



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**RESPUESTA METALÚRGICA DE UNA PROBETA
JOMINY DE TAMAÑO REDUCIDO DE ALEACIÓN DE
ALUMINIO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

P R E S E N T A:

EDUARDO HERNANDEZ HERNANDEZ

ASESOR DE TESIS:

DR. JOSÉ BERNARDO HERNÁNDEZ MORALES



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Presidente: Prof. BERNARDO FABIAN CAMPILLO ILLANES

Vocal: Prof. JOSE BERNARDO HERNANDEZ MORALES

Secretario: Prof. SERGIO GARCIA GALAN

1er Suplente: Prof. ANA LAURA RAMIREZ LEDESMA

2do Suplente: Prof. VICTOR ANTONIO ARANDA VILLADA

Sitio donde se desarrolló el tema:

Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Facultad de Química, U.N.A.M., Edificio D, Laboratorio 005

Asesor del tema:

Dr. José Bernardo Hernández Morales

Sustentante:

Eduardo Hernández Hernández

INDICE

| | |
|---|----|
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | I |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | IV |
| RESUMEN..... | V |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 Marco de trabajo..... | 1 |
| 1.2 Justificación | 2 |
| 1.3 Objetivos..... | 2 |
| 1.4 Metas | 3 |
| 2. ANTECEDENTES..... | 4 |
| 2.1 Aluminio | 4 |
| 2.2 Aleaciones de aluminio..... | 5 |
| 2.3 Serie 6XXX | 6 |
| 2.3.1 Aleación 6061 | 7 |
| 2.4 Tratamientos térmicos | 8 |
| 2.4.1 Tratamiento de solución | 12 |
| 2.4.2 Temple | 12 |
| 2.4.3 Envejecido | 13 |
| 2.5 Ensayo Jominy | 14 |
| 2.5.1 Ensayo Jominy con probetas de tamaño modificado | 16 |
| 2.6 Ensayo de dureza Brinell..... | 17 |
| 3. METODOLOGÍA..... | 18 |

| | |
|--|----|
| 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS..... | 24 |
| 4.1 Resultados..... | 24 |
| 4.1.1 Análisis químico..... | 24 |
| 4.1.2 Curvas de enfriamiento..... | 24 |
| 4.1.3 Perfiles de dureza..... | 29 |
| 4.2 Análisis de resultados..... | 31 |
| 4.2.1 Curvas de enfriamiento y de rapidez de enfriamiento..... | 31 |
| 4.2.2 Perfiles de dureza..... | 32 |
| 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 40 |
| 5.1 Conclusiones | 40 |
| 5.2 Recomendaciones | 40 |
| 6. REFERENCIAS | 41 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 2.1 DIAGRAMA DE TRATAMIENTO TÉRMICO PARA ENDURECER ALEACIONES DE ALUMINIO | 11 |
| FIGURA 2.2 SOPORTE, PROBETA Y ORIFICIO PARA LA COLUMNA DE AGUA EN EL ENSAYO JOMINY (DIMENSIONES INGLASAS Y MÉTRICAS)..... | 14 |
| FIGURA 3.1 ESQUEMA DE LAS PROBETAS JOMINY MODIFICADAS DE ESCALA DE 3:4 CON 4 TERMOPARES, LAS POSICIONES DE LOS TERMOPARES SON TC1, TC2, TC3 Y TC4 DE ABAJO HACIA ARRIBA | 18 |
| FIGURA 3.2 ESQUEMA DE LAS PROBETAS JOMINY MODIFICADAS DE ESCALA DE 3:4 CON BARRENOS PARA 2 TERMOPARES, LAS POSICIONES DE LOS TERMOPARES SON TC1 Y TC2 DE ABAJO HACIA ARRIBA..... | 19 |
| FIGURA 3.3 ESQUEMA DE LAS PROBETAS JOMINY ESTÁNDAR CON 4 TERMOPARES, LAS POSICIONES DE LOS TERMOPARES SON TC1, TC2, TC3 Y TC4 DE ABAJO HACIA ARRIBA..... | 19 |
| FIGURA 3.4 ESQUEMA DE LAS PROBETAS JOMINY ESTÁNDAR CON BARRENOS PARA 2 TERMOPARES, LAS POSICIONES DE LOS TERMOPARES SON TC1 Y TC2 DE ABAJO HACIA ARRIBA..... | 20 |
| FIGURA 3.5 VISTA FRONTAL DEL DISPOSITIVO DE TEMPLE: A ROTÁMETRO, B TANQUE DE AGUA DEL TEMPLE, C CONTENEDOR CON AGUA PARA TEMPLE, D PLACA PARA DETENER LA COLUMNA DE AGUA, E DISPOSITIVO PARA DESPLAZAR A LA PROBETA, F PROBETA. | 21 |
| FIGURA 3.6 VISTA SUPERIOR DEL DISPOSITIVO DE TEMPLE: A ENTRADA DE AGUA AL SISTEMA, B TUBO DE PVC EN L, C PLACA, D BOMBA DE EXTRACCIÓN DE AGUA. | 21 |
| FIGURA 3.7 VISTA LATERAL DEL TANQUE DE ACRÍLICO: A L DE PVC, B PLACA, C BOMBA EXTRACTORA CONECTADA A MANGUERA. | 22 |
| FIGURA 3.8 CICLO DEL TRABAJO EXPERIMENTAL PARA LAS PROBETAS..... | 22 |
| FIGURA 4.1 CURVAS DE ENFRIAMIENTO EN UNA PROBETA REDUCIDA 3:4 EN 4 POSICIONES DIFERENTES DURANTE EL TEMPLE DESDE 530 °C. | 25 |
| FIGURA 4.2 CURVAS DE RAPIDEZ DE ENFRIAMIENTO EN UNA PROBETA REDUCIDA 3:4 EN 4 POSICIONES DIFERENTES DURANTE EL TEMPLE DESDE 530 °C..... | 25 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 4.3 CURVA DE ENFRIAMIENTO EN UNA PROBETA REDUCIDA, EN LA POSICIÓN DEL TERMOPAR TC1 DURANTE EL TEMPLE DESDE UNA TEMPERATURA DE 530 °C PARA 4 PRUEBAS INDEPENDIENTES. | 26 |
| FIGURA 4.4 RAPIDEZ DE ENFRIAMIENTO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA LA PROBETA REDUCIDA EN LA POSICIÓN DEL TERMOPAR TC1 DURANTE EL TEMPLE DESDE 530 °C PARA 4 PRUEBAS INDEPENDIENTES. | 27 |
| FIGURA 4.5 CURVA DE ENFRIAMIENTO EN UNA PROBETA ESTÁNDAR, EN LA POSICIÓN DEL TERMOPAR TC1 DURANTE EL TEMPLE DESDE UNA TEMPERATURA DE 530 °C PARA 3 PRUEBAS INDEPENDIENTES. | 27 |
| FIGURA 4.6 RAPIDEZ DE ENFRIAMIENTO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA LA PROBETA ESTÁNDAR EN LA POSICIÓN DEL TERMOPAR TC1 DURANTE EL TEMPLE DESDE 530 °C PARA 3 PRUEBAS INDEPENDIENTES. | 28 |
| FIGURA 4.7 CURVAS DE ENFRIAMIENTO EN UNA PROBETA REDUCIDA ESTÁNDAR EN 4 POSICIONES DIFERENTES DURANTE EL TEMPLE DESDE 530 °C. | 28 |
| FIGURA 4.8 PERFIL DE DUREZA EN UNA PROBETA DE TAMAÑO REDUCIDA EN CONDICIÓN DE LLEGADA (POSIBLEMENTE T6) Y DESPUÉS DEL TRATAMIENTO (T0). | 29 |
| FIGURA 4.9 PERFILES DE DUREZA DE UNA PROBETA DE TAMAÑO REDUCIDO: A) DESPUÉS DEL TEMPLE, B) DESPUÉS DEL ENVEJECIDO NATURAL POR 9 DÍAS, C) DESPUÉS DEL ENVEJECIDO A 200 °C POR 30 MINUTOS, D) DESPUÉS DEL ENVEJECIDO A 200 °C POR 60 MINUTOS, E) DESPUÉS DEL ENVEJECIDO A 200 °C POR 120 MINUTOS, F) DESPUÉS DEL ENVEJECIDO A 200 °C POR 240 MINUTOS. | 30 |
| FIGURA 4.10 PERFIL DE DUREZA DE UNA PROBETA DE TAMAÑO ESTÁNDAR DESPUÉS DEL ENVEJECIDO A 200 °C POR 30 MINUTOS | 32 |
| FIGURA 4.11 PERFILES DE DUREZA DE UNA PROBETA DE TAMAÑO REDUCIDO: A) TEMPLE Y ENVEJECIDO NATURAL, B) TEMPLE Y ENVEJECIDO A 200 °C POR 30 MINUTOS, C) TEMPLE Y ENVEJECIDO A 200 °C POR 60 MINUTOS, D) TEMPLE Y ENVEJECIDO A 200 °C POR 120 MINUTOS, E) TEMPLE Y ENVEJECIDO A 200 °C POR 30 MINUTOS. | 33 |
| FIGURA 4.12 PERFIL DE DUREZA DESPUÉS DEL TEMPLE DESDE 530°C, ENVEJECIDOS ARTIFICIALES A 200 °C POR 30, 60, 120 Y 240 MINUTOS Y ENVEJECIDO NATURAL POR 9 DÍAS. | 34 |
| FIGURA 4.13 DUREZA MÁXIMA PARA VARIAS CONDICIONES DE TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO A 200 °C. SE INCLUYE, TAMBIÉN EL VALOR DESPUÉS DEL TEMPLE DESDE 530 °C... 35 | |
| FIGURA 4.14 DIAGRAMA DEL PROCESO DE ENVEJECIMIENTO QUE SE REPORTÓ | 36 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 4.15 MEDICIONES DE DUREZA PARA VARIAS CONDICIONES DE ENVEJECIMIENTO REPORTADAS EN LA LITERATURA | 36 |
| FIGURA 4.16 PERFIL DE DUREZA DESPUÉS DE TEMPLE (CÍRCULOS VERDES) Y DE RAPIDEZ DE ENFRIAMIENTO A LOS 55 S DE INICIADO EL TEMPLE (CÍRCULOS AZULES). | 38 |
| FIGURA 4.17 RAPIDEZ DE ENFRIAMIENTO EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA EN LA PROBETA ESTÁNDAR (CÍRCULOS AMARILLOS) Y EN LA PROBETA DE TAMAÑO REDUCIDO 3:4 (CÍRCULOS MORADOS) A UN TIEMPO DE 55 SEGUNDOS. | 38 |
| FIGURA 4.18 COMPARACIÓN DE LA RAPIDEZ DE ENFRIAMIENTO MÁXIMA EN LA POSICIÓN DE CADA TERMOPAR CON RESPECTO A LA DUREZA ENTRE UNA PROBETA ESTÁNDAR Y UNA PROBETA REDUCIDA 3:4 DESPUÉS DEL TEMPLE A 530 °C Y DESPUÉS DEL ENVEJECIMIENTO POR 30 MINUTOS A 200 °C. | 39 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| TABLA 2.1 ALEACIONES DE ALUMINIO Y SUS DESIGNACIONES. | 5 |
| TABLA 2.2 CARACTERÍSTICAS DEL DIAGRAMA DE FASES EUTÉCTICO DE LOS PRINCIPALES ELEMENTOS DE ALEACIÓN CON EL ALUMINIO | 6 |
| TABLA 2.3 COMPOSICIÓN AA6061 | 8 |
| TABLA 2.4 PROPIEDADES DE LA ALEACION AA6061 | 8 |
| TABLA 2.5 DESIGNACIÓN DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS | 9 |
| TABLA 2.6 VARIANTES DE TIPO DE TRATAMIENTO TÉRMICO | 10 |
| TABLA 2.7 MODIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES PARA ESPECÍMENES DE TAMAÑO REDUCIDO | 16 |
| TABLA 4.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA MEDIDA | 24 |
| TABLA 4.2 RAPIDEZ DE ENFRIAMIENTO MÁXIMA DESPUÉS DEL TEMPLE DE UNA PROBETA DE TAMAÑO REDUCIDO EN CADA POSICIÓN DE TERMOPAR..... | 31 |
| TABLA 4.3 RAPIDEZ DE ENFRIAMIENTO MÁXIMA DESPUÉS DEL TEMPLE DE UNA PROBETA ESTÁNDAR EN CADA POSICIÓN DE TERMOPAR. | 32 |
| TABLA 4.4 DUREZA MÁXIMA REPORTADA EN LA LITERATURA Y OBTENIDA DEL TRABAJO EXPERIMENTAL. | 37 |
| TABLA 4.5 PERFIL DE DUREZA DESPUÉS DEL TEMPLE Y DE RAPIDEZ DE ENFRIAMIENTO A LOS 55 S DE INICIADO EL TEMPLE. | 37 |

