

ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE TENACIDAD,
ESFUERZO DE TENSIÓN Y DUREZA DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 2024 T4,
TRATADO TÉRMICAMENTE MEDIANTE EL ENDURECIMIENTO POR
PRECIPITACIÓN A 180 °C

PRESENTADO POR:
VICENTE RICO SUÁREZ

UNIVERSIDAD LIBRE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C
2016-II

ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE TENACIDAD,
ESFUERZO DE TENSIÓN Y DUREZA DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 2024 T4,
TRATADO TÉRMICAMENTE MEDIANTE EL ENDURECIMIENTO POR
PRECIPITACIÓN A 180 °C

VICENTE RICO SUÁREZ

Trabajo de Grado

Director:
Carlos Arturo Bohórquez Ávila.
Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD LIBRE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C
2016-II

Nota de aceptación:

Firma del Jurado 1

Firma del Jurado 2

Bogotá D.C, Julio de 2016

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en especial a:

Dios por permitirme concluir esta valiosa etapa de mi vida de forma exitosa, por concederme la salud y por esas personas maravillosas que ha puesto en my camino.

A mis padres y familiares porque me brindaron su apoyo incondicional, sus deseos y sus consejos que contribuyeron a ir mejorando cada día.

Agradezco a la facultad de Ingeniería de la Universidad Libre por los conocimientos y educación integral recibida, durante mi formación académica la cual es de gran importancia para mi futuro como Ingeniero Mecánico.

Al Director del proyecto: Ingeniero Carlos Arturo Bohórquez Ávila, quien con sus conocimientos y guía ayudo al desarrollo de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

1.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	15
2.	JUSTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN.....	16
3.	OBJETIVOS.....	17
3.1	OBJETIVO GENERAL.....	17
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
4.	MARCO REFERENCIAL.....	18
4.1	MARCO TEÓRICO.....	18
4.1.1	Aluminio.....	18
4.1.2	Endurecimiento por precipitación.....	19
4.1.3	Efectos de la temperatura y del tiempo de sostenimiento.....	21
4.1.4	Fases obtenidas en el endurecimiento por precipitación.....	22
4.1.5	Requisitos para el endurecimiento por precipitación.....	23
4.1.6	Ensayos destructivos.....	24
4.2	MARCO CONCEPTUAL.....	25
4.3	ESTADO DEL ARTE.....	27
4.4	MARCO LEGAL Y NORMATIVO.....	32
4.4.1	ASTM E-23 (Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials).....	32
4.4.2	ASTM E-384 (Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials)..	32
4.4.3	ASTM E-08 (Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials).....	33
4.4.4	ASTM E-03 (Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens).....	34
4.4.5	ASTM E-407 (Standard Practice for Microetching Metals and Alloys).....	34
5.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	35
5.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	35
5.2	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	35
5.3	METODOLOGÍA.....	37

6.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	46
6.1	TENACIDAD.....	46
6.2	MICRODUREZA.....	48
6.3	TENSIÓN.....	50
6.4	METALOGRAFÍA.....	65
7.	CONCLUSIONES.....	71
	BIBLIOGRAFÍA.....	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gráfica de la temperatura frente al tiempo de sostenimiento de los tratamientos térmicos empleados en el endurecimiento por precipitación [11].	20
Figura 2. Diagrama de un extremo rico en aluminio de la fase aluminio–cobre, que muestra las microestructuras que se generan en el endurecimiento por precipitación [11].	21
Figura 3. Efecto de la temperatura y del tiempo de sostenimiento en la resistencia a la fluencia de una aleación Al-4% Cu.....	22
Figura 4. Efecto de la temperatura y del tiempo de sostenimiento en la resistencia a la fluencia de una aleación Al-4% Cu [28].	23
Figura 5. Medidas típicas para la elaboración de probetas de impacto [8].	32
Figura 6. Medidas típicas para la elaboración de probetas de tensión [9].	33
Figura 7. Curva de operación característica [24].	36
Figura 8. Probetas de impacto ya mecanizadas según la norma ASTM E – 023.	39
Figura 9. probetas de tensión ya mecanizadas, según la norma ASTM E-08	39
Figura 10. Diagrama de fase Al-Cu	40
Figura 11. Tratamiento térmico de envejecido a 180 °C de las muestras de estudio.....	41
Figura 12. Equipo de impacto Satec Systems, ing	42
Figura 13. Maquina universal de ensayos Shimadzu.....	43
Figura 14. Montaje en resina de las muestras a pulir	43
Figura 15. Pulido mecánico en paño y con suspensión SPM de 0,03 micras	44
Figura 16. Ataque químico.	44
Figura 17. Análisis metalografico	45
Figura 18. Microdurometro.....	45

Figura 19. Microestructura a 1000X aumentos de la aleación de aluminio 2024 T4 después de ser envejecida 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 24 horas	66
Figura 20. Metalografía de referencia tomada del libro <i>Metals handbook, vol 7 y 9</i>	67
Figura 21. Diagramas de esfuerzo deformación de la aleación de aluminio 2024 T4, en estado de entrega.	86
Figura 22. Diagramas de esfuerzo deformación de la aleación de aluminio 2024 T4, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 2 h.	87
Figura 23. Diagramas de esfuerzo deformación de la aleación de aluminio 2024 T4, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 4 h.	88
Figura 24. Diagramas de esfuerzo deformación de la aleación de aluminio 2024 T4, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 8 h.	89
Figura 25. Diagramas de esfuerzo deformación de la aleación de aluminio 2024 T4 con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 12 h.	90
Figura 26. Diagramas de esfuerzo deformación de la aleación de aluminio 2024 T4, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 24 h.	91
Figura 27. Diagrama de esfuerzo deformación de la aleación de aluminio 2024 T4 con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 36 h.	92
Figura 28. Diagrama de esfuerzo deformación de la aleación de aluminio 2024 T4, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 48 h.	93
Figura 29. Diagrama de esfuerzo deformación de la aleación de aluminio 2024 T4, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 72 h.	94
Figura 30. Diagrama de esfuerzo deformación de la aleación de aluminio 2024 T4, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 96 h.	95

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Principales Elementos Aleantes del Aluminio.....	18
Tabla 2. Composición química de la aleación 2024 [1].....	27
Tabla 3. Datos de tiempo de sostenimiento v_s energía de impacto obtenida.....	36
Tabla 4. Datos del diseño experimental	37
Tabla 5. Comparación de la composición química de la aleación de aluminio 2024 T4. ...	38
Tabla 6. Variación de la tenacidad en función del tiempo de envejecimiento a 180° C de la aleación de aluminio 2024 T4.....	46
Tabla 7. Variación de la dureza en función del tiempo de envejecimiento a 180° C de la aleación de aluminio 2024 T4.....	48
Tabla 8. Variación del esfuerzo máximo en función del tiempo de envejecimiento a 180° C de la aleación de aluminio 2024 T4.....	50
Tabla 9. Variación de la tenacidad obtenida de la gráfica esfuerzo deformación en función del tiempo de envejecimiento a 180° C de la aleación de aluminio 2024 T4.	63
Tabla 10. Microestructura a 200 X de la aleación de aluminio 2024 T4, después de ser envejecida a 180 °C.....	68
Tabla 11. Microestructura a 500 X de la aleación de aluminio 2024 T4, después de ser envejecida a 180 °C.....	69
Tabla 12. Microestructura a 1000 X de la aleación de aluminio 2024 T4, después de ser envejecida a 180 °C.....	70
Tabla 13. Tenacidad de las muestras en estado de entrega.....	76
Tabla 14. Tenacidad de las muestras, con un tratamiento térmico de solución.	76
Tabla 15. Tenacidad de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 2 h.	76
Tabla 16. Tenacidad de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 4 h.	77

Tabla 17. Tenacidad de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 8 h.....	77
Tabla 18. Tenacidad de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 12 h.	77
Tabla 19. Tenacidad de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 24 h.	78
Tabla 20. Tenacidad de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 36 h.	78
Tabla 21. Tenacidad de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 48 h.	78
Tabla 22. Tenacidad de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 72 h.	79
Tabla 23. Tenacidad de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 96 h.	79
Tabla 24. Dureza Vickers de la muestra en estado de entrega.	80
Tabla 25. Dureza Vickers de la muestra, con un tratamiento térmico de solución.....	80
Tabla 26. Dureza Vickers de la muestra, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 2 h.	81
Tabla 27. Dureza Vickers de la muestra, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 4 h.	81
Tabla 28. Dureza Vickers de la muestra, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 8 h.	82
Tabla 29. Dureza Vickers de la muestra, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 12 h.	82
Tabla 30. Dureza Vickers de la muestra, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 24 h.	83
Tabla 31. Dureza Vickers de la muestra, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 36 h.	83
Tabla 32. Dureza Vickers de la muestra, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 48 h.	84

Tabla 33. Dureza Vickers de la muestra, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 72 h.	84
Tabla 34. Dureza Vickers de la muestra, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 96 h.	85
Tabla 35. Resultados del ensayo de tensión de las muestras en estado de entrega.	96
Tabla 36. Resultados del ensayo de tensión de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 2 h.	96
Tabla 37. Resultados del ensayo de tensión de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 4 h.	97
Tabla 38. Resultados del ensayo de tensión de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 8 h.	97
Tabla 39. Resultados del ensayo de tensión de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 12 h.	98
Tabla 40. Resultados del ensayo de tensión de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 24 h.	98
Tabla 41. Resultados del ensayo de tensión de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 36 h.	99
Tabla 42. Resultados del ensayo de tensión de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 48 h.	99
Tabla 43. Resultados del ensayo de tensión de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 72 h.	100
Tabla 44. Resultados del ensayo de tensión de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 96 h.	100

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1. Variación de la tenacidad en función del tiempo de envejecimiento a 180° C de la aleación de aluminio 2024 T4.	47
Gráfica 2. Variación de la dureza Vickers, en función del tiempo de envejecimiento a 180 °C de la aleación de aluminio 2024 T4.	49
Gráfica 3. Diagrama de esfuerzo deformación, para el aluminio 2024 T4, en estado de entrega.	51
Gráfica 4. Diagrama de esfuerzo deformación, para el aluminio 2024 T4, envejecido a 180 °C, durante 2 horas.	52
Gráfica 5. Diagrama de esfuerzo deformación, para el aluminio 2024 T4, envejecido a 180 °C, durante 4 horas.	53
Gráfica 6. Diagrama de esfuerzo deformación, para el aluminio 2024 T4, envejecido a 180 °C, durante 8 horas.	54
Gráfica 7. Diagrama de esfuerzo deformación, para el aluminio 2024 T4, envejecido a 180 °C, durante 12 horas.	55
Gráfica 8. Diagrama de esfuerzo deformación, para el aluminio 2024 T4, envejecido a 180 °C, durante 24 horas.	56
Gráfica 9. Diagrama de esfuerzo deformación, para el aluminio 2024 T4, envejecido a 180 °C, durante 36 horas.	57
Gráfica 10. Diagrama de esfuerzo deformación, para el aluminio 2024 T4, envejecido a 180 °C, durante 48 horas.	58
Gráfica 11. Diagrama de esfuerzo deformación, para el aluminio 2024 T4, envejecido a 180 °C, durante 72 horas.	59
Gráfica 12. Diagrama de esfuerzo deformación, para el aluminio 2024 T4, envejecido a 180 °C, durante 96 horas.	60
Gráfica 13. Variación del esfuerzo máximo en función del tiempo de envejecimiento a 180° C de la aleación de aluminio 2024 T4.	61
Gráfica 14. Variación del porcentaje de elongación en función del tiempo de envejecimiento a 180° C de la aleación de aluminio 2024 T4.	62

Gráfica 15. Variación de la tenacidad obtenida de la gráfica esfuerzo deformación en función del tiempo de envejecimiento a 180° C de la aleación de aluminio 2024 T4.	64
Gráfica 16. Influencia del tratamiento térmico de envejecido en las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 2024 T4.	71

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. (Tablas de Resultados, del Ensayo de Impacto)	76
Anexo B. (Tablas de los Resultados del Ensayo de Dureza)	80
Anexo C. (Diagramas de Esfuerzo Deformación Para el Aluminio 2024 T4 Envejecido a 180 °C)	86
Anexo D. (Resultados de los Ensayos de Tensión)	96
Anexo E. (Factura Del Material De Estudio).....	101
Anexo F. (Certificado de la aleación de aluminio 2024 T4, con el cual se va a realizar el proyecto.).....	102
Anexo G . (Análisis de la composición química, del material adquirido en el DESVARE AÉREO S.A.).....	103
Anexo H . (Factura del Abrasivo)	104

INTRODUCCIÓN

Identificar y aumentar las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 2024 T4 mediante el tratamiento térmico de envejecido (endurecimiento por precipitación), son factores importantes en el campo de la ingeniería ya que estas propiedades aportan las características de resistencia y estabilidad de las estructuras y/o componentes que se van a diseñar.

El objetivo de este estudio es dar a conocer el efecto que tiene el tratamiento térmico de envejecido, en las propiedades mecánicas de tenacidad, esfuerzo de tensión, dureza y cambios microestructurales de la aleación de aluminio 2024 T4, el cual fue tratado térmicamente a 180 °C y con tiempos de sostenimiento entre 2 y 96 horas con un posterior tratamiento térmico de solución a 515 °C a 1 hora y enfriado en agua a temperatura ambiente. Para este proyecto, se desarrolla un diseño experimental para establecer el número mínimo de muestras necesarias que permita analizar el fenómeno; posteriormente se desarrollan los ensayos de tensión, impacto, microdureza y análisis metalográfico a 200X, 500X y 1000X aumentos con el objetivo de visualizar, si el tratamiento térmico de envejecido tiene un impacto significativo en las propiedades estudiadas de tenacidad, esfuerzo de tensión, dureza y cambios microestructurales, o por el contrario este tratamiento no las favorece y reduce, respecto a las del material en estado de entrega.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La aleación de aluminio 2024 T4 es una aleación de la serie 2_{xxx}, que tiene cobre como principal elemento aleante, el cual favorece de manera notable la resistencia a la tracción y la dureza, convirtiéndolo en un material útil para la industria e ingeniería; es ampliamente utilizada en la industria aeronáutica, ya que estas aleaciones son ligeras y resistentes a la vez, lo cual proporciona una disminución en el peso de la aeronave, lo que implica un menor consumo de combustible y un aumento de velocidad. Por lo general la aleación de aluminio 2024 T4 es empleada en la fabricación del fuselaje de las aeronaves, recubrimiento de las alas y de la fabricación de elementos de fijación como remaches, tornillos, pernos y tuercas.

Para aumentar las propiedades mecánicas (tenacidad, esfuerzo de tensión y dureza) y microestructurales de las aleaciones de aluminio, se procede en la mayoría de los casos a implementar un tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación (tratamiento térmico de envejecido), en el cual los elementos de la aleación deben ser parcialmente solubles en estado sólido con el aluminio [14].

Respecto al endurecimiento por precipitación de la aleación de aluminio 2024 T4 se han desarrollado diversos estudios, entre los cuales es de resaltar: La investigación de NAIDU GURUGUGELLI, Swami. (2012). "*The Effect of Ageing on Impact Toughness and Microstructure of 2024 Al-Cu-Mg Alloy*". En la cual se estudia el efecto del endurecimiento por precipitación en las propiedades mecánicas (tenacidad y dureza) y la microestructura en la aleación de aluminio 2024, con una temperatura de precipitación de 200 °C y tiempos de sostenimiento entre 1 y 18 horas. En esta investigación se observa que la dureza aumenta en las primeras horas de sostenimiento hasta obtener su máximo de 162 HV a las 10 horas y a partir de este tiempo comienza a disminuir gradualmente debido a la aparición de precipitados de fases intermedias de mayor tamaño. Además se concluye que la tenacidad depende en un gran porcentaje a las variables microestructurales y son afectadas, por factores como la resistencia a la fluencia, ductilidad y la temperatura, además se identifica que la muestra con mayor dureza tiene la tenacidad más baja [25].

Debido a que las aleaciones de aluminio están siendo constantemente utilizadas en la industria, y la necesidad de optimizar al máximo sus características mecánicas de tenacidad, esfuerzo de tensión, dureza y microestructurales, en el presente proyecto se determina la influencia que tiene el tratamiento térmico de envejecido (endurecimiento por precipitación) de la aleación de aluminio 2024 T4 con una temperatura de 180 °C y con tiempos de sostenimiento de 2, 4, 8, 12, 24, 36, 48, 72, y 96 horas.

2. JUSTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN

El aluminio es un material dúctil y maleable de alta conductividad térmica y eléctrica. Posee propiedades que lo convierten en un material útil para las aplicaciones de ingeniería ya que proporciona una baja densidad. Para aumentar las propiedades mecánicas del aluminio se tiene que alea con otros elementos como el cobre, magnesio, silicio, manganeso y zinc entre otros, la aleación de aluminio 2024 T4 es una aleación de la serie 2XXX la cual tiene cobre como principal elemento aleante. Una vez aleado el aluminio se procede a aumentar su resistencia mecánica por medio de deformación o por medio de un tratamiento térmico de envejecido [10].

El endurecimiento por precipitación o tratamiento térmico de envejecido, es un método común que se encuentra en la industria para incrementar la resistencia mecánica de las aleaciones de aluminio, para llevar a cabo este endurecimiento se debe aplicar previamente un tratamiento térmico de solución a una temperatura entre solvus y solidus del diagrama de fase aluminio-cobre, con el objetivo de disolver los precipitados de fase y reducir cualquier segregación microquímica presente en la aleación, seguido de un enfriamiento rápido o temple en agua para obtener una solución sólida sobresaturada y finalmente se hace el tratamiento térmico de envejecido (natural o artificial) que produce precipitados finamente dispersos en la matriz [3].

En este proyecto se realiza un tratamiento térmico de envejecido a la aleación de aluminio 2024 T4, para determinar el comportamiento de las propiedades mecánicas (tenacidad, esfuerzo de tensión y dureza) y microestructurales después del envejecido artificial a 180 °C y con tiempos de sostenimiento entre 2 y 96 Horas, y esto es debido a que las propiedades mecánicas están relacionadas con la temperatura de envejecimiento y el tiempo de sostenimiento ya que para una menor temperatura se necesitan tiempos de sostenimiento extensos para llegar a obtener una resistencia máxima. Mediante la implementación de ensayos mecánicos de tensión, impacto, microdureza y metalografía se identifica si las propiedades mecánicas y microestructurales de esta aleación obtienen una mejora representativa en sus propiedades, o por el contrario este tratamiento no las favorece y reduce, frente a las obtenidas en el material en estado de entrega.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar el impacto del tratamiento térmico de envejecido (endurecimiento por precipitación), en las propiedades mecánicas de Tenacidad, Esfuerzo de Tensión, Dureza y su comportamiento microestructural de la aleación de aluminio 2024 T4, en el cual el endurecimiento por precipitación se realiza a 180 °C y con tiempos de sostenimiento de 2, 4, 8, 12, 24, 36, 48, 72, y 96 horas.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el comportamiento de las propiedades mecánicas de tenacidad, esfuerzo de tensión y dureza de la aleación de aluminio 2024 T4, obtenidas en estado de entrega y después de haber sido tratado térmicamente, mediante un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con tiempos de sostenimiento entre 2 y 96 horas.
- Identificar y comparar la microestructura de la aleación de aluminio 2024 T4 que se obtiene, en el material en estado de entrega y las muestras tratadas térmicamente, mediante un tratamiento térmico de envejecido.
- Establecer los tiempos de sostenimiento con los cuales se obtuvo una mejora significativa de las propiedades mecánicas de tenacidad, esfuerzo de tensión y dureza de la aleación de aluminio 2024 T4, después de haber sido tratadas térmicamente.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 MARCO TEÓRICO

4.1.1 Aluminio. El aluminio (Al) es un metal no férreo el cual presenta una combinación de propiedades que lo hacen un material útil para la industria e ingeniería, tiene una densidad de 2.700 Kg/m^3 , la cual es 34 % más baja que la densidad del acero (7.870 Kg/m^3) y un módulo de elasticidad de 100 ksi (69 Mpa). Aun cuando las aleaciones de aluminio tienen propiedades a la tensión más bajas que el acero, su relación entre resistencia y peso es excelente. Al aluminio se le puede dar forma con toda facilidad, posee alta conductividad térmica y eléctrica y no muestra transiciones de dúctil a quebradizo a baja temperaturas [27].

En la industria se pueden encontrar diversos métodos para aumentar la resistencia mecánica del aluminio mediante la aplicación y combinación de los siguientes procesos:

- Aleación con otro elemento; los principales elementos de aleación son el cobre (Cu), magnesio (Mg), silicio (Si), manganeso (Mn) y zinc (Zn). Este proceso es uno de los más importantes, ya que el aluminio puro presenta una combinación de propiedades mecánicas bajas las cuales se optimizan al ser aleado con otro elemento. La designación de los principales elementos aleantes se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales Elementos Aleantes del Aluminio

Principal Aleante	Designación
Aluminio Puro	1 _{xxx}
Cobre	2 _{xxx}
Manganeso	3 _{xxx}
Silicio	4 _{xxx}
Magnesio	5 _{xxx}
Magnesio y Silicio	6 _{xxx}
Zinc	7 _{xxx}
Otros Elementos	8 _{xxx}
Series no Utilizadas	9 _{xxx}

Fuente: SMITH, William F. y HASHEMI, Javad. (2002). Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales. México, D.F.: Mc Graw Hill. Pág. 412.

- Endurecimiento por deformación (este proceso se origina mediante la deformación plástica del material).
- Endurecimiento por precipitación (tratamientos térmicos).

Hay que tener presente que la aplicación de estos procesos, favorecen al material en el aumento de su resistencia mecánica, pero a su vez se presenta una disminución en la resistencia a la corrosión, por lo cual estas aleaciones son galvanizadas con aluminio de alta pureza o con aleaciones de aluminio de la serie 6_{xxx} la cual ayuda en el aumento de la resistencia a la corrosión.

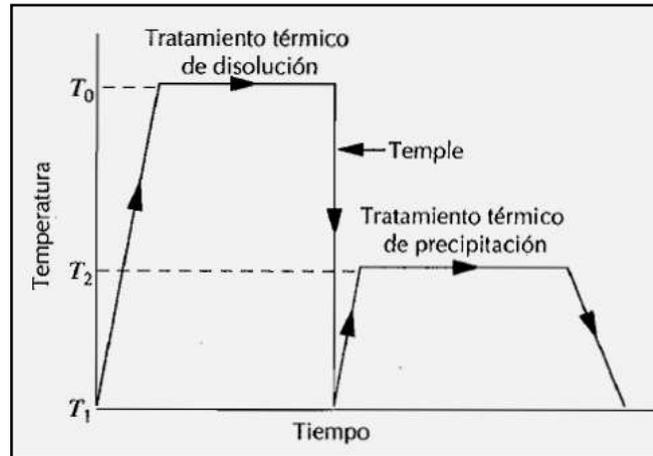
Las aleaciones de aluminio se clasifican dependiendo el método de fabricación en dos grupos fundamentales aleaciones forjadas y fundidas. Estos dos grupos de aleaciones tienen composiciones químicas, mecánicas y microestructurales que son considerablemente diferentes entre sí. Dentro de cada grupo principal es posible dividir las aleaciones en dos subgrupos: aleaciones que pueden recibir tratamiento térmico (se les puede realizar un tratamiento térmico para aumentar sus propiedades mecánicas) y las que no pueden recibir tratamiento (esto es un claro ejemplo de las aleaciones de las serie 1xxx y 3xxx, lo cual es debido a que estas aleaciones solo presentan una fase, ya que la presencia de otros elementos aleantes es baja), solo el trabajo en frío y el endurecimiento por deformación permite aumentar las propiedades mecánicas de estas aleaciones [11].

Para identificar las aleaciones forjadas de aluminio se utiliza un código de cuatro dígitos "XXXX". El primer número indica los principales elementos de aleación, y los números restantes se refieren a la composición química de la aleación. El grado de endurecimiento esta dado por la notación del templado T (endurecido por envejecimiento) o H (trabajada en frío), los numerales que siguen a la T o H indican la cantidad de endurecimiento u otros aspectos especiales del procesamiento de la aleación. Las aleaciones de aluminio fundidas se designan mediante tres dígitos "XXX" y un cuarto dígito ".X" separado por un punto decimal, el cual indica la forma del producto, 1 ó 2 si es un lingote, y 0 para fundición [27].

4.1.2 Endurecimiento por precipitación. Las propiedades mecánicas (tenacidad, esfuerzo máximo y dureza, etc.) de algunas aleaciones metálicas pueden aumentar debido a la formación de partículas finas precipitadas en una matriz de metal deformable y uniformemente dispersas, esta transformación se puede alcanzar mediante un tratamiento térmico denominado endurecimiento por precipitación o envejecimiento. Una ventaja significativa de aplicar un endurecimiento por precipitación es que puede usarse para aumentar la resistencia a la fluencia de numerosos materiales metálicos sin establecer cambios significativos en la densidad [27].

El proceso de endurecimiento por precipitación tiene tres pasos básicos, los cuales se observan en la Figura 1:

Figura 1. Gráfica de la temperatura frente al tiempo de sostenimiento de los tratamientos térmicos empleados en el endurecimiento por precipitación [11].



Fuente: CALLISTER, William D. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. México, D.F., Mc Graw Hill, 2009, pág. 351.

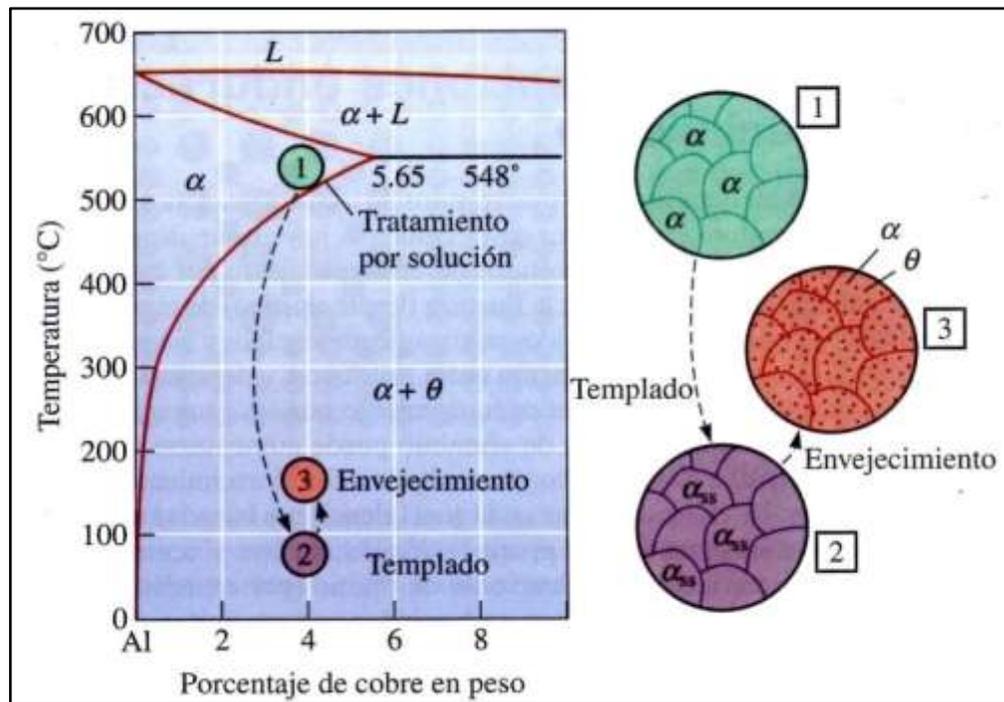
4.1.2.1 Tratamiento por Solución. Este tratamiento tiene como fin disolver los precipitados de fase y reduce cualquier segregación microquímica presente en la aleación original. En el tratamiento por solución la aleación es calentada a una temperatura intermedia entre la del solvus y la del solidus del diagrama Al-Cu, y se mantiene así hasta que se produce una solución α sólida homogénea [11].

4.1.2.2 Templado. Después del tratamiento por solución la muestra es enfriada rápidamente, en este proceso los átomos no tienen tiempo de difundirse a potenciales sitios de formación de núcleos a fin de prevenir la formación de una fase θ , la estructura de la muestra en este punto consiste en una solución sólida sobresaturada α_{ss} . En este estado la aleación es blanda y poco resistente [11].

4.1.2.3 Tratamiento Térmico de Precipitación. Finalmente la solución α_{ss} se calienta a una temperatura debajo de la temperatura de solvus. A esta temperatura de precipitación, se forman precipitados finamente dispersos ya que los átomos se difunden a cortas distancias. En esta etapa la muestra a la que se le está efectuando el tratamiento permanece un tiempo de sostenimiento determinado a la temperatura de precipitación y posteriormente es enfriada, con la

finalidad de obtener una estructura de equilibrio ($\alpha+\theta$). Como se observa en la Figura 2, cuando se ejecutan las tres etapas para realizar el endurecimiento por precipitación se produce la fase θ en forma de partículas de precipitado de segunda fase dispersas de manera uniforme y fina, el precipitado fino dentro de la aleación, impide durante la deformación el movimiento de las dislocaciones, lo cual ayuda a que la aleación se refuerce [27].

