Durante el lijado de las muestras, es muy importante la técnica a utilizar ya que de esto depende mucho al momento de observar la muestra en el microscopio metalográfico. La técnica de lijado consiste en lijar la muestra en un ángulo de 90° con un movimiento suave, al cambiar la lija por el siguiente número la muestra se rota 90° y así sucesivamente hasta llegar a la lija número 2000.

En la figura 3.11 se puede observar la muestra lista para ser desgastada, utilizando agua, lija y una base de vidrio.



Figura 3.11 Muestra de aluminio lista para ser desgastada.

Después de haber terminado con el lijado de las dos muestras de cada uno de los proveedores, en la figura 3.12 se puede observar la superficie transversal de ambas muestras desgastadas hasta llegar a la lija número 2000, se tiene que obtener un lijado uniforme en la superficie, así como se muestra en la siguiente imagen.



Figura 3.12 Superficie desgastada de ambas muestras, finalización de lijado.

Para concluir con el desgaste de las muestras, se procede a pulir el área o cara donde se realizó el desgaste de la pieza. Se necesita un paño especial, tipo terciopelo, alcohol y pasta diamante de 15, 9 y 6 μm , como se muestra en la figura 3.13.

La técnica para realizar el pulido consiste colocar el paño sobre la maquina pulidora, aplicar una gota de pasta diamante de 15 μm sobre el paño, un poco de alcohol, se enciende la pulidora a una velocidad moderada y se coloca la pieza y se sigue puliendo y la misma manera con 9 μm hasta llegar a la pasta diamante de 6 μm , el área o cara deberá de quedar sin rayones y con efecto espejo.



Figura 3.13 Muestra en proceso de pulido.

3.3.5 Ataque Químico

Antes de realizar la metalografía, es necesario atacar químicamente las muestras desgastadas y pulidas, la finalidad del ataque químico es poder observar y exponer la microestructura mediante el microscopio metalográfico y así poder hacer la comparación de las imágenes obtenidas con las imágenes que vienen en el ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys.

Para realizar el ataque químico a las muestras, fue necesario utilizar ácido fluorhídrico (HF 0.5%), figura 3.14, mediante un lapso de 10 segundos en cada una.



Figura 3.14 Ácido fluorhídrico al 0.5% (HF 0.5%).

3.3.6 Metalografía

Para poder observar la microestructura de las piezas, se colocaron en el microscopio metalográfico de la marca Olympus, cada muestra se le realizó un acercamiento de 25X, 50X, 100X 200X 500X.



Figura 3.15 Microscopio metalográfico Olympus

3.3.7 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

Después de haber realizado la metalografía, observar la microestructura de las muestras, por último, se les realizó microscopia electrónica de barrido (MEB) que consiste en un haz de electrones que

pasan sobre la superficie de la muestra, en este caso, la cara donde se realizó el desgaste y metalografía, con el fin de poder observar sus compuestos químicos de la aleación.



Figura 3.16. Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) en las muestras de aluminio 6061-T6.

3.3.8 Sub-Etapa I: Metodología experimental

Primeramente, se maquinaron las probetas de aluminio 6061-T6, después se procedió a realizar los ensayos de tensión a dichas probetas, de acuerdo a lo especificado en las normas ASTM E8-M-10 (Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 2010) y B557-10 (Tension Testing Wrought and Cast Aluminium- and Magnesium- Alloy Products, 2010).

Después, se procedió a realizar las pruebas mecánicas, para lo cual, se utilizó la máquina de tensión y durómetro.

La presión se logra mediante placas o mandíbulas accionadas por tornillos o sistema hidráulico. La máquina de ensayos, tiene como función comprobar la resistencia de diversos tipos de materiales. Posee un sistema que aplica cargas controladas sobre una probeta, y mide en forma gráfica, la deformación hasta su carga al momento de su ruptura, este modelo incluye control por desplazamiento (mm/min), fuerza (N/s), tensión (Mpa/s) y deformación (%/min).

También se utilizó un durómetro, el cual, es un aparato que mide la dureza de los materiales, donde se aplica una fuerza normalizada sobre el material, lo que produce una huella (vestigio) sobre dicho material. Las escalas de dureza que se pueden aplicar a los materiales son: Rockwell, Brinell y Vickers.

3.3.11 Sub-Etapa II: Desarrollo experimental

Para la realización de las pruebas de tensión y dureza, se procedió a la compra del material de aleación de aluminio 6061-T6 en barra, de 3/8 in de diámetro, a dos proveedores diferentes de la región. Seguidamente, se procedió al maquinado de dichas barras, para darle la forma de probeta 3/8 in, para que puedan ser colocadas en la Máquina Universal de Ensayos Mecánicos SHIMADZU, y así poderse realizar las pruebas de tensión y dureza. La máquina utilizada cuenta con un software, en el cual se capturan las dimensiones de cada una de las probetas (longitud mm y diámetro mm) y al momento de iniciar el ensayo, va calculando automáticamente el desplazamiento y fuerza en una tabla de datos, así como una gráfica de esfuerzo-deformación, y el punto donde llega la ruptura. Se repitió el mismo procedimiento para cada una de las probetas, que en total fueron cuatro, dos probetas por proveedor. Posteriormente, una vez tomadas los resultados proporcionados por la máquina de tensión, se graficaron cada uno de los resultados correspondiente a cada probeta. En las gráficas se señala el límite elástico, esfuerzo máximo, zona plástica, zona elástica y punto de ruptura. Seguidamente se calculó el porcentaje de elongación, para luego proceder con las comparaciones, según la norma ASTM B 308-10 y las fichas técnicas expedidas por cada uno de los proveedores.

Para las pruebas de dureza, se tomaron muestras del mismo material, esto es, de la misma sección del material analizado, esto con el fin de obtener resultados confiables al momento de hacer las comparaciones. Las medidas de las dos muestras para dureza, fueron de 3/8 in de diámetro. Las muestras se realizaron en el durómetro de escala Vickers, aplicando una presión de 500 gr (HV0.5), con indentador de diamante. Se realizaron un total de 10 pruebas en cada uno de las muestras, esto con el fin de sacar un promedio general de cada muestra.

3.4 ETAPA II: APLICACIÓN DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS Y DEFORMACIÓN PLÁSTICA PARA MODIFICACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS.

Para dar inicio con la segunda etapa del trabajo desarrollado se seleccionó al segundo proveedor, siendo este el que cumple con las especificaciones establecidas en la norma ASTM-B308. Resaltando que el aluminio seleccionado perteneciente a la serie 6000, está conformada principalmente de magnesio y silicio como los elementos con mayor porcentaje en la misma, logrando así una aleación con pocas impurezas. Específicamente la aleación utilizada fue la 6061-T6, de la cual se profundizo en el capítulo II.

El aluminio se caracteriza por ser un metal con propiedades mecánicas bajas, debido a esto, para acrecentarlas, es necesario alearlo con otros elementos. El incremento en resistencia después de alearlo, se obtiene por medio de los procesos de tratamiento térmico o por deformación mecánica. En este trabajo se aplicarán ambos procesos en los cuales el objetivo de los tratamientos térmicos de solubilizado y envejecido tendrán, el primero endurecer los elementos de la aleación logrando una solución sólida homogénea y el segundo a su vez mejorar y estabilizar las propiedades mecánicas de la aleación; el objetivo de la deformación plástica será lograr un endurecimiento por deformación debido a la creación de dislocaciones permanentes en el material.

3.4.1 Preparación de la Muestra

De una barra de aluminio 6061-T6 con un grosor de 6.35 mm, correspondiente al segundo proveedor se maquinaron veinte probetas rectangulares en base a la norma ASTM-E8, en la figura 3.17 se muestra el diseño de dichas probetas.

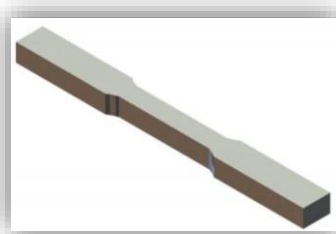


Figura 3.17 Diseño de probeta en base a Norma ASTM-E8.

Esta presentación comercial fue seleccionada en base a los positivos resultados de su caracterización en comparación con la norma ASTM B308M-10⁶ presentes en el estudio “Análisis comparativo de las propiedades mecánicas del aluminio 6061-T6 con base a la norma ASTM B 308-10 y fichas técnicas de proveedores locales”.⁹

Las veinte probetas maquinadas, fueron divididas en dos grupos de diez, identificándolos como grupo A y grupo B. En ambos grupos se separaron dos probetas para ensayar a tensión y tenerlas como muestras testigo del material; las ocho probetas restantes fueron solubilizadas a 555°C durante una hora y enfriadas en agua a temperatura ambiente, al finalizar este tratamiento se separaron dos para ensayarlas a tensión y tener muestras del material únicamente solubilizadas.

Las seis probetas restantes se dividieron en cuatro grupos de dos probetas cada uno. A cada grupo se les aplico tratamiento de envejecido en tres rangos de temperatura (150, 175, 200 °C respectivamente) durante una hora, fueron enfriadas en agua a temperatura ambiente, se realizó el trabajo en frío al 5%, para finalizar con el ensayo de tracción de cada muestra.

En la tabla 3.1 se puede observar el concentrado de las muestras realizadas, siendo un total de veinte probetas, de dos corridas diferentes.

Tabla 3.1 Control de muestras

Muestra	Testigo	Solubilizado	Temperatura de Envejecimiento		
			(°C)		
			150	175	200
A1	A11	A12	A13	A14	A15
A2	A21	A22	A23	A24	A25
B1	B11	B12	B13	B14	B15
B2	B21	B22	B23	B24	B25

3.4.2 Tratamientos Térmicos

Los procesos de solubilizado y envejecido fueron aplicados con objetivos distintos. El primer tratamiento busca conseguir una solución sólida homogénea, mientras que el segundo, trata de mejorar y estabilizar las propiedades mecánicas del material favoreciendo la precipitación de pequeñas fases de Al, Mg o Si, entre otras.

De las veinte muestras se tomaron dieciséis para ser solubilizadas de las cuales cuatro (A11, A21, B11 y B21) quedarían como referencia de dicho tratamiento térmico, para posteriormente aplicar el tratamiento térmico de envejecido a las doce restantes, cuatro muestras por cada temperatura seleccionada, de la siguiente manera:

- **150°C:** A13, A23, B13 y B23.
- **175°C:** A14, A24, B14 y B24.
- **200°C:** A15, A25, B15 y B25.

3.4.2.1 Solubilizado

Se introdujeron las dieciséis muestras (A12, A22, A13, A23, A14, A24, A15, A25, B12, B22, B13, B23, B14, B24, B15 y B25) en un horno térmico para tratamiento de metales C1228/PM4 previamente calentado a 555°C, una vez alcanzada la temperatura se introdujeron las muestras, ya que se estabilizó la temperatura comenzó a correr el tiempo determinado para que se realizara la solubilización el cual fue de 1 hora.



Figura 3.18 Horno para térmico para tratamiento de metales C1228/PM4.

3.4.2.2 Enfriamiento Rápido

Después de haber sido solubilizadas las muestras se procedió a realizar el enfriamiento de las mismas. Las muestras fueron sacadas del horno con ayuda de unas pinzas para horno de

fundición y se colocaron de manera horizontal dentro de un recipiente con agua con 20 cm de altura a temperatura ambiente (20°C aproximadamente) como se muestra en la figura 3.19. Con el propósito de obtener una velocidad de enfriamiento más rápida que si se dejase en alguna superficie a la intemperie.



Figura 3.19 Muestras pasando del horno al recipiente con agua para realizar el enfriamiento rápido.

3.4.2.3 Envejecido

Después de normalizar las muestras fueron introducidas nuevamente las restantes (A13, A23, A14, A24, A15, A25, B13, B23, B14, B24, B15 y B25) en el mismo horno térmico utilizado para el tratamiento de solubilizado tal como se presenta en la figura 3.20, una vez alcanzada la temperatura se introdujeron las muestras, ya que se estabilizó la temperatura comenzó a correr el tiempo determinado para que se realizara la solubilización el cual fue de 1 hora.



Figura 3.20. Muestras después del normalizado introducidas nuevamente al horno para realizar el tratamiento de envejecido.

Una vez terminado el tiempo establecido para el envejecimiento de las muestras se procedió a enfriarlas mediante el mismo proceso señalado en el punto anterior y que se ilustra en la figura 3.19.

3.4.3 Deformación Plástica

Tal como se menciona en el capítulo II, subtema 2.6; el trabajo en frío o endurecimiento por acritud es una manera eficaz de moldear materiales metálicos mientras se incrementa su resistencia. Esto se logrará sacrificando un porcentaje de la ductilidad del material.

El proceso se realizó en las mismas doce muestras que fueron envejecidas (A13, A23, A14, A24, A15, A25, B13, B23, B14, B24, B15 y B25). Antes de proceder con la deformación plástica, se tomaron las medidas a cada una de las probetas; ya que estas se capturaron en el software de la Máquina Universal de Ensayos Mecánicos SHIMADZU para poder iniciar el programa y que se llevara a cabo la deformación plástica.

Ingresada la información de cada una de las probetas en el software se procedió a colocar la primera en las mordazas de la Shimadzu como se muestra en la figura 3.21.



Figura 3.21 Colocación de probeta en Máquina Universal de Ensayos Mecánicos SHIMADZU.