RESUMEN

En este trabajo se analizaron las respuestas térmica y metalúrgica de una probeta Jominy de tamaño reducido, fabricada con la aleación de aluminio AA6061, sometida a un tratamiento de envejecido (natural y artificiales) y se compararon con los resultados que se obtienen en probetas de tamaño estándar.

A las probetas en estado de llegada se les aplicó un tratamiento previo (T0) manteniéndolas por 60 minutos a 450 °C en una mufla, para eliminar efectos de tratamientos térmicos previos. Luego, las probetas se solubilizaron a 530 °C durante 120 minutos antes de someterlas a un enfriamiento rápido en un dispositivo Jominy con agua a temperatura ambiente. Después de 3 horas de espera se realizó el envejecido (natural o artificial). El envejecido natural se llevó a cabo por 9 días, mientras que el envejecido artificial se realizó a 200 °C por 30, 60, 120 y 240 minutos. La respuesta metalúrgica se determinó mediante la medición de perfiles longitudinales de dureza, medidos después de cada etapa del proceso.

Para adquirir curvas de enfriamiento durante el temple, las probetas se instrumentaron con termopares tipo K que se conectaron a una tarjeta de adquisición de datos controlada con un *software* para ese efecto. A partir de las curvas de enfriamiento durante el temple se obtuvieron gráficas de rapidez de enfriamiento en función de la distancia desde el extremo templado, las cuales se relacionaron con los perfiles de dureza obtenidos después del temple y después del envejecido.

Se determinó que el efecto de la rapidez de enfriamiento durante el temple es significativo y que la respuesta térmica y metalúrgica en las probetas de tamaño reducido y estándar son equivalentes.

1. INTRODUCCIÓN

Las aleaciones de aluminio se encuentran en el segundo lugar (precedidas por el acero) en el listado de materiales utilizados para diseños estructurales [1]. La baja densidad del material, junto con la alta resistencia presente en algunos tipos de aleaciones del aluminio, permite la construcción de estructuras muy ligeras y resistentes, lo cual representa una gran ventaja para la elaboración de vehículos espaciales, terrestres, náuticos y por supuesto aviones.

El desarrollo en aleaciones de aluminio se ha beneficiado a lo largo del tiempo por diversos tratamientos térmicos para modificar su microestructura y por ende sus propiedades mecánicas o físicas, para adaptarse a las necesidades de la sociedad en general.

1.1 Marco de trabajo

Las aleaciones de la serie 6XXX (Mg-Si) no están entre las aleaciones de aluminio más resistentes, pero representan una gran parte de los productos de aluminio en el mundo (aproximadamente un 80%). Estas aleaciones presentan un dramático incremento en la resistencia, causado por precipitados formados por tan solo 1% de peso de Mg y Si que se adicionan al aluminio [2].

Los tratamientos térmicos de aleaciones de aluminio son muy importantes pues ayudan a mejorar sus propiedades mecánicas. El principal tratamiento térmico es el endurecimiento por envejecimiento, que se puede realizar de forma natural o artificial.

El tiempo y el tipo de envejecimiento son las claves de este proceso. El envejecimiento natural se lleva a cabo a temperatura ambiente, por lo que tiene el inconveniente es que se debe realizar en tiempos muy largos que pueden ir desde semanas hasta meses; por otro lado, para acelerar el proceso, el envejecimiento artificial se realiza a una temperatura relativamente alta y durante un tiempo que va desde minutos hasta horas.

1.2 Justificación

Los tratamientos térmicos de aleaciones de aluminio son muy distintos a los realizados en aceros. En este trabajo se busca cuantificar la respuesta (térmica y microestructural) que se obtiene en una probeta Jominy de tamaño reducido, sometida a diferentes tiempos de envejecimiento a una misma temperatura, con el fin de recabar los datos necesarios para establecer la respuesta metalúrgica del material y su posible relación con la rapidez de enfriamiento durante el temple. En particular, un ensayo tipo Jominy produce una variedad de rapidezces de enfriamiento durante la etapa de temple, lo que permite conocer el efecto de esta sobre la respuesta metalúrgica del material en un solo ensayo.