Figura 2. Diagrama de un extremo rico en aluminio de la fase aluminio-cobre, que muestra las microestructuras que se generan en el endurecimiento por precipitación [11].



Fuente: ASKELAND, Donald R.; FULAY, Pradeep P. y WRIGHT, Wendelin. Ciencia e Ingeniería de Materiales. México, D.F., CENGAGE Learning, 2011, 6 ed, pág. 460.

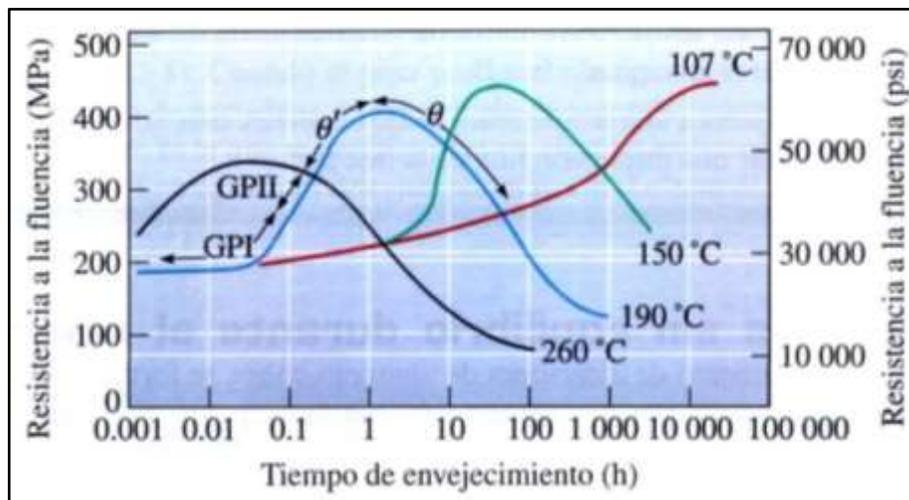
Cuando la aleación es envejecida a temperatura ambiente, el proceso se llama envejecido natural, este envejecimiento requiere de tiempos largos, a veces de varios días para alcanzar una máxima resistencia. Mientras que el envejecimiento realizado a altas temperaturas se denomina envejecimiento artificial.

4.1.3 Efectos de la temperatura y del tiempo de sostenimiento. Las propiedades de una aleación que se endurece por precipitación están relacionadas con la temperatura de envejecimiento y el tiempo de sostenimiento. Conforme se aumenta el tiempo de envejecimiento se forman zonas de

precipitación y su tamaño aumenta, con lo cual la aleación se vuelve más resistente, más dura y menos dúctil según se puede observar en la condición donde se encuentra la resistencia máxima. Pero si nos pasamos del estado donde se encuentra la resistencia máxima se va a originar una condición de sobre envejecimiento en el cual el tamaño del precipitado aumenta y la aleación se vuelve menos resistente respecto al punto de la resistencia máxima como se puede observar en la Figura 3 [27].

En la Figura 3 se puede observar que a temperaturas más bajas de envejecimiento para las aleaciones de aluminio, se requiere de un tiempo más largo para producir una condición de resistencia máxima. Además es de resaltar algunos beneficios que se obtienen al realizar un envejecimiento a temperaturas bajas. Primero la aleación mantiene su máxima resistencia durante un tiempo más largo. Segundo, las propiedades son más uniformes [11].

Figura 3. Efecto de la temperatura y del tiempo de sostenimiento en la resistencia a la fluencia de una aleación Al-4% Cu.



Fuente: ASKELAND, Donald R.; FULAY, Pradeep P. y WRIGHT, Wendelin. Ciencia e Ingeniería de Materiales. México, D.F., CENGAGE Learning, 2011, 6 ed, pág. 462.

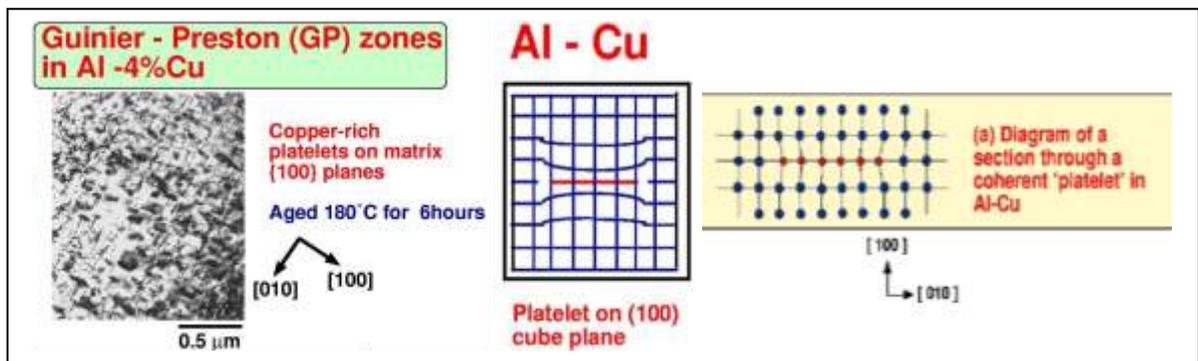
4.1.4 Fases obtenidas en el endurecimiento por precipitación. Durante el envejecimiento de la aleación de Al-Cu, se puede identificar la formación de una serie continua de otras fases de precipitados antes de la fase θ de equilibrio:

- Solución sólida α_{ss} sobresaturada.
- Zonas Guinier-Preston I (GP - I).
- Zonas Guinier-Preston I (GP - II) también llamada fase θ'' .

- Fase θ' .
- Fase θ la cual es una precipitación estable, que para el caso de la aleación Al-Cu la fase θ será Al_2Cu .

Un concepto significativo en el análisis de cómo las zonas GP se endurecen en una aleación de aluminio, es el hecho de que las zonas GP se componen de grupos de átomos de soluto que son coherentes con la celda de aluminio. Las plaquetas son muy pequeñas, de menos de $0.1 \mu\text{m}$ de diámetro aproximadamente, y se forman en los $\{100\}$ planos cúbicos de la matriz de aluminio. Como los átomos de cobre son más pequeños que los átomos de aluminio en un 11%. Los átomos de cobre se reúnen en átomos individuales en capas $\{100\}$ planos lo que crea una distorsión, en este caso una contracción, de la celda como se puede apreciar en Figura 4. No obstante, se mantiene la continuidad de los planos cristalográficos [28].

Figura 4. Efecto de la temperatura y del tiempo de sostenimiento en la resistencia a la fluencia de una aleación Al-4% Cu [28].



Fuente: TALAT *Precipitation Hardening*. Inglaterra, 1999, pág. 7-9. (1204)

4.1.5 Requisitos para el endurecimiento por precipitación. No todas las aleaciones son susceptibles al endurecimiento por precipitación, para lo cual estos elementos deben satisfacer tres condiciones para que la aleación tenga una respuesta favorable de endurecimiento durante el tratamiento térmico de precipitación:

- La aleación debe formar una sola fase (α) al calentarse a una temperatura por encima de la línea de solvus y luego entrar a una región de dos fases ($\alpha + \theta$) al enfriarse, como se observa en la Figura 2.
- La matriz debe ser relativamente blanda y dúctil, y el precipitado (compuesto intermetálico) debe ser duro y frágil.

- La aleación debe poder templarse, debido a que hay aleaciones que no se pueden enfriar con suficiente rapidez para suprimir la formación del precipitado [11].

4.1.6 Ensayos destructivos. Estos ensayos son pruebas destructivas que se le hace a un material con el objetivo de estudiar sus propiedades mecánicas. Los principales ensayos destructivos que se aplican en el presente proyecto son:

4.1.6.1 Prueba de tensión. En esta prueba una muestra del material a ensayar es estirado a velocidad constante hasta la fractura. Cuando se realiza una prueba de tensión la información registrada incluye la carga o fuerza como una función del cambio en la longitud (Δl), esta información se convierte en manera subsecuente a esfuerzo deformación. Las propiedades mecánicas de los materiales que tienen interés para el diseño estructural en ingeniería, y que pueden adquirirse a partir del ensayo de tracción son [11]:

- Resistencia a la fluencia.
- Esfuerzo máximo.
- % de elongación.
- Ductilidad.

4.1.6.2 Ensayo de dureza. La dureza de un metal se mide según la facilidad con que pueda ser deformado plásticamente. En este ensayo el microdurómetro aplica lentamente una carga de 300 gr al penetrador contra la superficie del material a ensayar durante 30 seg, inmediatamente producida la penetración el penetrador es retirado de la superficie dejando una huella de identificación y se lee la dureza producida. Este ensayo es más simple que el ensayo de tracción y puede ser no destructivo [27].

4.1.6.3 Prueba de impacto. La prueba de impacto describe la respuesta de un material a una carga aplicada de manera rápida. En esta prueba se mide la energía requerida para fracturar el material de estudio y puede utilizarse como la base para la comparación de varios metales probados en las mismas condiciones. En esta prueba, un péndulo pesado comienza una elevación h_0 , se balancea a través de su arco, golpea y rompe el espécimen y alcanza una elevación final menor h_f . Si se conoce la elevación final e inicial del péndulo, se puede calcular la diferencia en energía potencial. Esta diferencia es la energía de impacto absorbida por el material de estudio durante la falla [27].

4.2 MARCO CONCEPTUAL

Clúster: constituye la agrupación de pequeños átomos [2].

Diagrama de fase: representa en forma grafica los límites de temperatura y composición de las fases que están presentes en un sistema de aleación. La mayoría de los diagramas de fase han sido construidos según condiciones de equilibrio (condiciones de enfriamiento lento) [6].

Dislocaciones: son imperfecciones lineales en la red de un material cristalino. Generalmente se introducen en la red durante el proceso de solidificación o al deformarlo. El movimiento de las dislocaciones ayuda a explicar la manera en que se deforman los materiales, la interferencia con el movimiento de las dislocaciones ayuda a explicar cómo se endurecen los materiales [11].

Ductilidad: propiedad que tiene un material para deformarse plásticamente sin fracturarse, medido por el alargamiento o disminución de área en un ensayo de tracción [6].

Endurecimiento por precipitación: llamado también endurecimiento por envejecimiento. La precipitación es un proceso metalúrgico (una transformación de fase), en el que la aleación se encuentra inicialmente en un estado lejos de equilibrio y dado un tiempo de sostenimiento con una temperatura menor a la de solvus, la difusión de los átomos se produce progresivamente para transformar la estructura metalúrgica (microestructura) a un estado en equilibrio [28].

Equilibrio microestructural: mediante el endurecimiento por precipitación los átomos de soluto se agrupan para formar partículas muy pequeñas (finas) que actúan para bloquear el movimiento de las dislocaciones y hacer más resistente y duro el material [28].

Esfuerzo de ruptura: es el esfuerzo que se presenta una vez aparece la falla y se obtiene dividiendo la carga decreciente registrada en la pantalla de la máquina de ensayos universales y el área inicial de la probeta [11].

Esfuerzo de fluencia máximo: valor del esfuerzo mínimo para el cual el material comienza a deformarse plásticamente (separa el comportamiento elástico del comportamiento plástico del material) [11].

Fase: puede ser definida como una parte homogénea de un sistema que tiene características químicas y físicas similares [11].

Fatiga: es un proceso en el cual hay un cambio estructural gradual y localizado que ocurre en un material sujeto a tensiones y deformaciones variables en algún

punto y que produce grietas o la fractura tras un número suficiente de oscilaciones [6].

Metalografía: preparación de una muestra del material a estudiar mediante pulido y ataque químico, de forma que su estructura pueda ser examinada utilizando un microscopio [12].

Nucleación: es la aparición de una nueva fase estable [12].

Tenacidad: medida cualitativa de las propiedades de impacto de un material en el cual se analiza la energía total que absorbe un material antes de que se origine la ruptura. Un material que resista la ruptura por impacto se dice que es tenaz [10].

Tratamientos térmicos: son procesos en los cuales el material es calentado a una temperatura mayor a la del ambiente dependiendo de las características del material, con el objetivo de favorecer la difusión del soluto y promover la precipitación. Los tratamientos térmicos están conformados por tres etapas específicas: solubilizado, templado y envejecido (natural o artificial) [12].

Tratamiento térmico de solubilizado: en este tratamiento el material será calentado hasta una temperatura específica, y se mantendrá en estas condiciones durante un tiempo determinado para causar que uno o más componentes entren en solución sólida, y posteriormente se enfría lo suficientemente rápido para mantener esta solución sólida [12].

Segregación: son aquellas regiones que están formadas por varios tipos de partículas metálicas y pueden ayudar a que la aleación se refuerce o disminuyan sus propiedades mecánicas, todo esto dependiendo de las partículas que la componen [27].

Solución sólida: es una aleación sólida que está constituida por dos o más elementos con el fin de formar una estructura de una sola fase [27].

Zonas guinier preston (GP): las zonas GP en la aleación Al-Cu, consisten en regiones segregadas en forma de plaquetas; la formación de zonas de GP constituye la primera etapa de precipitación y es generalmente acompañado por un cambio en las propiedades de la solución sólida en el que se producen [28].

4.3 ESTADO DEL ARTE

Algunos investigadores han estudiado los fenómenos que se originan durante el proceso de endurecimiento por precipitación (tratamiento térmico de envejecido) de diversas aleaciones de aluminio; ya que este tratamiento térmico es de gran importancia para la modificación de las propiedades mecánicas (tenacidad, esfuerzo máximo, dureza, esfuerzos de fluencia y de rotura, porcentaje de elongación, etc.) y microestructurales (formación de precipitados θ y su distribución uniforme dentro de la matriz α).

Respecto al endurecimiento por precipitación de la aleación de aluminio 2024 se han desarrollado diversos estudios, entre los cuales se logra enfatizar:

4.3.1. Aleación de aluminio 2024: Las investigaciones desarrolladas por MONSALVE, A y MORALES, R. en el año 2003. “*Caracterización de la Respuesta a Fractura de las Aleaciones de Aluminio 2024 - 0 y 2024 - T3*” ECHAVARRÍA, Alejandro y ORREGO, Gustavo Adriano, en el año 2009 “*Metalurgia Básica de Algunas Aleaciones de Aluminio Extruidas o Laminadas*” se analizó las características metalúrgicas básicas de algunas aleaciones de aluminio extruidas y laminadas, entre estas aleaciones a analizar se halla la aleación de aluminio 2024. Estos investigadores resaltaron la influencia de los elementos que componen la aleación de aluminio. La aleación 2024 por ser de la serie 2XXX utiliza el cobre como principal elemento aleante según se puede observar en la Tabla 2. Este elemento favorece de manera notable la resistencia a la tracción y la dureza, pero tras ser tratadas térmicamente presentan una reducción en la resistencia a la corrosión. Las aleaciones de la serie 2XXX están siendo constantemente utilizadas en la industria aeroespacial, para la fabricación del fuselaje de las aeronaves debido a su elevada tenacidad y también a la elevada resistencia a la fatiga[1];[22].

Tabla 2. Composición química de la aleación 2024 [1].

Aluminio	Contenido en %						
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
AA 2024	0.5 max	0.5 max	3.8 - 4.0	0.3 - 0.9	0.9 - 1.2	0.10 max	0.25 max

Fuente. Metalurgia Básica de Algunas Aleaciones de Aluminio Extruidas o Laminadas [1].

4.3.2. Tratamiento térmico de solubilizado: En la investigación realizada por NAIDU GURUGUGELLI, Swami. (2012). "*The Effect of Ageing on Impact Toughness and Microstructure of 2024 Al-Cu-Mg Alloy*" se implemento un tratamiento térmico de solubilizado previamente al proceso de endurecimiento por precipitación, con el fin de obtener una solución solida de la matriz del material a analizar, este tratamiento se llevó a cavó durante 2 horas y con una temperatura de 450 °C y enfriamiento en agua. En esta investigaciones se determinó la temperatura de solubilizado, mediante la implementación del diagrama de fase Al-Cu, además se logró obtener una solución solida sobresaturada. Si la temperatura de solución es muy baja, la solución será incompleta y las propiedades mecánicas resultarán pobres, y si por el contrario se excede la temperatura de solución ocurrirá fusión en los límites de grano y el material perderá sus propiedades mecánicas y él se vuelve no recuperable [25].

Al comparar este estudio con el de GÜR, C y YILDIZ, I. "*Determining the Impact Toughness of Age-Hardened 2024 Al-Alloy by Nondestructive Measurements*" se observa que el tratamiento térmico de solubilizado que se aplicó en esta investigación es de 1 hora, con una temperatura de 493 ° C y enfriamiento en agua [16]. Al igual que la investigación de NAIDU GURUGUGELLI, Swami. La temperatura de solubilizado se obtuvo mediante la implementación del diagrama de fase Al-Cu, además se logró obtener una solución solida sobresaturada.

4.3.3. Endurecimiento por precipitación: El endurecimiento por precipitación es uno de los métodos más comunes que se encuentra en la industria para incrementar la resistencia mecánica de las aleaciones de aluminio.

La investigación de NAIDU GURUGUGELLI, Swami. (2012). "*The Effect of Ageing on Impact Toughness and Microstructure of 2024 Al-Cu-Mg Alloy*" en la cual se analizá el efecto del endurecimiento por precipitación en las propiedades mecánicas (tenacidad y dureza) y la microestructura en la aleación de aluminio 2024, con una temperatura de precipitación de 200 °C y tiempos de sostenimiento entre 1 y 18 horas. En esta investigación se obtuvo que la dureza empieza a aumentar en las primeras horas de sostenimiento hasta obtener su máximo de 162 HV a las 10 horas y a partir de este tiempo comienza a disminuir gradualmente debido a la aparición de precipitación de fases intermedias de mayor tamaño. Además observaron que la tenacidad depende en un gran porcentaje a las variables microestructurales y son afectadas por factores como resistencia a la fluencia, ductilidad y la temperatura, en la investigación se observó que la máxima tenacidad se obtuvo dentro de las primeras 5 horas con un valor de 51.5 J y comienza a descender con tiempos de sostenimiento más extensos, además se identifica que la muestra con mayor dureza tiene la tenacidad más baja [25].

En la investigación de TAN, Evren y OGEL, Bilgehan. En el año 2007. “*Influence of heat treatment on the mechanical properties of AA 6066 alloy*” se analizó un estudio en el que se pretendió producir un grano fino de alta resistencia, para la serie 6XXX en la cual se llevaron a cabo ensayos con tiempos de sostenimiento de 95 minutos a cuatro diferentes temperaturas (515, 530, 540 y 550 °C) el tiempo se calculó de acuerdo a las dimensiones de la muestra sugeridas por A.A (*Aluminum Association*). Se destaca que a una temperatura de 530 C° con un tiempo de sostenimiento de 93 minutos, hubo una tendencia a la mejora de las propiedades de dureza y resistencia, esto se puede comprobar ya que el tamaño de grano se hizo más pequeño y se distribuyó uniformemente dentro de la matriz [4].

L.A, Dobrzański; T, Tański Y J, Madejski. En el año 2009. “*The Influence of the Heat Treatment on the Microstructure and Properties of Mg-Al-Zn Based Alloys*”. En esta investigación se estudio la aleación Mg-Al-Zn, a la cual se le realizó un solubilizado a 550 °C por 1 hora y posteriormente un endurecimiento a 350 °C con tiempos de sostenimiento de 1, 3 y 5 horas. En este estudio se detecto que los tamaños de grano para los tiempos de envejecimiento fueron creciendo. Para la condición de 1 hora se afinó y continuó creciendo el grano, el tiempo de envejecimiento, en donde se aprecia el mayor tamaño del grano fue para la condición de 5 horas. L.A, Dobrzański; T, Tański Y J, Madejski concluyeron que el tratamiento térmico de envejecimiento influye de manera significativa sobre las propiedades mecánicas de resistencia (esfuerzos de fluencia, esfuerzos máximos y esfuerzos de ruptura) [19].

CHENNAKESAVA, Reddy y KOTIVEERACHARI, B. en su investigación en el año 2010. “*Effect ff Aging Condition on Structure and the Properties of Al-Alloy / Sic Composite*”, se realizó un estudio en el cual se ejecuta un tratamiento termico de solubilizado a la aleación de aluminio a 480 °C y con un tiempo de sostenimiento de 4 horas. Posteriormente efectuó un endurecimiento por precipitación a 100 °C y con tiempos de sostenimiento de 1 hora y 24 horas CHENNAKESAVA, Reddy y KOTIVEERACHARI, B. visualizaron regiones interfaciales que pueden desempeñar un papel dominante en la dureza de las particulas reforzadas por una matriz metálica [15].

En la investigación desarrollada en el año 2002 por GÜR, C y YILDIZ, I. se analizó el efecto del endurecimiento por precipitación sobre la tenacidad del impacto de la aleación de aluminio 2024, con una temperatura de envejecimiento de 190 °C y tiempos de sostenimiento entre 1 y 18 horas y se observó que para tiempos de sostenimiento entre 2 y 14 horas se obtuvieron durezas hasta los 160 HV. Además se pudo observar que la muestra con mayor dureza tiene la tenacidad al impacto más baja y dentro de las primeras cinco horas de sostenimiento se lograron las de mayor energía de impacto entre los 50 J. En este estudio se llegó a la conclusión de que el aumento de la dureza y la resistencia a la fluencia hacen que la aleación sea más frágil y disminuya su tenacidad [16].

En la investigación realizada por A, Hossain y W, Kurny. En el año 2013. “*Effect of Ageing Temperature on the Mechanical Properties of Al-6Si-0.5Mg Cast Alloys With Cu Additions Treated By T6 Heat Treatment*”, analizó la influencia del tratamiento térmico de envejecido en las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio Al-6 Si-0.5 Mg con un 4 % de peso en Cu. Se le aplicó un endurecimiento por precipitación a 300 °C, con un tiempo de sostenimiento de 1 hora, las etapas que se originaron en este proceso de precipitación fueron controladas mediante la medición de la dureza. En esta investigación se observó que durante el endurecimiento por precipitación, la resistencia a la tracción va aumentando a medida que la temperatura crece. La ductilidad y tenacidad de la aleación estudiada disminuyeron con la temperatura de precipitación al alcanzar la máxima dureza [18].

4.3.4. Ensayos mecánicos: LIPSKI, Adam y MROZIŃSKI, Stanisław. En el año 2011. Se realizó una investigación titulada “*The Effects of Temperature on the Strength Properties of Aluminium Alloy 2024-T3*”. En esta investigación se tuvo como objetivo principal determinar los efectos de la temperatura sobre el esfuerzo de deformación de la aleación de aluminio 2024 T3. Se realizaron pruebas con ocho diferentes temperaturas de precipitación que van desde 25 hasta los 200 °C y con un tiempo de sostenimiento de 10 minutos, además se emplearon dos clases de probetas de tensión; se emplearon probetas con una orientación paralela a la dirección de laminación y perpendiculares a la dirección de laminación. Dando como resultados que la orientación de los granos que están en paralelo tienen un mayor coeficiente de alargamiento respecto a la orientación perpendicular. A bajas temperaturas se alcanzó a percibir en el diagrama esfuerzo deformación unas fluctuaciones. En el caso de las muestras con una orientación paralela a la dirección del laminado estas fluctuaciones se van desvaneciendo a medida que aumenta la temperatura y son prácticamente imperceptibles a temperaturas superiores de 200 °C, mientras que para las muestras de corte perpendicular a la dirección de laminación, a medida que se aumenta la temperatura las fluctuaciones se vuelven menos intensas pero su valor aumenta [3].

4.3.5. Ensayo microestructural: En la investigación realizada por FORN, A; BAILE, M y RUPÉREZ, E . en el año 2002. “*Optimización del Tratamiento Térmico de Envejecimiento en Materiales Compuestos Base Aluminio*”, se realizó un endurecimiento por precipitación a una aleación de aluminio 6061. A esta aleación se le efectuó un tratamiento de solubilizado a 560 °C con un tiempo de sostenimiento de 2 horas y con una atmósfera inerte de nitrógeno, seguido de un endurecimiento por precipitación artificial a 175 °C y con tiempos de sostenimiento entre 1 y 48 horas (tratamiento T6). Para la preparación metalográfica de las muestras a analizar, se efectuó un pulido y en la etapa final se

complemento con un ataque químico a la superficie. Las características microestructurales se analizaron mediante un microscopio óptico y un microscopio electrónico de barrido. FORN, A; BAILE, M y RUPÉREZ observaron cuatro procesos de precipitación en el proceso de endurecimiento. El primero aparece a 150 °C y representa la formación de clusters de silicio. El segundo se detecta a 267 °C para la aleación 6061 y corresponde a la formación de las zonas GP-I y GP-II (θ''). El tercer se identifica con la aparición de los precipitados θ' y tiene lugar a 302 °C. En último lugar aparece un cuarto pico exotérmico a 453 °C, correspondiente a la formación de los precipitados de equilibrio θ -Mg₂Si [2].

RADUTOIU, Nicoleta. En el año 2012. “*Effect of the Over-ageing Treatment on the Mechanical Properties of A A 2024 Aluminum Alloy*” analizó de forma detallada la evolución de la dureza de una aleación de aluminio 2024 después de practicarle un endurecimiento por precipitación. En esta investigación se realizó un tratamiento de solubilizado a 495 °C con un tiempo de sostenimiento de 1 hora, y se enfrió en agua y posteriormente un endurecimiento por precipitación a 150, 175 y 190 °C y con tiempos de sostenimiento de 36 días, 50 horas y 24 horas respectivamente. RADUTOIU, Nicoleta afirmó que la etapa fundamental del proceso de endurecimiento por envejecimiento consiste en la aceleración del fenómeno de descomposición de la solución sólida sobresaturada, dando como resultado la precipitación de partículas gruesas intermetálicas, etapa en la que las propiedades mecánicas alcanza los valores máximos, pero al costo de una baja resistencia a la corrosión, además pudo afirmar con esta investigación que la dureza aumenta hasta un valor máximo “tamaño óptimo y distribución de precipitados por endurecimiento”, y luego disminuye gradualmente “sobreenvejecimiento”) [26]. Y al igual que FORN, A; BAILE, M y RUPÉREZ, E. se observan procesos de precipitación en el proceso de endurecimiento.

MAZOUZ, Hamoudi; BENSAAIDA, Said y MOHAMED TEWFIK, Bouziane. En el año 2012. “*Influence of Thermomechaniques Treatments on the Proprieties of Al-5.8% Zn - 2.7% Mg Alloy*”, mediante la implementación de análisis térmicos y calorimetría confirmó al igual que FORN, A; BAILE, M y RUPÉREZ, E. que la aleación Al-5.8% Zn-2.7% Mg presentan al menos tres procesos de precipitación en el proceso de endurecimiento [21].

MONTEIRO, A Waldemar, et. En el año 2011. “*Microstructural and Mechanical Characterization after Thermomechanical Treatments in 6063 Aluminum Alloy*” Concluyeron que el cambio de la dureza y conductividad eléctrica para la aleación de aluminio se atribuye a las diferentes etapas de precipitación que se forman durante el endurecimiento. En general la primera etapa es la formación de las zonas Guinier-Preston (GP) que inician en grupos de solutos y tras un envejecimiento progresivo las zonas Guinier-Preston (GP) aumentan de tamaño y se transforman en un precipitado en equilibrio. La secuencia de la solución sólida sobresaturada se puede representar como: SSS → Guinier-Preston (GP) → β'' → β' (zona de transición) → β (precipitados en equilibrio) [23].

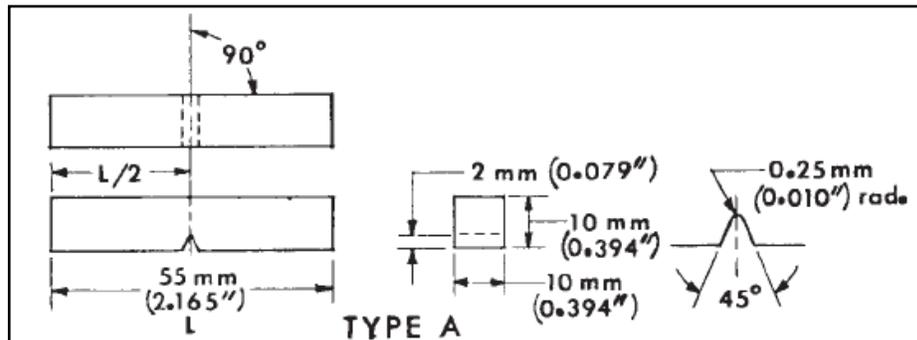
4.4 MARCO LEGAL Y NORMATIVO

Debido a que en este proyecto se va a determinar el impacto del tratamiento térmico de envejecido en las propiedades mecánicas de dureza, tenacidad y tensión y cambio microestructural de la aleación de aluminio 2024 T4, se realizarán los ensayos de tensión, impacto, microdureza y examen metalográfico, según los criterios de las normas ASTM.

En las normas ASTM se encuentran los pasos a seguir para la elaboración de los ensayos, calibración del equipo e interpretación de resultados.