Ya colocada se dio inicio al programa, el cual fue aplicando la fuerza (figura 3.22) y fue detenido hasta que se logró una deformación de 5mm (figura 3.23). Esto se repitió con las dieciséis muestras envejecidas ya mencionadas.



Figura 3.22 Máquina Universal de Ensayos Mecánicos SHIMADZU aplicando fuerza a probeta.



Figura 3.23 Probeta con deformación plástica aun en mordazas de la Shimadzu.

3.4.4 Ensayo de Tracción

Una vez completados los tratamientos térmicos y trabajo en frío, y antes de proceder con los ensayos de tensión, se tomaron las medidas a cada una de las probetas; ya que estas se capturaron en el software. Ingresada la información de cada una de las probetas en el software se procedió a colocar la primera en las mordazas de la Shimadzu como se muestra en la figura 3.20.

Las veinte muestras fueron ensayadas a tensión en la máquina de ensayos universales SHIMADZU con una velocidad de deformación de 0.5 mm/min. Con las curvas esfuerzo-deformación resultantes se determinaron los nuevos esfuerzos máximos y de cedencia, el módulo de Young, la resiliencia y la tenacidad del material.

En la figura 3.24 y 3.25 se señalan las caras lateral y trasera respectivamente de la muestra A13 después de realizar el ensayo de tensión.



Figura 3.24 Cara lateral de muestra A13 después del ensayo de tensión.



Figura 3.25 Cara trasera de muestra A13 después del ensayo de tensión.

3.4.5 Pruebas de Dureza

Para este estudio fueron realizadas dos rondas de pruebas de dureza Vickers. La primera ronda se llevó a cabo en un equipo Wilson Hardness Tukon 1102 ²³, mientras que los ensayos de la segunda se efectuaron en una Shimadzu Twin Mod 123. En ambos casos se utilizó una fuerza de

4.9 N y se tomaron 5 indentaciones por cada espécimen, tal como lo dicta la norma ASTM E92 – 17²⁴. Finalmente, se obtuvo el promedio de los resultados mostrado en la tabla 4.5.

De tal manera el desarrollo experimental constó de dos etapas, de la cual la primera consistió en la caracterización del material de los proveedores mediante ensayos de tensión, dureza y metalografía.

Una vez finalizada la primera etapa se prosiguió al desarrollo de la segunda, en la cual se llevo a cabo de nuevo el maquinado de las muestras, los tratamientos térmicos: solubilizado, envejecido a 150, 175 y 200 °C, endurecimiento por deformación, ensayos mecánicos y pruebas de dureza.

CAPITULO IV

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

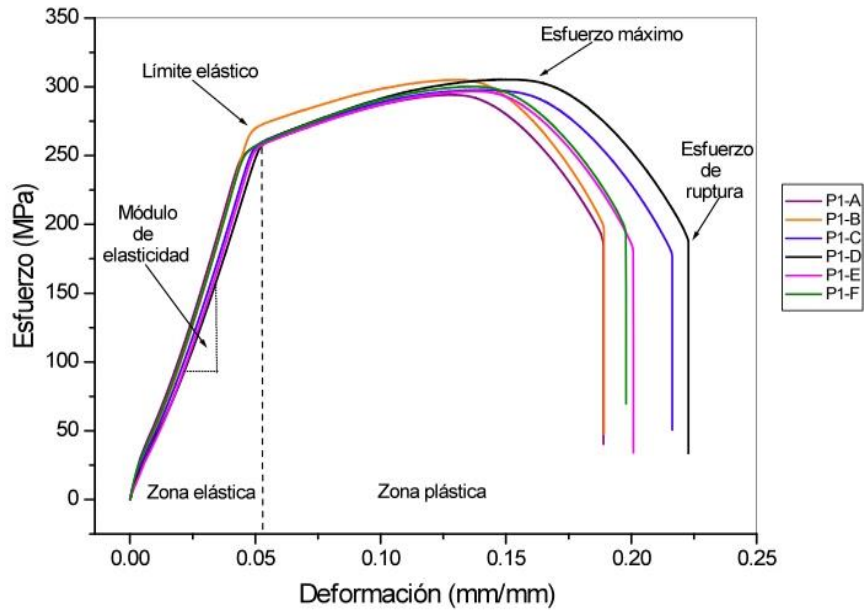
4.1 RESULTADOS DE LA PRIMERA ETAPA

En el presente capítulo se mostrarán los resultados obtenidos durante la experimentación en lo que respecta a los ensayos de tensión, imágenes de metalografía y resultados de la microscopia electrónica de barrido (MEB). Con base a los resultados obtenidos se harán las comparaciones con la ASTM B-308 respecto al MEB, tensión y dureza, en el Handbook Aluminum Alloys con la metalografía. Con esos resultados podremos definir si cumple o no cumple con las especificaciones el aluminio vendido por ambos proveedores.

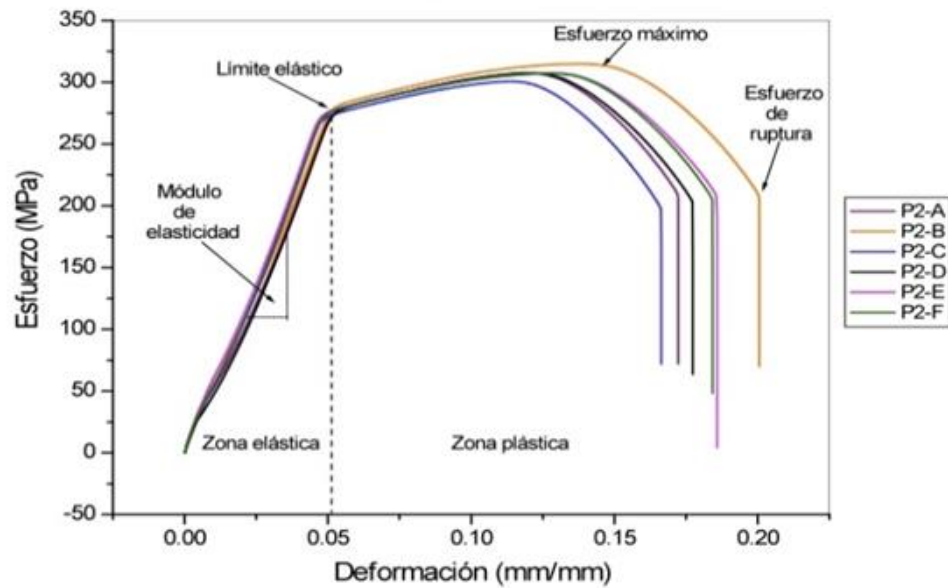
4.1.1 Ensayo de Tracción

En las siguientes gráficas y tablas se muestran los resultados obtenidos durante las pruebas de tensión, para luego proceder a realizar las comparaciones con la norma ASTM B 308-10 y las fichas técnicas proporcionadas por los proveedores.²³

Las gráficas 4.1 y 4.2 muestran los resultados del límite elástico, módulo de elasticidad, esfuerzo máximo y ruptura, así como la zona elástica y plástica para las seis muestras de los proveedores uno y dos. Se puede ver que el límite elástico y módulo de Young son aproximadamente iguales para cada una de las muestras. Asimismo, podemos ver claramente que el esfuerzo de ruptura es diferente en cada una de las muestras. Se observa que el esfuerzo máximo de mayor valor, corresponde a la muestra D (línea negra) para el proveedor uno y B (línea amarilla) para el proveedor dos. Por otro lado, para ambos proveedores, el esfuerzo de ruptura tiene pequeñas variaciones en la deformación, pero aproximadamente el mismo valor en el esfuerzo dado en MPa.



Gráfica 4.1 Resultados de tensión obtenidos de las seis muestras del proveedor A.



Gráfica 4.2 Resultados de tensión obtenidos de las seis muestras del proveedor B.

En las tablas 4.1 y 4.2, se presenta el promedio de las seis muestras correspondiente a cada proveedor. Se indican los valores de: límite elástico, módulo de Young, esfuerzo máximo, deformación máxima, esfuerzo a la ruptura, deformación a la ruptura, tenacidad, resiliencia y porcentaje de elongación.

Tabla 4.1 Propiedades mecánicas obtenidas de las muestras del proveedor A, y comparación de los datos obtenidos con la norma ASTM B 308-10 con la ficha técnica expedida del mismo proveedor.

Proveedor A		Cumple con la Norma	Norma ASTM B308	Ficha Técnica
Esfuerzo máximo	300.2 Mpa	SI	260 Mpa	315.15 Mpa
Deformación máxima	0.02026 mm			
Esfuerzo a la ruptura	187.07 Mpa			
Deformación de ruptura	0.2024 mm			
Módulo Elástico	5.5248 Gpa			
Resiliencia	6.271			
Tenacidad	31.571			
% Elongación	17.085 %	SI	10%	9.26%
Límite elástico	256.39 Mpa	SI	240 Mpa	282.20 Mpa

Tabla 4.2 Propiedades mecánicas obtenidas de las muestras del proveedor B, y comparación de los datos obtenidos con la norma ASTM B 308-10 con la ficha técnica expedida del mismo proveedor.

Proveedor A		Cumple con la Norma	Norma ASTM B308	Ficha Técnica
Esfuerzo máximo	307.74 Mpa	SI	260 Mpa	311.22 Mpa
Deformación máxima	0.1808 mm			
Esfuerzo a la ruptura	203.99 Mpa			
Deformación de ruptura	0.1808 mm			
Módulo Elástico	5.5698 Gpa			
Resiliencia	6.711			
Tenacidad	30.214			
% Elongación	14.299 %	SI	10%	14.89%
Límite elástico	271.72 Mpa	SI	240 Mpa	276.47 Mpa

De los resultados de las pruebas mecánicas para ambos proveedores, mostrados en las tablas anteriores, podemos ver que las muestras cumplen con la norma ASTM B 308-10 y la fichas técnicas expedidas por los proveedores de la región.

4.1.2 Metalografía

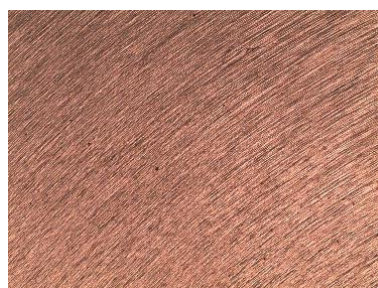
4.1.2.1 Proveedor A

A continuación, se muestran los resultados de la metalografía realizada al proveedor A en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Resultados de la metalografía realizada a las muestras del proveedor A.



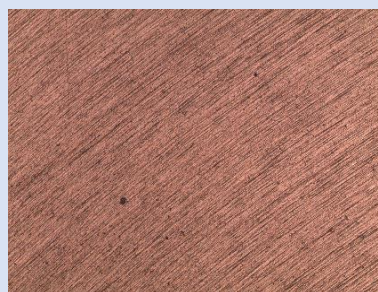
2.5X muestra solamente pulida



**2.5X muestra atacada químicamente
con HF al 5%**



5X muestra pulida



**5X muestra atacada químicamente
con HF al 5%**



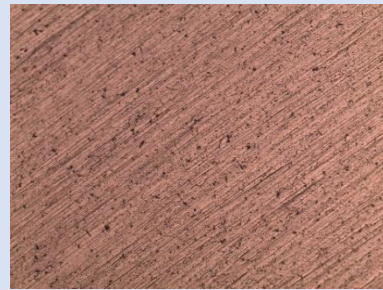
10X muestra pulida



**10X muestra atacada químicamente
con HF al 5%**



20X muestra pulida



**20X muestra atacada químicamente
con HF al 5%**



50X Muestra pulida

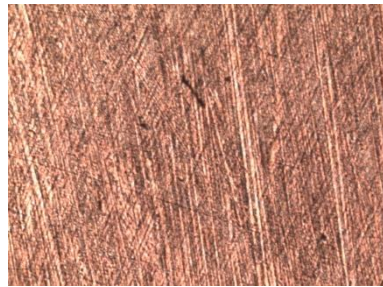


**50X Muestra atacada químicamente
con HF al 5%**

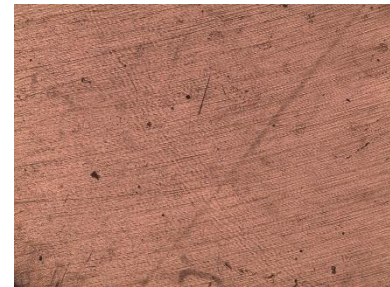
4.1.1.2 Proveedor B

A continuación, se muestran los resultados de la metalografía realizada al proveedor A en la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Resultados de la metalografía realizada a las muestras del proveedor B.