1.3 Objetivos

1. Caracterizar la respuesta metalúrgica de una probeta Jominy de tamaño reducido, fabricada con una aleación de aluminio, templada en un dispositivo Jominy y envejecida posteriormente, y relacionarla con la rapidez de enfriamiento después del temple.
2. Determinar si la respuesta de la probeta de tamaño reducido es equivalente a la de la probeta estándar.

1.4 Metas

1. Templar probetas de aleación de aluminio (reducidas en tamaño y de tamaño estándar) en un dispositivo Jominy
2. Calcular la evolución de la rapidez de enfriamiento local.
3. Medir el perfil de dureza de las probetas después del temple y después del envejecido.
4. Encontrar las condiciones de máximo endurecimiento
5. Establecer si la rapidez de enfriamiento durante el temple afecta a la dureza después del envejecido.
6. Comparar la respuesta metalúrgica, en función de la distribución de la rapidez de enfriamiento local en las probetas de ambos tamaños.

2. ANTECEDENTES

2.1 Aluminio

El aluminio es un elemento químico cuyo símbolo es Al y número atómico 13. Es un metal plateado muy ligero. Su masa atómica es 26.9815 uma, tiene punto de fusión de 660°C y punto de ebullición de 2.467°C, y densidad relativa de 2.7 kg/m³. Es un metal muy electropositivo y extremadamente reactivo [2]. Se trata de un metal no ferromagnético y es el tercer elemento más común en la corteza terrestre. Constituye cerca del 8% de la corteza terrestre y está presente en rocas, vegetación y animales [1]. En la Tierra, a temperatura y presión estándar el aluminio se encuentra en estado sólido formando parte de numerosos minerales, pero nunca se encuentra en estado puro. Los minerales más comunes que contienen aluminio son silicatos, pero su extracción se produce únicamente del mineral conocido como bauxita, una roca sedimentaria con un alto contenido de trióxido de aluminio (Al₂O₃), mediante su transformación en alúmina. La alúmina, que se extrae de la bauxita mediante el proceso Bayer, es posteriormente transformada en aluminio metálico por electrolisis. Es un metal muy apreciado en ingeniería de materiales gracias a su baja densidad y alta resistencia a la corrosión [2].

En estado puro el aluminio es muy blando, pero con elementos aleantes y tratamientos térmicos para mejorar sus propiedades mecánicas, las aleaciones resultantes incrementan sus propiedades mecánicas, siendo útiles para muchas industrias como por ejemplo en la construcción, minería, iluminación e industria aeronáutica por mencionar algunas [4]. En estado puro el aluminio se utiliza principalmente para la fabricación de espejos tanto de uso doméstico como en telescopios reflectores [4].

El aluminio es uno de los metales menos nobles debido a su gran afinidad por el oxígeno por lo cual algunas veces se usa como agente reductor. También por tener esa gran afinidad, se forma fácilmente su óxido, Al₂O₃, que es muy estable. El aluminio se oxida fácilmente, pero la delgada capa que se forma sobre su superficie es muy compacta y lo protege [3].

2.2 Aleaciones de aluminio

Los elementos aleantes más comunes para formar aleaciones de aluminio son el cobre, el manganeso, el silicio, el magnesio, el zinc, el níquel y el estaño [5].

Las aleaciones de aluminio pueden subdividirse en dos grandes grupos de acuerdo con el proceso de fabricación: de forja y de fundición [5]. En los Estados Unidos, la Asociación de Aluminio adoptó un sistema de cuatro dígitos numéricos para identificar las aleaciones de aluminio de fundición: el primero de los cuales indica el grupo de aleación y el segundo los límites de impurezas. Los dos últimos identifican la aleación o indican la pureza del metal [6].

Se clasifican mediante un sistema numérico que las ordena por series de millares (serie 1000, serie 2000, serie 3000...), como se indica en la Tabla 2.1 Cada serie se considera una familia de aleación con características comunes [7].

Tabla 2.1 Aleaciones de aluminio y sus designaciones [7].

| Serie | Designación | Aleante principal |
|-------|-------------|------------------------------|
| 1000 | 1XXX | 99% ALUMINIO |
| 2000 | 2XXX | Cobre (Cu) |
| 3000 | 3XXX | Manganeso (Mn) |
| 4000 | 4XXX | Silicio (Si) |
| 5000 | 5XXX | Magnesio (Mg) |
| 6000 | 6XXX | Magnesio (Mg) y Silicio (Si) |
| 7000 | 7XXX | Zinc (Zn) |
| 8000 | 8XXX | Otros elementos |

En la actualidad, decenas de aleaciones de aluminio se utilizan en diferentes áreas de manufactura, por ejemplo; automotriz, aeroespacial, militar etc. Todos los elementos de aleación que se utilizan se clasifican en tres grupos; elementos básicos de aleación, elementos de adición auxiliares (dopantes) e impurezas [8].

Dependiendo de la naturaleza de la aleación, los mismos elementos pueden desempeñar diferentes papeles. En la mayoría de los casos solo se usan cuatro

elementos: magnesio, cinc, cobre y silicio [8]. Se llama a estos elementos básicos o principales ya que definen la microestructura y propiedades. La adición de altas cantidades de elementos principales es posible ya que se caracterizan por su considerable solubilidad en el aluminio.

Se sabe que la solubilidad máxima en aluminio excede al 1% sólo para los siguientes siete elementos; magnesio, cobre, silicio, litio, manganeso, germanio y plata, mientras que el resto de los elementos químicos tienen una baja solubilidad en el aluminio, del orden de 0.1-0.01% [8].

Todos los elementos principales de aleación forman diagramas de fase eutécticos con el aluminio. Los parámetros correspondientes de estos eutécticos binarios se muestran en la Tabla 2.2 [8].

Tabla 2.2 Características del diagrama de fases eutéctico de los principales elementos de aleación con el aluminio [8].

| No | Elementos de Aleación | Ca^a | | Ce^b | | Te^c [°C] | Fases en equilibrio con (Al) |
|----|-----------------------|--------|------|--------|------|-------------|------------------------------|
| | | % masa | % At | % masa | % At | | |
| 1 | Cu | 5.7 | 2.5 | 33.2 | 17.5 | 547 | $CuAl_2$ (52% Cu) |
| 2 | Mg | 17.4 | 18.5 | 35 | 36 | 450 | Mg_5Al_8 (35%) |
| 3 | Zn | 82 | 49.3 | 94.6 | 75 | 382 | Zn (99%Zn) |
| 4 | Si | 1.65 | 1.59 | 12 | 12 | 577 | Si (99.5 % Si) |

^a Limite de solubilidad a temperatura eutéctica

^b Concentración de punto eutéctico

^c Temperatura de solidificación en eutéctico binario

2.3 Serie 6XXX

Las aleaciones de la serie 6XXX (Al-Mg-Si), son un grupo que contiene magnesio y silicio en proporción tal que se forma Mg_2Si . Estas aleaciones tienen buen balance entre resistencia a la corrosión y resistencia mecánica, son aleaciones tratables térmicamente de resistencia media, constituyen la mayor producción de aleaciones extruidas y son usadas extensivamente en edificaciones, construcción y muchas

otras aplicaciones estructurales [7].

Se caracterizan por ser aleaciones forjadas. Gracias al nivel de plasticidad, soldabilidad y maquinabilidad de la serie 6000, se someten con frecuencia a procesos de extrusión para fabricación de diferentes tipos de perfiles de aluminio.

El interés industrial en estas aleaciones es debido a que dos tercios de todos los productos extruidos están fabricados de aleaciones de aluminio y el 90% de ellos son de aleaciones de esta serie [7].

2.3.1 Aleación 6061

La aleación de aluminio 6061 es una aleación que contiene como principales elementos aluminio, magnesio y silicio. Tiene buenas propiedades mecánicas y es soldable. Es una de las aleaciones de aluminio más comunes para uso general. Se emplea comúnmente en formas pre-templadas como el 6061-T0 y templadas como la 6061-T6 y 6061-T651. Es una de las aleaciones de aluminio más comunes para uso general, tiene numerosas ventajas en comparación con otras aleaciones de aluminio, que incluyen resistencia media, bajo costo, alta conformabilidad, buena soldabilidad y alta resistencia a la corrosión [9].

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 [9].

La aleación AA6061 es una aleación cuyas propiedades mecánicas pueden manipularse mediante un tratamiento térmico de envejecido ya sea natural o artificial [9].