4.4.1 ASTM E-23 (Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials). La norma ASTM E-23 describe las pruebas de impacto Charpy e Izod. Para este proyecto se tendrá en cuenta las pruebas de impacto Charpy con probetas tipo A, las dimensiones de esta probeta se describen en la Figura 5. En este ensayo se requiere que la muestra de metal entallada esté soportada por ambos extremos y se fractura por el impacto del martillo en la parte contraria de la entalla. La energía absorbida por la muestra se determina midiendo la diferencia de altura del brazo del péndulo y finalmente multiplicado por el peso del péndulo [8].

Figura 5. Medidas típicas para la elaboración de probetas de impacto [8].



Fuente: ASTM E-23 (Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials)

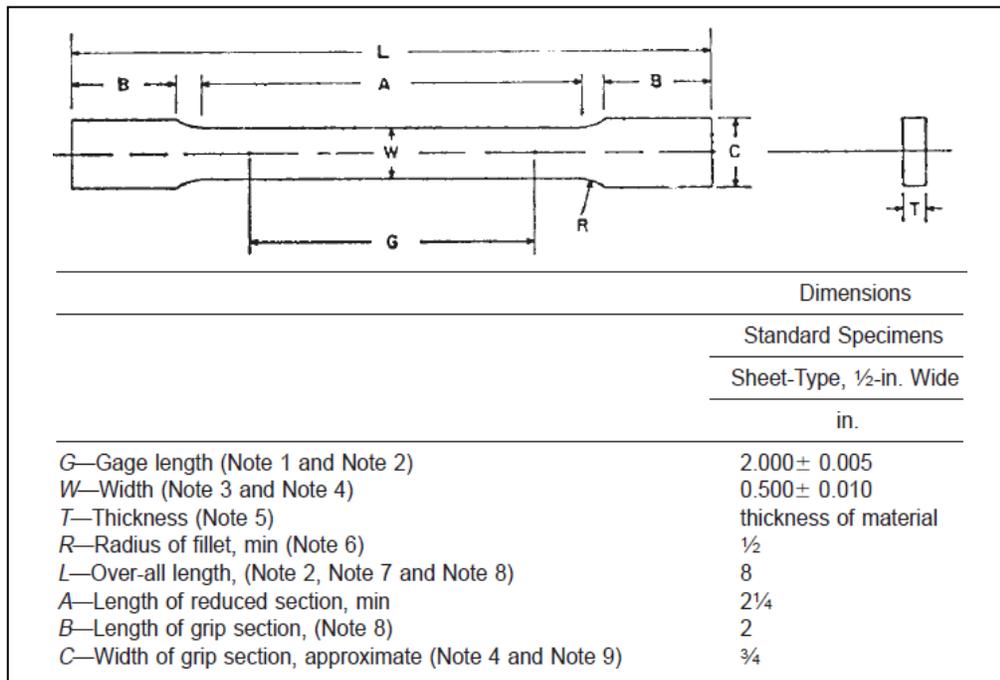
4.4.2 ASTM E-384 (Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials). La prueba de dureza Vickers (HV) es un ensayo de microdureza de indentación, el cual presenta un indentador de diamante en forma de pirámide con un ángulo base de 136°, y puede ser útil en el control de calidad y la selección de materiales, para que la prueba sea válida hay que tener en cuenta que el ángulo

entre el penetrador y la superficie de la muestra este dentro de 2° , ya que mayores cantidades de inclinación producen hendiduras no uniformes por lo cual el resultado sería no valido [7].

4.4.3 ASTM E-08 (Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials). La norma E-08 trata sobre la elaboración del ensayo de tensión de materiales metálicos en cualquier forma a temperatura ambiente, además establece unas pautas para la determinación de la resistencia de fluencia, límite de elasticidad, resistencia a la tracción, elongación y esfuerzo máximo [9].

Debido a que este método de ensayo proporciona información sobre el esfuerzo máximo y ductilidad del material a estudiar bajo el esfuerzo de tracción uniaxial, se va a aplicar la prueba de tensión a las muestras de aluminio 2024 T4 tratadas térmicamente y en estado de entrega del presente proyecto, para lo cual se van a elaborar probetas de tensión basándose en las medidas observadas en la Figura 6.

Figura 6. Medidas típicas para la elaboración de probetas de tensión [9].



Fuente: ASTM E-08 (Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials)

4.4.4 ASTM E-03 (Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens). Esta norma trata de la preparación de muestras para el examen metalográfico, este examen tiene como objetivo revelar la estructura de los metales y aleaciones por medio del microscopio óptico. Debido a que la microestructura generada en el tratamiento térmico de envejecido tiene una fuerte influencia sobre las propiedades de la aleación de estudio se requiere el uso del examen metalográfico para observar el comportamiento de los precipitados a medida que avanza el tiempo de sostenimiento [5].

4.4.5 ASTM E-407 (Standard Practice for Microetching Metals and Alloys). Esta norma da a conocer los reactivos a emplear para revelar las fases y micro constituyentes de metales y aleaciones para poder efectuar el examen de microscopia. Para las aleaciones de aluminio de la serie 2XXX se recomienda utilizar el reactivo N°3 (keller's) el cual está compuesto por:

- 2 mL HF (Ácido Fluorhídrico)
- 3 mL HCl (Ácido Clorhídrico)
- 5 mL HNO₃ (Ácido Nítrico)
- 190 mL de agua

Para efectuar el ataque químico a la muestra, esta debe ser sumergida entre 10 y 20 segundos y posteriormente se le efectúa un lavado con agua tibia [6].

5. DISEÑO METODOLÓGICO

Con el diseño metodológico se pretende establecer los elementos necesarios y describir las actividades secuenciales, que se llevaron a cabo para realizar el proyecto, en el cual se analiza la influencia del tratamiento térmico de envejecido de la aleación de aluminio 2024 T4, con una temperatura de 180 °C, y con tiempos de sostenimiento de 2, 4, 8, 12, 24, 36, 48, 72 y 96 Horas.

5.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación que se desarrolla es de tipo cuantitativa (se van a examinar los datos obtenidos en el laboratorio de manera numérica en los que se toman medidas de tenacidad, esfuerzo máximo y microdureza).

Es un proyecto de clasificación experimental, ya que se evalúa el efecto que tiene la temperatura de 180 °C del tratamiento térmico de envejecido a diversos tiempos de sostenimiento, sobre las propiedades mecánicas de dureza, tenacidad y esfuerzo máximo de la aleación de aluminio 2024 T4.

5.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para la elaboración del diseño experimental del presente proyecto se determina que las variables independientes son la temperatura de envejecido y el tiempo de sostenimiento y las variables dependientes son la dureza, tenacidad y el esfuerzo máximo. Para determinar el tamaño de la muestra se va a implementar un arreglo factorial 2_k y posteriormente se analizan las curvas de operación característica y de esta forma hallar el error del sistema y el número mínimo de repeticiones que se deben implementar en cada ensayo.

En la Tabla 3 se puede identificar los valores obtenidos en la investigación de GÜR, C y YILDIZ, I. (2002) los cuales se emplean para realizar el diseño experimental mediante la implementación de las siguientes formulas:

$$\tau = \mu - \bar{U}$$

$$\bar{U} = \frac{1}{a} * \sum_{i=1}^9 \mu$$

$$\varphi^2 = \frac{n * \sum_{i=1}^9 \tau^2}{a * \sigma^2}$$

Donde:

φ^2 = cantidad relacionada con el parámetro de no centralidad

n = numero de repeticiones

a = grados de libertad del factor uno

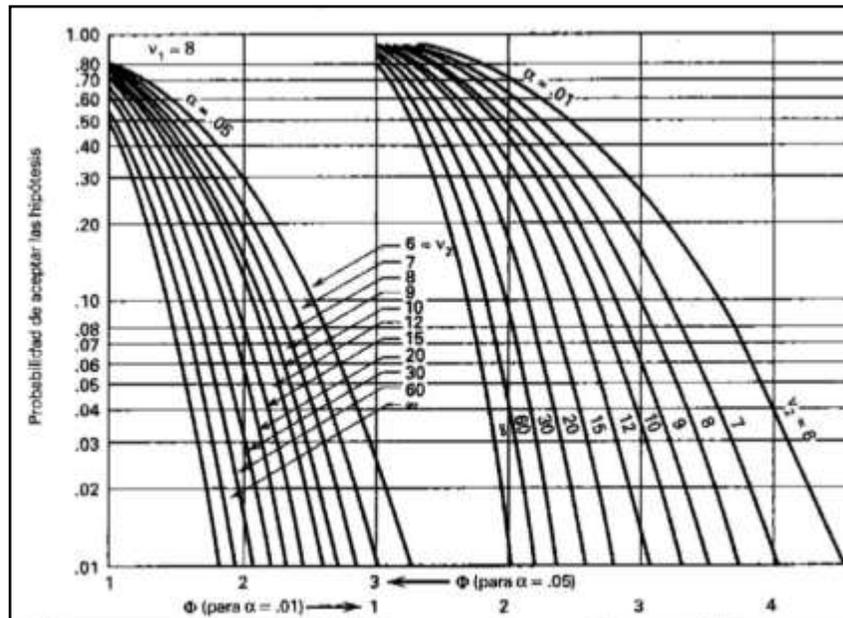
σ = desviación estandar
 β = error del sistema

Tabla 3. Datos de tiempo de sostenimiento v_s energía de impacto obtenida

Tiempo (hr)	μ Impacto (J)	τ
2	37	6,389
4	47	16,389
6	48,5	17,889
8	42	11,389
10	30	-0,611
12	16	-14,611
14	17,5	-13,111
16	18	-12,611
18	19,5	-11,111

Fuente: GÜR, C y YILDIZ, I. (2002). Determining the Impact Toughness of Age-Hardened 2024 Al-Alloy by Nondestructive Measurements [16].

Figura 7. Curva de operación característica [24].



Fuente: MONT GOMERY, Douglas. (2004). Diseño y análisis de experimentos. Mexico

Tabla 4. Datos del diseño experimental

		$\Sigma \mu$	275,5		
		\bar{U}	30,611		
		σ	13,357		
		τ^2	1427,389		
n	φ^2	φ	$a(n - 1)$	β	$1 - \beta$
3	2,67	1,63	18	0,5	0,5
4	3,56	1,89	27	0,2	0,8
5	4,44	2,11	36	0,05	0,95

Fuente: Autor del Proyecto

Mediante el uso de las curvas características de la Figura 7 se identifica el error del sistema y posteriormente la confiabilidad aceptable para las muestras, en la Tabla 4 se puede observar que las confiabilidades están entre el 50, 80 y 95 %, para 3, 4 y 5 repeticiones respectivamente.

Se determina que para este proyecto las 4 (cuatro) repeticiones serán satisfactorias para la obtención de los resultados, dando un total de 72 probetas entre ensayo de impacto y tensión.

5.3 METODOLOGÍA

Para la elaboración del presente proyecto se emplea el siguiente desarrollo metodológico:

- **Revisión bibliográfica.** Mediante la consulta y recopilación de datos de diversas fuentes tales como libros, base de datos reconocidas de antecedente, teorías, conceptos y normas necesarios para el desarrollo del presente proyecto.
- **Determinación del material a trabajar.** Se determina que el material para el desarrollo del presente proyecto será la aleación de aluminio 2024 T4, ya que esta aleación es ampliamente utilizada en la industria aeronáutica en la fabricación de parte del fuselaje de la aeronave.

- **Diseño experimental.** Se realiza el diseño experimental para definir el número mínimo de repeticiones que se van a generar por ensayo. Este análisis se observa en la sección 5.2 del presente trabajo.
- **Adquisición del material de estudio.** una vez definido el material y establecida la cantidad a emplear en el estudio, se procede a efectuar la compra de barra de perfil cuadrado de 1/2" y platina de 1" x 1/4" de la aleación de aluminio 2024 T4, la cual fue adquirida a la empresa DESVARE AÉREO S.A. es de resaltar que el proveedor entrega el material certificado en el cual se demuestra la composición química de la aleación. La factura de la aleación y el certificado se encuentran en el Anexo E y el Anexo F, respectivamente.
- **Análisis de la composición química de la aleación de aluminio 2024 T4.** En la Tabla 5 se puede observar que la composición química de la aleación de aluminio 2024 T4, adquirida en la empresa DESVARE AÉREO S.A. corresponde a la que aparece en el certificado que entrega el proveedor, además es de resaltar que la desviación obtenida de estos datos es del 4.8 % lo cual da una precisión de los datos del 95.11 %.

De la Tabla 5 se puede identificar que el aluminio es el material solvente de la aleación, ya que este es el elemento que se presenta en una composición mayor y el soluto va a ser el cobre, magnesio y los otros elementos que presentan una composición menor.

Tabla 5. Comparación de la composición química de la aleación de aluminio 2024 T4.

Elemento aleante	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	otros	Al
Composición química según el certificado	0,189	0,126	4,09	0,449	1,43	0,012	0,094	0,026	0,0394	---
Análisis de la composición química	0,178	0,143	3,939	0,475	1,255	0,013	0,094	0,026	0,027	93,02
Media X	0,1835	0,1345	4,0145	0,462	1,3425	0,0125	0,094	0,026	0,0332	--
Desviación estándar	0,0055	0,0085	0,0755	0,013	0,0875	0,0005	0	0	0,0062	--
Variación en %	3%	6%	2%	3%	7%	4%	0%	0%	19%	---

Fuente: Autor del Proyecto

- **Elaboración de las probetas:**

Elaboración de las probetas de impacto según la norma ASTM E – 023.

Se fabrican 44 probetas de impacto, en la Figura 5 se puede apreciar las dimensiones de las probetas, ver Figura 8.

Figura 8. Probetas de impacto ya mecanizadas según la norma ASTM E – 023.



Fuente: Autor del Proyecto

Elaboración de las probetas de tensión según la norma ASTM E – 08.

Se fabrican 30 probetas de tensión, en la Figura 6 se puede apreciar las dimensiones con las que se debe conformar las probetas, ver Figura 9.

Figura 9. Probetas de tensión ya mecanizadas, según la norma ASTM E-08

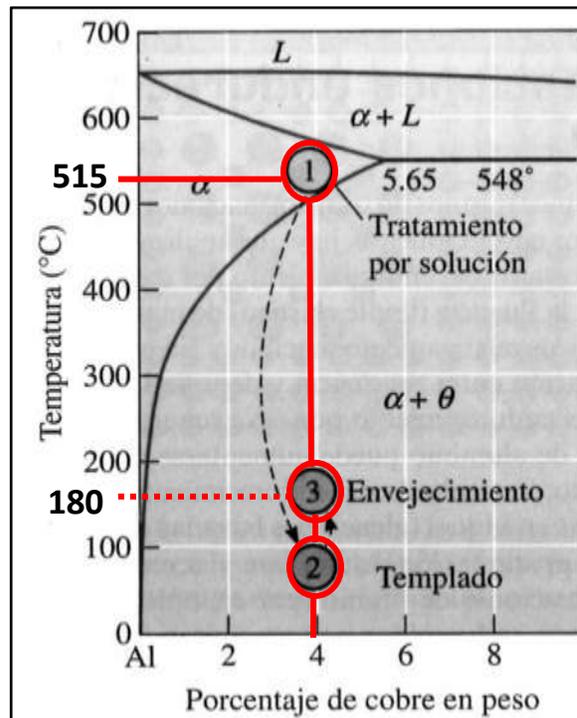


Fuente: Autor del Proyecto

- **Identificación de las muestras.** Una vez finalizada la etapa de fabricación de las probetas, se debe proceder a marcarlas de acuerdo al tiempo de sostenimiento que se les vaya a dar en el tratamiento térmico de envejecido.

- **Tratamiento por solución.** En este paso las probetas de tensión e impacto se introducen en un horno a una temperatura intermedia entre la temperatura de Solvus y la de Solidus, y se mantiene así durante 1 hora. La temperatura intermedia se va a hallar mediante la implementación del diagrama de fase Al-Cu de la Figura 10. Para este estudio la temperatura intermedia que se eligió es de 515 °C, ya que la aleación de estudio tiene un porcentaje de peso del Cu del 3.94 % [28].

Figura 10. Diagrama de fase Al-Cu



Fuente: ASKELAND, Donald R.; FULAY, Pradeep P. y WRIGHT, Wendelin. Ciencia e Ingeniería de Materiales. México, D.F., CENGAGE Learning, 2011, 6 ed, pág. 460.

- **Templado.** Después del tratamiento por solución, las muestras deben ser enfriadas rápidamente en agua a temperatura ambiente.
- **Tratamiento térmico de envejecido (endurecimiento por precipitación).** Una vez que se han agrupado las muestras se procede a realizar el envejecimiento. En esta etapa se ingresan las probetas al horno a una temperatura de 180 °C y con tiempos de sostenimiento de 2, 4, 8, 12, 24, 36, 48, 72 y 96 Horas. En este paso se debe monitorear la temperatura del horno como se observa en la Figura 11. Una vez cumplido un tiempo de

sostenimiento las muestras son retiradas y dejadas enfriar a temperatura ambiente.

Figura 11. Tratamiento térmico de envejecido a 180 °C de las muestras de estudio.



Fuente: Autor del Proyecto

Realizar los ensayos mecánicos de impacto, tensión y microdureza. Una vez finalizado el tratamiento térmico de envejecido, se procede a desarrollar los ensayos mecánicos, con el fin de evaluar el comportamiento de estas propiedades después de que el material de estudio haya sido envejecido a diversos tiempos de sostenimiento. Para efectuar estos ensayos se implementan las normas ASTM.

Los ensayos que se deben realizar son:

- **Ensayo de impacto Charpy:** Se le efectúan las pruebas de tenacidad a las probetas del aluminio 2024 T4 en estado de entrega y a las que fueron tratadas térmicamente mediante el envejecido a 180 °C; este ensayo de tenacidad se implemento en el laboratorio de ensayos y materiales de la Universidad Libre, con el equipo de impacto Satec Systems, ing que se aprecia en la Figura 12.

Figura 12. Equipo de impacto Satec Systems, ing



Fuente: Autor del proyecto, con permiso de la Universidad Libre, Laboratorio de Análisis de Materiales.

- **Ensayo de tensión:** Se realizan las pruebas de tensión a las probetas del aluminio 2024 T4 en estado de entrega y a las que fueron tratadas térmicamente mediante el envejecido a 180 °C; este ensayo se realizo en el laboratorio de ensayos y materiales de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, con la maquina universal de ensayos Shimadzu como la que se muestra en la Figura 13; de este ensayo se obtuvieron las graficas de esfuerzo deformación y los valores de limite de elasticidad, esfuerzo máximo y porcentaje de elongación.

Figura 13. Maquina universal de ensayos Shimadzu.



Fuente: Autor del proyecto, con permiso de la Universidad Libre, Laboratorio de Análisis de Materiales.

- **Alistamiento de probetas para el pulido:** en este paso se procede a cortar tramos de aproximadamente 1.5 cm del material de estudio, con el fin de realizar un montaje en resina como se observa en la Figura 14 para obtener una mejor manipulación de las muestras a pulir.

Figura 14. Montaje en resina de las muestras a pulir



Fuente: Autor del Proyecto

- **Pulido hasta brillo espejo:** Una vez obtenida la pieza en resina, se procede a realizar la preparación mecánica de la muestra utilizando papel lija de diferentes dimensiones de grano (320, 400, 600, 1000, 1200, 2000 y

2500), finalizado este proceso se pasa a implementar un pulido mecánico en paño y con la suspensión SPM de 0,03 micras para obtener una superficie brillo espejo.

Figura 15. Pulido mecánico en paño y con suspensión SPM de 0,03 micras



Fuente: Autor del Proyecto

- **Ensayo metalografico:** Una vez obtenido el brillo espejo de las muestras a analizar, se procede a realizar el ataque químico con el reactivo de Keller (2 mL HF, 3 mL HCl, 5 mL HNO₃ y 100 mL H₂O), durante un periodo de tiempo entre los 10 y 20 segundos, según la Norma ASTM, una vez atacadas las muestras se procede la toma de las imágenes metalográficas en el microscopio óptico de la Universidad Libre. Para este ensayo se tomaron imágenes con aumentos de 200X, 500X y 1000X, las cuales se pueden apreciar en Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12 respectivamente.

Figura 16. Ataque químico.



Fuente: Autor del Proyecto

Figura 17. Análisis metalografico



Fuente: Autor del Proyecto, con permiso de la Universidad Libre, Laboratorio de Análisis de Materiales.

- **Realización del ensayo de dureza Vickers:** El ensayo de microdureza se efectuó en el laboratorio de ensayos y materiales de la Universidad Libre, con el equipo de microdureza Shimadzu. Este ensayo se trabaja con una carga de 300 gramos, durante 30 segundos y el desplazamiento de los puntos donde se tomo la microdureza es de 3 veces la distancia del indentador.

Figura 18.Microdurometro



Fuente: Autor del Proyecto, con permiso de la Universidad Libre, Laboratorio de Análisis de Materiales.

6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

6.1 TENACIDAD

El ensayo de tenacidad se efectuó en el laboratorio de ensayos y materiales de la Universidad Libre, con el equipo de impacto Satec Systems, ing. Para esta prueba se llevan a cabo 4 repeticiones, a las muestras en estado de entrega y a cada una de las muestras tratadas térmicamente mediante el envejecido a 180 °C de la aleación de aluminio 2024 T4. En el anexo A, se muestran los resultados obtenidos del ensayo de impacto Charpy de cada una de las muestras estudiadas.

En la Tabla 6 se observa el resumen de los datos obtenidos del ensayo de impacto Charpy que se exponen en las tablas del Anexo A, y se identifica que el coeficiente de variación de los datos obtenidos del ensayo, se encuentran entre el 1,042 % y el 4,314 %, lo cual da una precisión de los datos obtenidos entre el 98,958 % y 95,686 % respectivamente.

Tabla 6. Variación de la tenacidad en función del tiempo de envejecimiento a 180° C de la aleación de aluminio 2024 T4.

Población	Tiempo de Sostenimiento (h)	Tenacidad (J)	Desviación Estándar (J)	Variación %	Aumento %
Estado De Entrega		28,393	0,634	2,235%	
Tratamiento Térmico de Envejecido a 180 °C	2	36,448	1,274	3,497%	28,370%
	4	34,683	0,891	2,570%	22,154%
	8	34,065	1,313	3,854%	19,979%
	12	32,265	0,667	2,068%	13,639%
	24	32,950	0,541	1,642%	16,052%
	36	31,355	1,353	4,314%	10,434%
	48	32,043	0,789	2,461%	12,856%
	72	33,695	0,351	1,042%	18,676%
	96	33,715	0,408	1,211%	18,746%

Fuente: Autor del Proyecto

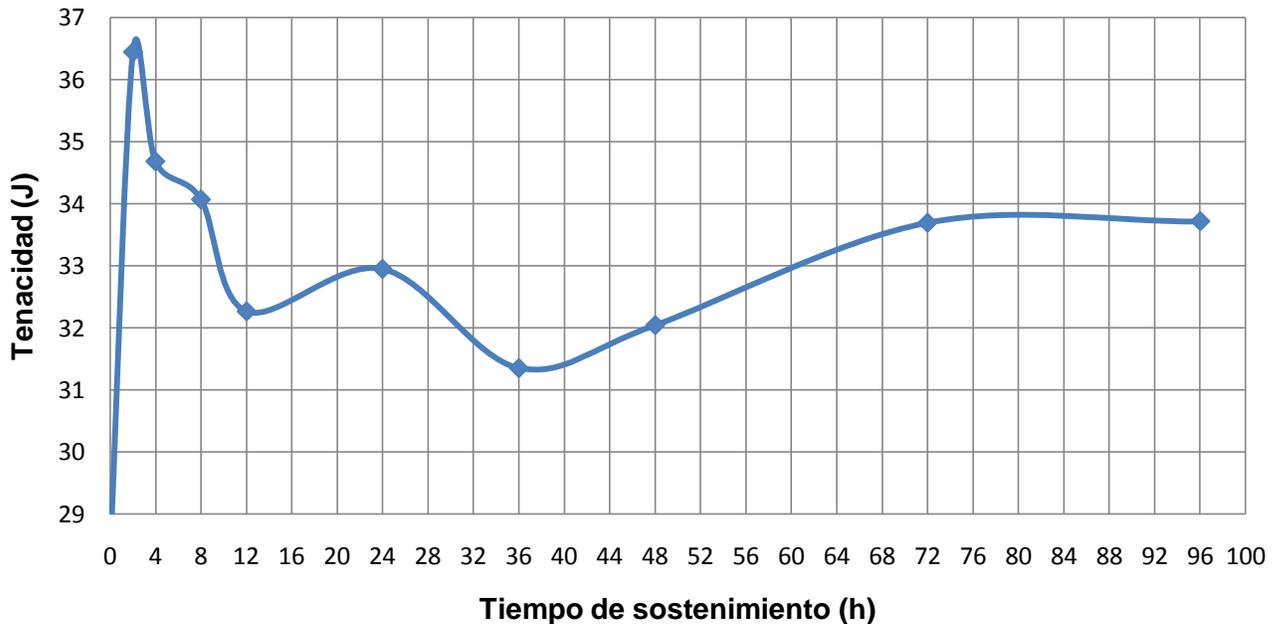
En la Gráfica 1 se evidencia que la tenacidad de la aleación de aluminio 2024 T4 en estado de entrega es de 28,393 J y una vez es efectuado el tratamiento térmico de envejecimiento la tenacidad aumenta un 28,37 % hasta su valor máximo obtenido de 36,448 J a las 2 horas de sostenimiento.

Una vez obtenido el valor máximo de tenacidad a las 2 horas de sostenimiento esta propiedad mecánica comienza a disminuir progresivamente hasta un 13,973 % el cual se encuentra a las 36 horas de sostenimiento y con un valor de 31,355 J, esta disminución drástica de la tenacidad se debe, a la precipitación de fases intermedias, como se puede observar en la metalografía (b) de la Tabla 12 a las 4 h ya que se comienza a visualizar precipitados pequeños y subdesarrollados.

Como se puede observar en la Gráfica 1, la tenacidad de la aleación de aluminio comienza a aumentar nuevamente después de las 36 horas de envejecido, hasta alcanzar una tenacidad de 33,715 J la cual corresponde a un aumento del 18,746 % frente al material en estado de entrega.

En los datos obtenidos en el ensayo de impacto Charpy, se puede evidenciar que la tenacidad de la aleación de aluminio 2024 T4 tiene un aumento significativo entre el 10,434 % y el 28,37 % después de haber sido tratada térmicamente con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C.

Gráfica 1. Variación de la tenacidad en función del tiempo de envejecimiento a 180° C de la aleación de aluminio 2024 T4.



Fuente: Autor del Proyecto

6.2 MICRODUREZA

El ensayo de microdureza se efectuó en el laboratorio de ensayos y materiales de la Universidad Libre, con el equipo de microdureza Shimadzu. Para garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos para este ensayo se realiza 10 tomas de microdureza a la muestra en estado de entrega y a cada una de las muestras tratadas térmicamente mediante el envejecido a 180 °C de la aleación de aluminio 2024 T4. Para efectuar este ensayo se utiliza una carga de 300 gramos, durante 30 segundos y el desplazamiento de los puntos donde se tomo la microdureza fue de 3 veces la distancia del indentador.

En el Anexo B se muestran los resultados obtenidos del ensayo de dureza Vickers, de cada una de las muestras estudiadas.

En la Tabla 7 se observa el resumen de los datos obtenidos del ensayo de microdureza que se exponen en las tablas del Anexo B y se puede identificar que el coeficiente de variación de los datos obtenidos del ensayo, se encuentran entre el 1,768 % y el 4,457 %, lo cual da una precisión de los datos obtenidos entre el 98,232 % y 95,543 % respectivamente.

Tabla 7. Variación de la dureza en función del tiempo de envejecimiento a 180° C de la aleación de aluminio 2024 T4.

