



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas

Academia de Metalurgia - Ingeniería Metalúrgica

**“EFECTO DEL TRABAJO EN FRÍO (%CW) SOBRE LOS
PARÁMETROS MECÁNICOS DE LAS ALEACIONES A6061-O Y
A6061-T6”**

CURRICULAR

Que para obtener el título de ingeniero metalúrgico

PRESENTA

Luis Javier Dávila Sánchez

Asesor:

Dr. Alfonso Nájera Bastida

Co-asesores:

Dr. Miguel Fernando Delgado Pámanes

Ing. Javier Ramírez Mora

Ing. Addried Samir Moreno Castro

Zacatecas, Zac; Abril de 2022



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE INGENIERÍA ZACATECAS



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"



Unidad Profesional Interdisciplinaria
de Ingeniería Zacatecas

Folio
UPIIZ/ESA/103/2022

100 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura
50 Aniversario de la UPIICSA
50 Aniversario del CECYT 10 "Carlos Vallejo Márquez"
25 Aniversario del CIECAS, CIITEC y del CIDIR, Unidad Sinaloa

Asunto
DESIGNACIÓN
LUIS JAVIER DÁVILA SÁNCHEZ
INGENIERÍA METALÚRGICA
BOLETA: 2017670251
GENERACIÓN: 2017-2021

Zacatecas, Zac., a 04 de abril de 2022

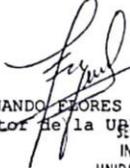
C. LUIS JAVIER DÁVILA SÁNCHEZ
PRESENTE

Mediante el presente se hace de su conocimiento que este Departamento acepta que el Dr. Alfonso Nájera Bastida se el Asesor y el Dr. Miguel Fernando Delgado Pamanes el Co-Asesor, en el tema que propone usted a desarrollar como prueba escrita de la opción Curricular, con el título y contenido siguiente:

"Efecto del trabajo en frío (%CW) sobre los parámetros mecánicos de las aleaciones A6061-O y A6061-T6".

Se concede un plazo de máximo de un año, a partir de esta fecha, para presentarlo a revisión por el jurado asignado.


L.C. María Monserrat Saldaña Noriega
Jefa del Departamento de Evaluación
y Seguimiento Académico


DR. FERNANDO FLORES MEJÍA
Director de la UPIIZ

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA
DE INGENIERÍA ZACATECAS
DIRECCIÓN

Calle Circuito del Gato No. 202, Col. Ciudad Administrativa, Zacatecas, Zac. C.P. 98160
Tel/Fax: (01-492) 9242419 y 9255998, Correo Electrónico: zacatecas@ipn.mx





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE INGENIERÍA ZACATECAS



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"



Unidad Profesional Interdisciplinaria
de Ingeniería Zacatecas

100 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura
50 Aniversario de la UPHICSA
50 Aniversario del CECyT 10 "Carlos Vallejo Márquez"
25 Aniversario del CIECAS, CHTEC y del CHDIR, Unidad Sinaloa

Folio
UPIIZ/ESA/104/2022

Asunto
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN
LUIS JAVIER DÁVILA SÁNCHEZ
INGENIERÍA METALÚRGICA
BOLETA: 2017670251
GENERACIÓN: 2017-2021

Zacatecas, Zac., a 08 de abril de 2022

El suscrito tengo el agrado de informar a usted, que habiendo procedido a revisar el trabajo de titulación que presenta con fines de titulación denominada:

"Efecto del trabajo en frío (%CW) sobre los parámetros mecánicos de las aleaciones A6061-O Y A6061-T6"

Encontré que el citado Trabajo de Titulación, reúne los requisitos para autorizar la impresión y proceder a la presentación del Examen Profesional debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se hicieron.