La proporción de aluminio debe oscilar entre el 95.85 y el 98.56 por ciento, mientras que el resto de elementos de la aleación atiende a los márgenes establecidos en la Tabla 2.3, sin que existan otros elementos en proporciones superiores a 0.05 de forma individual [10].

Tabla 2.3 Composición AA6061 [10].

| Elemento | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti |
|------------|-----|-----|------|------|-----|------|------|------|
| Mínimo (%) | 0.4 | 0 | 0.15 | 0 | 0.8 | 0.04 | 0 | 0 |
| Máximo (%) | 0.8 | 0.7 | 0.4 | 0.15 | 1.2 | 0.35 | 0.25 | 0.15 |

Algunas propiedades de esta aleación se listan en la Tabla 2.4:

Tabla 2.4 Propiedades de la aleación AA6061 [10].

| Propiedad | Valor |
|---------------------------|------------------------|
| Fase en STP | N / A |
| Densidad | 2700 kg/m ³ |
| Resistencia a la tracción | 290 MPa |
| Límite de elasticidad | 240 MPa |
| Módulo de Young | 69 GPa |
| Dureza Brinell | 105 BHN |
| Punto de fusión | 600°C |
| Conductividad térmica | 150 W/(mK) |
| Capacidad calorífica | 896 J/(gK) |

2.4 Tratamientos térmicos

Los procesos de tratamiento térmico permiten modificar la microestructura metalográfica y las propiedades mecánicas de los metales. Esto se hace a partir de aumentos y descensos de temperatura de manera controlada [3].

Las aleaciones comerciales de aluminio tratables térmicamente son, con pocas excepciones, sistemas binarios o cuaternarios con respecto a los solutos involucrados en la mejora de la resistencia mecánica por el mecanismo de precipitación. Las aleaciones comerciales cuya resistencia y dureza pueden ser

significativamente incrementados por tratamiento térmico incluyen las series trabajadas 2XXX, 6XXX y 7XXX [3].

La designación del tratamiento se coloca después de la designación de la aleación, separando ambas por un guion. La designación de los tratamientos básicos consiste en letras y sus subdivisiones, cuando se requiere, se indican por uno o más dígitos a continuación de la letra correspondiente como se muestra en la Tabla 2.5 [3].

Tabla 2.5 Designación de procesamiento de aleaciones de aluminio [3,11].

| Designación | Significado |
|--------------------|--|
| F | Estado bruto. Es el material tal como sale del proceso de fabricación. |
| O | Estado bruto. Es el material tal como sale del proceso de fabricación. |
| O1 | Estado bruto. Es el material tal como sale del proceso de fabricación. |
| O2 | Sometido a tratamiento termomecánico |
| O3 | Homogeneizado. Esta designación se aplica a los alambrones y a las bandas de colada continua, que son sometidos a un tratamiento de difusión a alta temperatura |
| W | Homogeneizado. Esta designación se aplica a los alambrones y a las bandas de colada continua, que son sometidos a un tratamiento de difusión a alta temperatura |
| H | Estado de Trabajado. Viene con materiales a los que se ha realizado un endurecimiento por deformación. |
| H1 | Endurecido por deformación hasta obtener el nivel deseado y sin tratamiento posterior. |
| H2 | Endurecido en exceso por deformación y recocido parcial para recuperar suavidad sin perder ductilidad. |
| H3 | Acritud y estabilizado. |
| H4 | Acritud y lacado o pintado. Son aleaciones endurecidas en frío y que pueden sufrir un cierto recocido en el tratamiento de curado de la capa de pintura o laca dada. |
| T | Denomina a materiales que has sido endurecidos por tratamiento térmico con o sin endurecimiento por deformación posterior. |

Existen variantes del estado T; para la designación de estas variantes se le añade a la T dos dígitos [4].

Estos dos dígitos son específicos para cada producto y se usan para estado de alivio de tensiones en productos fabricados mediante el proceso de trabajado, mientras que para aleaciones de fundición se emplea solo un dígito (ver Tabla 2.6).

Tabla 2.6 Variantes de tipo de tratamiento térmico [4, 11].

| Designación | Significado |
|--------------------|--|
| T1 | Enfriado desde un proceso de fabricación realizado a una elevada temperatura y envejecido de forma natural. |
| T2 | Enfriado desde un proceso de fabricación realizado a una alta temperatura, trabajado en frío y envejecido de forma natural. |
| T3 | Enfriado desde un proceso de fabricación realizado a una alta temperatura, trabajado en frío y envejecido de forma natural. |
| T4 | Solución tratada térmicamente y envejecida a T_{amb} . hasta alcanzar una condición estable. Es un tratamiento similar a T3 pero sin el trabajo en frío. |
| T5 | Enfriado desde un proceso de fabricación a alta temperatura envejecida artificialmente. |
| T6 | Solución tratada térmicamente y envejecida artificialmente. Son designados de esta forma los productos que después de un proceso de conformado a alta temperatura (moldeo o extrusión) no son endurecidos en frío, sino que sufren un envejecimiento artificial. |
| T7 | Solución tratada térmicamente y sobre envejecida para su completa estabilización. |
| T8 | Térmicamente tratada por disolución, trabajada en frío y envejecida artificialmente |
| T9 | Solución tratada térmicamente, envejecida artificialmente y trabajada en frío. |
| T10 | Enfriado desde un proceso de fabricación realizado a una elevada temperatura, trabajado en frío y envejecido artificialmente hasta una condición sustancialmente estable |

Las aleaciones de aluminio se tratan térmicamente para:

- Homogenizarlas

- Relajar esfuerzos residuales
- Mejorar la estabilidad dimensional y la maquinabilidad
- Aumentar la resistencia mecánica, ductilidad, dureza y resistencia a la corrosión.

El tratamiento térmico típico para las aleaciones de aluminio incluye las siguientes etapas (ver Figura 2.1) [9]:

1. Tratamiento de solución a temperatura relativamente alta para disolver las partículas ricas en Cu y Mg formadas durante la solidificación y así lograr una solución sólida de alta concentración.
2. Temple, generalmente en un medio a temperatura ambiente para obtener una solución sólida supersaturada de átomos de soluto y vacancias.
3. Endurecimiento por envejecido, que causa la precipitación desde la solución sólida supersaturada, puede ser a temperatura ambiente (envejecido natural) o a temperatura elevada (envejecido artificial).

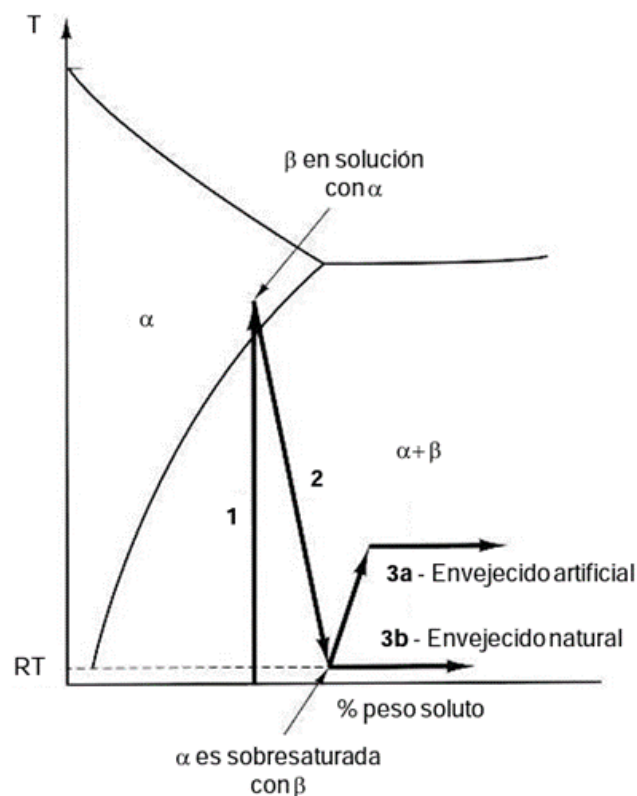


Figura 2.1 Diagrama de tratamiento térmico para endurecer aleaciones de aluminio [4]

2.4.1 Tratamiento de solución

Tres eventos ocurren durante el tratamiento de solución, que se lleva a cabo a una temperatura por arriba de la temperatura de *solvus* de la aleación, son:

1) Homogenización de los elementos de aleación.

Tiene como propósito disolver fases constituyentes y enriquecidas de solución sólida de aluminio (α) en soluto.