Población	Tiempo de Sostenimiento (h)	Microdureza (HV)	Desviación estándar (HV)	variación %	Aumento %
Estado De Entrega		121,694	2,920	2,400%	
Tratamiento Térmico de Envejecido a 180 °C	2	123,324	5,127	4,157%	1,340%
	4	124,204	4,443	3,577%	2,063%
	8	130,629	5,822	4,457%	7,343%
	12	135,347	5,882	4,346%	11,219%
	24	147,293	4,831	3,280%	21,036%
	36	147,970	3,854	2,605%	21,592%
	48	136,261	5,317	3,902%	11,970%
	72	131,575	2,327	1,768%	8,120%
	96	131,286	2,820	2,148%	7,883%

Fuente: Autor del Proyecto

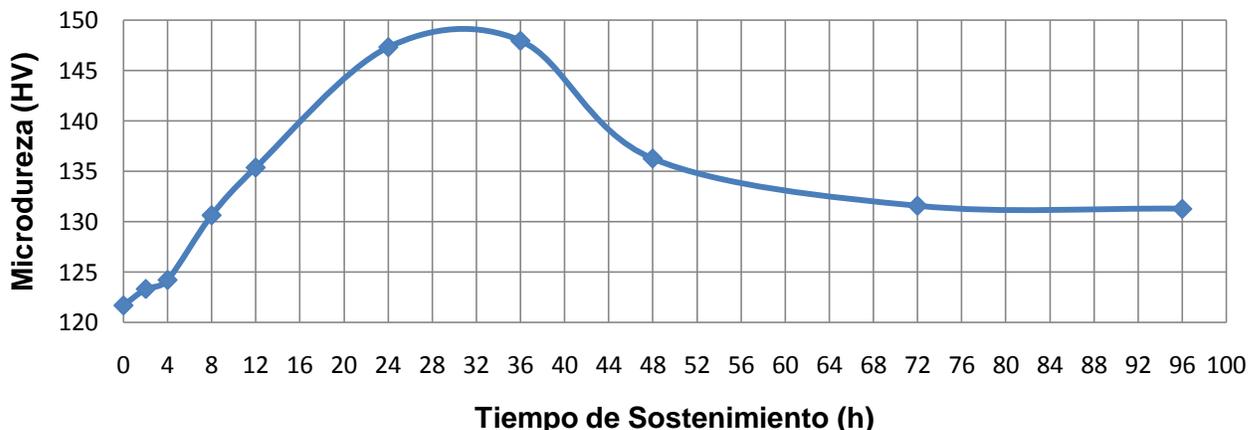
En la Gráfica 2 se evidencia que la dureza de la aleación de aluminio 2024 T4 en estado de entrega es de 121,694 HV y una vez es efectuado el tratamiento térmico de envejecimiento, esta propiedad mecánica comienza a aumentar gradualmente hasta alcanzar la máxima dureza de 147,970 HV a las 36 horas de sostenimiento, lo cual representa un aumento de esta propiedad mecánica del 21,592 % frente a la del material en estado de entrega. Este aumento drástico de la dureza se debe a que en la matriz del aluminio 2024 T4 se presentan precipitados finos de θ (Al_2Cu) y S' (Al_2CuMg), los cuales tienen un tamaño óptimo y distribución homogénea dentro del grano que constituyen un obstáculo eficaz, para el deslizamiento de las dislocaciones. Esto se puede observar en la metalografía (f) de la Tabla 12 a las 36 hr de sostenimiento.

Una vez obtenido el valor máximo de dureza a las 36 horas, esta propiedad comienza a disminuir ligeramente a medida que el tiempo de sostenimiento va aumentando, hasta alcanzar una dureza de 131,286 HV a las 96 horas de sostenimiento, el cual representa una disminución del 11,275 % frente a la dureza del material tratado a 36 horas.

Entre las 24 y 36 horas de sostenimiento del tratamiento térmico de envejecido, se observa que no hay un cambio significativo en la dureza, y además que estos tiempos se encuentran con los valores más altos, lo cual indica que este punto corresponde a la condición de dureza máxima obtenida frente a la dureza del material en estado de entrega.

En los datos obtenidos en el ensayo de microdureza, se puede evidenciar que la dureza de la aleación de aluminio 2024 T4 tiene un aumento significativo entre el 1,340 % y el 21,592 % después de haber sido tratado térmicamente con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C.

Gráfica 2. Variación de la dureza Vickers, en función del tiempo de envejecimiento a 180 °C de la aleación de aluminio 2024 T4.



Fuente: Autor del Proyecto

6.3 TENSIÓN

El ensayo de tensión se efectuó en el laboratorio de ensayos de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, con la maquina universal de ensayos Shimadzu, Para esta prueba se llevan a cabo 3 repeticiones, a las muestras en estado de entrega y a cada una de las muestras tratadas térmicamente mediante el envejecido a 180 °C a diversos tiempos de sostenimiento de la aleación de aluminio 2024 T4.

En el Anexo C, se exponen los diagramas de esfuerzo deformación que se obtuvieron en el ensayo de tensión, de cada una de las muestras estudiadas, además en el Anexo D, se pueden apreciar los resultados del esfuerzo máximo, límite de elasticidad y porcentaje de elongación que arrojo cada muestra.

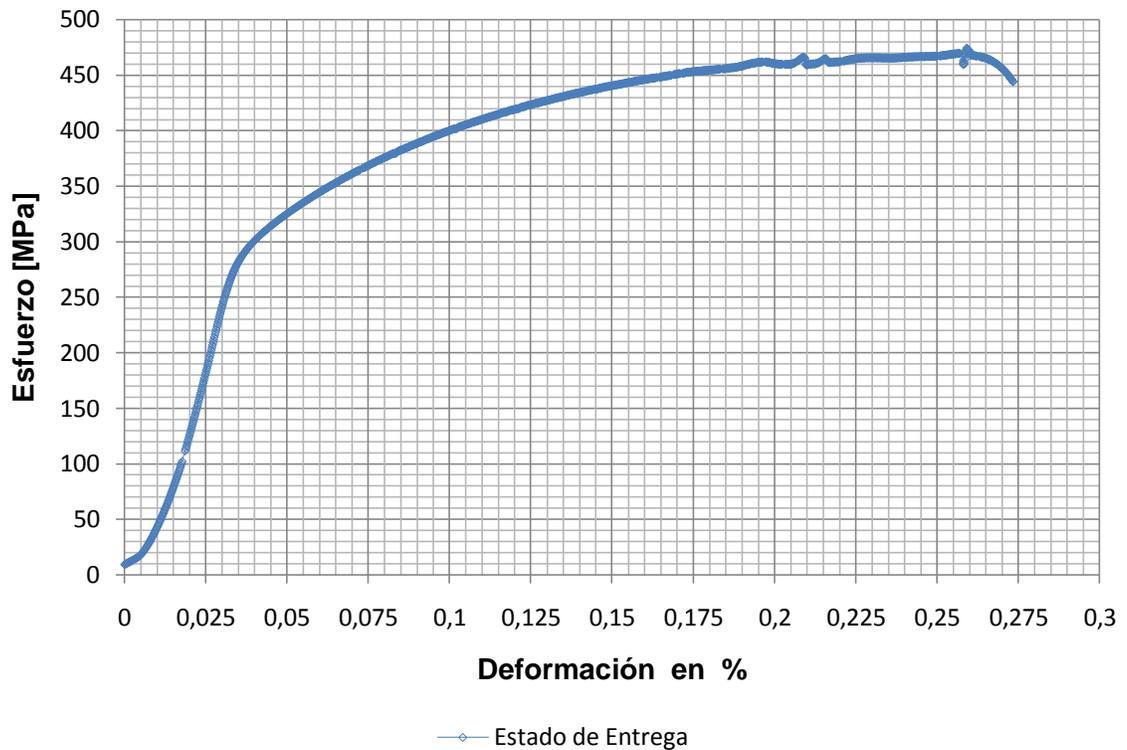
En la Tabla 8 se observa el resumen de los datos del esfuerzo máximo obtenidos en el ensayo de tensión, que se exponen en las tablas del Anexo D y se puede identificar que el coeficiente de variación de los datos obtenidos del ensayo, se encuentran entre el 0,301 % y el 3,029 %, lo cual da una precisión de los datos obtenidos entre el 99,699 % y 96,971 % respectivamente.

Tabla 8. Variación del esfuerzo máximo en función del tiempo de envejecimiento a 180° C de la aleación de aluminio 2024 T4.

Población	Tiempo de Sostenimiento [h]	Esfuerzo Máximo [MPa]	Desviación Estándar [MPa]	Variación %	Aumento %
Estado De Entrega		461,871	10,001	2,17%	
Tratamiento Térmico de Envejecido a 180 °C	2	471,752	4,804	1,018%	2%
	4	476,188	3,530	0,741%	3,100%
	8	484,314	2,984	0,616%	4,859%
	12	493,363	1,993	0,404%	6,818%
	24	504,300	6,563	1,301%	9,186%
	36	520,465	1,568	0,301%	12,686%
	48	507,550	5,696	1,122%	9,890%
	72	489,322	9,688	1,980%	5,943%
	96	480,756	14,562	3,029%	4,089%

Fuente: Autor del Proyecto

Gráfica 3. Diagrama de esfuerzo deformación, para el aluminio 2024 T4, en estado de entrega.



Fuente: Autor del Proyecto

Área bajo la curva

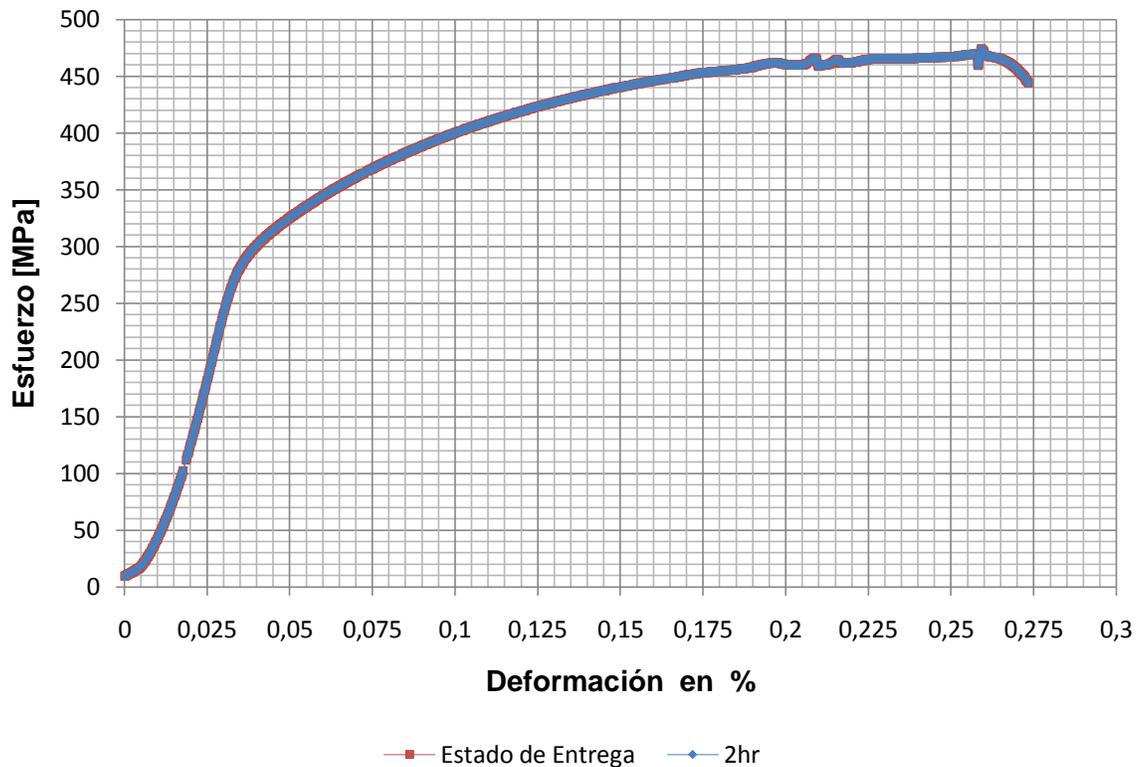
$$U_T = S_U * e_f \qquad U_T = \int_0^{e_f} S_U * e_f de_f \qquad U_T = \frac{S_U * (e_f)^2}{2}$$

Tenacidad

$$U_T = \frac{\left(47,097 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}\right) * (0,273\text{-mm})^2}{2} \qquad U_T = 1,755 \text{ kgf} * 9,807 \frac{\text{kg} * \text{m}}{\text{s}^2}$$

$$U_T = 17,211 \frac{\text{J}}{\text{m}}$$

Gráfica 4. Diagrama de esfuerzo deformación, para el aluminio 2024 T4, envejecido a 180 °C, durante 2 horas.



Fuente: Autor del Proyecto

Área bajo la curva

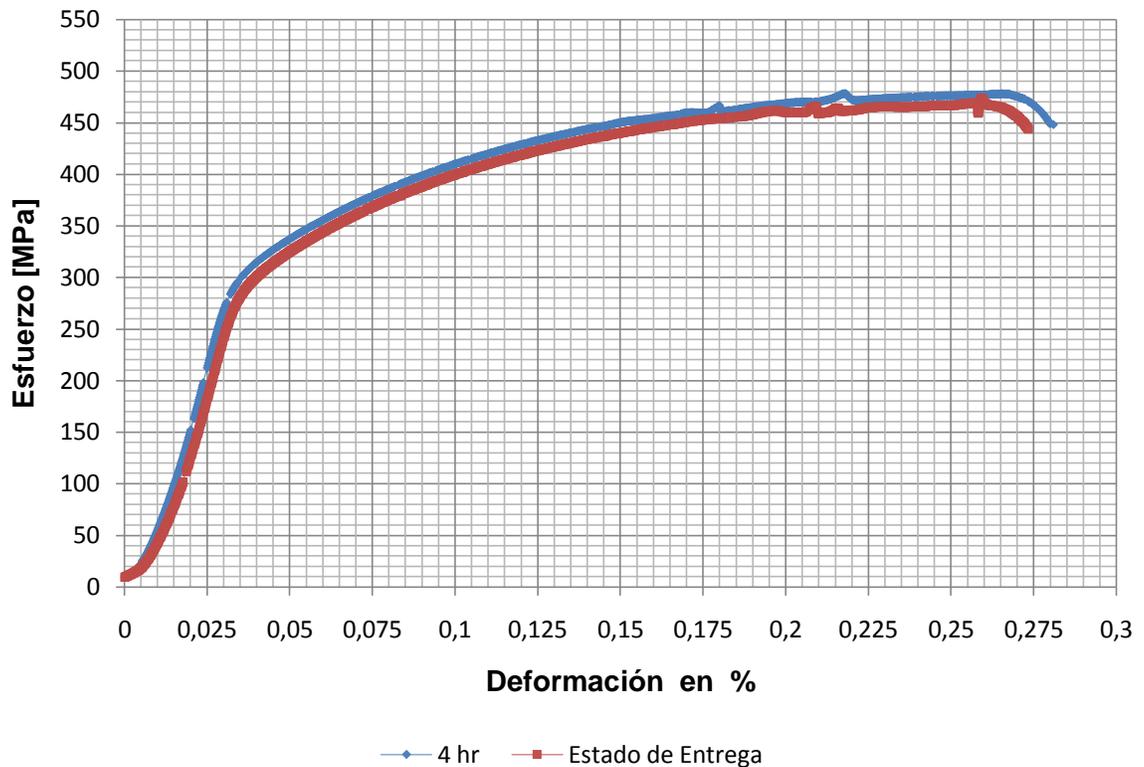
$$U_T = S_U * e_f \qquad U_T = \int_0^{e_f} S_U * e_f \, de_f \qquad U_T = \frac{S_U * (e_f)^2}{2}$$

Tenacidad

$$U_T = \frac{\left(48,105 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}\right) * (0,273\text{-mm})^2}{2} \qquad U_T = 1,793 \text{ kgf} * 9,807 \frac{\text{kg} * \text{m}}{\text{s}^2}$$

$$U_T = 17,580 \frac{\text{J}}{\text{m}}$$

Gráfica 5. Diagrama de esfuerzo deformación, para el aluminio 2024 T4, envejecido a 180 °C, durante 4 horas.



Fuente: Autor del Proyecto

Área bajo la curva

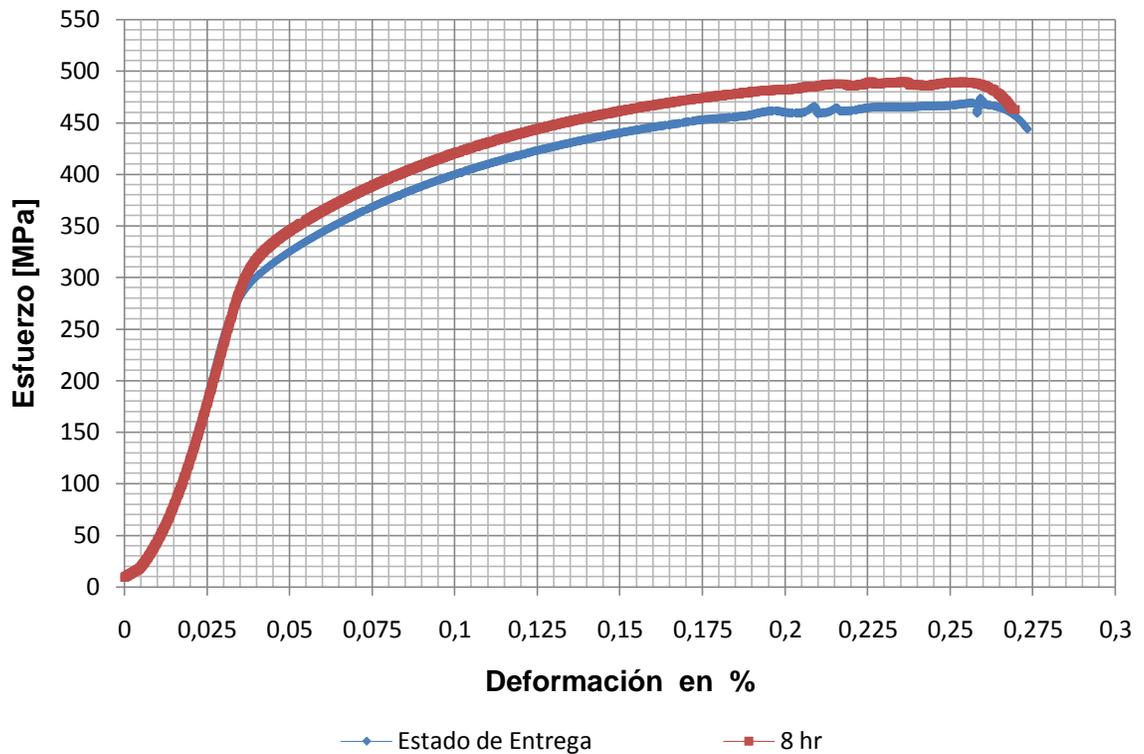
$$U_T = S_U * e_f \qquad U_T = \int_0^{e_f} S_U * e_f de_f \qquad U_T = \frac{S_U * (e_f)^2}{2}$$

Tenacidad

$$U_T = \frac{\left(48,557 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}\right) * (0,281\text{-mm})^2}{2} \qquad U_T = 1,917 \text{ kgf} * 9,807 \frac{\text{kg} * \text{m}}{\text{s}^2}$$

$$U_T = 18,801 \frac{\text{J}}{\text{m}}$$

Gráfica 6. Diagrama de esfuerzo deformación, para el aluminio 2024 T4, envejecido a 180 °C, durante 8 horas.



Fuente: Autor del Proyecto

Área bajo la curva

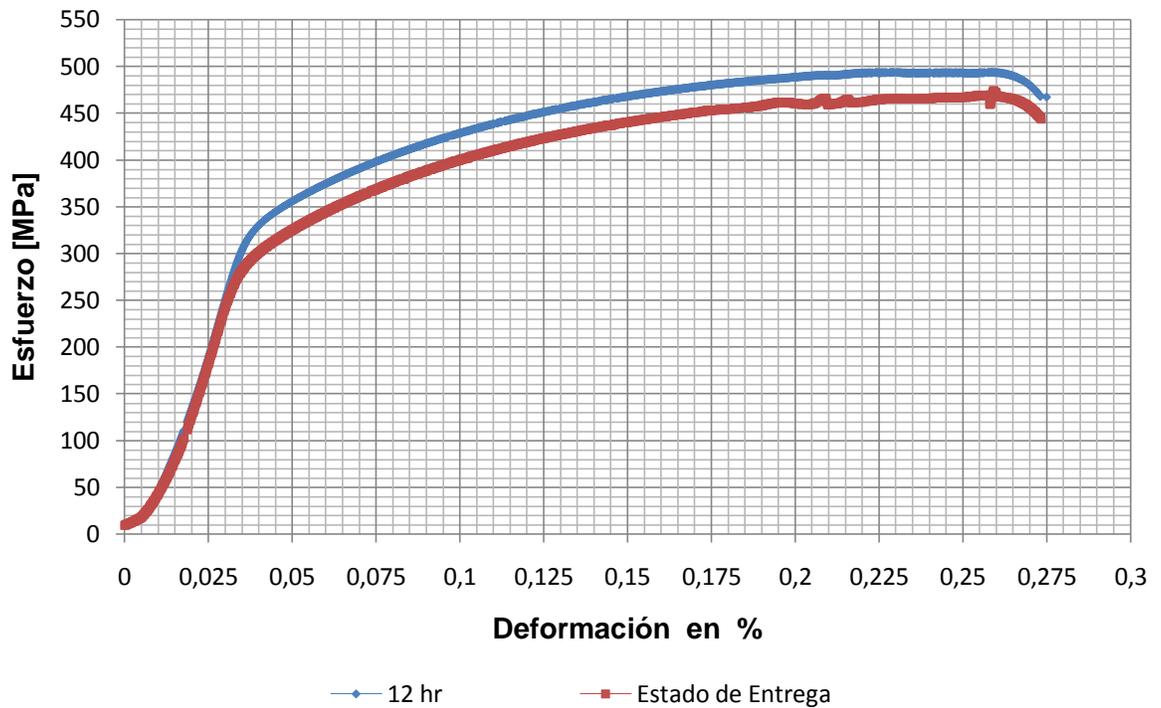
$$U_T = S_U * e_f \quad U_T = \int_0^{e_f} S_U * e_f de_f \quad U_T = \frac{S_U * (e_f)^2}{2}$$

Tenacidad

$$U_T = \frac{\left(49,385 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}\right) * (0,27\text{-mm})^2}{2} \quad U_T = 1,800 \text{ kgf} * 9,807 \frac{\text{kg} * \text{m}}{\text{s}^2}$$

$$U_T = 17,654 \frac{\text{J}}{\text{m}}$$

Gráfica 7. Diagrama de esfuerzo deformación, para el aluminio 2024 T4, envejecido a 180 °C, durante 12 horas.



Fuente: Autor del Proyecto

Área bajo la curva

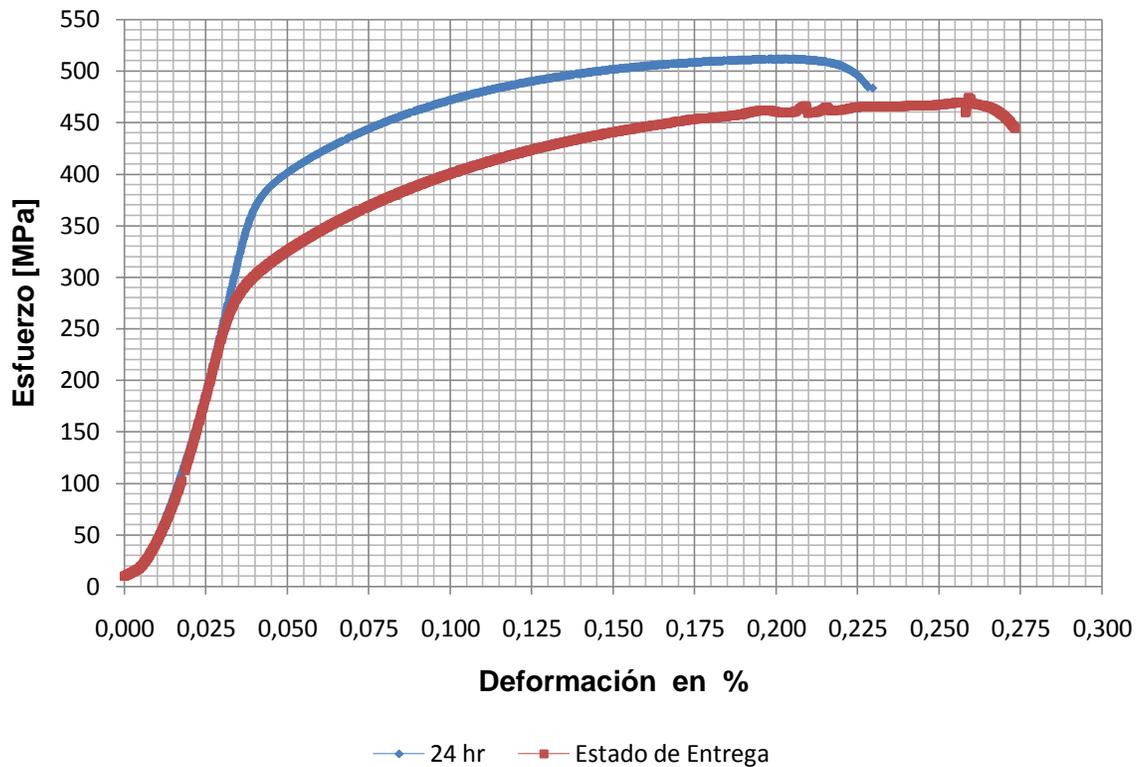
$$U_T = S_U * e_f \qquad U_T = \int_0^{e_f} S_U * e_f \, de_f \qquad U_T = \frac{S_U * (e_f)^2}{2}$$

Tenacidad

$$U_T = \frac{\left(50,308 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}\right) * (0,275 \text{ mm})^2}{2} \qquad U_T = 1,902 \text{ kgf} * 9,807 \frac{\text{kg} * \text{m}}{\text{s}^2}$$

$$U_T = 18,656 \frac{\text{J}}{\text{m}}$$

Gráfica 8. Diagrama de esfuerzo deformación, para el aluminio 2024 T4, envejecido a 180 °C, durante 24 horas.



Fuente: Autor del Proyecto

Área bajo la curva

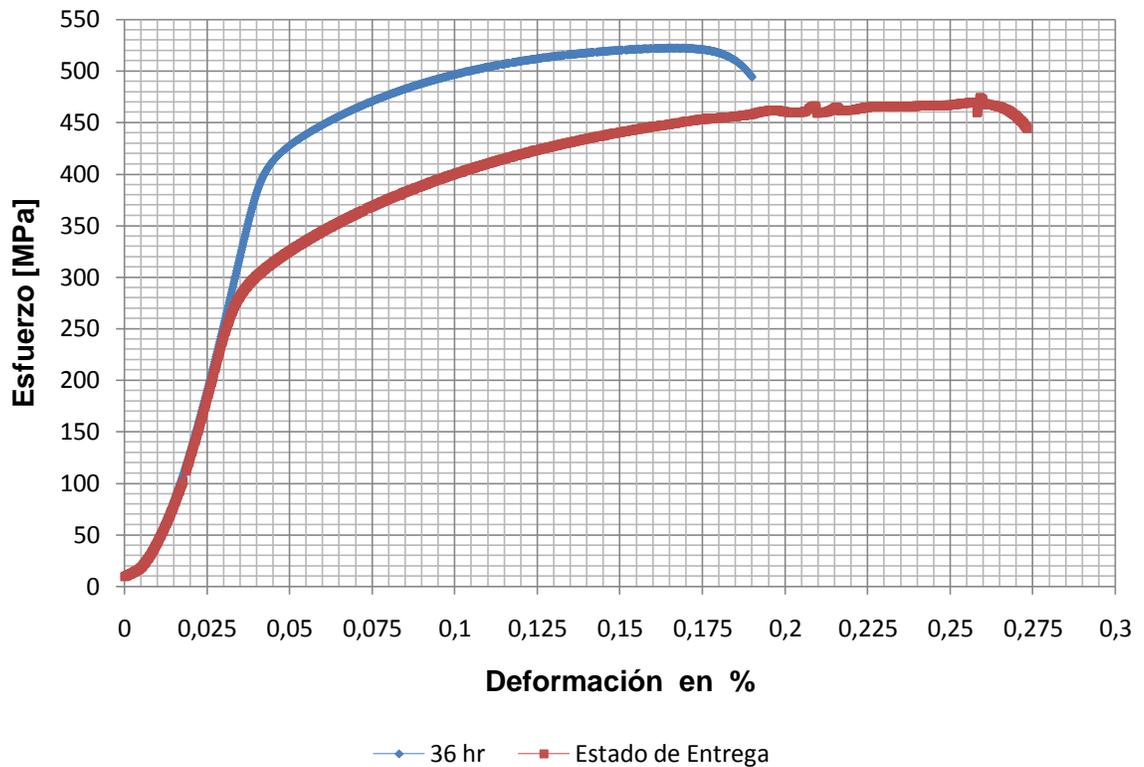
$$U_T = S_U * e_f \qquad U_T = \int_0^{e_f} S_U * e_f de_f \qquad U_T = \frac{S_U * (e_f)^2}{2}$$

Tenacidad

$$U_T = \frac{\left(51,423 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}\right) * (0,230\text{-mm})^2}{2} \qquad U_T = 1,360 \text{ kgf} * 9,807 \frac{\text{kg} * \text{m}}{\text{s}^2}$$

$$U_T = 13,339 \frac{\text{J}}{\text{m}}$$

Gráfica 9. Diagrama de esfuerzo deformación, para el aluminio 2024 T4, envejecido a 180 °C, durante 36 horas.