Dr. Alfonso Najera Bastida

Dr. Miguel Fernando Delgado Pamanes

Calle Circuito del Gato No. 202, Col. Ciudad Administrativo, Zacatecas, Zac. C.P. 98160
Tel/Fax: (01-492) 9242419 y 9255998, Correo Electrónico: zacatecas@ipn.mx





Autorización de uso de obra

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Presente

Bajo protesta de decir verdad, el que suscribe: Luis Javier Dávila Sánchez, estudiante del programa de Ingeniería Metalúrgica, con número de boleta 2017670251, adscrito a la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas; manifiesto ser autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada “Efecto del trabajo en frío (%CW) sobre los parámetros mecánicos de las aleaciones A6061-O y A6061-T6”, en adelante “El trabajo de titulación” y del cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el Artículo 27 Fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo al Instituto Politécnico Nacional, en adelante el “IPN”, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales “El trabajo de titulación” por un periodo indefinido a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso al “IPN” de su terminación.

En virtud de lo anterior, el “IPN” deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor del “El trabajo de titulación”.

Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de “El trabajo de titulación”, manifiesto que la misma es original y que la presente autorización no contraviene a ninguna otra otorgada por el suscrito respecto de “El trabajo de titulación”, por lo que deslindo de toda responsabilidad al “IPN” en caso de que el contenido de “El trabajo de titulación” o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Zacatecas, Zac., a 12 de Abril de 2022

Atentamente

Luis Javier Dávila Sánchez



AGRADECIMIENTOS

Al **Instituto Politécnico Nacional**, específicamente a la **UPIIZ** por brindarme las facilidades para cursar la licenciatura en ingeniería metalúrgica, y con ello, la oportunidad de vivir una de las experiencias más importantes de mi vida y mi carrera profesional.

A mi **Madre** por regalarme su cariño, su esfuerzo y sudor, durante todos estos años sin esperar nada a cambio, más allá de la satisfacción de lograr el bienestar mío y de mis hermanos; y por enseñarme que, incluso en los momentos de mayor adversidad, se puede sonreír y disfrutar de la vida.

A mi **Padre** quien, a pesar de todas sus dificultades, nunca me negó su ayuda, su amor ni sus consejos, y jamás dudó en sacrificar cualquier cosa para verme crecer y vivir con las facilidades y ventajas que él no tuvo.

A mis **Familiares y hermanos** que ayudaron a moldear la persona que soy el día de hoy, y forman parte esencial de los pilares de mi vida y de los recuerdos más felices de mi infancia, pubertad y adultez.

A mi **Pareja** por compartir sus días conmigo y crear tantos momentos tan valiosos que recordaré por el resto de mi vida, por ayudarme a encontrar y desarrollar la mejor versión de mi persona, y por estar a mi lado y apoyarme en los momentos difíciles.

Por último, quiero agradecer a todos mis **Amigos y Compañeros**, con quienes compartí tantos momentos, tanto alegres como tristes, tantas risas y emociones que le dieron el verdadero significado a pertenecer a esta institución, y quienes ocasionan que, cada vez que vuelvo a pisar mi casa de estudios, no pueda evitar sentir una profunda nostalgia.



RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se presentan los efectos que tienen diferentes porcentajes de trabajado en frío (%CW) mediante el proceso de laminación; sobre los parámetros mecánicos de: Resistencia máxima, esfuerzo de cedencia, modulo elástico, esfuerzo a la ruptura y ductilidad. La evaluación del trabajado en frío se dividió en dos etapas: La primera donde se trabajó con una aleación de aluminio pre templada A6061-O y la segunda donde se trabajó con la misma aleación templada A6061-T6.

Palabras clave: trabajo en frío, laminación, aluminio, parámetros mecánicos.

ABSTRACT

In the present research, the effect of the different percentages of cold work (%CW) are evaluated over the mechanical properties: Ultimate tensile strength, yield stress, modulus of elasticity, breaking strain and ductility for two types of aluminum alloys by the lamination process. The first stage of the research focuses on the pre-tempered aluminum alloy A6061-O, and the second stage of the research focuses on the tempered aluminum alloy A6061-T6.