2) Esferoidización de las partículas de Si.

Tiene como propósito la modificación de los constituyentes que están presentes en cantidades que no pueden ser completamente disueltas.

3) Disolución de las fases solubles que contienen Cu y Mg formados durante la solidificación.

Los elementos constitutivos de las fases presentes se redistribuyen cuando se disuelven. Sin embargo, algunas fases constituidas, particularmente intermetálicos ricos en hierro, contienen elementos insolubles o muy difíciles de disolver que se llegan a modificar morfológicamente por el tratamiento de solución [4].

El tratamiento de solución puede incluir dos etapas de calentamiento para evitar la fusión insipiente. Primeramente, las piezas se calientan por debajo de la temperatura eutéctica para disolver las fases eutécticas fuera de equilibrio; posteriormente las piezas se calientan a la temperatura final de solución para poder así disolver los elementos adicionales de endurecimiento y así poder generar una buena homogenización [13].

2.4.2 Temple

El temple tiene como objetivo evitar la precipitación durante el enfriamiento desde la temperatura de solubilización hasta a temperatura ambiente y completa el tratamiento de solución [10].

Si la rapidez de enfriamiento llega a ser muy alta el soluto y un gran número de vacancias se retienen en solución sólida. Por otro lado, si el enfriamiento es mucho más lento, las partículas llegan a precipitar homogéneamente (principalmente en los límites de grano o en las dislocaciones, entre 500 y 700 °F (260 y 400 °C respectivamente), se pierde rápidamente el soluto de la solución sólida por difusión y por precipitación en los límites de grano) [9]. Por lo tanto, el enfriamiento rápido o temple es necesario para que se pueda retener la alta concentración en equilibrio conseguida a la temperatura de solución, particularmente los que están cerca de los bordes de grano.

2.4.3 Envejecido

La etapa de envejecido consiste en la dispersión de fases secundarias formadas durante la precipitación en estado sólido de la matriz.

El exceso de soluto en una solución sobresaturada de aluminio α , eventualmente va a precipitar, pero esto ocurre lentamente a temperatura ambiente. Después de un tiempo determinado que pueden ser días o incluso semanas a temperatura ambiente, algunas aleaciones de la familia 7XXX, llegan a endurecen apreciablemente, a este proceso se le conoce como envejecido natural [13].

El envejecimiento de una aleación también puede ser acelerado mediante un calentamiento después del temple a temperaturas intermedias, las cuales no sobrepasan la temperatura de solubilización; a este proceso se le conoce como envejecido artificial [13].

El tamaño de los precipitados está en función de la temperatura y del tiempo de mantenimiento. Por tanto, a altas temperaturas o mayor tiempo de envejecimiento, el tamaño de los precipitados va a aumentar, por lo que disminuyen las propiedades mecánicas de la aleación. Entonces una adecuada combinación de temperatura y tiempo de envejecido es determinante para poder obtener una pieza con alta dureza [13].

2.5 Ensayo Jominy

El procedimiento más común para evaluar la templabilidad de un acero es el ensayo Jominy también conocido como temple por el extremo inferior. El ensayo consiste en un temple con una columna de agua que impacta en el extremo inferior de una probeta cilíndrica para después realizar mediciones de dureza, lo cual permite obtener una gráfica de la dureza en función de la distancia desde el extremo templado al final de la probeta de ensayo (ver Figura 2.2). El ensayo rapideces de enfriamiento menores a medida que se incrementa la distancia desde el extremo templado. La medición de la dureza se realiza cada 1/16 de pulgada; cada valor de dureza está asociado a una historia de rapidez de enfriamiento [14].

La norma ASTM A 255 describe los dispositivos para el ensayo:

➤ *Soporte para la probeta Jominy*

El soporte debe mantener la probeta a una distancia vertical de 12.7 mm (1/2") sobre el orificio del dispositivo de temple (ver Figura 2.2).

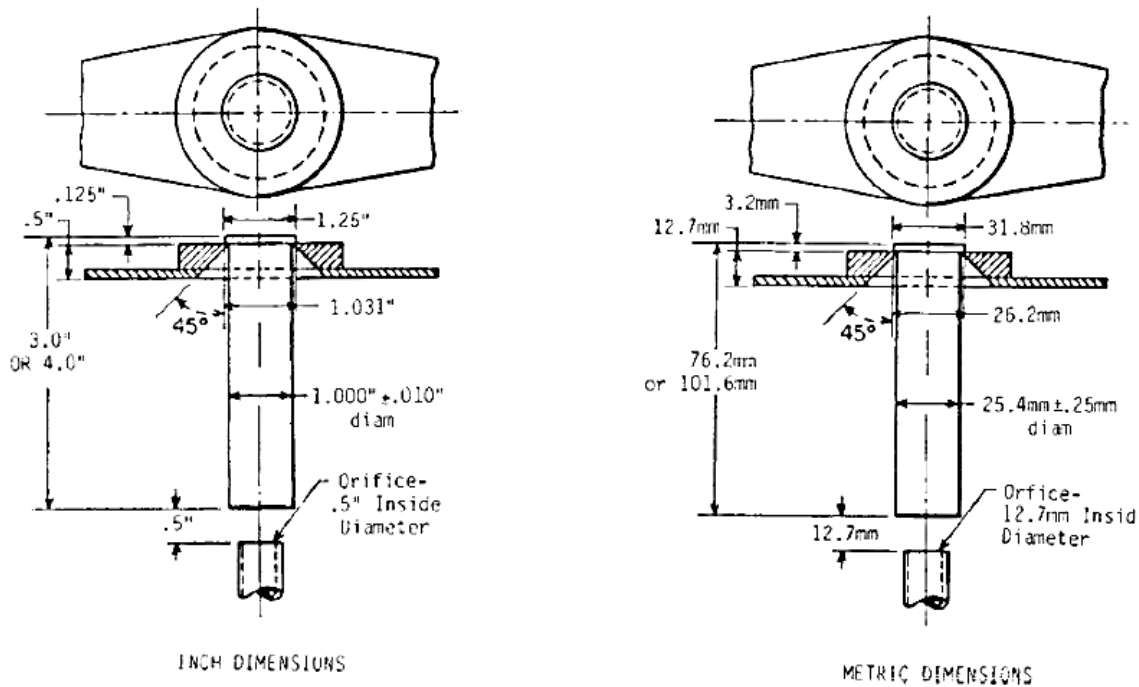


Figura 2.2 Soporte, probeta y orificio para la columna de agua en el ensayo Jominy (dimensiones inglesas y métricas).

➤ *Dispositivo de temple*

Este debe ser capaz de mantener una columna de agua de 65.5 mm (2 ½”) de altura libre, además de poder ser controlado y estar acoplado a un suministro de agua con suficiente capacidad, en conjunto a una bomba y válvulas para llevar a cabo el ensayo.

➤ *Probetas para el ensayo*

Las probetas para el ensayo deberán ser producidas por forja, tener un diámetro de 1 pulgada de diámetro y 4 pulgadas de largo con medios para ser sujetadas por el soporte antes descrito en posición vertical.

➤ *Procedimiento del ensayo*

El ensayo Jominy para aceros se realiza en las siguientes etapas:

1. **Normalizado del producto previo:** El producto del cual la probeta será fabricada debe ser normalizado previamente para asegurar las características de dureza requeridas.
2. **Calentamiento:** Se lleva la probeta hasta su temperatura de austenización y posteriormente se mantiene así por 30 minutos. Es necesario que la atmosfera del horno reduzca la descarburización al mínimo.
3. **Temple:** Al inicio de cada ensayo el soporte deberá estar seco; posteriormente, la probeta caliente se mantendrá en el soporte a una distancia de 0.5 pulgadas del orificio del dispositivo de temple, en ese momento se inicia el flujo vertical con la válvula, que debe durar no menos de 10 minutos.
4. **Medición de dureza:** Para efectuar la medición de la dureza se deben tener 2 planos separados a 180° uno del otro con una profundidad de 0.015 pulgadas a lo largo de la probeta, la dureza se mide en una escala HRC. Durante la realización de los ensayos de dureza se debe colocar al espécimen sobre una base firme con una de las caras lisas actuando como reposo; el soporte sobre el cual descansa la pieza debe permitir el movimiento de esta en intervalos de 1/16” para las mediciones. Las mediciones se realizan en intervalos de 1/16

pulgadas para la primera pulgada de distancia; posteriormente se realizan a 18,20,22,24 y 28 dieciseisavos de pulgada. Cabe mencionar que mediciones debajo de 20 HRC serán descartadas pues la norma establece que estas no son precisas. Finalmente, al concluir las mediciones en un plano de ensayo se aconseja usar un accesorio que compense las irregularidades de las mediciones o que el soporte permita esta acción. En el caso de la detección de errores es conveniente realizar mediciones en ambos lados de la probeta, si ocurre que la dureza en ambos puntos de ambos planos difiere en más de 4 HRC la medición deberá repetirse en otros 2 planos separados a 90° de los originales, si se repite lo anterior se debe repetir el ensayo nuevamente.