Fuente: Autor del Proyecto

Área bajo la curva

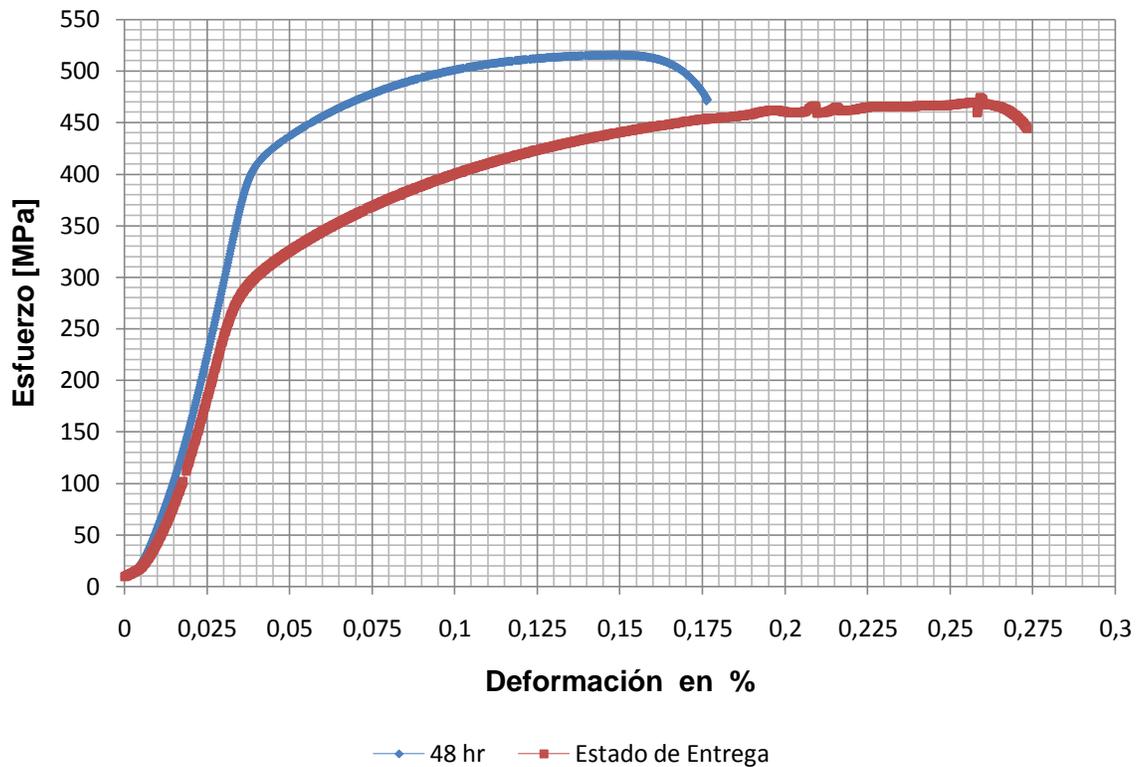
$$U_T = S_U * e_f \qquad U_T = \int_0^{e_f} S_U * e_f de_f \qquad U_T = \frac{S_U * (e_f)^2}{2}$$

Tenacidad

$$U_T = \frac{\left(53,072 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}\right) * (0,190\text{-mm})^2}{2} \qquad U_T = 0,958 \text{ kgf} * 9,807 \frac{\text{kg} * \text{m}}{\text{s}^2}$$

$$U_T = 9,395 \frac{\text{J}}{\text{m}}$$

Gráfica 10. Diagrama de esfuerzo deformación, para el aluminio 2024 T4, envejecido a 180 °C, durante 48 horas.



Fuente: Autor del Proyecto

Área bajo la curva

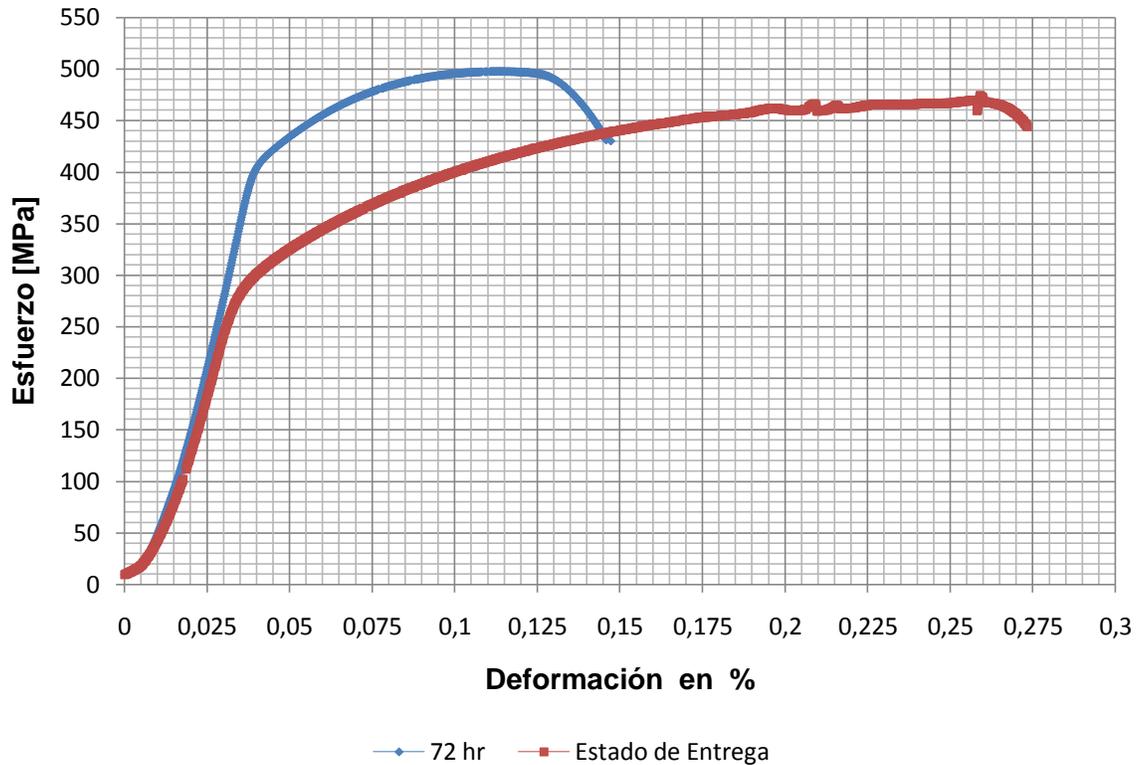
$$U_T = S_U * e_f \qquad U_T = \int_0^{e_f} S_U * e_f de_f \qquad U_T = \frac{S_U * (e_f)^2}{2}$$

Tenacidad

$$U_T = \frac{\left(51,755 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}\right) * (0,176\text{-mm})^2}{2} \qquad U_T = 0,802 \text{ kgf} * 9,807 \frac{\text{kg} * \text{m}}{\text{s}^2}$$

$$U_T = 7,861 \frac{\text{J}}{\text{m}}$$

Gráfica 11. Diagrama de esfuerzo deformación, para el aluminio 2024 T4, envejecido a 180 °C, durante 72 horas.



Fuente: Autor del Proyecto

Área bajo la curva

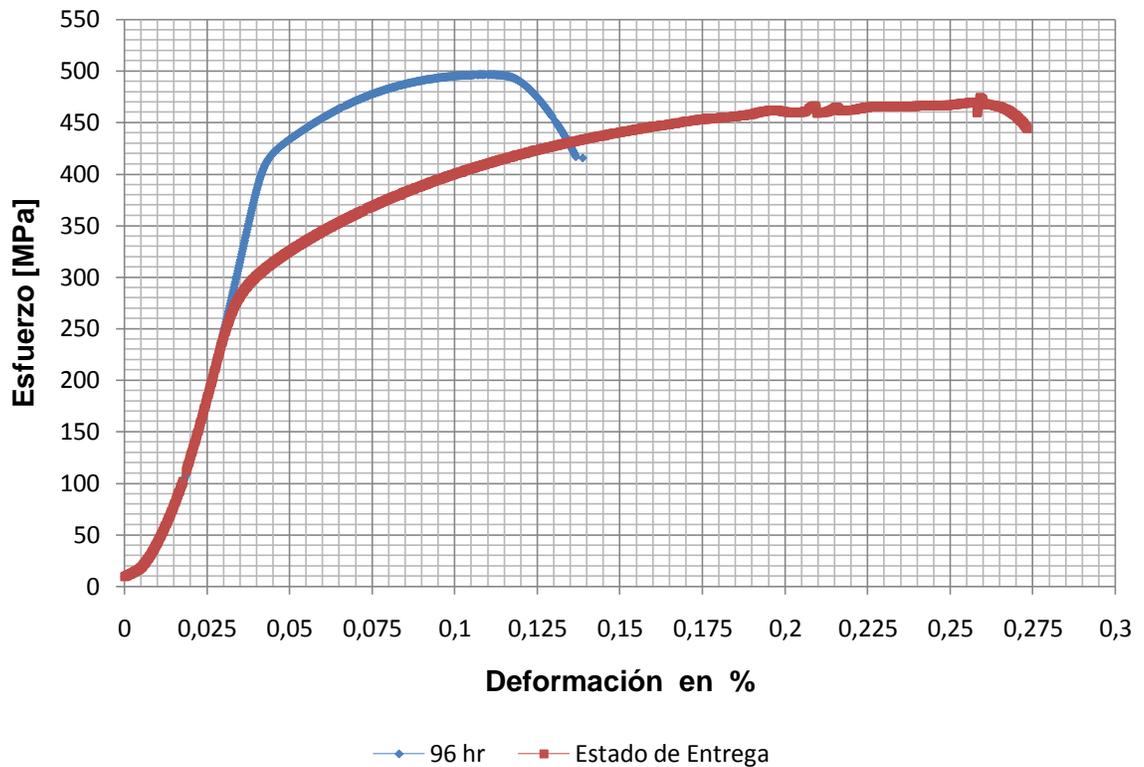
$$U_T = S_U * e_f \qquad U_T = \int_0^{e_f} S_U * e_f de_f \qquad U_T = \frac{S_U * (e_f)^2}{2}$$

Tenacidad

$$U_T = \frac{\left(49,896 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}\right) * (0,147\text{-mm})^2}{2} \qquad U_T = 0,539 \text{ kgf} * 9,807 \frac{\text{kg} * \text{m}}{\text{s}^2}$$

$$U_T = 5,287 \frac{\text{J}}{\text{m}}$$

Gráfica 12. Diagrama de esfuerzo deformación, para el aluminio 2024 T4, envejecido a 180 °C, durante 96 horas.



Fuente: Autor del Proyecto

Área bajo la curva

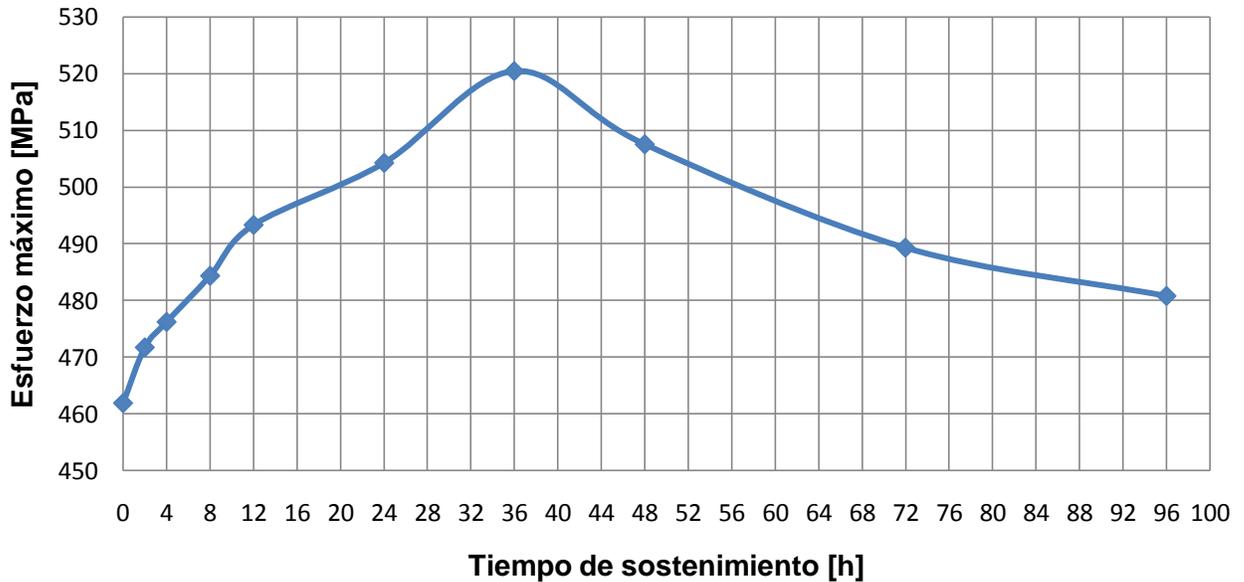
$$U_T = S_U * e_f \qquad U_T = \int_0^{e_f} S_U * e_f de_f \qquad U_T = \frac{S_U * (e_f)^2}{2}$$

Tenacidad

$$U_T = \frac{\left(49,023 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}\right) * (0,139\text{-mm})^2}{2} \qquad U_T = 0,474 \text{ kgf} * 9,807 \frac{\text{kg} * \text{m}}{\text{s}^2}$$

$$U_T = 4,644 \frac{\text{J}}{\text{m}}$$

Gráfica 13. Variación del esfuerzo máximo en función del tiempo de envejecimiento a 180° C de la aleación de aluminio 2024 T4.



Fuente: Autor del Proyecto

En la Gráfica 3 y Gráfica 13, se identifican que el esfuerzo máximo de la aleación 2024 T4 en estado de entrega es de 461,871 MPa y una vez es efectuado el tratamiento térmico de envejecimiento esta propiedad inicia un aumento creciente hasta alcanzar la resistencia máxima para este estudio, el cual se encuentra a las 36 horas de sostenimiento, que representa un aumento de esta propiedad mecánica del 12,686 % frente a la del material en estado de entrega. Este aumento del esfuerzo máximo se debe a que en la matriz del aluminio 2024 T4 se presentan precipitados finos de θ (Al_2Cu) y S' (Al_2CuMg), los cuales tienen un tamaño óptimo y distribución homogénea dentro del grano que constituyen un obstáculo eficaz para el deslizamiento de las dislocaciones.

Una vez que a la aleación de aluminio 2024 T4 se le efectúa un tratamiento térmico de envejecimiento con un tiempo mayor, del que se obtuvo el aumento de 12,686 % del esfuerzo máximo, se puede apreciar que esta propiedad comienza a disminuir levemente hasta alcanzar un valor de 480,756 MPa como se observa en la Gráfica 13, el cual representa un descenso del 7,629 % respecto a la resistencia máxima obtenida en este estudio.

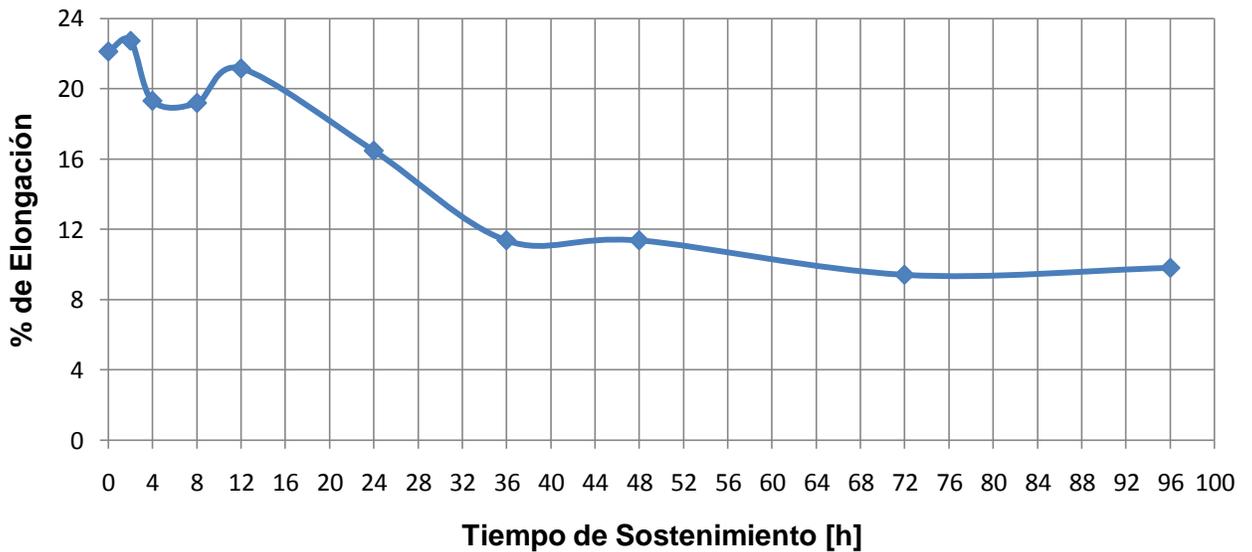
De las Gráficas 3 a la 13 de esfuerzo deformación se puede evidenciar que la deformación de la aleación tiende a reducir a medida que se va incrementando el tiempo de sostenimiento del tratamiento térmico de envejecimiento, lo cual es debido a

que a medida que aumenta la dureza y el esfuerzo máximo hace que la aleación sea más frágil .

Mediante la aplicación del tratamiento térmico de envejecido a 180 °C, se puede evidenciar que el esfuerzo máximo de la aleación de aluminio 2024 T4 tiene un aumento significativo entre el 2 % y el 12,686 %.

En la Gráfica 14 se identifica que el porcentaje de elongación de las muestras tratadas térmicamente, disminuye progresivamente hasta un 55,709 % una vez se ha efectuado un tratamiento de envejecido a 180 °C y con tiempos superiores de 2 horas de sostenimiento, esto es a casusa de que una vez se implementa el tratamiento térmico de envejecido los precipitados comienzan a desarrollarse y a distribuirse dentro del grano y sus límites con el fin de endurecer el material lo cual vuelve la aleación más dura, lo cual indica que la aleación se va volviendo más frágil.

Gráfica 14. Variación del porcentaje de elongación en función del tiempo de envejecimiento a 180° C de la aleación de aluminio 2024 T4.



Fuente: Autor del Proyecto

Otra propiedad que se puede evaluar mediante la aplicación del ensayo de tensión es la tenacidad, ya que este ensayo se implementa en condiciones de cargas cuasiestáticas (aplicando cargas de manera muy lenta). La tenacidad es la capacidad para absorber energía en el campo plástico, para este ensayo se considera que la tenacidad es el área total que se da bajo la curva de tensión

deformación; la cual se encuentra mediante la aplicación de la siguiente aproximación matemática [30] :

$$U_T = S_U * e_f \qquad U_T = \int_0^{e_f} S_U * e_f de_f \qquad U_T = \frac{S_U * (e_f)^2}{2}$$

U_T =Tenacidad [J/m].

S_U =Esfuerzo Máximo [kgf/mm²]

e_f =deformación [mm]

Tabla 9. Variación de la tenacidad obtenida de la gráfica esfuerzo deformación en función del tiempo de envejecimiento a 180° C de la aleación de aluminio 2024 T4.

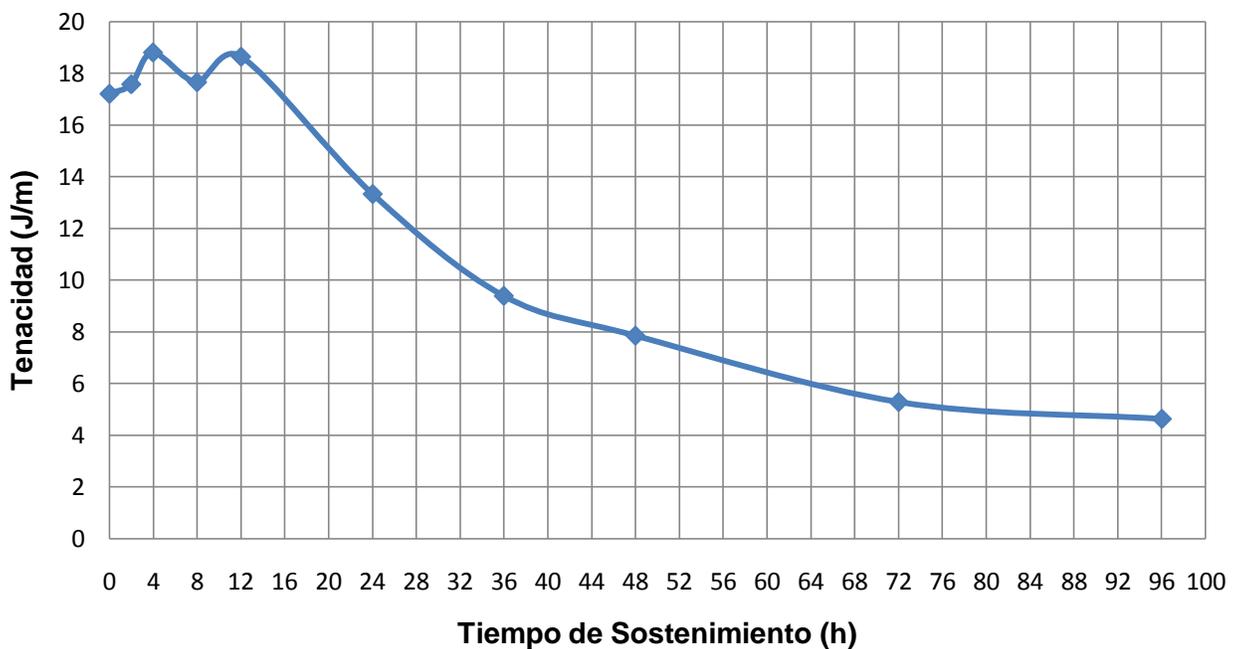
Población	Tiempo de sostenimiento [h]	Tenacidad UT [J/m]	Aumento %
Estado De Entrega		17,212	
Tratamiento térmico de envejecido a 180 °C	2	17,580	2%
	4	18,801	9%
	8	17,654	3%
	12	18,656	8%
	24	13,339	-23%
	36	9,395	-45%
	48	7,861	-54%
	72	5,287	-69%
	96	4,644	-73%

En las Gráficas 7 a la 12 se observa que a medida que aumenta el tiempo de sostenimiento va aumentando también el esfuerzo máximo y el límite de elasticidad pero a su vez disminuye la deformación lo cual conlleva a que la tenacidad comience a disminuir a medida que aumenta el tiempo de sostenimiento como se observa en la Gráfica 15 en los tiempos de sostenimiento entre 12 y 36 horas, esto es debido a que el área bajo la curva de la gráfica esfuerzo deformación comienza a disminuir a medida que se aumenta el tiempo de sostenimiento.

Entre los tiempos de sostenimiento de 2, 4, 8 y 12 horas se presenta un aumento del esfuerzo máximo y una disminución del límite de elasticidad entre el 12.34 % y el 0,853 %, y a su vez se cuenta con los porcentajes de deformación más representativos obtenidos en este ensayo, lo cual eleva la tenacidad del material ya que se presenta una mayor área bajo la curva.

Como se aprecia en la Gráfica 15 y en la Tabla 9 a partir de las 12 horas de sostenimiento la tenacidad inicia una disminución significativa, hasta reducir un 73 % respecto a la del estado de entrega, esta disminución de la tenacidad está relacionada con la precipitación de fases intermedias dentro del grano y sus límites.

Gráfica 15. Variación de la tenacidad obtenida de la gráfica esfuerzo deformación en función del tiempo de envejecimiento a 180° C de la aleación de aluminio 2024 T4.



Fuente: Autor del Proyecto

6.4 METALOGRAFÍA

A continuación se exponen las metalografías tomadas con el microscopio óptico y con aumentos de 200X, 500X y 1000X ya que estos dan a conocer las características metalográficas del material con mayor claridad. Para efectuar estas metalografías, las muestras fueron atacadas con el reactivo de Keller (2 mL HF, 3 mL HCl, 5 mL HNO₃ y 100 mL H₂O), durante un periodo de tiempo entre los 10 y 20 segundos.

En las imágenes de la Tabla 10 se pueden apreciar las metalografías a 200x de la aleación de aluminio 2024 T4 en estado de entrega, solubilizado y después de haber sido tratada térmicamente, mediante un tratamiento de envejecido a 180 °C y con tiempos de sostenimiento entre 2 y 96 horas, en estas imágenes se aprecia que a medida que aumenta el tiempo de sostenimiento en el tratamiento térmico de envejecido el tamaño de grano va aumentando. Conjuntamente se observa que a las 8 horas de envejecido los límites de grano ya empiezan a aumentar su tamaño y esto es debido a que los precipitados comienzan a acumularse en estas regiones.

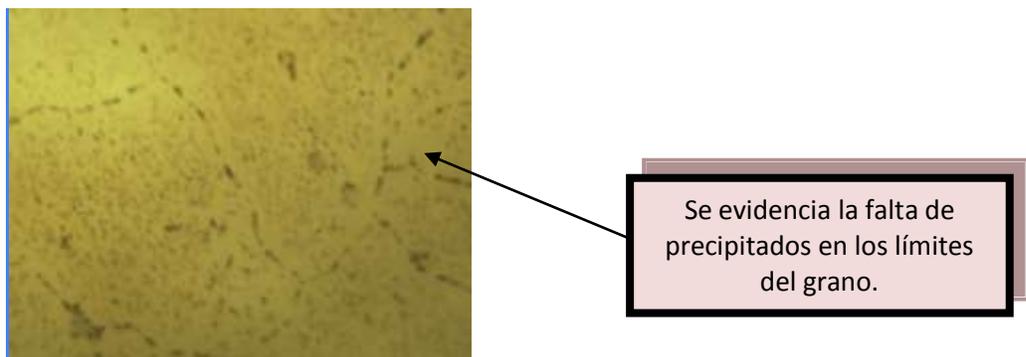
En las imágenes de la Tabla 11 y la Tabla 12 se pueden apreciar las metalografías a 500x y 1000x respectivamente de la aleación de aluminio 2024 T4 en estado de entrega, solubilizado y después de haber sido tratada térmicamente, mediante un tratamiento de envejecido a 180° y con tiempos de sostenimiento entre 2 y 96 horas, en estas imágenes se puede apreciar que la estructura del material consiste principalmente en una matriz de solución sólida α (solución de Al) que tiene Cu, Mg, Mn y Fe como soluto (que presentan una composición menor), además se pueden apreciar la fase precipitada θ (Al₂Cu) y la fase precipitada S' (Al₂CuMg) la cuales se identifican con ayuda de las imágenes de referencia del libro *Metals handbook, vol 7 "Atlas of microstructure", American Society for Metals*.

- **Al₂Cu.** esta fase está representada por la formación de regiones claras delineadas. En el tratamiento térmico de envejecido se precipita esta fase θ la cual ayuda significativamente a que la aleación aumente su dureza.
- **Al₂CuMg.** esta fase se representa por la formación de regiones de color marrón oscuro. En el tratamiento térmico de envejecido se precipita esta fase S' la cual ayuda en el aumento de los esfuerzos de la aleación.

En la imagen (f) de la Tabla 12 se puede apreciar la metalografía de la aleación de aluminio 2024 T4 envejecida a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 36 horas, en esta metalografía se puede apreciar, que el límite de grano está formado por una hilera de finos precipitados, los cuales ayudan significativamente a obstaculizar el movimiento de las dislocaciones [12].

En la Figura 19 puede apreciar que las regiones que limitan con los bordes de grano carecen de la presencia de precipitados, esto es debido a que los precipitados presentes en el borde del grano presentan un mayor contenido de soluto que el de la matriz, por lo cual los átomos de soluto se difunden desde la matriz adyacente hacia las partículas del borde del grano para ayudar en el crecimiento de los precipitados [12].