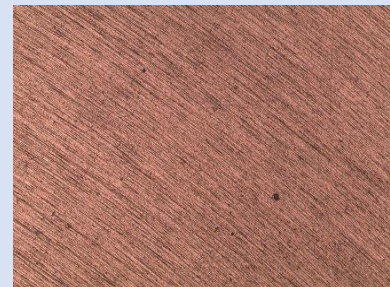
2.5X muestra solamente pulida



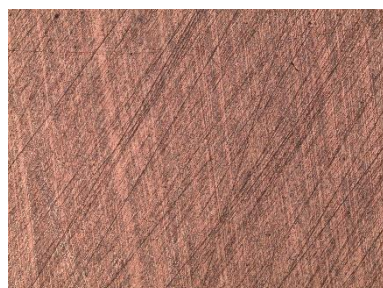
**2.5X muestra atacada químicamente
con HF al 5%**



5X muestra pulida



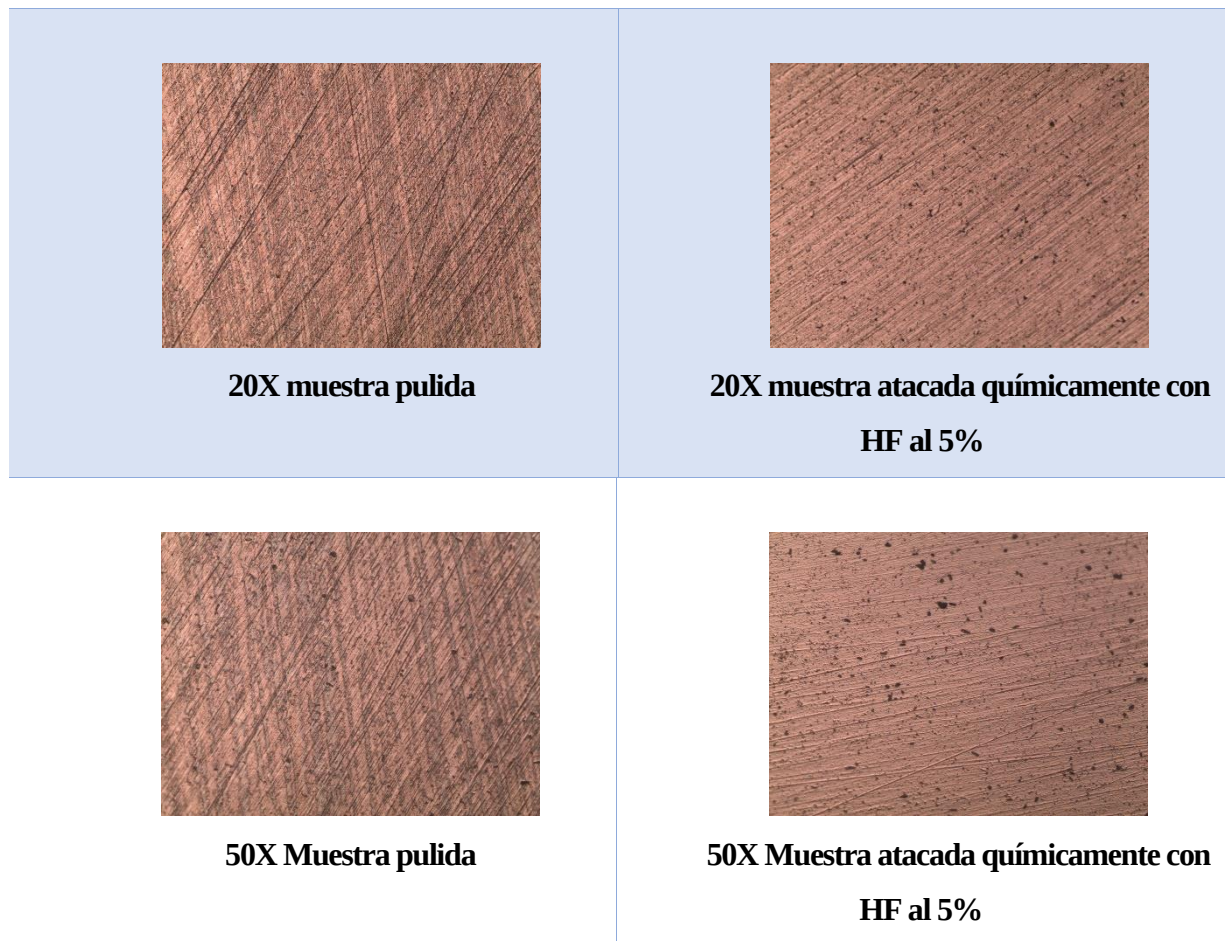
**5X muestra atacada químicamente con
HF al 5%**



10X muestra pulida



**10X muestra atacada químicamente con
HF al 5%**



4.1.4 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

4.1.4.1 Proveedor A

A continuación, se muestran los resultados de la microscopia electrónica de barrido realizada al proveedor A en las figuras 4.1, 4.2 y 4.3.

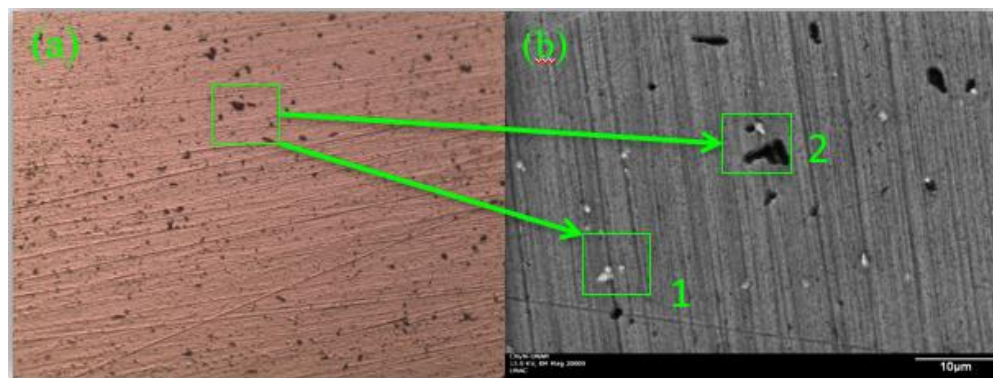


Figura 4.1 a) Metalografía de muestra a 50X atacada con HF 0.5%.
b) Vista cercana de la superficie del aluminio 6061-T6, MEB a 2000X.

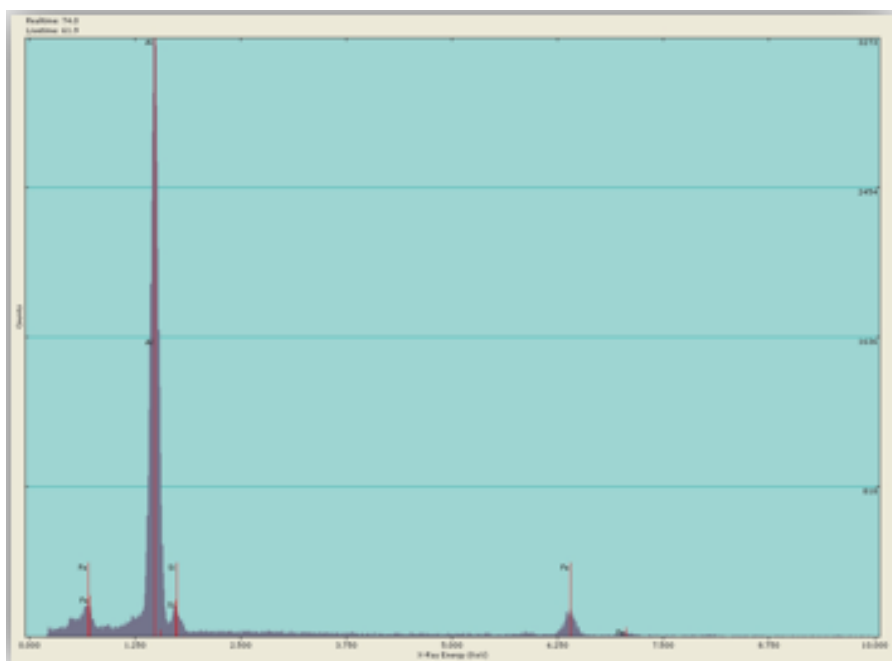


Figura 4.2 Espectrograma correspondiente a la zona 1, con elementos encontrados de Fe-Si-Al.

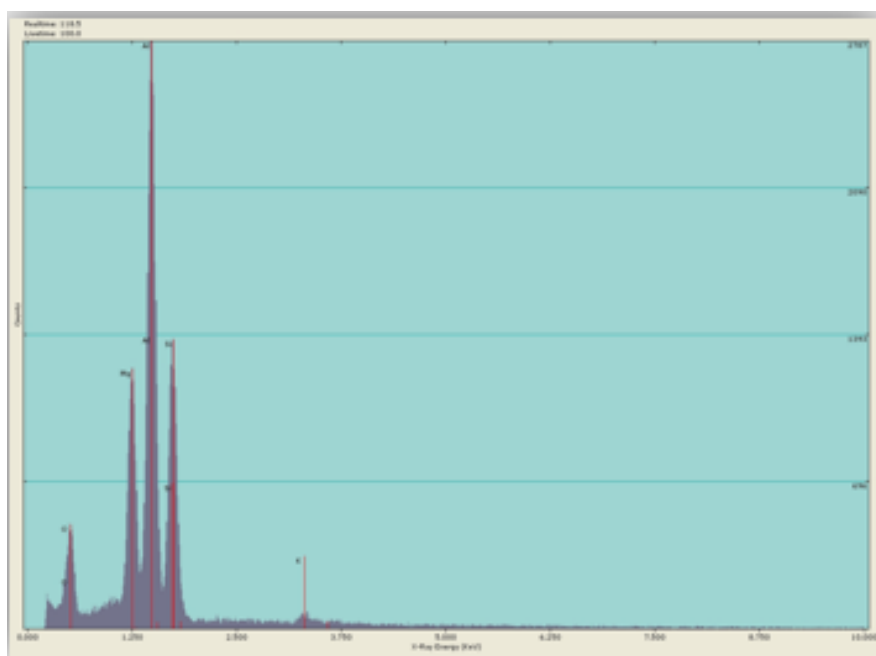


Figura 4.3 Espectrograma correspondiente a la zona 2, con elementos encontrados de Al-Mg-O-Si-K.

4.1.4.2 Proveedor B

A continuación, se muestran los resultados de la microscopía electrónica de barrido realizada al proveedor A en las figuras 4.4, 4.5 y 4.6.

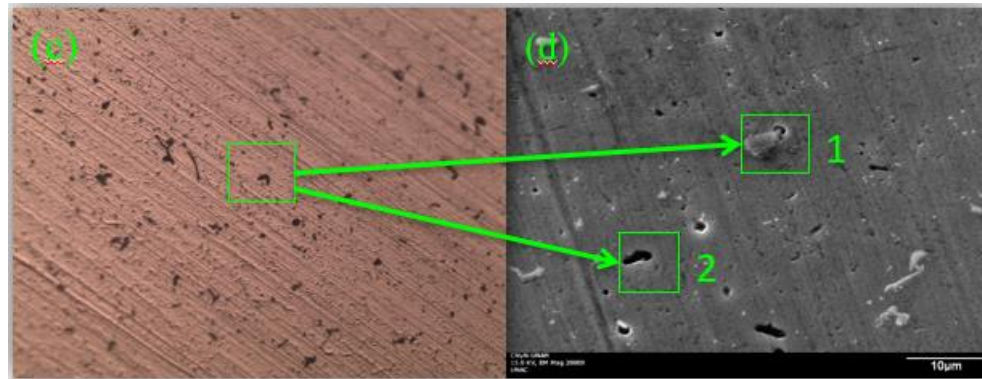


Figura 4.4 a) Metalografía de muestra a 50X atacada con HF 0.5%.
b) Vista cercana de la superficie del aluminio 6061-T6, MEB a 2000X.

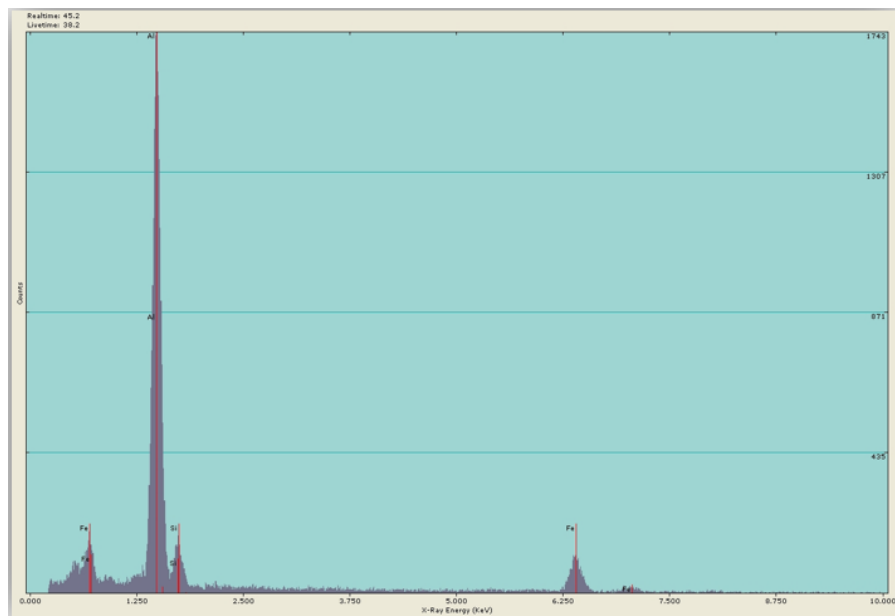


Figura 4.5 Espectrograma correspondiente a la zona 1, con elementos encontrados de Fe-Si-Al.