Key words: cold work, lamination, aluminum, mechanical properties.



ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	MARCO TEÓRICO	2
2.1	Endurecimiento por deformación	2
2.2	Proceso de laminación	4
2.3	Aluminio 6061 (A6061).....	5
2.3.1	Propiedades mecánicas del A6061-O	6
2.3.2	Propiedades mecánicas del A6061-T6	6
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
4.	JUSTIFICACIÓN.....	9
5.	OBJETIVOS.....	10
6.	HIPÓTESIS	11
7.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	12
7.1	Primera Etapa	12
7.2	Segunda Etapa.....	13
8.	CRONOGRAMA	16
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	18



1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se utilizan diversos métodos para mejorar los parámetros mecánicos de una infinidad de aleaciones metálicas, entre estos se encuentra la laminación en frío, que permite mejorar las propiedades de ciertos materiales hasta lograr que soporten esfuerzos muy altos y volverlos esenciales para diferentes ramas de la industria.

La aleación de aluminio 6061 tiene la capacidad de ser endurecida por precipitación, contiene como principales elementos de aleación al magnesio y al silicio. Originalmente denominado "aleación 61S" fue desarrollada en 1935. Tiene buenas propiedades mecánicas y para su uso en soldaduras. Es una de las aleaciones de aluminio más comunes para uso general. Se emplea comúnmente en formas pre templadas como el 6061-O y las templadas como el 6061-T6 y 6061-T651.

Esta aleación es usada en todo el mundo para los moldes de inyección y soplado, construcción de estructuras de aeronaves, como las alas y el fuselaje de aviones comerciales y de uso militar; en refacciones industriales, en la construcción de yates, incluidos pequeñas embarcaciones, en piezas de automóviles, en la manufactura de latas de aluminio para el empaquetado de comida y bebidas. (Murtha J; 1995.)

De acuerdo con todo lo anterior, en el presente proyecto se tiene como propósito realizar gráficas que muestren el cambio de los parámetros mecánicos (resistencia máxima, esfuerzo de fluencia, modulo elástico, esfuerzo a la ruptura y ductilidad) en función del % de trabajo en frío (%CW) mediante el proceso de laminación.



2. MARCO TEÓRICO

2.1 Endurecimiento por deformación

El endurecimiento por deformación es el fenómeno por el cual un metal dúctil se vuelve más duro y más fuerte a medida que se deforma plásticamente. A veces también se le llama endurecimiento por trabajo o, debido a que la temperatura a la que tiene lugar la deformación es "fría" en relación con la temperatura de fusión absoluta del metal, trabajo en frío. La mayoría de los metales se endurecen por deformación a temperatura ambiente.

A veces es conveniente expresar el grado de deformación plástica como porcentaje de trabajo en frío en lugar de esfuerzo. El porcentaje de trabajo en frío (% CW) se define como:

$$\%CW = \left(\frac{A_0 - A_d}{A_0} \right) \times 100$$

Donde A_0 es el área original de la sección transversal que experimenta deformación y A_d es el área después de la deformación. Las Figuras 1a y 1b demuestran cómo el acero, el latón y el cobre aumentan el límite de fluencia y la resistencia a la tracción con el aumento del trabajo en frío. El costo de esta mejora de dureza y resistencia está en la ductilidad del metal. Esto se muestra en la Figura 1c, en la cual la ductilidad, en porcentaje de alargamiento, experimenta una reducción con el aumento del porcentaje de trabajo en frío para las mismas tres aleaciones. La figura 2 muestra la influencia del trabajo en frío sobre el comportamiento de tensión-deformación de un acero con bajo contenido de carbono; aquí, las curvas de tensión-deformación se trazan a 0% CW, 4% CW y 24% CW. (Jafar, Muhaed & Gatea, Shakir; 2013).