Figura 19. Microestructura a 1000X aumentos de la aleación de aluminio 2024 T4 después de ser envejecida 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 24 horas

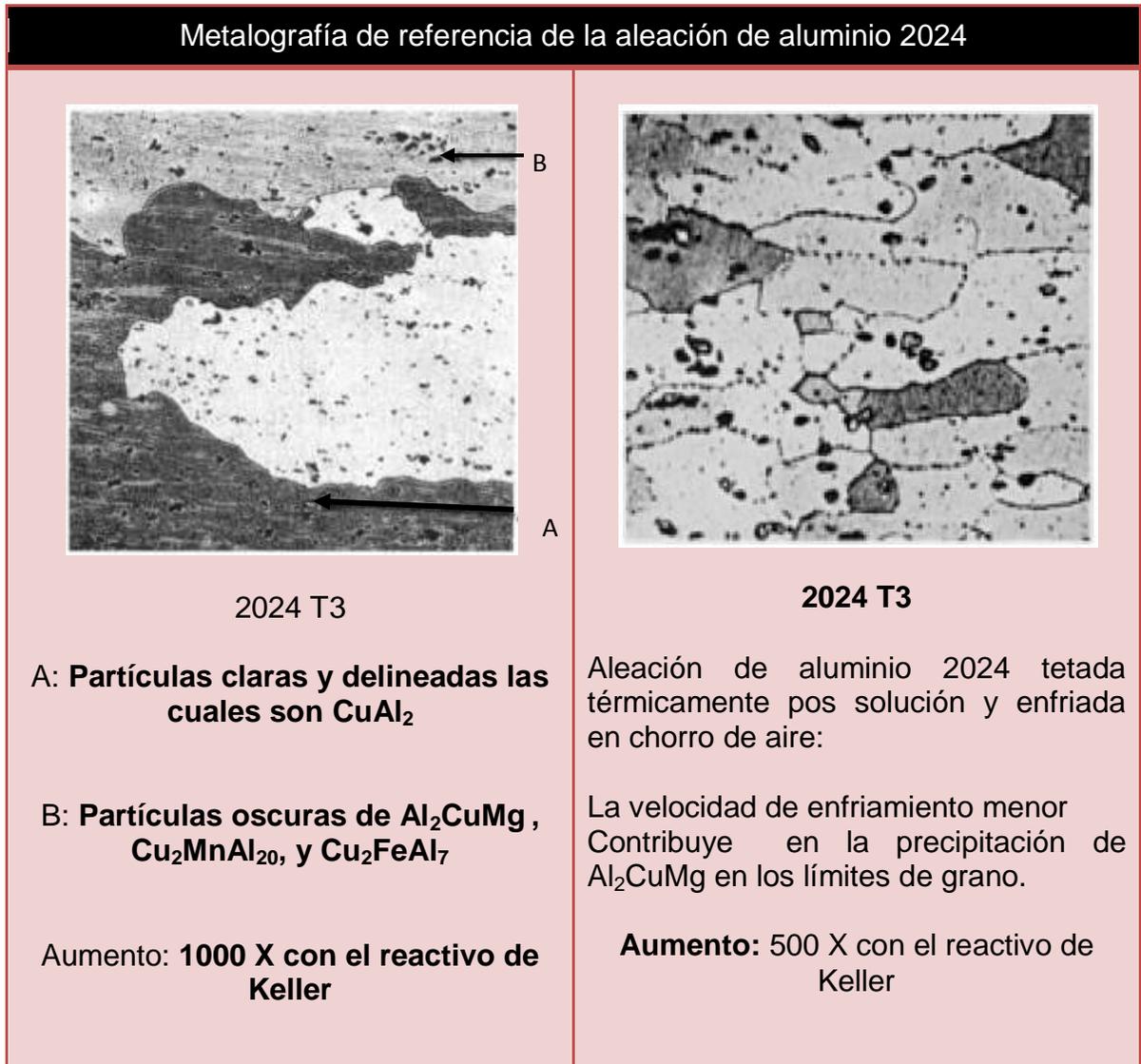


Fuente: Autor del Proyecto

En la metalografía se puede observar que la microestructura evoluciona con el tiempo de sostenimiento del tratamiento térmico de envejecido. A medida que va aumentando el tiempo de sostenimiento los precipitados más pequeños se disuelven con el soluto y se propagan a través de la matriz para favorecer en el crecimiento de las partículas precipitadas más grandes, por tal razón se observa que a medida que se aumenta el tiempo de envejecido los precipitados aumentan de tamaño [12].

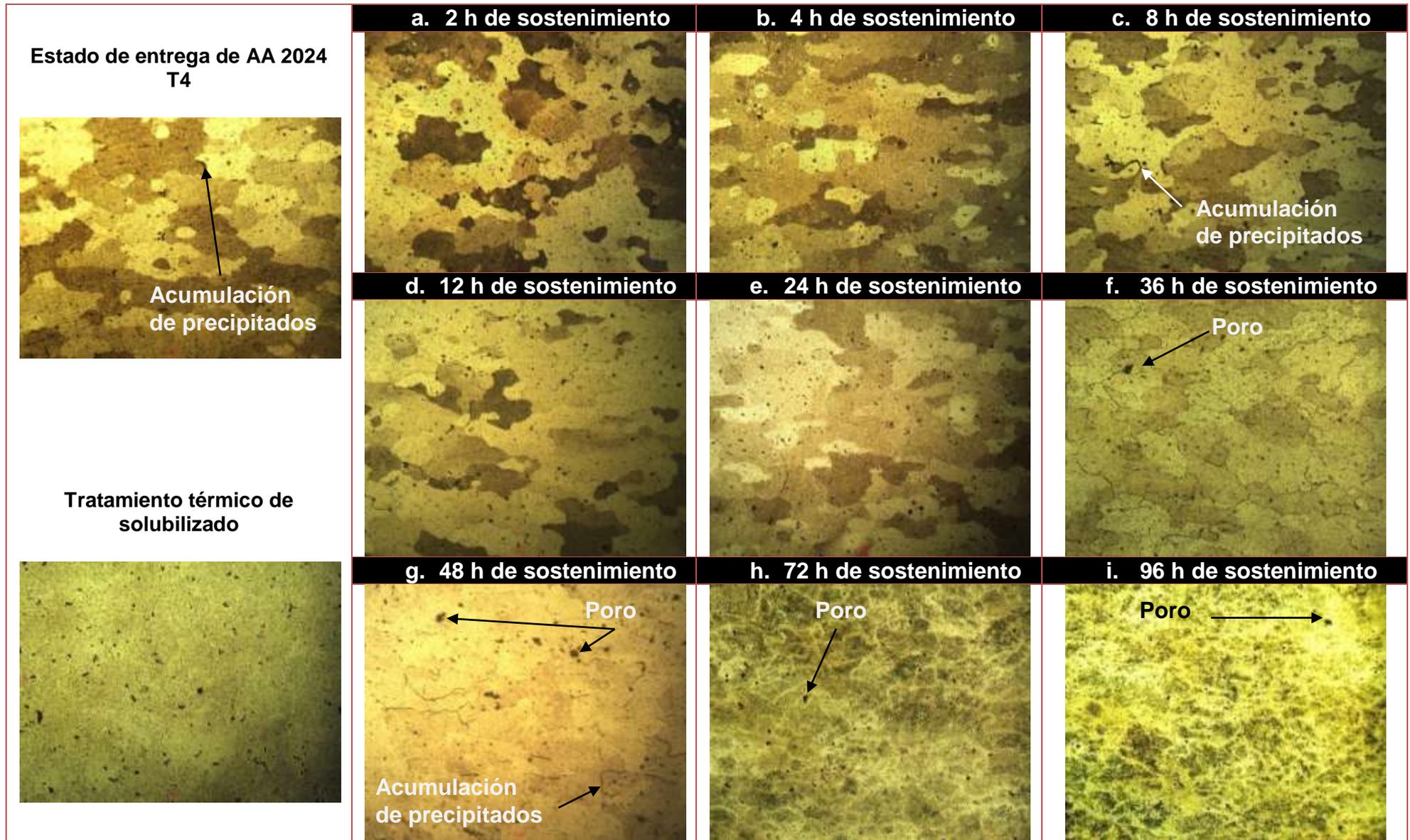
La metalografía de referencia de la Figura 20 fue tomada del libro *Metals handbook, vol 7 "Atlas of microstructure", American Society for Metals*, esta metalografía muestra la estructura de la aleación 2024 T3, la cual consta de partículas oscuras de CuMgAl_2 , $\text{Cu}_2\text{MnAl}_{20}$, y Cu_2FeAl_7 en una matriz de solución sólida y solo se obtiene una pequeña cantidad de partículas de CuAl_2 (claras y delineadas); atracada con el reactivo de Keller.

Figura 20. Metalografía de referencia tomada del libro *Metals handbook*, vol 7 y 9



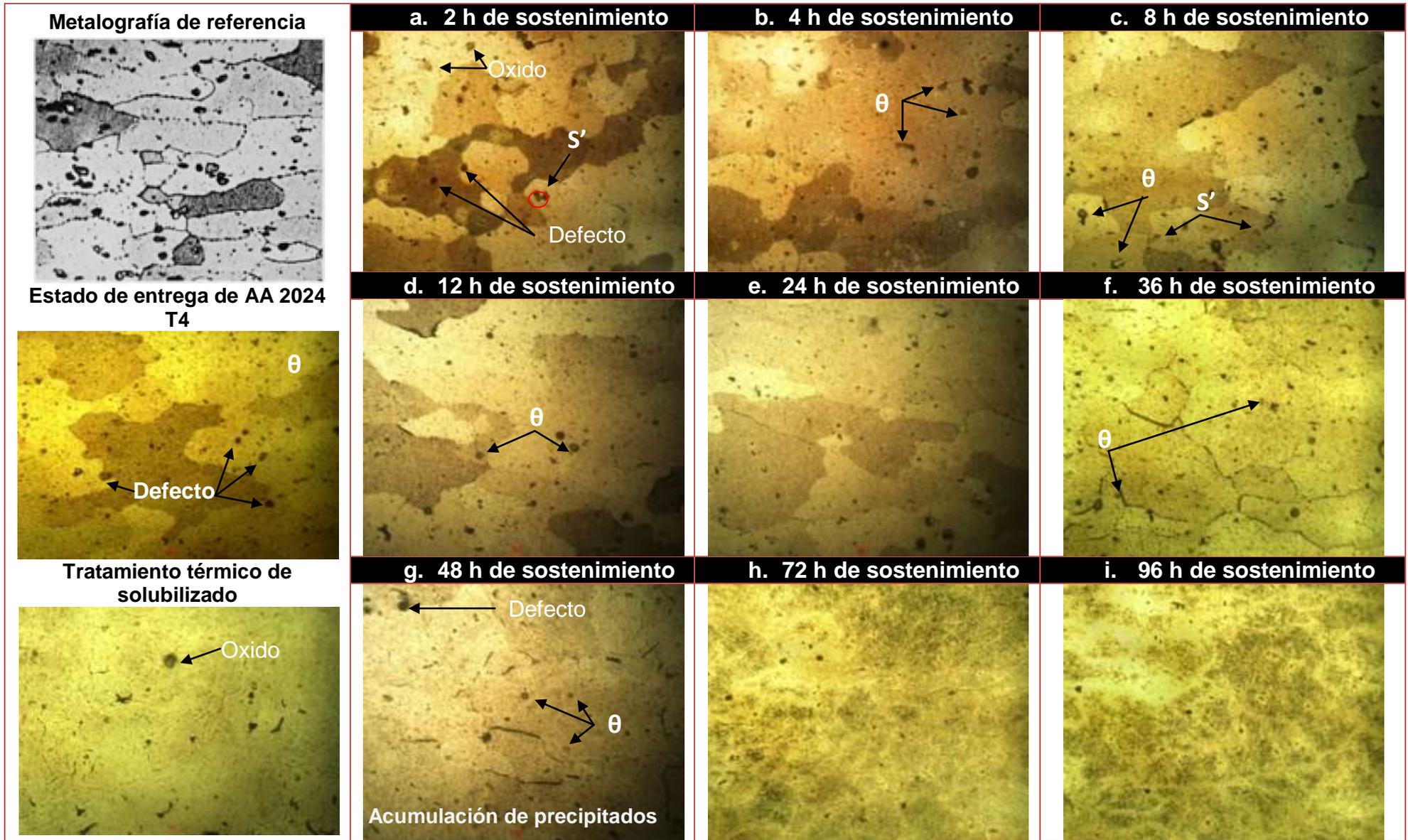
Fuente: *Metals handbook*, vol 7 "Atlas of microstructure", American Society for Metals

Tabla 10. Microestructura a 200 X de la aleación de aluminio 2024 T4, después de ser envejecida a 180 °C



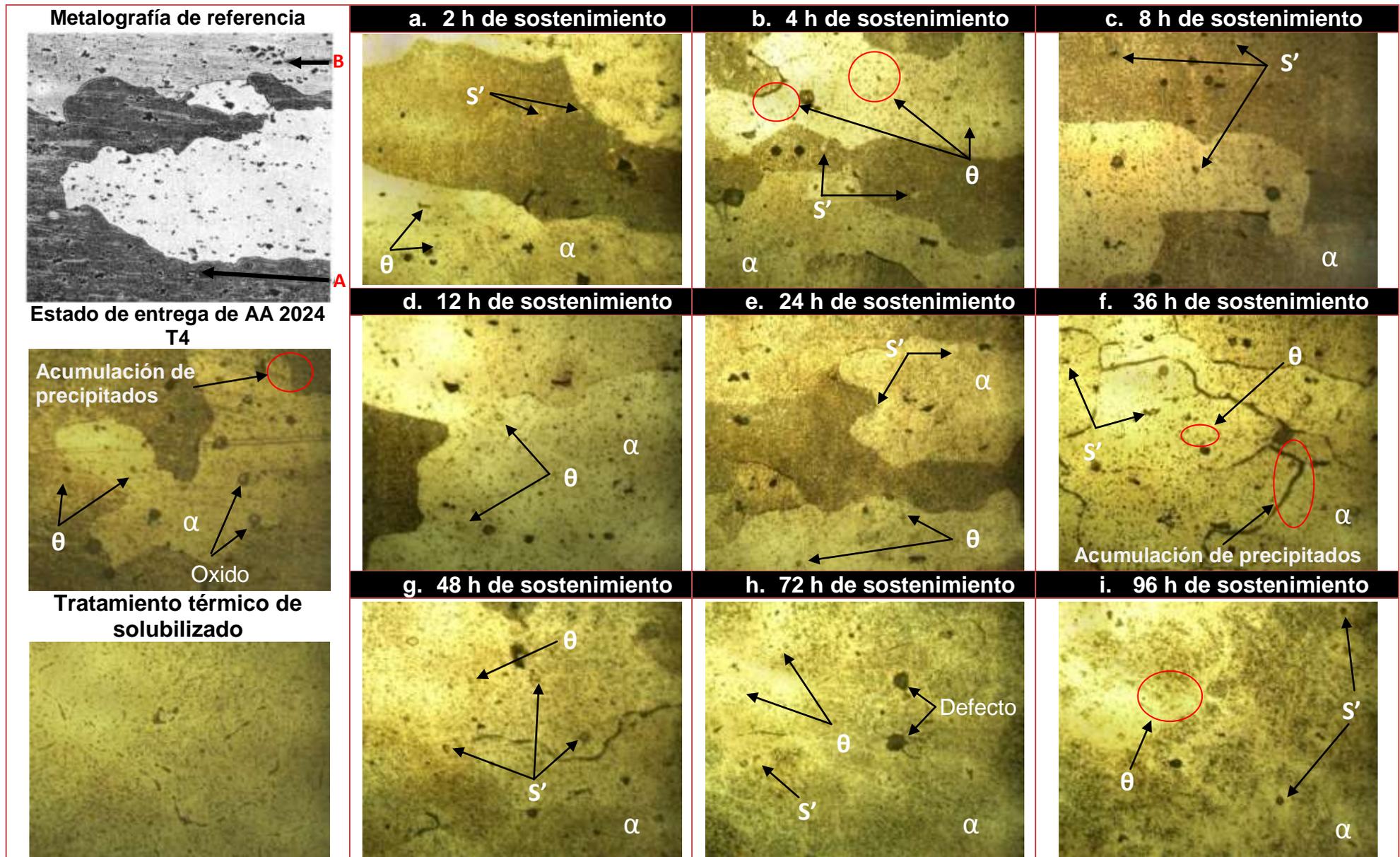
Fuente: Autor del Proyecto

Tabla 11. Microestructura a 500 X de la aleación de aluminio 2024 T4, después de ser envejecida a 180 °C



Fuente: Autor del Proyecto

Tabla 12. Microestructura a 1000 X de la aleación de aluminio 2024 T4, después de ser envejecida a 180 °C

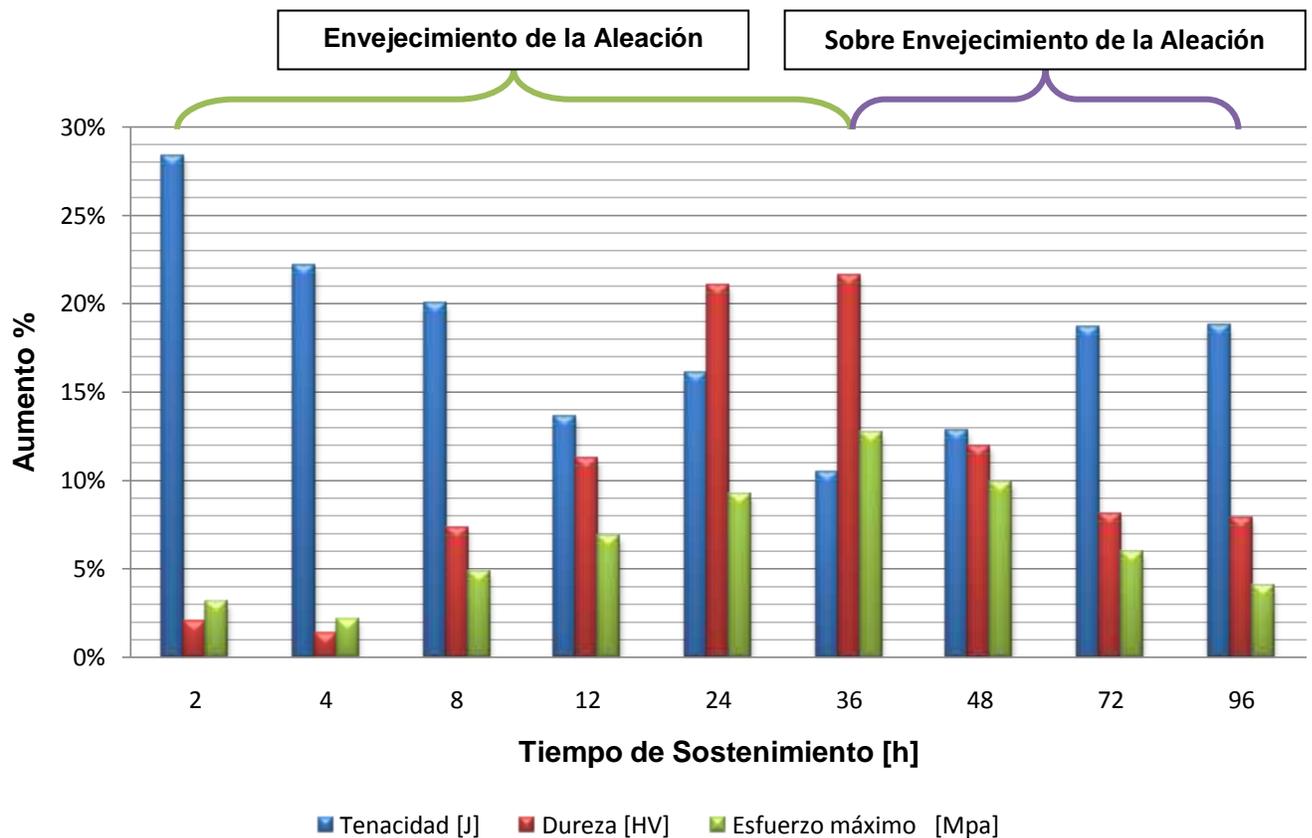


Fuente: Autor del Proyecto

7. CONCLUSIONES

En la Gráfica 16 se puede observar la influencia que tiene el tiempo de sostenimiento en el tratamiento térmico de envejecido o endurecimiento térmico por precipitación en las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 2024 T4.

Gráfica 16. Influencia del tratamiento térmico de envejecido en las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 2024 T4.



Fuente: Autor del Proyecto

En el tratamiento térmico de envejecido se precipita la fase θ (Al_2Cu) y la fase S' (Al_2CuMg), las cuales impiden el movimiento de las dislocaciones, lo cual ayuda a que la aleación se refuerce y de esta forma se aumente la dureza y su esfuerzo máximo; a medida que aumenta el tiempo de envejecido estas propiedades de dureza y esfuerzo máximo presentan su mayor valor obtenido en

los ensayos (21.592 % y 12.686 % respectivamente, frente a la aleación en estado de entrega), para este proyecto se pudo obtener estos aumentos representativos con el tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 36 horas, como se puede apreciar en la Gráfica 16

Como se puede observar en la Gráfica 16 entre las 24 y 36 horas se presenta un aumento de las propiedades de dureza y esfuerzo máximo comparado con el material en estado de entrega. En las muestras metalográficas de estos tiempos, que puede apreciar en la Tabla 12 imagen (e) y (f) se puede estimar que los límites de grano presentan concentraciones de precipitados, que impiden el movimiento de las dislocaciones, lo cual ayuda a que la aleación de aluminio 2024 T4 aumente significativamente sus propiedades mecánicas de esfuerzo máximo y dureza.

En las metalográficas de la Tabla 12 se puede observar que de acuerdo como avanza el tiempo de sostenimiento, los precipitados van aumentando de tamaño y van cambiando su distribución dentro de la matriz α , lo cual tiene un impacto significativo en la variación de los porcentajes obtenidos de las propiedades mecánicas.

En la Gráfica 16 se identifica que a medida que aumenta el tiempo de envejecido del tratamiento térmico, la aleación se vuelve más resistente y a su vez más frágil, esto se puede apreciar a las 36 horas de sostenimiento, en el cual se obtienen los mejores resultados de dureza y esfuerzo máximo, pero a su vez se encuentra el resultado más bajos de tenacidad.

Como se observa en la Gráfica 16, si se desea obtener una aleación de aluminio 2024 T4, con una excelente tenacidad, es apropiado efectuar, un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C, el cual no supere las 2 horas de tiempo de sostenimiento. Si se desea obtener una aleación con una elevada dureza y esfuerzo máximo, es oportuno efectuar un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento ente 24 y 36 horas. Pero si se requiere que la aleación presente una combinación de propiedades que superen a la de estado de entrega, se debe efectuar un tratamiento de envejecido a la aleación de aluminio 2024 T4 con un tiempo de sostenimiento de 48 horas y una temperatura de 180 °C.

El cambio de las propiedades mecánicas (Tenacidad, dureza, esfuerzo máximo, porcentaje de elongación) y el comportamiento de la microestructura, están en función de la temperatura y tiempo de sostenimiento de la aleación de aluminio 2024 T4.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ECHAVARRÍA, Alejandro y ORREGO, Gustavo Adriano. (2009). Metalurgia Básica de Algunas Aleaciones de Aluminio Extruidas o Laminadas.
- [2] FORN, A; BAILE, M y RUPÉREZ, E . (2002). Optimización del Tratamiento Térmico de Envejecimiento en Materiales Compuestos Base Aluminio.
- [3] LIPSKI, Adam y MROZIŃSKI, Stanisław . (2011). The Effects of Temperature on the Strength Properties of Aluminium Alloy 2024-T3.
- [4] TAN, Evren y OGEL, Bilgehan . (2007). Influence of Heat Treatment on the Mechanical Properties of AA6066 Alloy.
- [5] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). (2001). *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. (E - 03).*
- [6] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). (2002). *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys (E-407).* ASTM.
- [7] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). (2003). *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials (E - 384).*
- [8] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). (2002). *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. (E - 23).*
- [9] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). (2004). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. (E - 08).*
- [10] AMÚ ,Maribel y FRANCO, Fernando . (2009). *MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECÁNICAS EN LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR DE LA UNIÓN SOLDADA DE LA ALEACIÓN 6261-T5.*
- [11] ASKELAND, Donald R.; FULAY, Pradeep P. y WRIGHT, Wendelin. (2011). *Ciencia e Ingeniería de Materiales.* México, D.F.: CENGAGE Learning.
- [12] ASM Handbook. (2002). *HEAT TREATING, ATLAS OF MICROSTRUCTURE.*
- [13] CALLISTER, William D. (2009). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales.* México, D.F.: Mc Graw Hill.

- [14] CALVAZOS GARCIA, Jose Luis. (2000). *Tratamiento termico de una aleación de aluminio 6063*.
- [15] CHENNAKESAVA, Reddy y KOTIVEERACHARI, B. (2010). Effect of Aging Condition on Structure and the Properties of Al-Alloy / Sic Composite.
- [16] GÜR, C y YILDIZ, I. (2002). Determining the Impact Toughness of Age-Hardened 2024 Al-Alloy by Nondestructive Measurements.
- [17] GUTIERREZ PULIDO, Humberto y SALAZ, Roman de la Vara. (2010). *Análisis y Diseño de Experimentos*. México: Mc GrawHill.
- [18] HOSSAIN, A y KURNY, W. (2013). Effect of Ageing Temperature on the Mechanical Properties of Al-6Si-0.5Mg Cast Alloys With Cu Additions Treated By T6 Heat Treatment.
- [19] L.A, Dobrzański; T, Tański Y J, Madejski . (2009). The Influence of the Heat Treatment on the Microstructure and Properties of Mg-Al-Zn Based Alloys.
- [20] MATERIALS, A. S. (2002). *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys (E-407)*.
- [21] MAZOUZ, Hamoudi; BENSADA, Said y MOHAMED TEWFIK, Bouziane. (2012). Influence of Thermomechanical Treatments on the Properties of Al-5.8%Zn-2.7%Mg Alloy.
- [22] MONSALVE, A y MORALES, R. (2003). Caracterización de la Respuesta a Fractura de las Aleaciones de Aluminio 2024 - 0 y 2024 - T3.
- [23] MONTEIRO A, Waldemar, et al. (2011). Microstructural and Mechanical Characterization after Thermomechanical Treatments in 6063 Aluminum Alloy.
- [24] MONTGOMERY, D. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. . Mexico.
- [25] NAIDU GURUGUGELLI, Swami . (2012). The Effect of Ageing on Impact Toughness and Microstructure of 2024 Al-Cu-Mg Alloy.
- [26] RADUTOIU, Nicoleta. (2012). Effect of the Over-ageing Treatment on the Mechanical Properties of AA2024 Aluminum Alloy.
- [27] SMITH, William F. y HASHEMI, Javad. (2002). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*. México, D.F.: Mc Graw Hill.
- [28] TALAT. (1999). *Precipitation Hardening*. Inglaterra.

- [29]** ZAID, R; HATAB, A y IBRAHIM, A. (2010). Properties Enhancement of Al-Zn-Mg Alloy by Retrogression and Re-Aging Heat Treatment.
- [30]** DIETER, George E. (1988). MECHANICAL METALLURGY, SI Metric Edition. Mc Graw Hill

Anexo A . (Tablas de Resultados, del Ensayo de Impacto)

Tabla 13. Tenacidad de las muestras en estado de entrega.

ESTADO DE ENTREGA					
N° Repetición	Tenacidad (J)	Media X	Desviación estándar	variación %	
1	28,2	28,393 J	0,634 J	2,23 %	
2	28,2				
3	27,73				
4	29,44				

Fuente: Autor del Proyecto

Tabla 14. Tenacidad de las muestras, con un tratamiento térmico de solución.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE SOLUCIÓN					
N° Repetición	Tenacidad (J)	Media X	Desviación estándar	Variación %	Aumento %
1	31,02	31,330 J	0,228 J	0,729 %	10,346 %
2	31,24				
3	31,42				
4	31,64				

Fuente: Autor del Proyecto

Tabla 15. Tenacidad de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 2 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 2 HORAS					
N° Repetición	Tenacidad (J)	Media X	Desviación estándar	Variación %	Aumento %
1	34,46	36,448 J	1,274 J	3,497 %	28,370 %
2	36,52				
3	36,81				
4	38				

Fuente: Autor del Proyecto

Tabla 16. Tenacidad de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 4 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 4 HORAS					
N° Repetición	Tenacidad (J)	Media X	Desviación estándar	Variación %	Aumento %
1	33,56	34,683 J	0,891 J	2,570 %	22,154 %
2	34,2				
3	35,04				
4	35,93				

Fuente: Autor del Proyecto

Tabla 17. Tenacidad de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 8 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 8 HORAS					
N° Repetición	Tenacidad (J)	Media X	Desviación estándar	Variación %	Aumento %
1	32,05	34,065 J	1,313 J	3,85 %	19,979 %
2	33,94				
3	34,62				
4	35,65				

Fuente: Autor del Proyecto

Tabla 18. Tenacidad de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 12 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 12 HORAS					
N° Repetición	Tenacidad (J)	Media X	Desviación estándar	Variación %	Aumento %
1	31,34	32,265 J	0,667 J	2,068 %	13,639 %
2	32,1				
3	32,42				
4	33,2				

Fuente: Autor del Proyecto.

Tabla 19. Tenacidad de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 24 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 24 HORAS					
N° Repetición	Tenacidad (J)	Media X	Desviación estándar	Variación %	Aumento %
1	32,12	32,950 J	0,541 J	1,642 %	16,052 %
2	32,86				
3	33,25				
4	33,57				

Fuente: Autor del Proyecto.

Tabla 20. Tenacidad de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 36 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 36 HORAS					
N° Repetición	Tenacidad (J)	Media X	Desviación estándar	Variación %	Aumento %
1	29,42	31,355 J	1,353 J	4,314 %	10,434 %
2	31,14				
3	31,65				
4	33,21				

Fuente: Autor del Proyecto.

Tabla 21. Tenacidad de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 48 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 48 HORAS					
N° Repetición	Tenacidad (J)	Media X	Desviación estándar	Variación %	Aumento %
1	31,15	32,043 J	0,789 J	2,461 %	12,856 %
2	31,55				
3	32,24				
4	33,23				

Fuente: Autor del Proyecto.

Tabla 22. Tenacidad de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 72 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 72 HORAS					
N° Repetición	Tenacidad (J)	Media X	Desviación estándar	Variación %	Aumento %
1	33,37	33,695 J	0,351 J	1,04 %	18,676 %
2	33,49				
3	33,64				
4	34,28				

Fuente: Autor del Proyecto.

Tabla 23. Tenacidad de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 96 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 96 HORAS					
N° Repetición	Tenacidad (J)	Media X	Desviación estándar	variación	Aumento
1	33,07	33,715 J	0,408 J	1,211 %	18,746 %
2	33,71				
3	33,9				
4	34,18				

Fuente: Autor del Proyecto.

Anexo B . (Tablas de los Resultados del Ensayo de Dureza)

Tabla 24. Dureza Vickers de la muestra en estado de entrega.