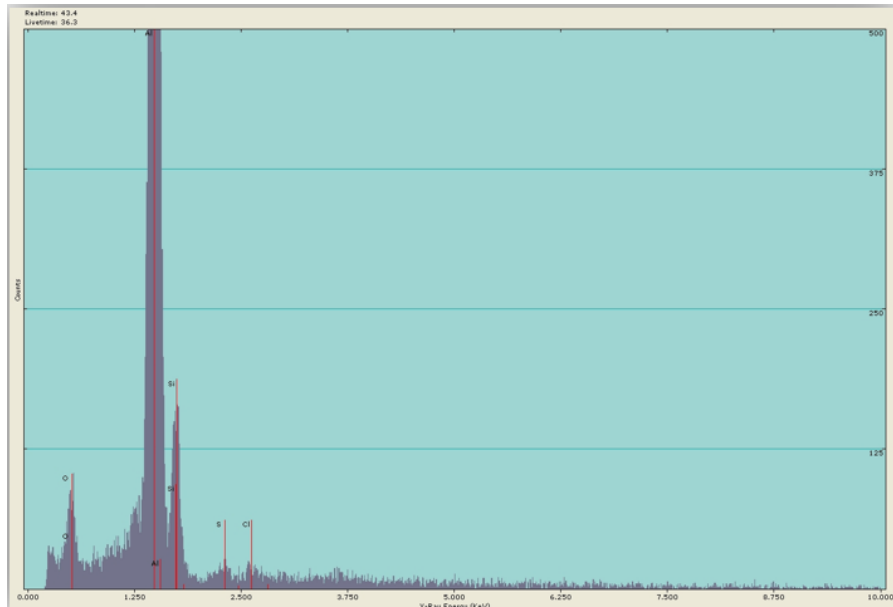


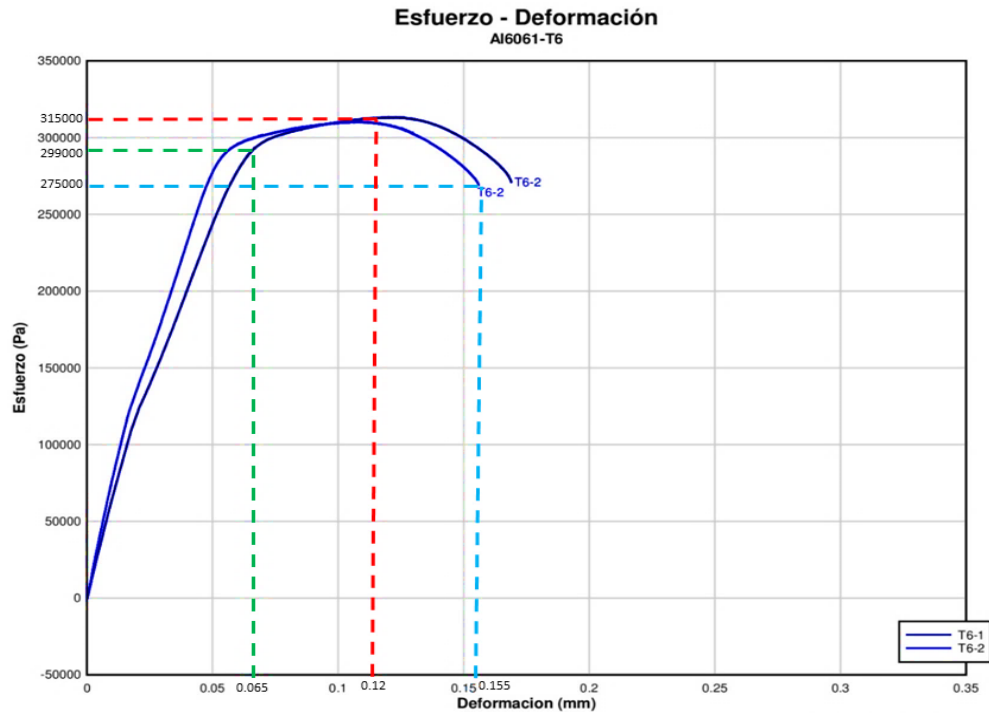
Figura 4.6 Espectrograma correspondiente a la zona 2, con elementos encontrados de Al-Si-O-Cl.

4.2 RESULTADOS DE LA SEGUNDA ETAPA

4.2.1 Muestras Testigo

4.2.1.1 Curva de esfuerzo-deformación ($\sigma - \epsilon$) de muestra testigo.

La gráfica 4.3 muestra la curva de esfuerzo deformación ($\sigma - \epsilon$) de la muestra de aluminio Testigo, en la que se puede apreciar la zona elástica, delimitada por el esfuerzo de cedencia de $\sigma_o = 29 \text{ MPa}$ (línea roja) y la zona plástica en la que se identifica el esfuerzo máximo de $\sigma_{max} = 39 \text{ MPa}$ (línea verde) y el esfuerzo a la ruptura de $\sigma_{rup} = 26 \text{ MPa}$ (línea morada). Los valores del módulo elástico E , energía de resiliencia E_R , energía de plasticidad E_p y energía de tenacidad E_T que se obtiene de esta gráfica se calcularon con las ecuaciones descritas en el apartado del desarrollo experimental y se muestran en la tabla 4.5.

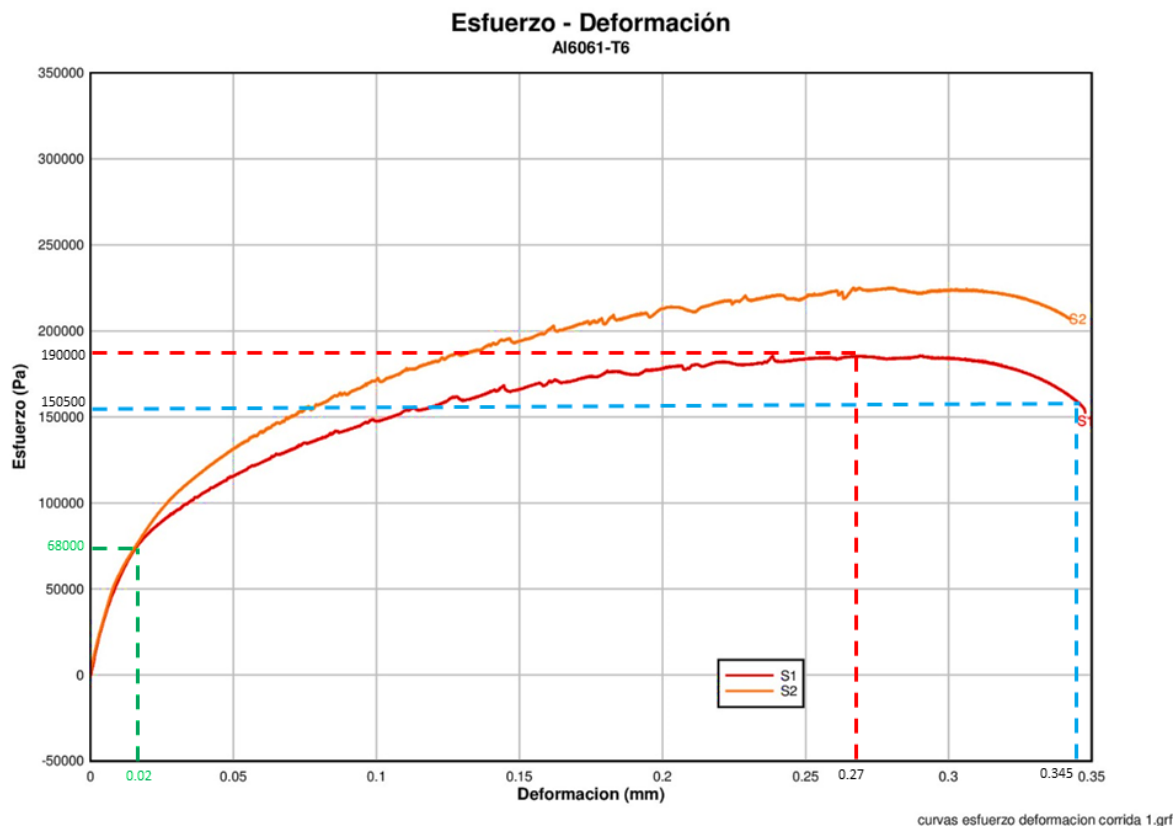


Gráfica 4.3 Curva de Esfuerzo – Deformación ($\sigma - \epsilon$) de muestra testigo (A11 Y A21) de aluminio 6061 T6.

4.2.2 Solubilizado

4.2.2.1 Curva de esfuerzo-deformación ($\sigma - \epsilon$) de muestra solubilizada con TT 555°C

La gráfica 4.4 muestra la curva de esfuerzo deformación ($\sigma - \epsilon$) de la muestra de aluminio solubilizada con TT 555°C, en la que se puede apreciar la zona elástica, delimitada por el esfuerzo de cedencia de $\sigma_o = 6.8 \text{ MPa}$ (línea roja) y la zona plástica en la que se identifica el esfuerzo máximo de $\sigma_{max} = 19 \text{ MPa}$ (línea verde) y el esfuerzo a la ruptura de $\sigma_{rup} = 15.05 \text{ MPa}$ (línea morada). Los valores del módulo elástico E , energía de resiliencia E_R , energía de plasticidad E_P y energía de tenacidad E_r que se obtiene de esta gráfica se calcularon con las ecuaciones descritas en el apartado del desarrollo experimental y se muestran en la tabla 4.5.

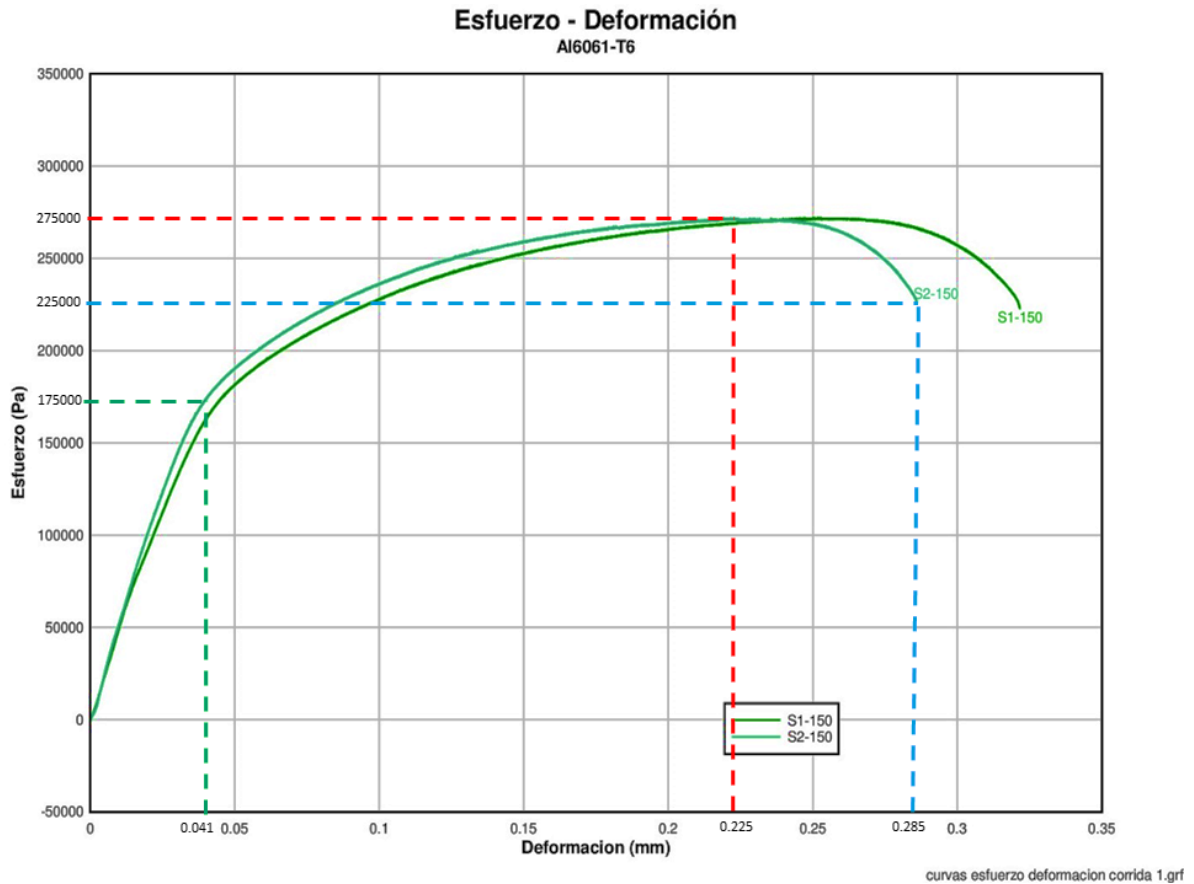


Gráfica 4.4 Curva de Esfuerzo – Deformación ($\sigma - \varepsilon$) de muestra (A12 y A22) solubilizada con TT 555°C.

4.2.2 Solubilizado con Envejecido

4.2.2.1 Curva de esfuerzo-deformación ($\sigma - \varepsilon$) de muestra solubilizada con TT 555°C y envejecida a 150°C.