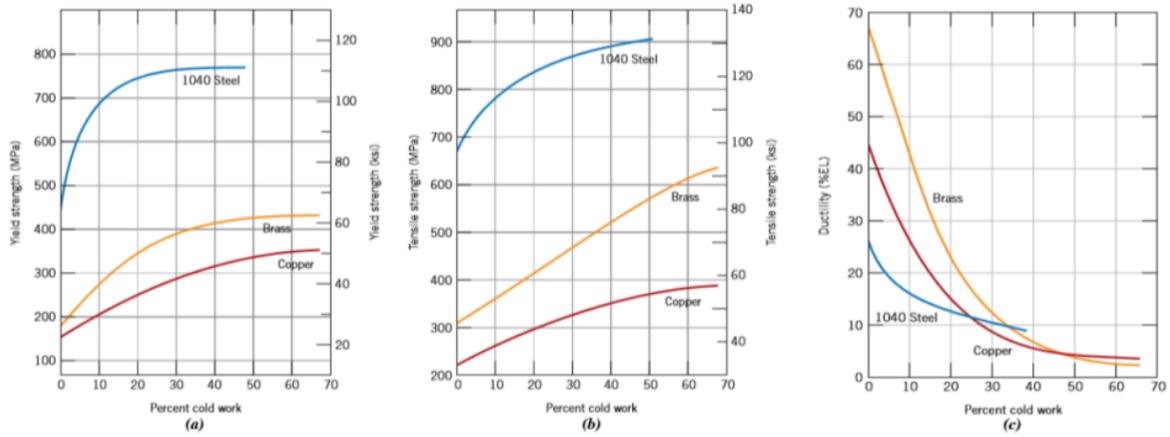


Figura 1. Gráficos de %CW contra a) Esfuerzo de Fluencia, b) Resistencia a la tensión y c) Ductilidad para el acero 1040, Latón y Cobre.

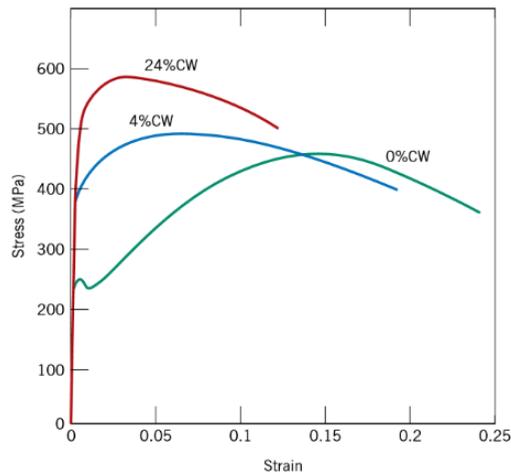


Figura 2. Influencia del trabajo en frío CW contra valores de esfuerzo-deformación.



El fenómeno de endurecimiento por deformación se explica sobre la base de interacciones entre dislocaciones. La densidad de dislocación en un metal aumenta con la deformación o el trabajo en frío debido a la multiplicación de la dislocación o la formación de nuevas dislocaciones. En consecuencia, la distancia promedio de separación entre dislocaciones disminuye: las dislocaciones se colocan más juntas. En promedio, las interacciones dislocación-dislocación de tensión son repulsivas. El resultado neto es que el movimiento de una dislocación se ve obstaculizado por la presencia de otras dislocaciones. A medida que aumenta la densidad de dislocación, esta resistencia al movimiento de dislocación por otras dislocaciones se vuelve más pronunciada. Por lo tanto, el esfuerzo impuesto necesario para deformar un metal aumenta con el incremento del trabajo en frío.