ESTADO DE ENTREGA				
N° Repetición	Microdureza (HV)	Media X	Desviación estándar	Variación %
1	117,675	121,694 HV	2,920 HV	2,40%
2	118,536			
3	118,536			
4	120,285			
5	120,285			
6	122,074			
7	123,903			
8	123,903			
9	125,396			
10	126,342			

Fuente: Autor del Proyecto.

Tabla 25. Dureza Vickers de la muestra, con un tratamiento térmico de solución.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE SOLUCIÓN A 515 °C					
N° Repetición	Microdureza (HV)	Media X	Desviación estándar	Variación %	Aumento %
1	92,604	103,562 HV	8,760 HV	8,46%	-14,90%
2	96,295				
3	96,295				
4	97,575				
5	98,880				
6	101,570				
7	105,091				
8	113,510				
9	113,510				
10	120,285				

Fuente: Autor del Proyecto.

Tabla 26. Dureza Vickers de la muestra, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 2 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 2 HORAS					
N° Repetición	Microdureza (HV)	Media X	Desviación estándar	Variación %	Aumento %
1	116,824	123,324 HV	5,127 HV	4,16%	1,34%
2	117,675				
3	118,536				
4	120,285				
5	121,175				
6	123,903				
7	125,773				
8	127,686				
9	127,686				
10	133,694				

Fuente: Autor del Proyecto.

Tabla 27. Dureza Vickers de la muestra, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 4 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 4 HORAS					
N° Repetición	Microdureza (HV)	Media X	Desviación estándar	Variación %	Aumento %
1	119,406	124,204 HV	4,443 HV	3,58%	2,06%
2	120,285				
3	120,285				
4	121,175				
5	122,074				
6	122,983				
7	125,773				
8	126,724				
9	129,643				
10	133,694				

Fuente: Autor del Proyecto.

Tabla 28. Dureza Vickers de la muestra, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 8 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 8 HORAS					
N° Repetición	Microdureza (HV)	Media X	Desviación estándar	Variación %	Aumento %
1	122,983	130,629 HV	5,822 HV	4,46%	7,34%
2	123,903				
3	125,773				
4	127,686				
5	129,643				
6	130,638				
7	131,645				
8	133,694				
9	137,938				
10	142,387				

Fuente: Autor del Proyecto.

Tabla 29. Dureza Vickers de la muestra, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 12 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 12 HORAS					
N° Repetición	Microdureza (HV)	Media X	Desviación estándar	Variación %	Aumento %
1	127,686	135,347 HV	5,882 HV	4,35%	11,22%
2	128,659				
3	129,643				
4	131,645				
5	133,694				
6	134,736				
7	137,938				
8	142,387				
9	142,387				
10	144,693				

Fuente: Autor del Proyecto.

Tabla 30. Dureza Vickers de la muestra, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 24 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 24 HORAS					
N° Repetición	Microdureza (HV)	Media X	Desviación estándar	Variación %	Aumento %
1	140,136	147,293 HV	4,831 HV	3,28%	21,04%
2	142,387				
3	143,533				
4	144,693				
5	144,693				
6	147,055				
7	149,476				
8	151,957				
9	154,500				
10	154,500				

Fuente: Autor del Proyecto.

Tabla 31. Dureza Vickers de la muestra, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 36 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 36 HORAS					
N° Repetición	Microdureza (HV)	Media X	Desviación estándar	Variación %	Aumento %
1	142,387	147,970 HV	3,854 HV	2,60%	21,59%
2	144,693				
3	144,693				
4	145,867				
5	147,055				
6	147,055				
7	149,476				
8	149,476				
9	154,500				
10	154,500				

Fuente: Autor del Proyecto.

Tabla 32. Dureza Vickers de la muestra, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 48 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 48 HORAS					
N° Repetición	Microdureza (HV)	Media X	Desviación estándar	Variación %	Aumento %
1	127,686	136,261 HV	5,317 HV	3,90%	11,97%
2	131,645				
3	133,694				
4	135,791				
5	135,791				
6	135,791				
7	136,858				
8	137,938				
9	137,938				
10	149,476				

Fuente: Autor del Proyecto.

Tabla 33. Dureza Vickers de la muestra, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 72 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 72 HORAS					
N° Repetición	Microdureza (HV)	Media X	Desviación estándar	Variación %	Aumento %
1	127,686	131,575 HV	2,327 HV	1,77%	8,12%
2	128,659				
3	129,643				
4	131,645				
5	131,645				
6	131,645				
7	131,645				
8	133,694				
9	133,694				
10	135,791				

Fuente: Autor del Proyecto.

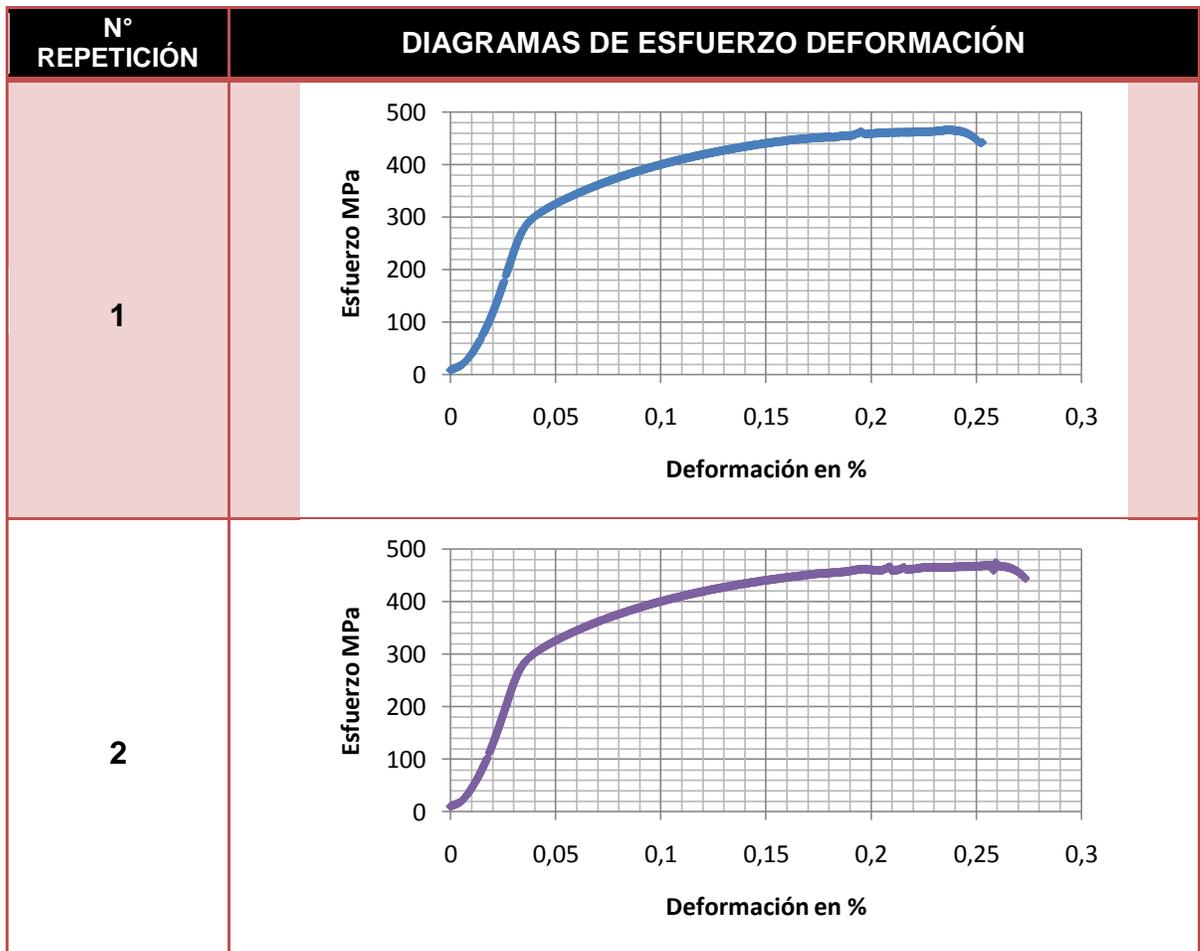
Tabla 34. Dureza Vickers de la muestra, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 96 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 96 HORAS					
N° Repetición	Microdureza (HV)	Media X	Desviación estándar	Variación %	Aumento %
1	127,686	131,286 HV	2,820 HV	2,15%	7,88%
2	127,686				
3	127,686				
4	129,643				
5	131,645				
6	131,645				
7	133,694				
8	133,694				
9	133,694				
10	135,791				

Fuente: Autor del Proyecto.

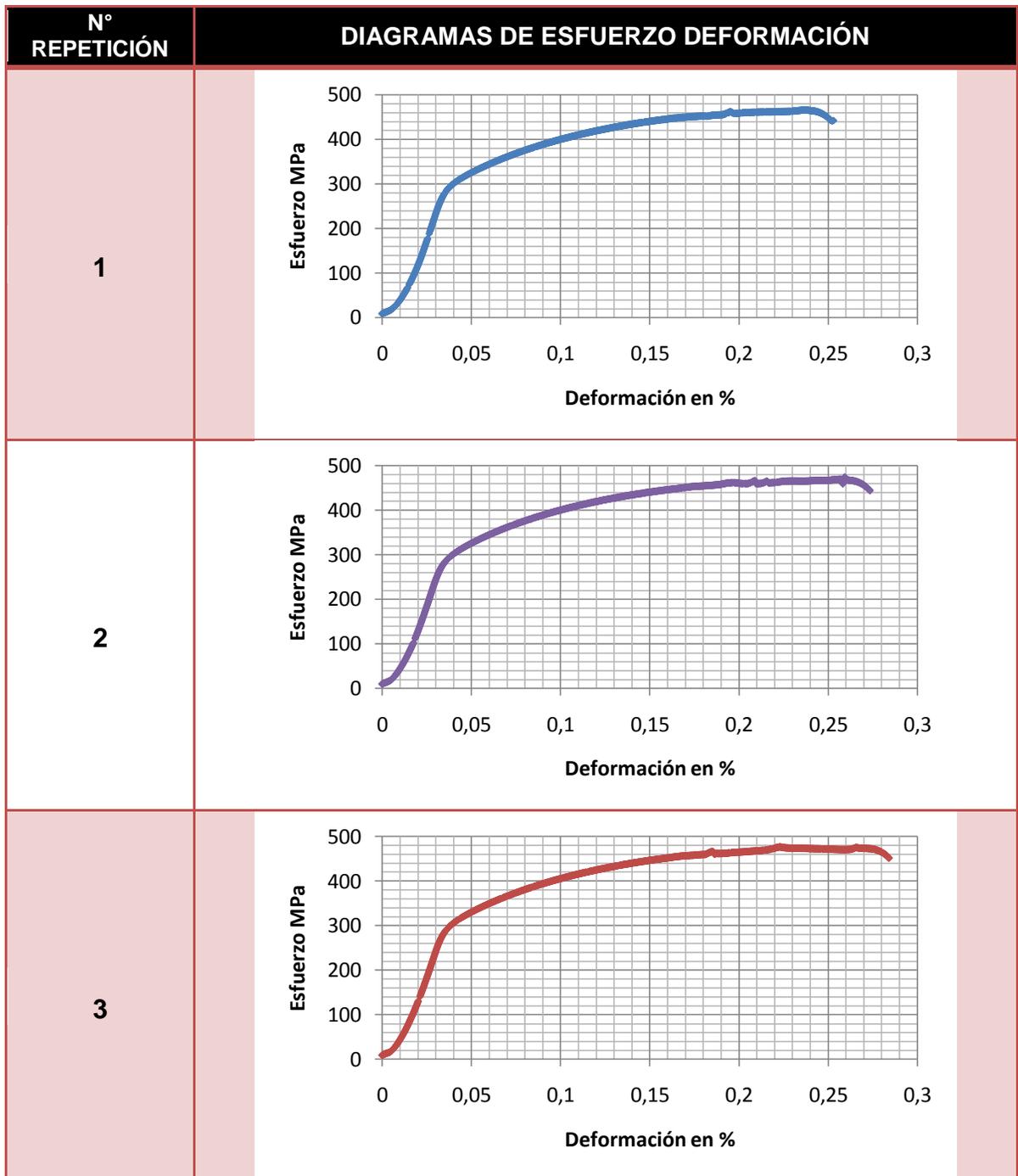
**Anexo C . (Diagramas de Esfuerzo Deformación Para el Aluminio 2024 T4
Envejecido a 180 °C)**

Figura 21. Diagramas de esfuerzo deformación de la aleación de aluminio 2024 T4, en estado de entrega.



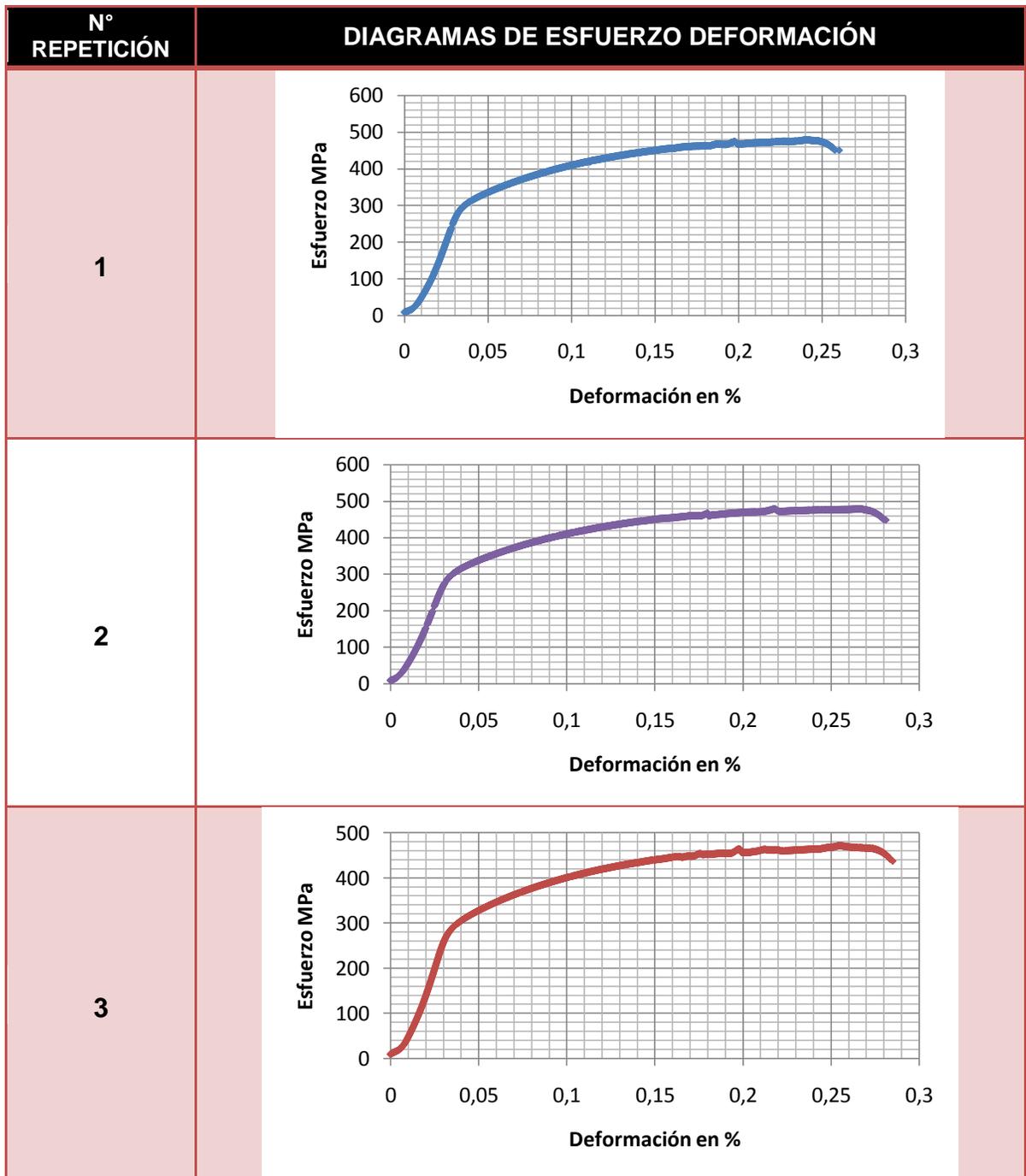
Fuente: Autor del Proyecto.

Figura 22. Diagramas de esfuerzo deformación de la aleación de aluminio 2024 T4, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 2 h.



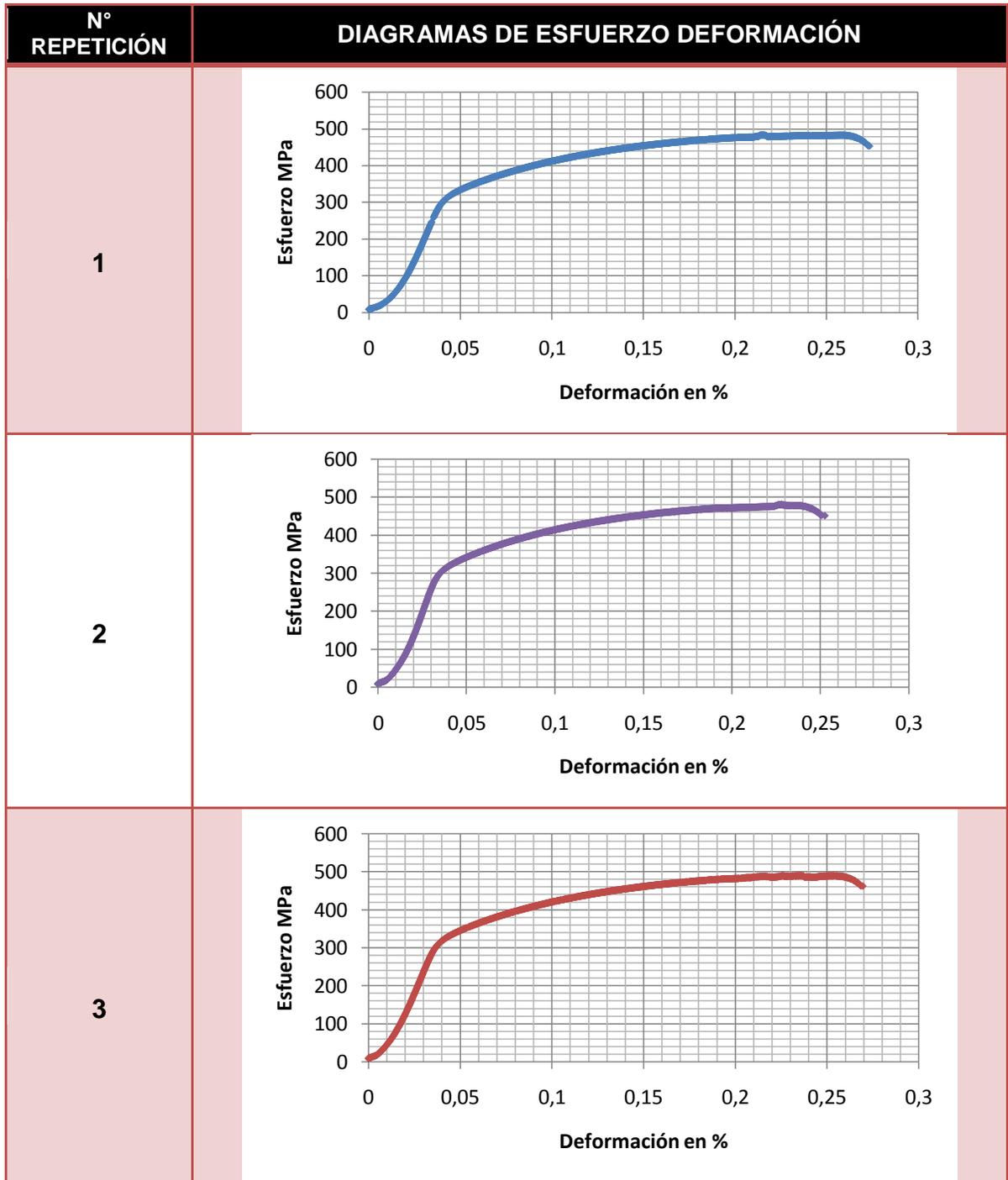
Fuente: Autor del Proyecto.

Figura 23. Diagramas de esfuerzo deformación de la aleación de aluminio 2024 T4, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 4 h.



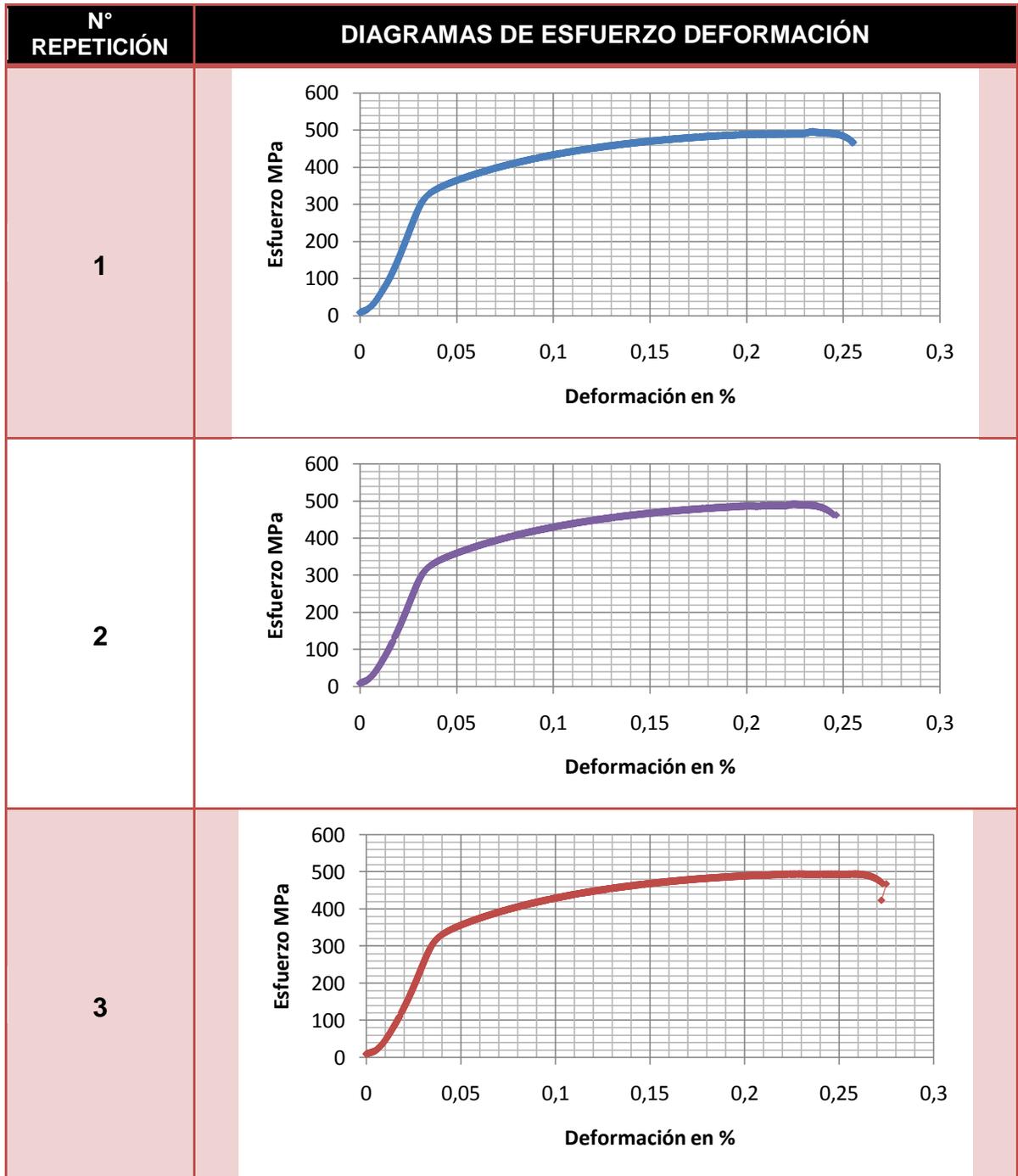
Fuente: Autor del Proyecto.

Figura 24. Diagramas de esfuerzo deformación de la aleación de aluminio 2024 T4, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 8 h.



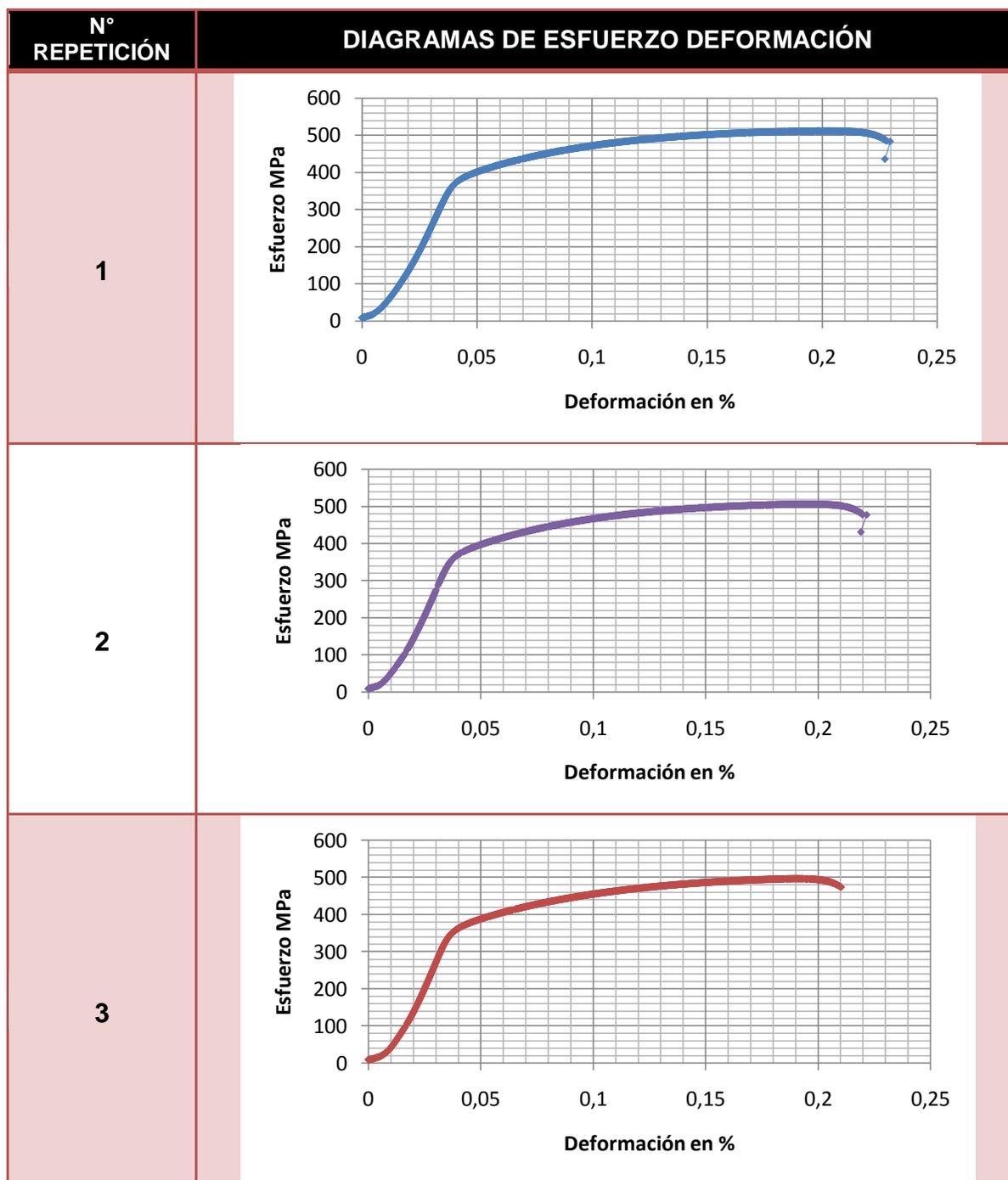
Fuente: Autor del Proyecto.

Figura 25. Diagramas de esfuerzo deformación de la aleación de aluminio 2024 T4 con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 12 h.