5. **Graficación de resultados:** Los resultados obtenidos se grafican como dureza HRC en función de la posición (cada dieciseisavo de pulgada), si las mediciones se realizaron en 2 o más planos dichos valores se deben promediar para ser graficados.

2.5.1 Ensayo Jominy con probetas de tamaño modificado

De acuerdo con la norma ASTM A 255 es posible llevar a cabo el ensayo Jominy con una modificación en las dimensiones de la probeta (Sección IX Especímenes para aplicaciones especiales). Con base a la norma, los diámetros aceptados para la modificación son de 0.75 in, 0.5 in y 0.25 in de diámetro; para cada uno de estos casos las condiciones del ensayo se ven modificadas en cuanto al orificio del dispositivo de temple, distancia del orificio al extremo inferior de la probeta y altura de la columna de agua, estas modificaciones se aprecian a detalle en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Modificación de las condiciones para especímenes de tamaño reducido [15].

| Diámetro de la probeta in (mm) | Tamaño de la huella, in (mm) | Distancia de la huella, in (mm) | Altura de la columna de agua, in (mm) |
|-----------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|--|
| 0.75 (19.0) | 0.50 (12.7) | 0.50 (12.7) | 2.5 (63.5) |
| 0.50 (12.7) | 0.25 (6.4) | 0.375 (9.5) | 4.0 (102) |
| 0.25 (6.4) | 0.125 (3.2) | 0.25 (6.4) | 8.0 (203) |

Es interesante notar que el ensayo Jominy se ha utilizado para estudiar la respuesta metalúrgica de aleaciones de aluminio sometidas a procesos de endurecimiento por precipitación [16]. Desde luego, en esos casos la dureza se mide en escala Brinell.

2.6 Ensayo de dureza Brinell

La norma ASTM E 10-78 define a la *dureza Brinell* como un método de ensayo por indentación por el cual, con el uso de un durómetro, se fuerza una bola fabricada de un acero templado extraduro de un diámetro (D) (seleccionado en función del espesor de la probeta a ensayar) contra la superficie del material del que se quiere medir su dureza, mediante la aplicación de una fuerza (P) durante un tiempo (t) [17].

Como resultado del ensayo se formará una huella que tendrá forma de casquete esférico de diámetro (d) en la superficie de la probeta ensayada.

El valor que se mide en el ensayo es precisamente este diámetro (d) del casquete que se forma en la superficie del material. La dureza Brinell (HB) está definida entonces por la Ec. 2.1.

$$HB = \frac{P}{S} \quad (2.1)$$

Siendo (S) la superficie de la huella que queda sobre la probeta. La fuerza (P) de la expresión se expresa en N y la superficie de la huella (S) en mm. Otra manera de determinar HB es partiendo del diámetro d de la impresión lo cual tiene la ventaja de que se pueden efectuar tantas mediciones como se estimen necesarias y en microscopios o aparatos especialmente diseñados para tal fin. En este caso, la dureza HB se calcula usando la Ec 2.2:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.2)$$

D: diámetro del balón

d: diámetro de la huella

P: Carga de prueba

Donde D y d se miden en milímetros. En algunos materiales la penetración del balón origina una craterización y en otros una depresión [17].

3. METODOLOGÍA

A partir del material que se usó para obtener las probetas, se obtuvo una muestra significativa para poder determinar su composición química, mediante un espectrómetro de emisión óptica.

Las probetas de aleación de aluminio AA6061 recibidas de llegada, se calentaron en una mufla por 1 hora a una temperatura de 450 °C y posteriormente se enfriaron dentro de la misma mufla por un tiempo de 90 minutos, seguido de un enfriamiento al aire. Este tratamiento previo (T0) tiene como fin eliminar el resultado del tratamiento térmico de las probetas que viene de fábrica (usualmente un T6).

Se realizó el ensayo Jominy tanto a probetas reducidas de tamaño, las cuales fueron maquinadas a una escala 3:4 con respecto a la probeta estándar, como a probetas de tamaño estándar. La instrumentación de las probetas se realizó con termopares embebidos en ellas: cuatro barrenos para las probetas que se usaron en ensayos iniciales de temple (sin solubilización) (ver Figuras 3.1 y 3.3) y dos barrenos para las probetas que se utilizaron para los ensayos de envejecimiento (natural y artificial) (ver Figuras 3.2 y 3.4).

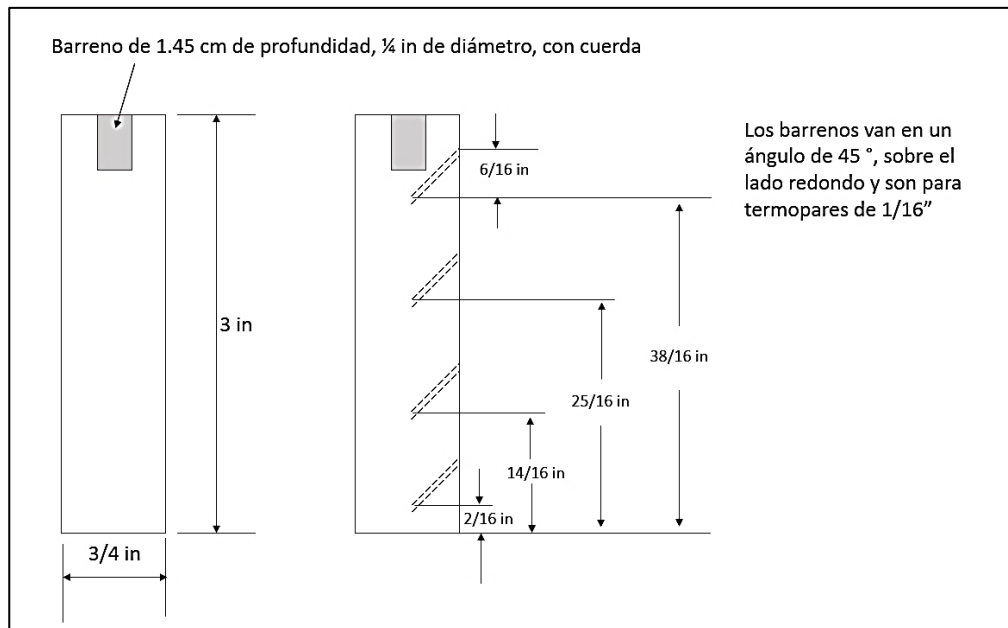


Figura 3.1 Esquema de las probetas Jominy modificadas de escala de 3:4 con 4 termopares, las posiciones de los termopares son TC1, TC2, TC3 y TC4 de abajo hacia arriba

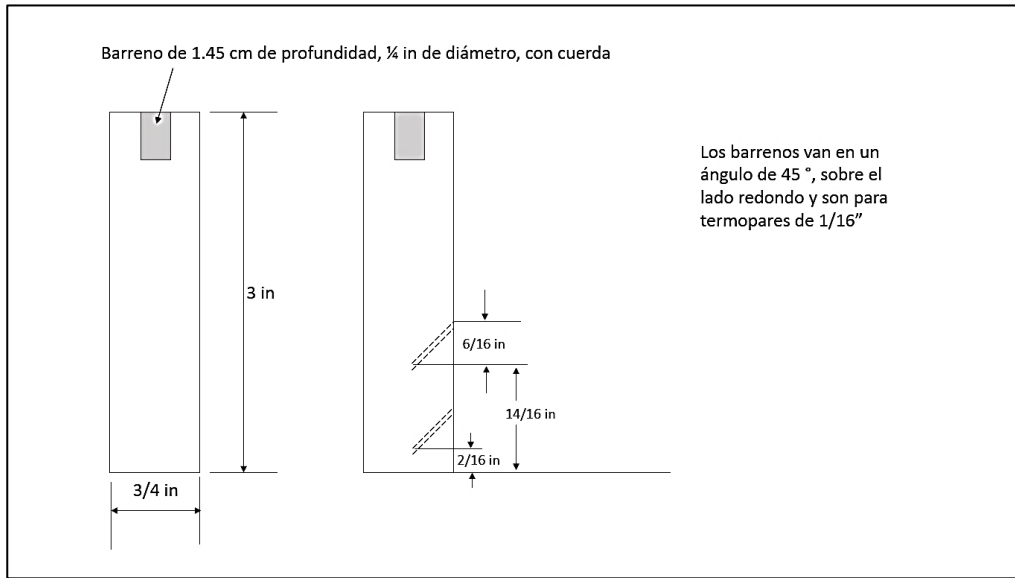


Figura 3.2 Esquema de las probetas Jominy modificadas de escala de 3:4 con barrenos para 2 termopares, las posiciones de los termopares son TC1 y TC2 de abajo hacia arriba