El endurecimiento por deformación a menudo se utiliza comercialmente para mejorar las propiedades mecánicas de los metales durante los procedimientos de fabricación. Los efectos del endurecimiento por deformación pueden eliminarse mediante un tratamiento térmico de recocido. En la expresión matemática que relaciona el esfuerzo y la deformación verdaderos o reales, $\sigma_{real} = K\varepsilon_{real}^n$, el parámetro “n” se llama exponente de endurecimiento por deformación, que es una medida de la capacidad de un metal para endurecerse por deformación; cuanto mayor es su magnitud, mayor es el endurecimiento por deformación para una cantidad dada de deformación plástica. (D. Askeland; 2003)

2.2 Proceso de laminación

Es un proceso de deformación plástica en el cual el espesor del material de trabajo se reduce mediante fuerzas de compresión ejercidas por dos rodillos opuestos. El metal se somete a altos esfuerzos de compresión como resultado de la fricción entre los rodillos y la superficie metálica.

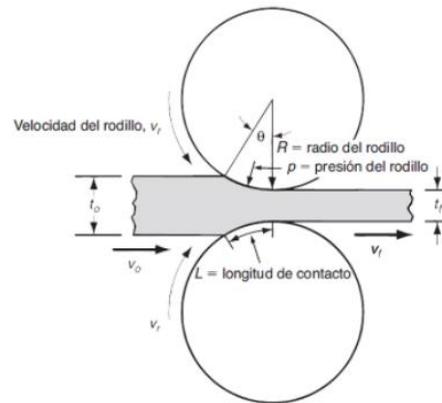


Figura 3. Proceso de Laminado.

El laminado es el proceso de conformado más utilizado, que proporciona alta producción y control cercano del producto final. El porcentaje de trabajo en frío en el proceso de laminación se puede calcular con la misma expresión presentada anteriormente, solo se sustituyen las áreas por los espesores. (T. Oppenheim & Co; 2007)

$$\%CW = \left(\frac{t_0 - t_f}{t_0} \right) \times 100$$

2.3 Aluminio 6061 (A6061)

La aleación 6061 se usa ampliamente en las industrias, estos materiales pueden ser tratados térmicamente para producir endurecimiento por precipitación. Los componentes principales de esta aleación son el Magnesio y el Silicio, además de la matriz de Aluminio. Estos elementos



le brindan al aluminio un incremento a la dureza mediante endurecimiento por precipitación. (J. Buha, R. Co; 2006). En la Figura 4 se muestra la composición exacta de aleación 6061.

Tabla 1. Composición química del A6061.

Mg	Si	Cu	Fe	Mn	Cr	Zn	Ti	Al
0.90	0.41	0.16	0.26	0.07	0.04	0.01	0.01	Bal.

2.3.1 Propiedades mecánicas del A6061-O

Según la base de datos de MatWeb, el Aluminio 6061-O tiene las propiedades mecánicas que se enlistan en la **Tabla 2**:

Tabla 2. Propiedades mecánicas del A6061-O.

Dureza (Brinell)	30
Resistencia Máxima (UTS)	124 MPa
Esfuerzo de cedencia	55.2 MPa
Módulo de elasticidad	68.9 GPa
Elongación a la ruptura	25%

2.3.2 Propiedades mecánicas del A6061-T6

Del mismo modo, según MatWeb, el Aluminio 6061-T6 tiene las propiedades que se encuentran enlistadas en la **Tabla 3**.



Tabla 3. Propiedades mecánicas del A6061-T6.

Dureza (Brinell)	95
Resistencia máxima (UTS)	310 MPa
Esfuerzo de cedencia	276 MPa
Módulo de elasticidad	68.9 GPa
Elongación a la ruptura	17%





3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Pese a que la aleación de aluminio 6061 en ambas: su forma pre templada 6061-O y templada 6061-T6; resultan de gran utilidad en una amplia gamma de aplicaciones que este sistema de aleación presenta, ¿Sería posible actualmente, encontrar gráficos que muestren cómo es que cambian las propiedades mecánicas de la aleación, una vez que se le aplican diferentes porcentajes de trabajo en frío (%CW)?