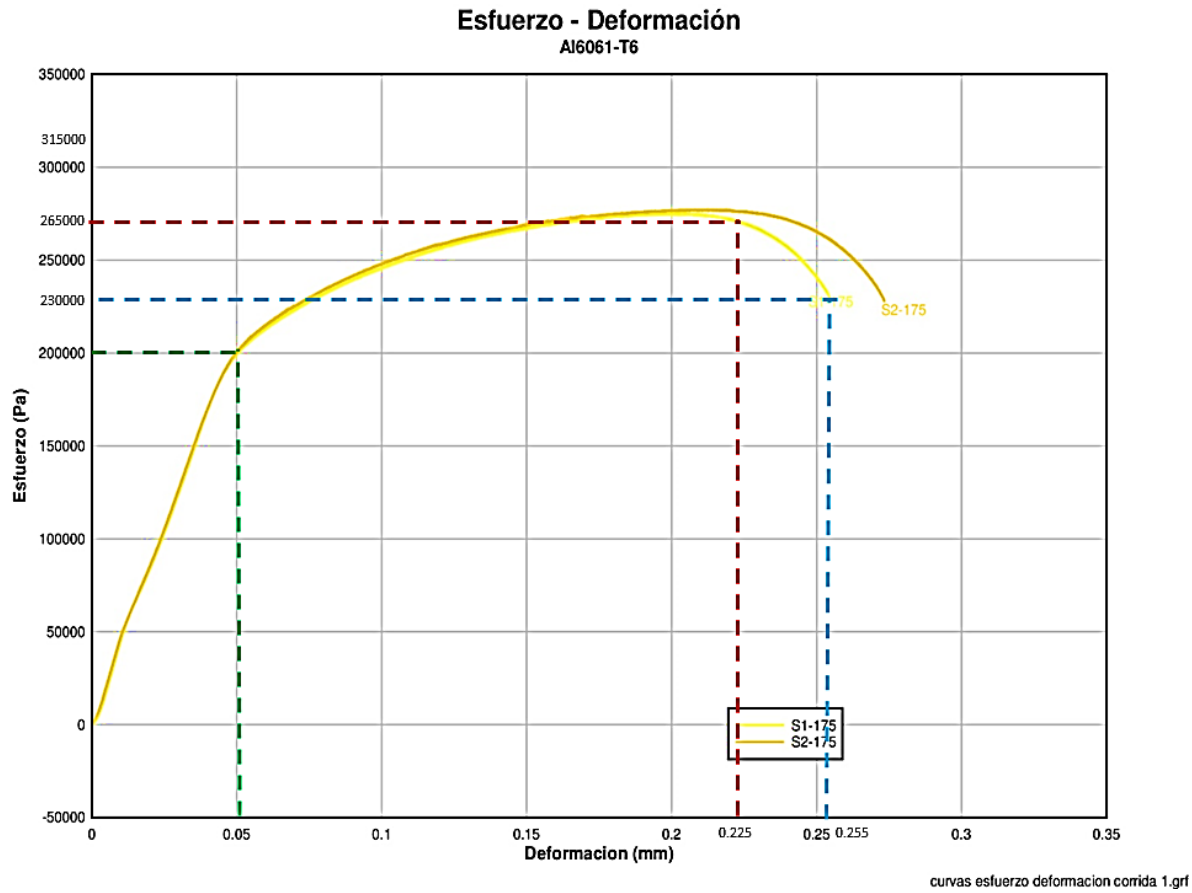
La gráfica 4.5 muestra la curva de esfuerzo deformación ($\sigma - \varepsilon$) de la muestra de aluminio solubilizada con TT 555°C y envejecida a 150 °C, en la que se puede apreciar la zona elástica, delimitada por el esfuerzo de cedencia de $\sigma_o = 17.5 \text{ MPa}$ (línea roja) y la zona plástica en la que se identifica el esfuerzo máximo de $\sigma_{max} = 27.5 \text{ MPa}$ (línea verde) y el esfuerzo a la ruptura de $\sigma_{rup} = 22.5 \text{ MPa}$ (línea morada). Los valores del módulo elástico E , energía de resiliencia E_R , energía de plasticidad E_P y energía de tenacidad E_r que se obtiene de esta gráfica se calcularon con las ecuaciones descritas en el apartado del desarrollo experimental y se muestran en la tabla 4.5.



Gráfica 4.5 Curva de Esfuerzo – Deformación ($\sigma - \epsilon$) de muestra (A13 y A23) solubilizada con TT 555°C y envejecida a 150°C

4.2.2.1 Curva de esfuerzo-deformación ($\sigma - \epsilon$) de muestra solubilizada con TT 555°C y envejecida a 175°C

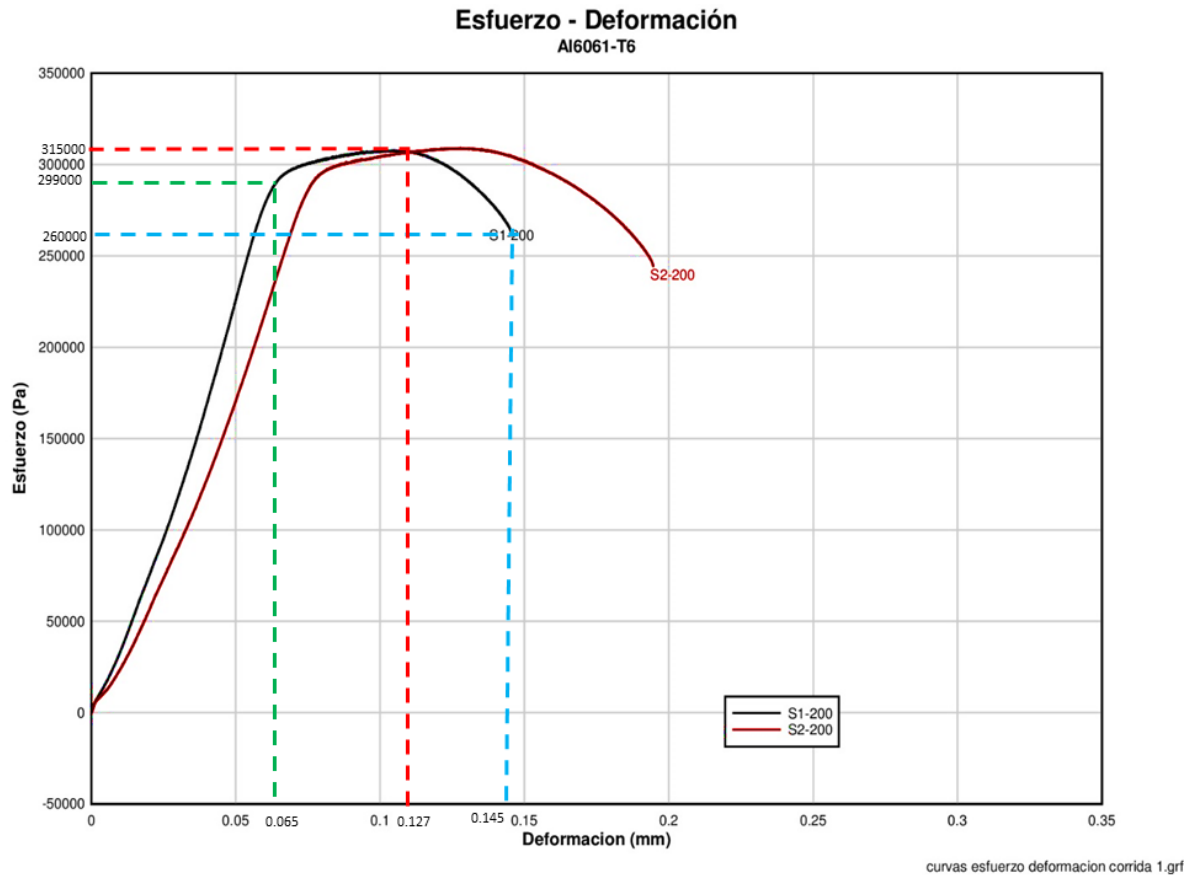
La gráfica 4.6 muestra la curva de esfuerzo deformación ($\sigma - \epsilon$) de la muestra de aluminio solubilizada con TT 555°C y envejecida a 175°C, en la que se puede apreciar la zona elástica, delimitada por el esfuerzo de cedencia de $\sigma_o = 29.9 \text{ MPa}$ (línea roja) y la zona plástica en la que se identifica el esfuerzo máximo de $\sigma_{max} = 31.5 \text{ MPa}$ (línea verde) y el esfuerzo a la ruptura de $\sigma_{rup} = 26 \text{ MPa}$ (línea morada). Los valores del módulo elástico E , energía de resilencia E_R , energía de plasticidad E_P y energía de tenacidad E_T que se obtiene de esta gráfica se calcularon con las ecuaciones descritas en el apartado del desarrollo experimental y se muestran en la tabla 4.5.



Gráfica 4.6 Curva de Esfuerzo – Deformación ($\sigma - \varepsilon$) de muestra (A14 y A24) solubilizada con TT 555°C y envejecida a 175°C

4.2.2.1 Curva de esfuerzo-deformación ($\sigma - \varepsilon$) de muestra solubilizada con TT 555°C y envejecida a 200°C

La gráfica 4.7 muestra la curva de esfuerzo deformación ($\sigma - \varepsilon$) de la muestra de aluminio solubilizada con TT 555°C y envejecida a 200°C, en la que se puede apreciar la zona elástica, delimitada por el esfuerzo de cedencia de $\sigma_o = 26 \text{ MPa}$ (línea roja) y la zona plástica en la que se identifica el esfuerzo máximo de $\sigma_{max} = 27 \text{ MPa}$ (línea verde) y el esfuerzo a la ruptura de $\sigma_{rup} = 24 \text{ MPa}$ (línea morada). Los valores del módulo elástico E , energía de resiliencia E_R , energía de plasticidad E_P y energía de tenacidad E_T que se obtiene de esta gráfica se calcularon con las ecuaciones descritas en el apartado del desarrollo experimental y se muestran en la tabla 4.5.

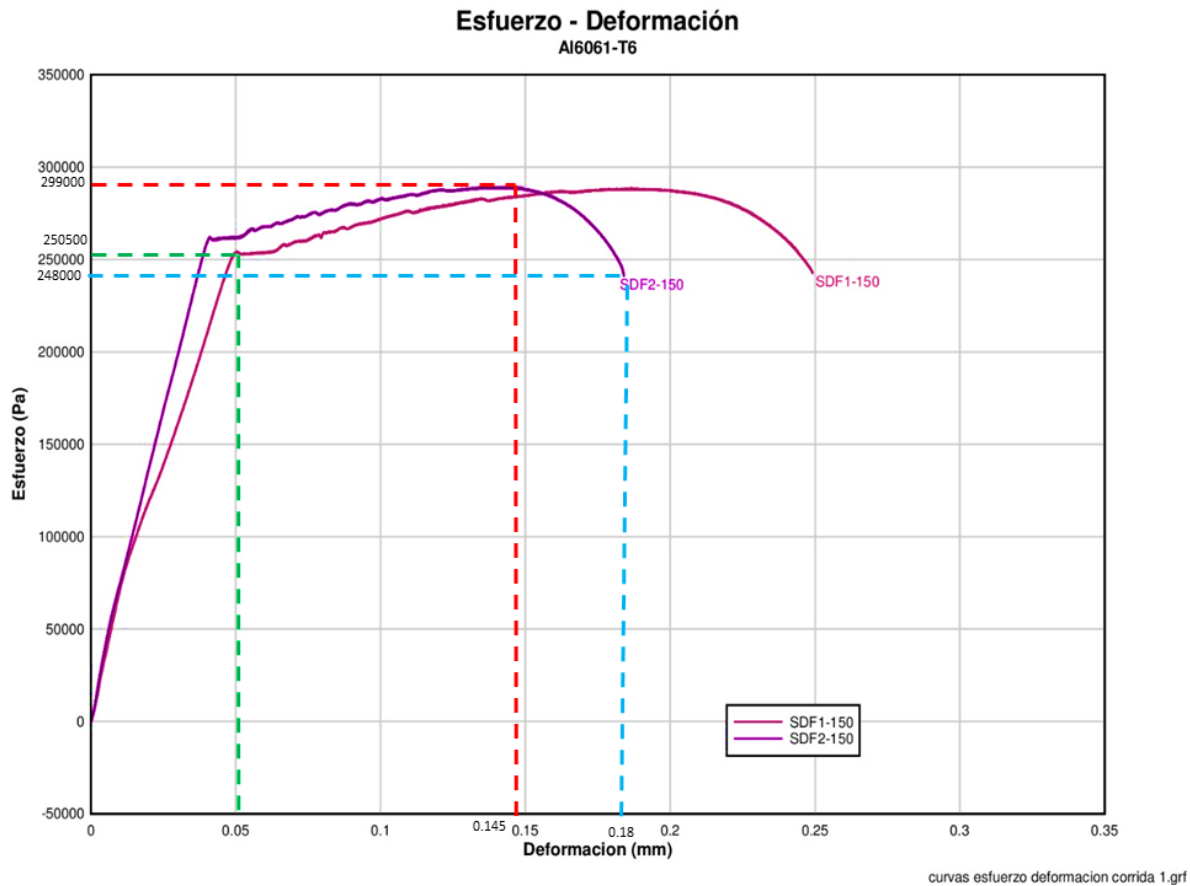


Gráfica 4.7 Curva de Esfuerzo – Deformación ($\sigma - \varepsilon$) de muestra (A15 y A25) solubilizada con TT 555°C y envejecida a 200°C

4.2.3 Endurecimiento por Deformación (Trabajo en Frío)

4.2.3.1 Curva de esfuerzo-deformación ($\sigma - \varepsilon$) de muestra solubilizada con TT 555°C, envejecida a 150°C y trabajo en frío.