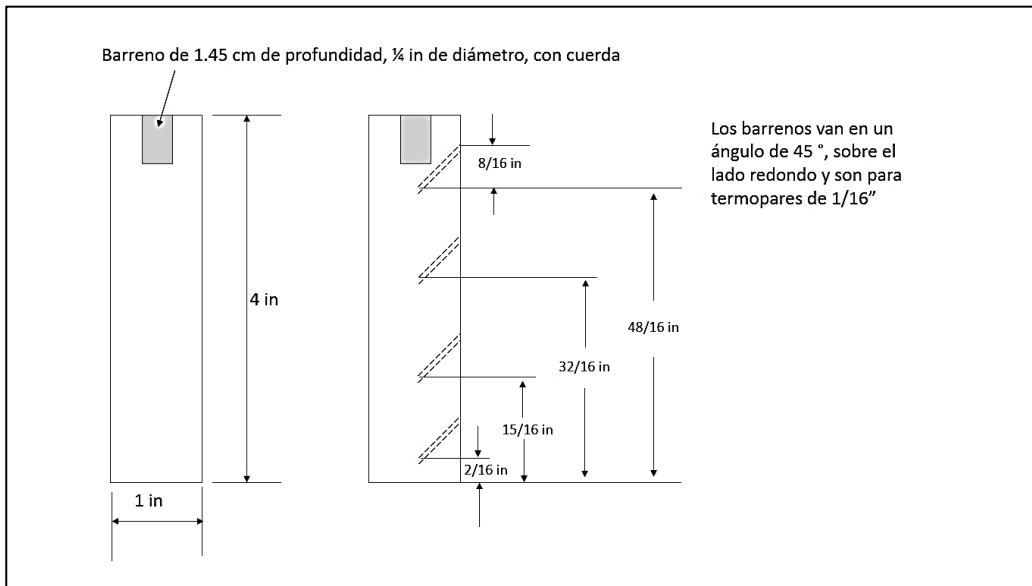


Figura 3.3 Esquema de las probetas Jominy estándar con 4 termopares, las posiciones de los termopares son TC1, TC2, TC3 y TC4 de abajo hacia arriba.

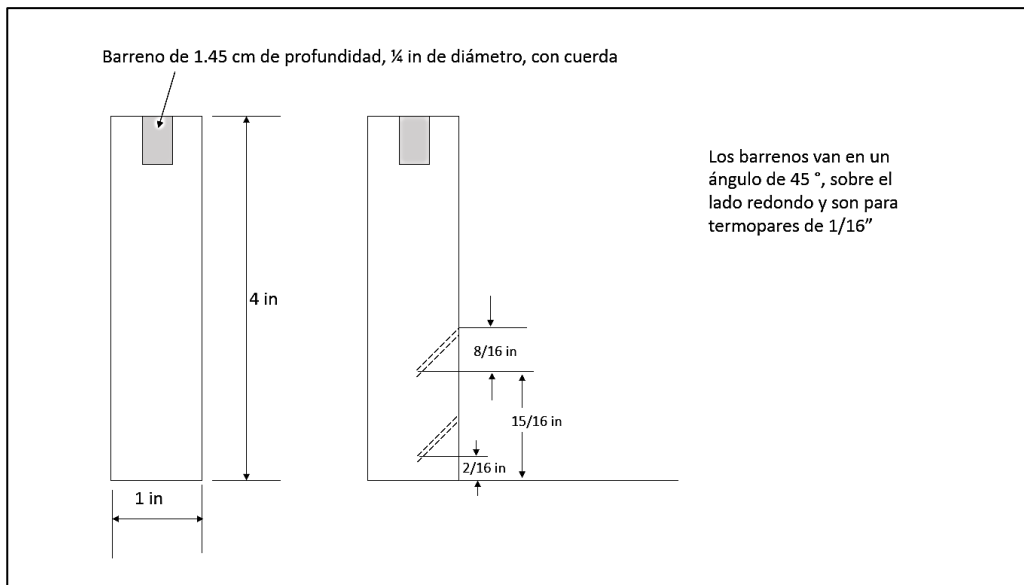


Figura 3.4 Esquema de las probetas Jominy estándar con barrenos para 2 termopares, las posiciones de los termopares son TC1 y TC2 de abajo hacia arriba

El dispositivo Jominy consta de una estructura metálica en arreglo rectangular el cual tiene una base donde se coloca un tanque de acrílico que recibe el agua del ensayo. La columna de agua del ensayo se genera bombeando agua a través de una tubería de PVC (que termina en una sección en forma de "L") que tiene un rotámetro marca Blue White con capacidad de hasta 5 GPM. En la parte superior de la estructura se tiene una plataforma deslizante sujeta a un cable junto con una manivela, la cual se puede manipular para ajustar la distancia de las probetas con respecto a la parte superior de la "L" de PVC. Las probetas se instrumentaron con termopares conectados a una tarjeta de adquisición de datos marca *Data Translation* modelo DT 9828 controlada con el software *QuickDAQ* que se ejecuta en una laptop. La frecuencia de adquisición de datos en todos los ensayos fue de 15 Hz. En la parte exterior se tiene otro tanque con agua que funge como alimentación y receptáculo; en su interior se coloca una bomba sumergible para alimentar a la tubería. El sistema se muestra esquemáticamente en las Figuras 3.5 (vista frontal), 3.6 (vista superior del tanque en la sección media) y 3.7 (vista lateral del tanque en la sección del medio).

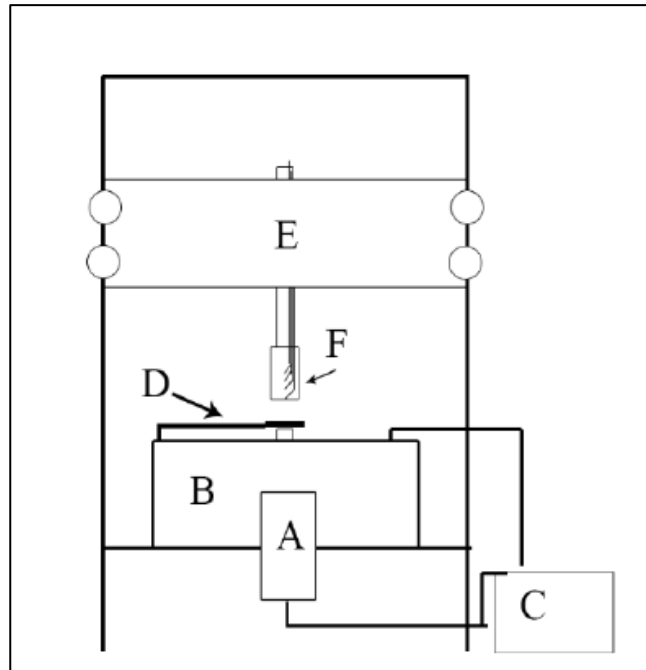


Figura 3.5 Vista frontal del dispositivo de temple: A rotámetro, B tanque de agua del temple, C contenedor con agua para temple, D placa para detener la columna de agua, E dispositivo para desplazar a la probeta, F probeta.