Aunque el estudio y el desarrollo de los materiales avanza todos los días, no es posible encontrar, en la literatura, gráficos completos que muestren el efecto del trabajo en frío (%CW) para el aluminio 6061-O y 6061-T6. En los procesos de formado para fabricar laminas y alambres resulta de gran importancia conocer las propiedades limite que los materiales pueden alcanzar sin romperse y/o detener el proceso para realizar tratamientos térmicos de recuperación y continuar con la deformación plástica. Es por ello que se plantea obtener gráficos para la aleación 6061 donde se puedan observar los parámetros mecánicos en función del trabajo en frío.



4. JUSTIFICACIÓN

De acuerdo con la problemática planteada en el apartado anterior, es importante desarrollar los gráficos completos de trabajo en frío (%CW) contra las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 6061, tales como las presentadas anteriormente para materiales como el acero, cobre y bronce; que podrían resultar ser una herramienta bastante útil a la hora de diseñar componentes que puedan ser utilizados para la producción de moldes, troqueles, herramientas, vehículos ultraligeros, piezas de la industria naval, aeroespacial e incluso militar. Además, este tipo de gráficos podrían ser muy útiles en los libros de texto de ciencia e ingeniería de materiales.

De la misma manera, la obtención de estos gráficos puede significar un ahorro en los costos y tiempo de producción de las piezas trabajadas con la aleación 6061, ya que permitiría obtener piezas con las dimensiones y tolerancias requeridas.



5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo General

Obtener gráficos de %CW contra parámetros mecánicos de las aleaciones de aluminio 6061-O y 6061-T6; tales como, esfuerzo de fluencia, resistencia máxima, ductilidad y dureza. Para ello se utiliza el proceso de laminado en frío, el cual es un proceso de deformación plástica que permite tener un control sobre el % de trabajo en frío.

5.2 Objetivos Específicos

- Analizar el comportamiento de los gráficos de %CW contra los parámetros mecánicos de las aleaciones 6061-O y 6061-T6.
- Comparar el comportamiento entre los gráficos de las aleaciones 6061-O y 6061-T6.



6. HIPÓTESIS

Los gráficos de %CW contra las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio 6061-O y 6061-T6 pueden ser de gran utilidad para la industria adaptativa en el diseño y producción de piezas de aluminio para diversas aplicaciones.





7. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

7.1 Primera Etapa

1. Se adquieren barras de la aleación 6061 de espesores de 15, 12, 10, 8.6, 7.5 y 6.6 mm y longitud de 30 cm.
2. Se reduce el espesor de las barras de acuerdo al espesor máximo que pueda soportar la laminadora, en este caso se hicieron sub-tamaños de la mitad de los espesores de cada barra, obteniendo tamaños de 7.5, 6, 5, 4.3, 3.75 y 3.3 mm. Estos sub-tamaños se determinaron siguiendo la norma ASTM E8, según los métodos estándar de pruebas de tensión a materiales metálicos de 1984.
3. Se cortan las barras en longitudes de 5cm para obtener al menos 3 barras pequeñas de cada espesor.
4. Las barras se someten a un tratamiento térmico de recocido total (6061-O) para eliminar esfuerzos residuales y obtener los valores de esfuerzos al %0 de endurecimiento por deformación, como lo presentan los gráficos.
5. Se laminan juegos de 3 probetas a los siguientes porcentajes de deformación. 10, 20, 30, 40, 50 y 60%.



6. De las probetas ya laminadas se fabrican probetas de tensión planas de acuerdo a la norma ASTM E8.
7. Se ensayan las probetas de tensión en base a la norma ASTM-E8 y se obtienen gráficos de esfuerzo contra deformación ingenieriles para obtener los parámetros, esfuerzo de fluencia, modulo elástico, resistencia máxima, resistencia a la fractura y ductilidad (% de deformación). Se ensayan como mínimo 3 probetas por cada condición.
8. Se realizan metalografías de muestras de las probetas en todas las etapas de % de deformación y antes y después del tratamiento térmico de recocido.
9. Se hacen pruebas de dureza Brinell a las probetas en todas las condiciones.