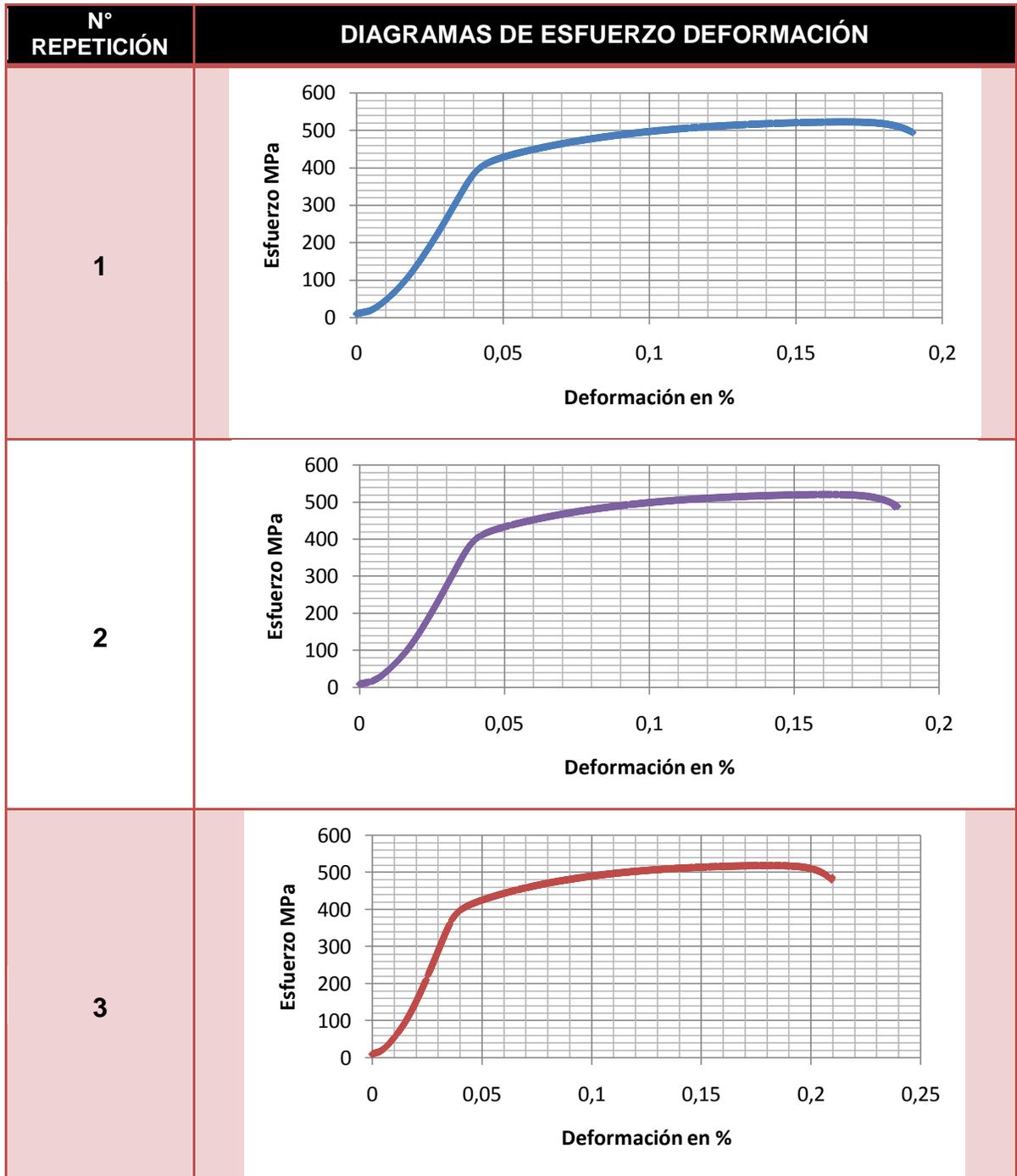
Fuente: Autor del Proyecto.

Figura 26. Diagramas de esfuerzo deformación de la aleación de aluminio 2024 T4, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 24 h.



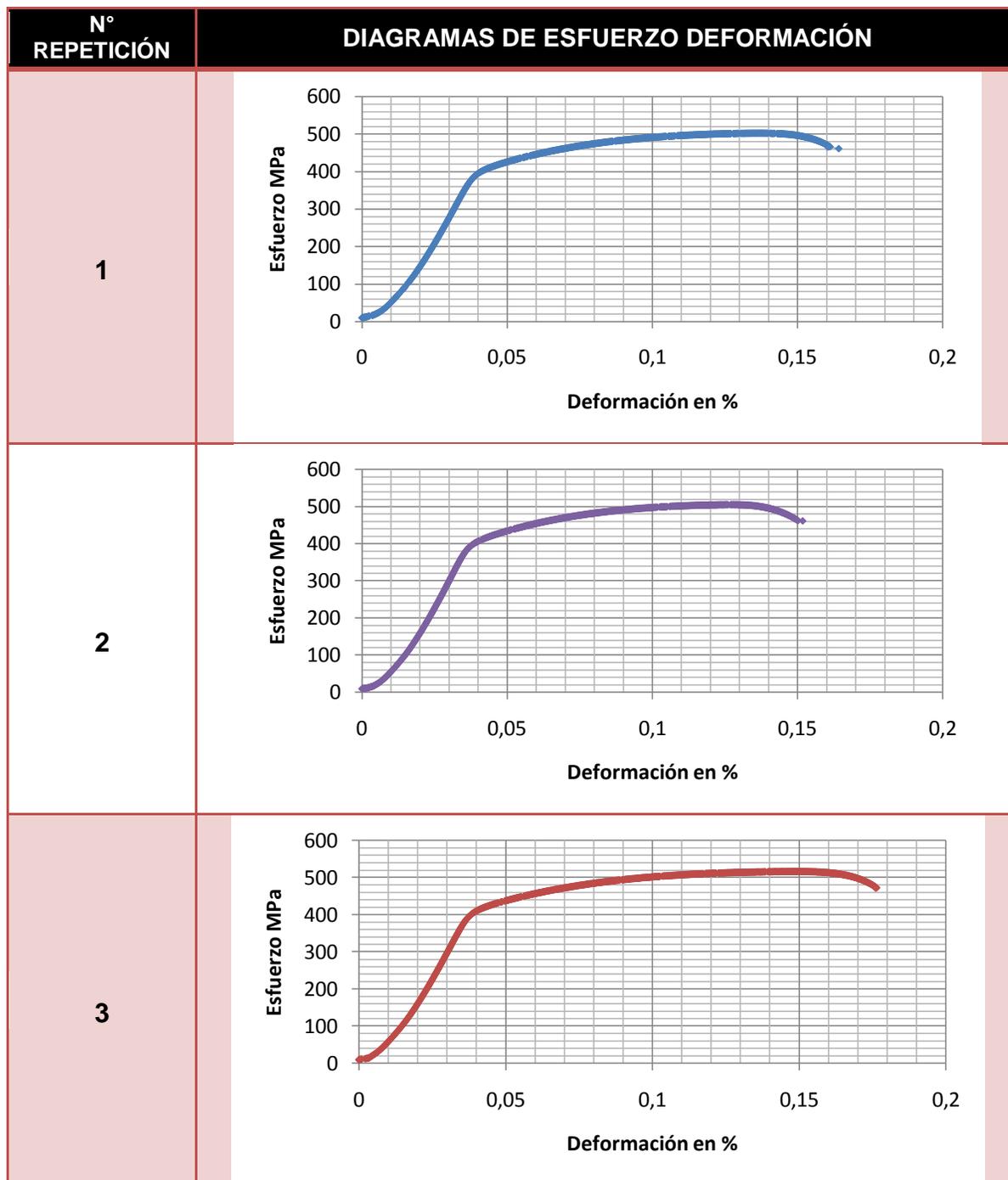
Fuente: Autor del Proyecto.

Figura 27. Diagrama de esfuerzo deformación de la aleación de aluminio 2024 T4 con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 36 h.



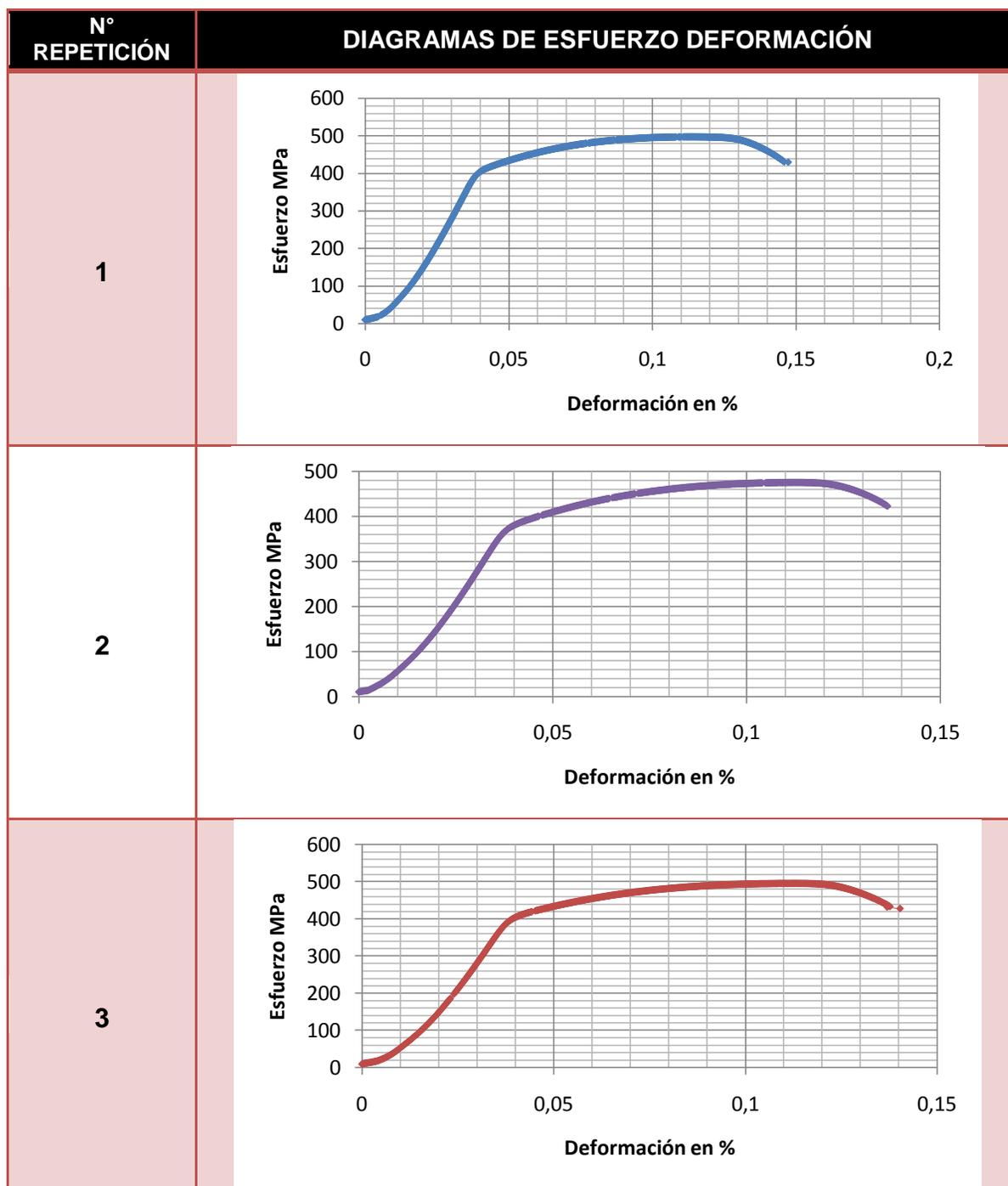
Fuente: Autor del Proyecto.

Figura 28. Diagrama de esfuerzo deformación de la aleación de aluminio 2024 T4, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 48 h.



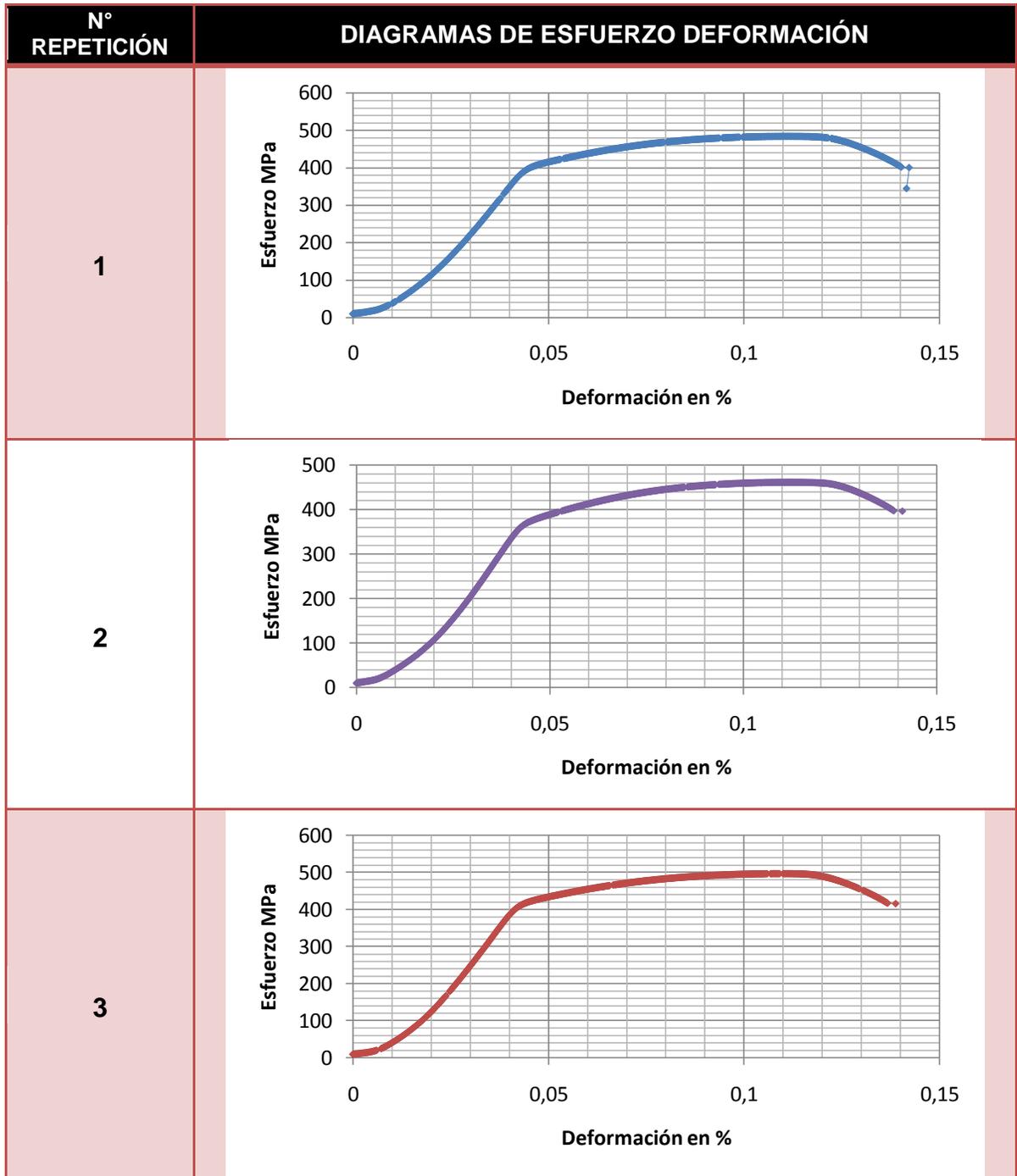
Fuente: Autor del Proyecto.

Figura 29. Diagrama de esfuerzo deformación de la aleación de aluminio 2024 T4, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 72 h.



Fuente: Autor del Proyecto.

Figura 30. Diagrama de esfuerzo deformación de la aleación de aluminio 2024 T4, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 96 h.



Fuente: Autor del Proyecto.

Anexo D . (Resultados de los Ensayos de Tensión)

Tabla 35. Resultados del ensayo de tensión de las muestras en estado de entrega.

ESTADO DE ENTREGA			
N° Repetición	Limite de Elasticidad [MPa]	Esfuerzo Máximo [MPa]	% de Elongación
1	347,506	474,594	20,4
2	313,78	450,159	24,82
3	339,513	460,859	21,185
Media X	333,600 MPa	461,871 MPa	22,135 %
Desviación estándar	14,389 MPa	10,001 MPa	1,925 %
Variación %	4,313%	2,165%	8,699%

Fuente: Autor del Proyecto.

Tabla 36. Resultados del ensayo de tensión de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 2 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 2 HORAS			
N° Repetición	Limite de Elasticidad [MPa]	Esfuerzo Máximo [MPa]	% de Elongación
1	291,748	465,031	21,176
2	289,113	474,256	23,592
3	296,36	475,969	23,529
Media X	292,407 MPa	471,752 MPa	22,745 %
Desviación estándar	2,995 MPa	4,804 MPa	1,109 %
Variación %	1%	1%	4,877 %
Aumento %	-12,348%	2,139%	2,756 %

Fuente: Autor del Proyecto.

Tabla 37. Resultados del ensayo de tensión de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 4 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 4 HORAS			
N° Repetición	Limite de Elasticidad [MPa]	Esfuerzo Máximo [MPa]	% de Elongación
1	297,941	479,131	19,294
2	300,577	478,209	20,187
3	288,322	471,225	18,47
Media X	295,613 MPa	476,188 MPa	19,317 %
Desviación estándar	5,267 MPa	3,530 MPa	0,701 %
Variación %	1,782%	0,741%	4 %
Aumento %	-11,387%	3,100%	-12,730 %

Fuente: Autor del Proyecto.

Tabla 38. Resultados del ensayo de tensión de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 8 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 8 HORAS			
N° Repetición	Limite de Elasticidad [MPa]	Esfuerzo Máximo [MPa]	% de Elongación
N° muestra	315,336	483,348	18,8235
1	306,507	481,24	18,8235
2	317,181	488,355	20
3	313,008 MPa	484,314 MPa	19,216 %
Media X	4,658 MPa	2,984 MPa	0,555 %
Desviación estándar	1%	1%	3%
Variación %	-6,173%	4,859%	-13,189%

Fuente: Autor del Proyecto.

Tabla 39. Resultados del ensayo de tensión de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 12 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 12 HORAS			
N° Repetición	Limite de Elasticidad [MPa]	Esfuerzo Máximo [MPa]	% de Elongación
1	331,807	495,735	21,1764
2	329,831	490,859	20
3	330,622	493,495	22,3529
Media X	330,753 MPa	493,363 MPa	21,176 %
Desviación estándar	0,812 MPa	1,993 MPa	0,961 %
Variación %	0,25%	0,40%	4,54%
Aumento %	-0,853%	6,818%	-4,331%

Fuente: Autor del Proyecto.

Tabla 40. Resultados del ensayo de tensión de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 24 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 24 HORAS			
N° Repetición	Limite de Elasticidad [MPa]	Esfuerzo Máximo [MPa]	% de Elongación
1	377,138	511,679	16,4705
2	365,674	505,486	16,4705
3	354,736	495,735	16,4705
Media X	365,849 MPa	504,300 MPa	16,471 %
Desviación estándar	9,146 MPa	6,563 MPa	0,000 %
Variación %	2,50%	1,30%	0,00%
Aumento %	9,667%	9,186%	-25,591%

Fuente: Autor del Proyecto.

Tabla 41. Resultados del ensayo de tensión de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 36 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 36 HORAS			
N° Repetición	Limite de Elasticidad [MPa]	Esfuerzo Máximo [MPa]	% de Elongación
1	408,632	522,485	9,41177
2	410,872	520,245	10,5882
3	397,036	518,664	14,1176
Media X	405,513 MPa	520,465 MPa	11,373 %
Desviación estándar	6,064 MPa	1,568 MPa	2 %
Variación %	1,50%	0,30%	17,58%
Aumento %	21,557%	12,686%	-48,622%

Fuente: Autor del Proyecto.

Tabla 42. Resultados del ensayo de tensión de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 48 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 48 HORAS			
N° Repetición	Limite de Elasticidad [MPa]	Esfuerzo Máximo [MPa]	% de Elongación
1	401,121	502,455	10,5882
2	404,415	504,695	10,5882
3	410,609	515,501	12,9411
Media X	405,382 MPa	507,550 MPa	11,373 %
Desviación estándar	3,933 MPa	5,696 MPa	1,109 %
Variación %	0,97%	1,12%	9,75%
Aumento %	21,517%	9,890%	-48,622%

Fuente: Autor del Proyecto.

Tabla 43. Resultados del ensayo de tensión de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 72 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 72 HORAS			
N° Repetición	Limite de Elasticidad [MPa]	Esfuerzo Máximo [MPa]	% de Elongación
1	412,717	497,448	9,41177
2	383,2	475,705	9,41177
3	409,818	494,812	9,41177
Media X	401,912 MPa	489,322 MPa	9,412 %
Desviación estándar	13,284 MPa	9,688 MPa	0,000 %
Variación %	3,31%	1,98%	0,00%
Aumento %	20,477%	5,943%	-57,480%

Fuente: Autor del Proyecto.

Tabla 44. Resultados del ensayo de tensión de las muestras, con un tratamiento térmico de envejecido a 180 °C y con un tiempo de sostenimiento de 96 h.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIDO A 180° C, CON UN TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DE 96 HORAS			
N° Repetición	Limite de Elasticidad [MPa]	Esfuerzo Máximo [MPa]	% de Elongación
1	408,368	484,139	9,41177
2	376,084	461,473	10,5882
3	420,623	496,657	9,41177
Media X	401,692 MPa	480,756 MPa	9,804 %
Desviación estándar	18,786 MPa	14,562 MPa	0,555 %
Variación %	4,68%	3,03%	5,66%
Aumento %	20,411%	4,089%	-55,709%

Fuente: Autor del Proyecto.

Anexo E . (Factura Del Material De Estudio)



DESVARE AEREO S.A.

Elementos y Suministros Aeronáuticos
NIT. 830.025.735-4

Calle 22J No. 97-44, Bogotá - Colombia Tel 1-57-1-2988962 / 1-57-1-2981992
ventas@desvareaereo.com - desvareaereo@etb.net.co

COTIZACIÓN

Cotización No. **8312**

Fecha **2-sep-13**

CLIENTE VICENTE RICO SUAREZ

Forma de pago Contado
Vendedor Javier Caro

Validez de la cotización 30 Días
Tiempo de entrega Según cuadro adjunto

ITEM	P/N	DESCRIPCION	CANT.	U/M	TIEMPO DE ENTREGA	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1	2024T4	PLATINA 1"X 1/4 X 6FT	12	MT	2 SEMANAS	\$67.800	\$813.600
2	2024T351	BARRA CUADRADA 1/2 X 6FT	12	MT	2 SEMANAS	\$55.200	\$662.400

OBSERVACIONES

- MATERIAL SUJETO A PREVIA VENTA

SUBTOTAL \$1.476.000
IVA 16% \$236.160

TOTAL \$ 1.712.160

Fuente: DESVARE AEREO S.A.

Anexo F . (Certificado de la aleación de aluminio 2024 T4, con el cual se va a realizar el proyecto.)

Customer Name: Desvare Aereo S.A. Customer PO#: DESVARE20150106 Shipper No: 395175 Heat Number: 980711000510



YE FONG ALUMINIUM INDUSTRIAL LTD.
 No. 272, Huakang Street, Dada City, Taoyuan County 334, Taiwan R.O.C.
 Tel: +886-3-3755533 Fax: +886-3-3766587 Email:alu@ye-fong.com



MILL CERTIFICATE

Sold by: Ye Fong Aluminium Industrial Ltd.
 Ship to: CHANNEL ALLOYS
 Order No.:45575
 Material: 2024-T4
 Quantity: 564pcs (2,033.12lbs)
 Lot No.: 9807110005-10
 Specification: ASTM-D-211-03; QQA 225/6E; AMS-QQA-225/6A; AMS 4120R

Y.F. ALUMINIUM INDUSTRIAL LTD. CERTIFICATE
 THIS IS A TRUE AND CORRECT COPY OF ORIGINAL
 MILL CERTIFICATE FOR THE ABOVE
 RECEIVED BY CHANNEL ALLOYS
 SEP 03 2009
 BY: [Signature]
 P.O. Box 1000510

No.	Contents	Requirement	Unit								
1	Dimension	FL 0.250 in.X1.000 in.X12 ft									
2	Tensile Strength	≥ 62.0	ksi								
3	Yield Strength	≥ 45.0	ksi								
4	Elongation	≥ 10	%								
5	Hardness	----									
6	Chemical Composition										
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Other Max	Other Total	Al
	≤ 0.50	≤ 0.50	3.80-4.90	0.30-0.90	1.20-1.80	≤ 0.10	≤ 0.25	≤ 0.15	0.05	0.15	Rem

Remark: We certify that the material is free from mercury contamination.

No.	Contents	Measurement	Unit								
1	Dimension	FL 0.251 in.X1.002 in.X12 ft									
2	Tensile Strength	65.29	ksi								
3	Yield Strength	45.51	ksi								
4	Elongation	24.82	%								
5	Hardness	----									
6	Chemical Composition										
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Other Max	Other Total	Al
	0.189	0.126	4.09	0.449	1.43	0.012	0.094	0.026	0.0106	0.0268	Rem

Checked by: S. H. Wu
 Date: 30th Dec 2009
 Signature: [Signature]

Approved by: S. S. Yang
 Date: 30th Dec 2009
 Signature: [Signature]

Verified by: K.K. Yang
 Date: 30th Dec 2009
 Signature: [Signature]
 Company: [Signature]



Only Stamped Certificate Valid

Fuente: DESVARE AEREO S.A.

Anexo G . (Análisis de la composición química, del material adquirido en el DESVARE AÉREO S.A.)

```

FIRMA ANALISTA
ANALISTA : JHON JAIRO CASTAÑEDA RODRIGUEZ
FIRMA JEFE LAB
JEFE LABORATORIO : ING. EDGAR ESPINO MORA
REFERENCIA : MUESTRA AL
Alloy : ALUMIN2 Node #50 27-Apr-2016 Time 15:38

Burn 1
Al 93.978 Si 0.174 Fe 0.147 Cu 3.923 Mn 0.466
Mg 1.166 Ni 0.003 Zn 0.083 Sn 0.003 Ti 0.026
Pb 0.007 Cr 0.013 V 0.011 Co 0.001

Burn 2
Al 93.567 Si 0.183 Fe 0.143 Cu 4.077 Mn 0.488
Mg 1.365 Ni 0.003 Zn 0.086 Sn 0.006 Ti 0.027
Pb 0.004 Cr 0.014 V 0.012 Co 0.002

Burn 3
Al 93.894 Si 0.177 Fe 0.139 Cu 3.936 Mn 0.473
Mg 1.254 Ni 0.002 Zn 0.083 Sn 0.004 Ti 0.026
Pb 0.007 Cr 0.013 V 0.011 Co 0.001

Average
Al 93.820 Si 0.178 Fe 0.143 Cu 3.979 Mn 0.475
Mg 1.255 Ni 0.003 Zn 0.084 Sn 0.004 Ti 0.026
Pb 0.007 Cr 0.013 V 0.012 Co 0.001
    
```

```

STORE DATA : 2707
ORDEN DE TRABAJO : INTERNA
COMPANIA : ESTUDIANTE
ENTERANTE : MARICIO SIERRA
FIRMA ANALISTA
ANALISTA : JHON JAIRO CASTAÑEDA RODRIGUEZ
FIRMA JEFE LAB
JEFE LABORATORIO : ING. EDGAR ESPINO MORA
REFERENCIA : MUESTRA AL
Alloy : ALUMIN2 Node #50 27-Apr-2016 Time 15:31

Number of burns : 3
Element Average S.D. F.S.D. Minimum Maximum
Al (%) 93.820 0.2064 0.2 93.567 93.978
Si (%) 0.178 0.0047 2.7 0.174 0.183
Fe (%) 0.143 0.0039 2.7 0.139 0.147
Cu (%) 3.979 0.0951 2.3 3.923 4.077
Mn (%) 0.475 0.0115 2.3 0.466 0.488
Ni (%) 0.003 0.0003 12.0 0.003 0.003
Zn (%) 0.084 0.0019 2.5 0.083 0.086
Sn (%) 0.004 0.0015 35.1 0.003 0.006
Ti (%) 0.026 0.0005 1.9 0.026 0.027
Pb (%) 0.007 0.0009 11.9 0.007 0.009
Cr (%) 0.013 0.0003 1.9 0.013 0.014
V (%) 0.012 0.0007 5.9 0.011 0.012
Co (%) 0.001 0.0007 61.7 0.001 0.002
    
```

Fuente: Autor del Proyecto.

Anexo H . (Factura del Abrasivo)

Testek de Colombia S.A.S. Calle 41 No 20-39 Bogotá D.C. Phone: 8023687 Fax: 7514380	Fecha 28/01/2016 Oferta No. TPRC00216	
--	--	--

Vicente Rico Suárez Estudiante Universidad Libre Calle 12 N° 26ª-20 Bogota - Colombia	Tel: Cel: 315-4401684 Fax: Correo: vicente.rico.suarez@gmail.com
--	---

Consumibles Metalografía

Cant	Referencia	Descripción	Valor unitario	Valor total
ALUMINAS				
1	0012008	Suspensión SPM 0,03 µ presentación por 1 litro. (Cristalina)	\$ 174.458	\$ 174.458
1	0012045	Suspensión SPM 0,03 µ presentación por 1 litro (No cristalina)	\$ 189.628	\$ 189.628
Sub Total				\$ 364.086
IVA 16,000%				\$ 58.254
TOTAL				\$ 422.339

**TERMINOS Y CONDICIONES GENERALES APLICABLES A LAS OFERTAS
DE LA EMPRESA TESTEK DE COLOMBIA S.A.S.**

CONDICIONES COMERCIALES

Validez: 30 días
Precio y Moneda: Pesos colombianos.
Plazo de entrega: 2 a 3 semanas.
Forma de pago: Anticipado
Garantía: 1 año contra defectos de fábrica más no por mal manejo.
Lugar de entrega: Oficinas Cliente

Fuente: Testek