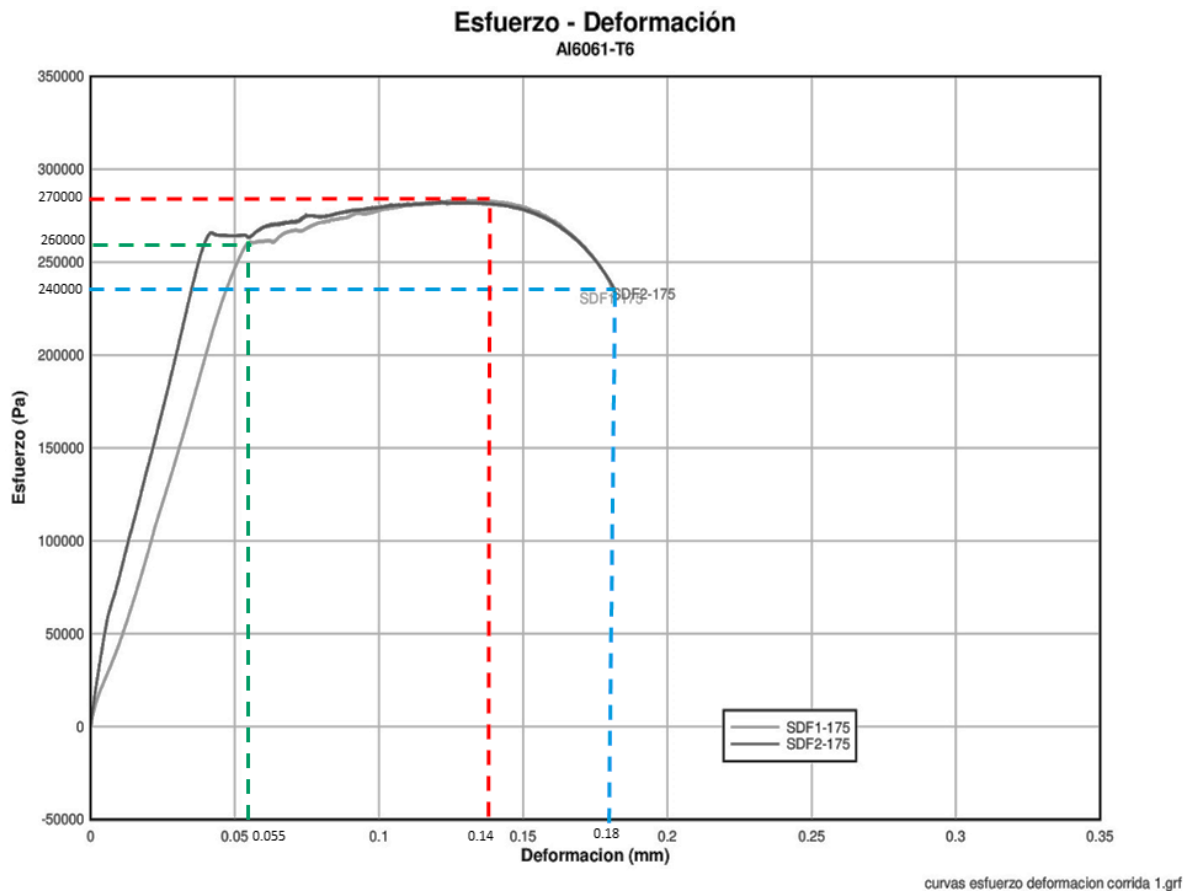
La gráfica 4.8 muestra la curva de esfuerzo deformación ($\sigma - \varepsilon$) de la muestra de aluminio solubilizada con TT 555°C, envejecida a 150°C, y trabajo en frío, en la que se puede apreciar la zona elástica, delimitada por el esfuerzo de cedencia de $\sigma_o = 20 MPa$ (línea roja) y la zona plástica en la que se identifica el esfuerzo máximo de $\sigma_{max} = 26.5 MPa$ (línea verde) y el esfuerzo a la ruptura de $\sigma_{rup} = 23 MPa$ (línea morada). Los valores del módulo elástico E , energía de resiliencia E_R , energía de plasticidad E_P y energía de tenacidad E_T , que se obtiene de esta gráfica se calcularon con las ecuaciones descritas en el apartado del desarrollo experimental y se muestran en la tabla 4.5.



Gráfica 4.8. Curva de Esfuerzo – Deformación ($\sigma - \epsilon$) de muestra (B14 y B24) solubilizada con TT 555°C, envejecida a 150 °C y trabajo en frío.

4.2.3.1 Curva de esfuerzo-deformación ($\sigma - \epsilon$) de muestra solubilizada con TT 555°C, envejecida a 175°C y trabajo en frío.

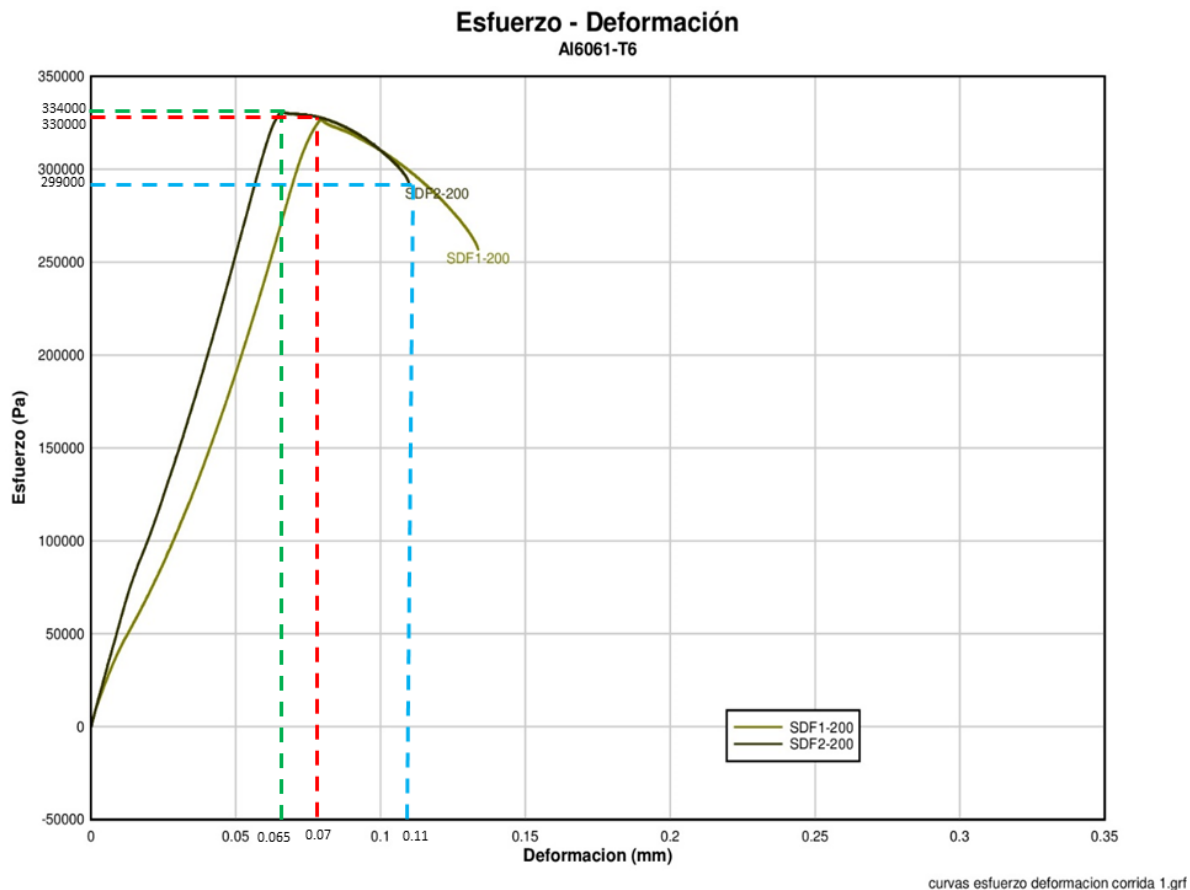
La gráfica 4.9 muestra la curva de esfuerzo deformación ($\sigma - \epsilon$) de la muestra de aluminio solubilizada con TT 555°C, envejecida a 175°C, y trabajo en frío, en la que se puede apreciar la zona elástica, delimitada por el esfuerzo de cedencia de $\sigma_o = 25 \text{ MPa}$ (línea roja) y la zona plástica en la que se identifica el esfuerzo máximo de $\sigma_{max} = 29.9 \text{ MPa}$ (línea verde) y el esfuerzo a la ruptura de $\sigma_{rup} = 24.8 \text{ MPa}$ (línea morada). Los valores del módulo elástico E , energía de resiliencia E_R , energía de plasticidad E_p y energía de tenacidad E_r que se obtiene de esta gráfica se calcularon con las ecuaciones descritas en el apartado del desarrollo experimental y se muestran en la tabla 4.5.



Gráfica 4.9. Curva de Esfuerzo – Deformación ($\sigma - \epsilon$) de muestra (B14 y B24) solubilizada con TT 555°C, envejecida a 175 °C y trabajo en frío.

4.2.3.1 Curva de esfuerzo-deformación ($\sigma - \epsilon$) de muestra solubilizada con TT 555°C, envejecida a 200°C y trabajo en frío.

La gráfica 4.10 muestra la curva de esfuerzo deformación ($\sigma - \epsilon$) de la muestra de aluminio solubilizada con TT 555°C, envejecida a 200°C, y trabajo en frío, en la que se puede apreciar la zona elástica, delimitada por el esfuerzo de cedencia de $\sigma_o = 33.4 \text{ MPa}$ (línea roja) y la zona plástica en la que se identifica el esfuerzo máximo de $\sigma_{max} = 33.3 \text{ MPa}$ (línea verde) y el esfuerzo a la ruptura de $\sigma_{rup} = 29.9 \text{ MPa}$ (línea morada). Los valores del módulo elástico E , energía de resiliencia E_R , energía de plasticidad E_P y energía de tenacidad E_r que se obtiene de esta gráfica se calcularon con las ecuaciones descritas en el apartado del desarrollo experimental y se muestran en la tabla 4.5.



Gráfica 4.10. Curva de Esfuerzo – Deformación ($\sigma - \epsilon$) de muestra (B15 y B25) solubilizada con TT 555°C, envejecida a 200 °C y trabajo en frío.

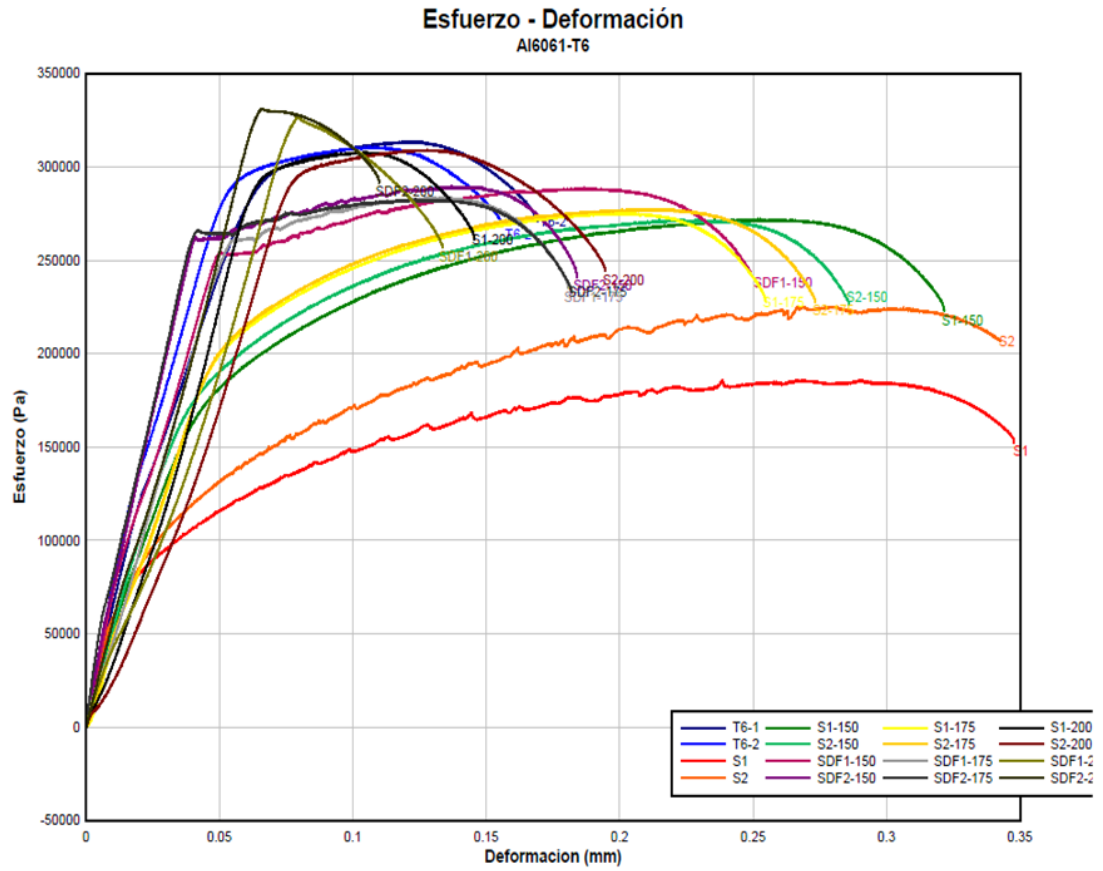
4.2.4 Concentrado de Datos

4.2.4.1 Curva de esfuerzo-deformación ($\sigma - \epsilon$) de todas las muestras caracterizadas y tabla de promedios.

La grafica 4.11 muestra todas las curvas de ($\sigma - \epsilon$) en la que se puede contrastar que las cuervas testigo y solubilizadas son las que mayor elongación tienen, es decir son más largas.