7.2 Segunda Etapa

1. A la aleación 6061 se le efectúa primero un tratamiento térmico de recocido (6061-O) y posteriormente tratamiento (6061-T6), en ambos casos con 0%CW.
2. Las aleaciones tratadas térmicamente T6 se laminan a diferentes porcentajes: 10, 20, 30, 40, 50 y 60%.



3. Del mismo modo que en la etapa 1, se fabrican probetas planas de tensión y se ensayan de acuerdo a la norma ASTM E8, para obtener los gráficos de %CW contra parámetros mecánicos y además de la dureza.
4. Se realizan metalografías de muestras de las probetas en todas las etapas de % de deformación y antes y después del tratamiento térmico de Temple (T6)
5. Finalmente se hace un análisis de resultados entre los valores obtenidos en ambas etapas.



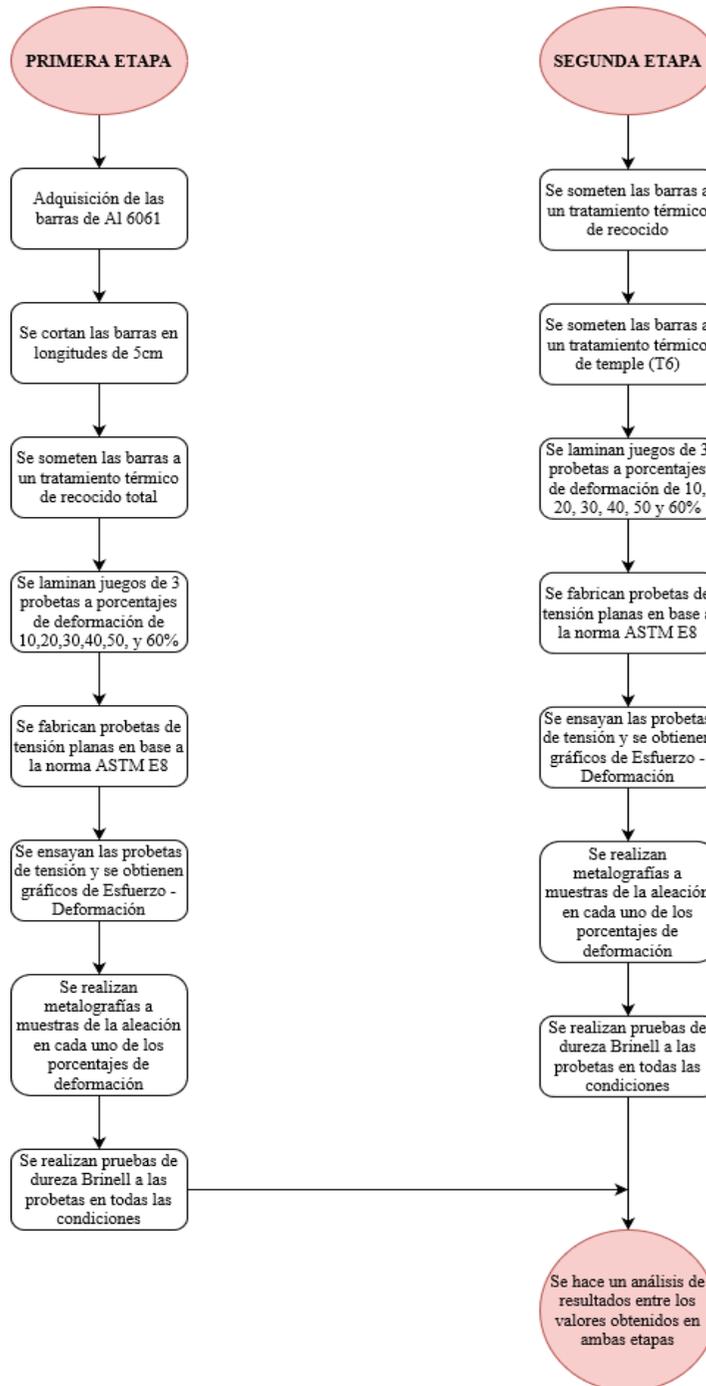


Figura 4. Diagrama de bloques de la metodología experimental para la obtención de gráficos de %CW contra propiedades mecánicas del Aluminio 6061-O y 6061-T6



8. CRONOGRAMA

Tabla 4. Cronograma de actividades para el desarrollo del diseño experimental.

Actividad	Enero	Febrero				Marzo				Abril				Mayo			
	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Primera Etapa																	
Adquisición de barras de Al 6061																	
Corte de las barras																	
Reducción de tamaño de las barras																	
Tratamiento de recocido a las barras																	
Laminado de probetas recocidas																	
Maquinado de probetas																	
Ensayo de tensión a las probetas																	
Pruebas de dureza Brinell																	
Metalografía																	
Segunda Etapa																	
Adquisición de barras de Al 6061																	
Corte de las barras																	



9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Aluminum and Aluminum Alloys, “Physical Metallurgy,” ASM International, 1998, p 11, 37.
- [2] AMS 2772C, Heat Treatment of Aluminum Alloy Raw Materials, Aerospace Material Specifications, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 2002.