Es importante destacar que las curvas con trabajo en frío presentan un endurecimiento por lo que su plasticidad es menor pero su esfuerzo de cedencia es más alto tal y como se observa en las curvas con los picos más altos de la gráfica 4.11.

Correlacionado la deformación en cada etapa (elástica, plástica y a la ruptura) con sus respectivos valores de esfuerzos a la cedencia, máximo y a la ruptura se calculó la energía asociada con resiliencia, la plasticidad y tenacidad cuyos valores se muestran en la tabla 4.5.



Gráfica 4.11 Curva de Esfuerzo – Deformación ($\sigma - \epsilon$) de todas las muestras.

Tabla 4.5 Concentrado del promedio de las propiedades mecánicas de las 24 muestras.

Propiedades mecánicas	Testigo	Solubilizada	150 °C	150°C + TF	175 °C	175°C + TF	200 °C	200 °C + TF
Esfuerzo de cedencia (MPa)	29.9	6.8	17.5	20	29.9	25	26	33.4
Esfuerzo máximo (MPa)	31.5	19	27.5	26.5	31.5	29.9	27	33.3
Esfuerzo a la fractura (MPa)	27.5	15.05	22.5	23	26	24.8	24	29.9
Deformación de cedencia (mm)	0.065	0.02	0.041	0.05	0.065	0.05	0.055	0.065
Deformación máxima (mm)	0.12	0.27	0.225	0.225	0.127	0.145	0.14	0.07
Deformación a la fractura (mm)	0.155	0.345	0.285	0.255	0.145	0.18	0.18	0.11
Resiliencia (J/m^3)	9717.5	680	3587.5	5000	9717.5	6250	7150	10855
Plasticidad (J/m^3)	37798	51298	61873	59623	40003	43353	37798	23308
Tenacidad (J/m^3)	32907. 5	51242.5	60537. 5	53650	27982. 5	38390	36050	22035
Módulo elástico	--	-	--	--	--	--	--	--

4.2.5 Resultados de Dureza

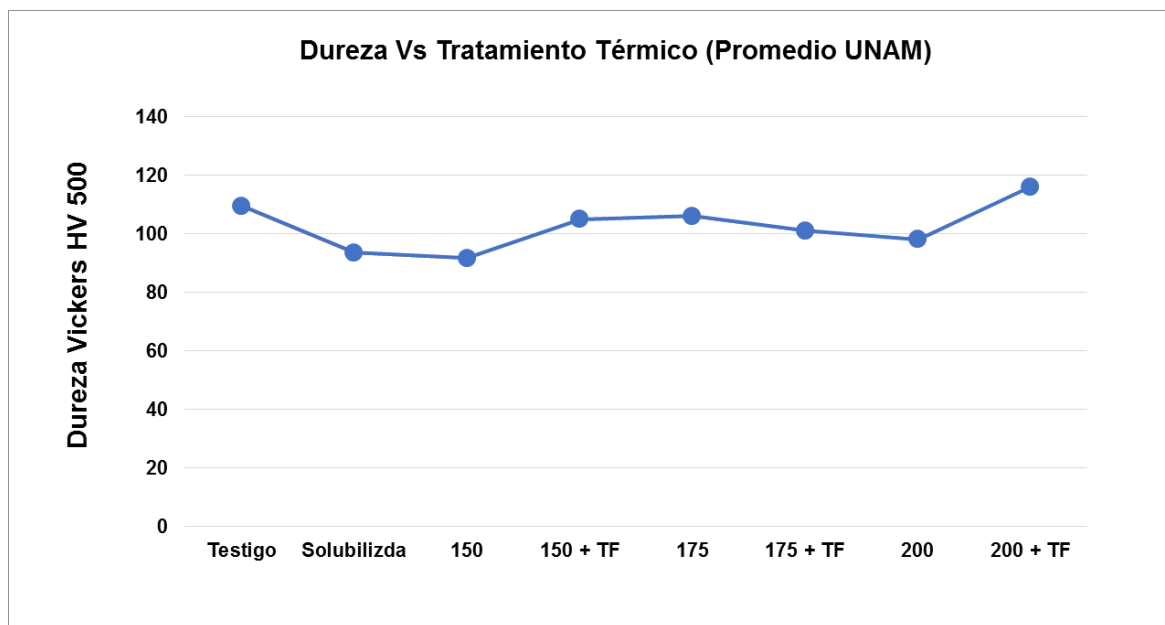
La tabla 3 muestra los valores de dureza promedio obtenidos en dos diferentes equipos de dureza Vickers. El equipo automático Shimadzu del Instituto de Investigación de Materiales de la UNAM (IIM-UNAM) y con el equipo análogo Wilson del ECITEC-UABC. En la que se puede destacar que los valores promedio son similares, cuya tendencia se puede observar en las gráficas 10 y 11.

Es importante mencionar que los ensayos de dureza se hicieron a todas las muestras bajo la norma ASTM E92 – 1717 ²⁴.

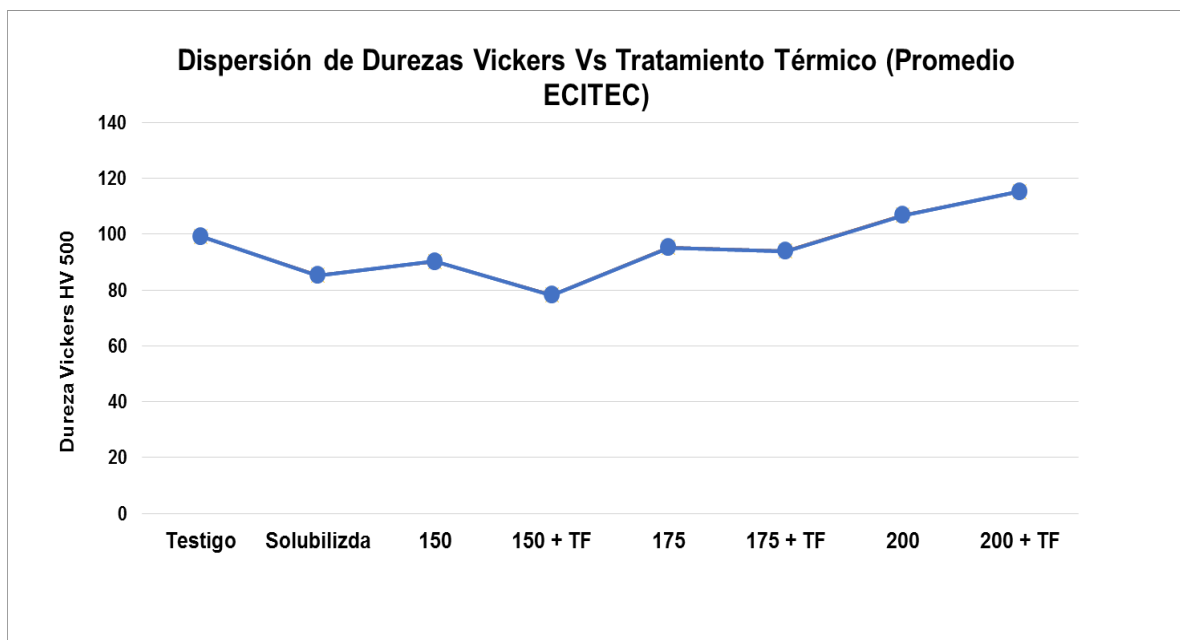
Las gráficas 12 y 13 muestran los valores de dureza por muestra, en la que se observa la dispersión de las medidas de dureza, evidenciándose que en las muestras con trabajo en frío muestran una dispersión mayor, es decir los valores están más separados.

Tabla 4.6 Valores de dureza promedio obtenidas con equipo Shimadzu Wilson.

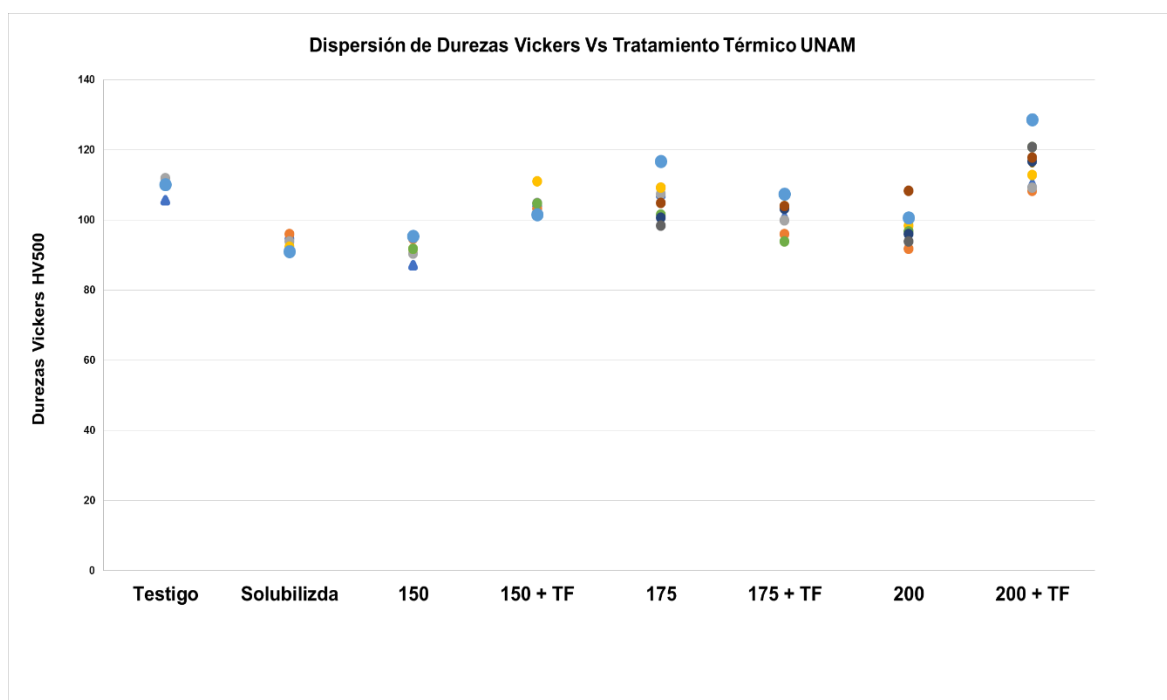
	Testigo	Solubilizada	150	150 + TF	175	175 + TF	200	200 + TF
UNAM HV500	109	93	91	104	106	101	98	116
CITEC HV500	99	85	90	78	95	93	106	115



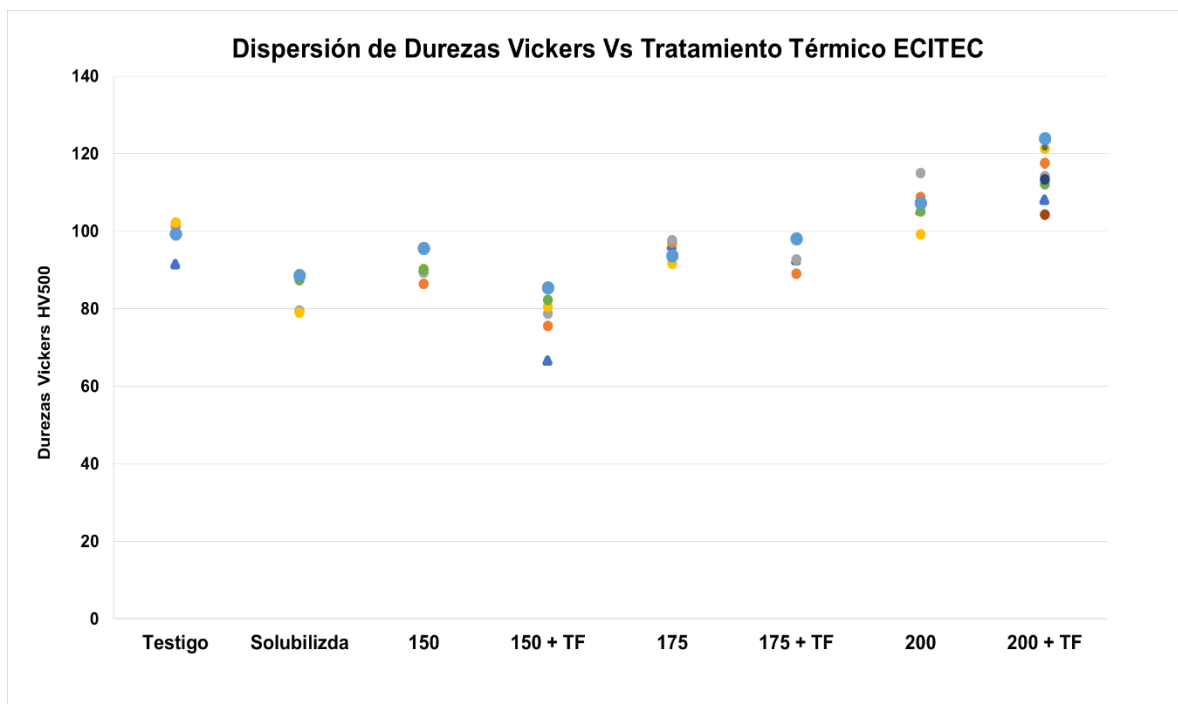
Gráfica 4.12 Comportamiento de dureza Vs tratamiento térmico con equipo Shimadzu. (UNAM)



Gráfica 4.13 Comportamiento de dureza Vs tratamiento térmico con equipo WILSON (ECITEC) .



Gráfica 4.14. Dispersión de dureza Vs tratamiento térmico con equipo Shimadzu. (UNAM)



Gráfica 4.15 Dispersión de dureza Vs tratamitno temrico con equipo WILSON (ECITEC)

4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

De las curvas $\sigma-\epsilon$ que se presentan en las gráficas 4.3 a la 4.9, se determinó el esfuerzo y la deformación a la cedencia, el esfuerzo máximo y el esfuerzo a la ruptura; con dichos valores se determinó la energía necesaria para deformar el material en la zona elástica, plástica y su tenacidad, la cual están relacionadas con el área bajo la curva de $\sigma-\epsilon$ y están relacionadas con resiliencia plasticidad y tenacidad respectivamente; los valores de muestran en la tabla 4.5 en los que se puede observar que:

La muestra a 200°C con trabajo en frío (200°C+TF) presenta los valores de esfuerzo de cedencia, máximo, ruptura, y la resiliencia son los valores más alto de 33.4 MPa, 33.3MPa, 29.9 MPa y 10855 J/m³ respectivamente. Es importante destacar que dichos valores son muy similares a los obtenidos en las muestras testigo.

Los valores obtenidos de plasticidad y tenacidad en la muestra a 150°C son los más altos con 61873 J/m³ y 60537 J/m³ los cual corresponde al área bajo la curva de $\sigma-\epsilon$ de la gráfica 4.5.

Por otra parte, los valores de dureza obtenidos en diferentes equipos muestran un patrón similar entre los obtenidos en la UNAM y los obtenidos en ECITEC, ver graficas 4.12 y 4.13.

Las gráficas de 4.14 y 4.15 muestran la dispersión de los valores de dureza en ambos equipos en el que se observa la misma dispersión siendo las muestras con trabajo en frío las que presentan mayor dispersión entre sus valores en ambos equipos.

CAPITULO V

CONCLUSIÓN

5.1 CONCLUSIÓN

EL OBJETIVO DE ESTA TESIS ES Caracterizar una aleación de aluminio 6061-T6, mediante el análisis mecánico y dureza, con el fin de comparar los resultados con la norma ASTM B 308-10 y los del proveedor (aluminio comercial), y así validar que el aluminio que se comercializa en la región, sea el indicado para aplicaciones aeroespaciales. ASI COMO Determinar los parámetros óptimos de Temperatura y porcentaje de acritud para lograr un cambio significativo en las propiedades mecánicas del Aluminio a partir de la materia prima utilizada, siendo esta el Aluminio de la serie 6061-T6 para una obtener un aluminio con mejores propiedades mecánicas (mayor dureza, menos fragilidad) aplicando métodos de tratamientos térmicos (normalizado, temple y revenido).

Comprendiendo la relación entre la microestructura, composición, síntesis y procesamiento es posible el desarrollo del conocimiento a profundidad de los materiales. Clasificando estos en cinco grupos según sus propiedades, estos son: metales, cerámicos, polímeros, semiconductores y materiales compuestos. Se debe tener en cuenta que, al modificar algún aspecto de la relación entre estructura interna, procesamiento y propiedades del material, cualquier otra o ambas, también cambiaran. Los metales es el grupo con mayor trascendencia para este trabajo ya que mediante tratamientos térmicos se puede modificar sus propiedades mecánicas.

En síntesis, se puede decir que los tratamientos térmicos ayudan a mejorar las propiedades y características de diversos materiales, afectando la estructura microscópica del metal, e incluso podrían presentarse en la composición de dicho metal.

Para los materiales no ferrosos, como lo es el aluminio utilizado en este trabajo, es común que se realice el envejecido como tratamiento térmico, además de poder ser tratadas por medios de recocidos y deformación en frío.

Los tratamientos térmicos aplicados a los aluminios son de bastante importancia para modificar sustancialmente sus propiedades, en la serie 6xxx, el fenómeno conocido como envejecimiento natural afecta las aleaciones de aluminio a una temperatura ambiente, si este proceso se realiza a una mayor temperatura se le conoce como envejecimiento artificial. Este tipo de tratamiento afecta significativamente las propiedades del material.

El objetivo de los tratamientos térmicos es mejorar las propiedades del material al que se le apliquen con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, especialmente la dureza, resistencia y elasticidad. El material utilizado en este trabajo se clasifica como un tipo de aleación forjada;

debido al tipo de aleación (Al-Mg-Si) corresponde a la serie 6xxx que es endurecible por envejecimiento.

Si a esto se le suma la aplicación del endurecimiento por acritud se verá una mejora en sus propiedades, incrementando el límite elástico, dureza, resistencia a tracción, perdiendo plasticidad y tenacidad.

Es importante tener en cuenta las normas aplicables a estos procesos, en este caso la norma ASTM E-8 es nuestra base para manufacturar los especímenes que posteriormente serán utilizados en los ensayos de tracción necesarios para determinar la relación de esfuerzo-deformación de los mismos.

De tal manera el desarrollo experimental constó de dos etapas, de la cual la primera consistió en la caracterización del material de los proveedores mediante ensayos de tensión, dureza y metalografía.

Una vez finalizada la primera etapa se prosiguió al desarrollo de la segunda, en la cual se llevó a cabo de nuevo el maquinado de las muestras, los tratamientos térmicos: solubilizado, envejecido a 150, 175 y 200 °C, endurecimiento por deformación, ensayos mecánicos y pruebas de dureza.

Caracterizar una aleación de aluminio 6061-T6, mediante el análisis mecánico y dureza, con el fin de comparar los resultados con la norma ASTM B 308-10 y los del proveedor (aluminio comercial), y así validar que el aluminio que se comercializa en la región, sea el indicado para aplicaciones aeroespaciales.

Determinar los parámetros óptimos de Temperatura y porcentaje de acritud para lograr un cambio significativo en las propiedades mecánicas del Aluminio a partir de la materia prima utilizada, siendo esta el Aluminio de la serie 6061-T6 para una obtener un aluminio con mejores propiedades mecánicas (mayor dureza, menos fragilidad) aplicando métodos de tratamientos térmicos (homogenizado, envejecido y endurecimiento por acritud).

Con el objetivo de verificar la calidad del aluminio 6061-T6 utilizado en la industria, se realizaron pruebas de tensión a la ruptura, esfuerzo máximo, porcentaje de elongación y límite elástico de dicha materia. Dichas pruebas se hicieron para un total de 12 muestras, correspondientes a dos proveedores locales, tomando 6 muestras por proveedor. Se consideró un promedio de los resultados para su comparación con la norma ASTM B 308-10 y fichas técnicas de dos proveedores locales, dando resultados positivos de dichas propiedades del aluminio para su uso en la industria, de acuerdo a la norma y fichas técnicas.

Aun y cuando la muestra de 200°C con trabajo en frío presenta la mayor energía de resiliencia, es decir que se soporta mayor energía en la zona elástica, no es la más adecuada ya que presenta valores de plasticidad y tenacidad bajos en comparación a los obtenidos de en las muestras tratadas a 150°C los cuales son tres veces más altos.

De las curvas $\sigma-\epsilon$ que se presentan en las gráficas 4.3 a la 4.9, se determinó el esfuerzo y la deformación a la cedencia, el esfuerzo máximo y el esfuerzo a la ruptura; con dichos valores se determinó la energía necesaria para deformar el material en la zona elástica, plástica y su tenacidad, la cual están relacionadas con el área bajo la curva de $\sigma-\epsilon$ y están relacionadas con resiliencia plasticidad y tenacidad respectivamente; los valores de muestran en la tabla 4.5 en los que se puede observar que:

La muestra a 200°C con trabajo en frío (200°C+TF) presenta los valores de esfuerzo de cedencia, máximo, ruptura, y la resiliencia son los valores más alto de 33.4 MPa, 33.3MPa, 29.9 MPa y 10855 J/m³ respectivamente. Es importante destacar que dichos valores son muy similares a los obtenidos en las muestras testigo.

Los valores obtenidos de plasticidad y tenacidad en la muestra a 150°C son los más altos con 61873 J/m³ y 60537 J/m³ los cual corresponde al área bajo la curva de $\sigma-\epsilon$ de la gráfica 4.5.

Por otra parte, los valores de dureza obtenidos en diferentes equipos muestran un patrón similar entre los obtenidos en la UNAM y los obtenidos en ECITEC, ver graficas 4.12 y 4.13.

Las gráficas de 4.14 y 4.15 muestran la dispersión de los valores de dureza en ambos equipos en el que se observa la misma dispersión siendo las muestras con trabajo en frío las que presentan mayor dispersión entre sus valores en ambos equipos.

Es importante destacar que las muestras a 150°C podrán soportar mayor deformación sin que se fracturen; sin embargo, habrá que evaluar cuál es el comportamiento con la película delgada de material cerámico (TiB₂-AlN). Es decir que el compuesto se caracterizan mediante MEB, DRX FM; con el propósito de evaluar si cumple con las propiedades refractarias, tribológicas y estabilidad mecánica que se buscan.

En lo particular realizar este trabajo de tesis ha sido para mí una experiencia enriquecedora y una de las más arduas a las que me he visto enfrentada. Muchos han sido obstáculos personales que he tenido que asumir y aprender a superar. Pero también muchas han sido las oportunidades y ayuda que he recibido de mis mentores.

En la realización de esta tesis no me limité a cumplir el requisito para titularme. El tema me fue envolviendo y cautivando hasta terminar inmensa en él. Finalizo este trabajo feliz y con nuevas aptitudes desarrolladas a lo largo de su realización.

5.2 TRABAJOS FUTUROS

Con el fin de dar continuidad a esta investigación se tiene contemplado evaluar las muestras a 150°C mediante microscopia óptica y electrónica con el propósito de determinar cuáles y cuantas fases coexisten y correlacionarlas con la dureza y las propiedades mecánicas.

Paralelamente se pretende utilizar estos materiales como sustratos para depósitos de películas delgadas mediante técnicas de Ablación Laser o electrodeposición.

Para finalmente caracterizar este material compuesto (aluminio 6061 T6 - TiB₂).

CAPITULO VI

BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM. *ASTM E8M-10 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International; 2010.
2. Piris Nuria M. *Ciencia de Materiales Para Ingenieros*. PEARSON; 2012.
3. Callister Jr WD. *Introducción a La Ciencia e Ingeniería de Los Materiales*. Segundo Vo. Editorial Reverté; 2007.
4. Askeland DR, Phulé PP. *Ciencia e Ingeniería de Los Materiales 2*. 4ta Edición.
5. Budynas Jr RG. *Diseño En Ingeniería Mecánica*. 9na Edición. McGraw Hill
6. ASTM. *ASTM B308-10 Standard Specification for Aluminum-Alloy 6061-T6 Standard Structural Profiles*. ASTM International; 2010.
7. ASTM International. *ASTM E8-16 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*.
8. ASTM International. *ASTM B308M-10 Standard Specification for Aluminum-Alloy 6061-T6 Standard Structural Profiles*.
9. González Vizcarra B, Hernández Maldonado A, Hernández Martínez E, Martín del Campo C. Análisis comparativo de las propiedades mecánicas del aluminio 6061-T6 con base a la norma ASTM B 308-10 y fichas técnicas de proveedores locales. 2016:779-783.
10. Mijangos C, Moya José Serafín. *Nuevos Materiales En La Sociedad Del Siglo XXI*. CSIC; 2005.
11. Autores V. Enciclopedia de Ciencia y Técnica. Tomo 13 Titanio. In: Salvat Editores S.A; 1984.
12. Morss L, Edelstein N, Fuger J, Katz J. *The Chemistry of the Actinide and Transactinide Elements*. 3rd ed. Springer Netherlands; 2006.
13. Askeland DR. *Ciencia e Ingeniería de Los Materiales*. 4ta ed.
14. Groover MP (Lehigh U. *Fundamentos de Manufactura Moderna*. Tercera Ed. McGraw Hill; 2007. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
15. Apraiz B. J. *Tratamientos Térmicos de Los Aceros*. 10a ed. Madrid
16. Cavazos Garcia JL. Tratamiento Térmico de una Aleación de Aluminio 6063. 1998.
17. Cetina MS, Lemus J. Influencia del tratamiento térmico de envejecimiento en las propiedades mecánicas de los aluminios. 2011:6-11.
18. Maffia EGDI. *Estructura y Propiedades de Las Aleaciones, Aluminio y Sus Aleaciones*; 2013.
19. Echavarría V. A, Orrego P. GA. Metalurgia Básica De Algunas Aleaciones De Aluminio Extruidas O Laminadas. *J Chem Inf Model*. 2013;53(9):1689-1699. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
20. Committee. AIH. *ASM HANDBOOK Volume 19 Fatigue and Fracture*. ASM International; 1996.

21. Lorenzo M, Carlos J, Franco M. Análisis del efecto baushinger en aceros de alta resistencia. (May 2014).
22. ASTM. *ASTM B557-10 Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium- Alloy Products*. ASTM International; 2010.
23. Buehler. Wilson| Tukon 1102 & 1202.
24. ASTM International. *ASTM E92-17 Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials*.