- [3] D. Askeland, The Science and Engineering of Materials, 4th ed., Pacific Grove, CA, 2003, p 257–258, 791.
- [4] Jafar, Muhaed & Gatea, Shakir. (2013). Study the effect of heat treatments on spring-back in U-bending process. International Journal of Metallurgical & Materials Science and Engineering (IJMMSE). 3. 49-56.
- [5] Mirzakhani, B., & Mansourinejad, M. (2011). Tensile properties of AA6061 in different designated precipitation hardening and cold working. Procedia Engineering, 10, 136–140. doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.025.
- [6] Murtha SJ. New 6xxx aluminum alloy for automotive body sheet applications. SAE Int J Mater Manuf 1995; 104:657–6.
- [7] Ortiz, D., Abdelshehid, M., Dalton, R., Soltero, J., Clark, R., Hahn, M., Lee, E., Lightell, W., Pregger, B., Ogren, J., Stoyanov, P., and EsSaid, O. S., 2007, "Effect of Cold Work on the Tensile Properties of 6061, 2024, and 7075 Al Alloys," Journal of Materials Engineering and Performance, 16(5), pp. 515-520.
- [8] Standard methods of tension testing metallic materials, E-8, Annual Book of ASTM Standards: Vol. 03.01, Philadelphia: ASTM; 1984, p. 130-150.
- [9] T. Oppenheim, S. Tewfik, T. Scheck, V. Klee, S. Lomeli, W. Dahir, P. Youngren, N. Aizpuru, R. Clark, Jr., E.W. Lee, J. Ogren, and O.S. EsSaid, “On the Correlation of Mechanical



and Physical Properties of 6061-T6 and 7249-T76 Aluminum Alloys,” Eng. Failure Anal., 2007, 14(1), p 218–225.

[10] Venkateshwarlu, G., Prasad, A., & Ramesh, K. (2010). Evaluation of Mechanical Properties of Aluminium Alloy AA 6061(HE-20). International Journal of Current Engineering and Technology, 2(2), 295–297. doi: 10.14741/ijcet/spl.2.2014.53.

[11] Yamada K, Sato T, Kamio A. Effects of quenching conditions on two-step aging behavior of Al-Mg-Si alloys. Mater Sci Forum 2000; 331:669-4.

[12] MatWeb - The Online Materials Information Resource. (2022). Retrieved 7 April 2022.