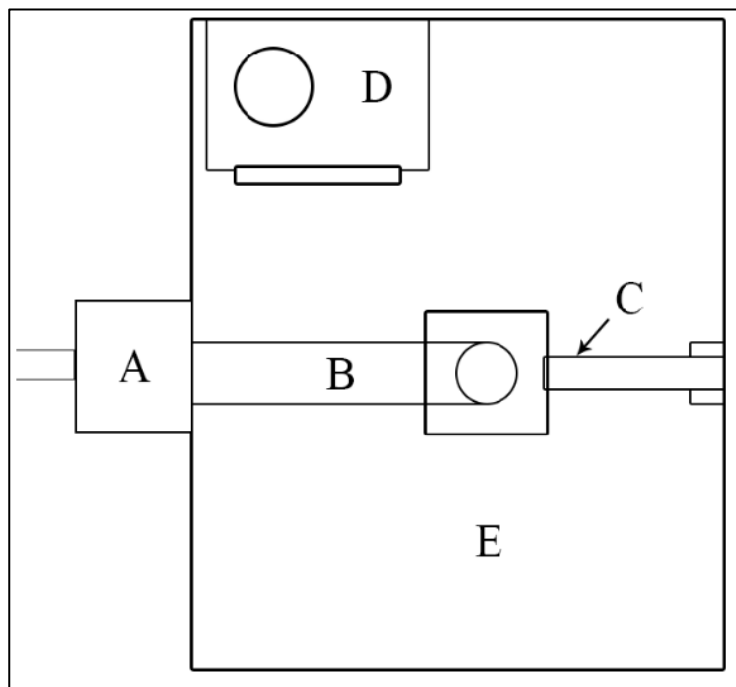


Figura 3.6 Vista superior del dispositivo de temple: A entrada de agua al sistema, B tubo de PVC en L, C placa, D bomba de extracción de agua.

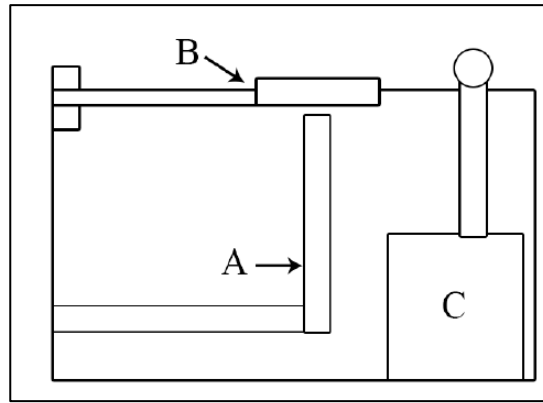


Figura 3.7 Vista lateral del tanque de acrílico: A L de PVC, B placa, C bomba extractora conectada a manguera.

Después del tratamiento T0, la probeta se montó en el sistema para calentarla en un horno de resistencias eléctricas de tipo “libro” hasta alcanzar una temperatura de 530°C con un rango de precisión de ± 5 °C (525°C-530°C). Después de mantener la pieza en el horno por un tiempo de 2 horas, se realizó el temple en el dispositivo Jominy, para lo cual el horno se abrió y se retiraba de manera que no golpee la pieza, para que así la probeta (la cual está unida a una lanza de acero inoxidable) se desplazara hasta llegar a la posición de temple. Previamente, la columna de agua ya se había establecido colocando una placa para evitar que entre en contacto con la base de la probeta antes de tiempo.

En el ciclo de trabajo posterior al temple, las probetas fueron sometidas a un endurecimiento por precipitación (ver Figura 3.8).

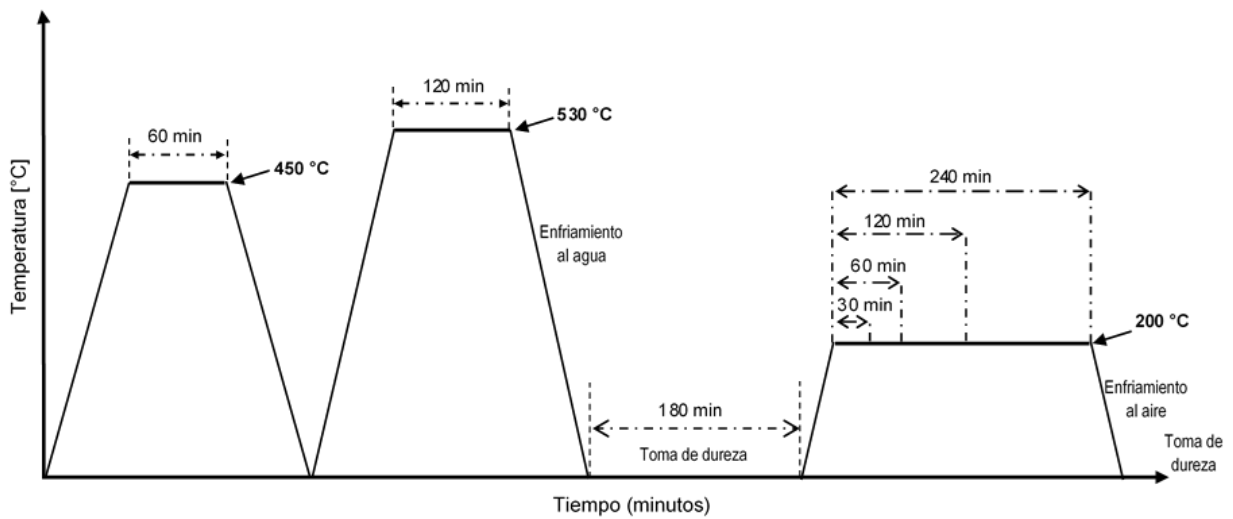


Figura 3.8 Ciclo del trabajo experimental para las probetas.

Adicionalmente, se realizaron ensayos de temple (sin ninguna de las etapas previas ni posteriores) a probetas reducidas y de tamaño estándar, con el fin de caracterizar exclusivamente el enfriamiento durante el temple.

A la probeta templada se le realizó un ensayo de dureza Brinell, en un durómetro marca Time, modelo THB-3000E, con una carga de 125 kgf, por un tiempo de 20 segundos y un indentador de 5 milímetros. Todas las mediciones de dureza se realizaron en 2 caras paralelas, por lo que los valores se obtuvieron por duplicado. Debido a que las huellas fueron relativamente grandes, las mediciones no se pudieron realizar a intervalos de 1/16 de pulgada como la norma para aceros lo dicta. Las huellas se generaron a 4/16" de distancia entre ellas para que así se pudieran distinguir una de otra; la primera huella se tomó a una distancia de 3 mm de la base templada, con el fin de que pudiera coincidir con la posición de la punta caliente de uno de los termopares.

El ciclo indica que después del temple se hace una pausa con una espera de 3 horas; durante este tiempo se realizaba el ensayo de dureza Brinell de la probeta previo al envejecimiento. Una vez pasado el tiempo de espera la probeta se volvía a montar y, se introducía al horno para realizar los envejecimientos artificiales a 4 periodos distintos de tiempo: 30, 60, 120 y 240 minutos; es importante mencionar que el tiempo de envejecimiento se toma una vez que la pieza alcanza una temperatura de 200 °C con una precisión de ± 5 °C. Posteriormente al tiempo de envejecimiento, la probeta se dejaba enfriar al aire para que nuevamente se realizara el ensayo de dureza. Adicionalmente a los envejecidos artificiales se efectuó en una probeta un envejecimiento natural, por un periodo de 9 días a temperatura ambiente, después del tiempo de envejecido se le realizó el ensayo de dureza Brinell.

Finalmente, una probeta de tamaño estándar de la misma aleación se sujetó al mismo ciclo con un tiempo de envejecido de 30 minutos; también se le realizó en el ensayo Brinell a las mismas condiciones después del temple y del envejecido.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Resultados

4.1.1 Análisis químico

En la Tabla 4.1 se muestra la composición química obtenida de la muestra a la que se le realizó el análisis químico a través de espectroscopia de emisión óptica. Al analizar su composición y comparando con la literatura se determinó que se trata de una aleación de la serie 6XXX (Mg-Si-Al), específicamente una aleación AA6061 [4].

Tabla 4.1 Composición química medida [4]

| E | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Zn | Ni | Cr | Pb | Ti | V | Co | Sr | Al |
|---|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| % | 0.7270 | 0.3005 | 0.1792 | 0.0658 | 0.943 | 0.0262 | 0.0057 | 0.0854 | 0.0026 | 0.0259 | 0.0103 | 0.0020 | 0.0003 | 97.6 |

4.1.2 Curvas de enfriamiento

En la Figura 4.1 se grafican las curvas de enfriamiento en distintas posiciones obtenidas de un solo experimento de una probeta de tamaño reducido. Nótese que los valores de rapidez de enfriamiento son negativos. Se aprecia que el enfriamiento de la probeta está en función de la posición de cada termopar. La posición del termopar TC1 (que se encuentra más cercano al extremo templado) provoca que se enfríe más rápidamente con respecto a los otros termopares; en contraste la posición de TC4 se enfría más lentamente dado que es el termopar más lejano con respecto al extremo templado.

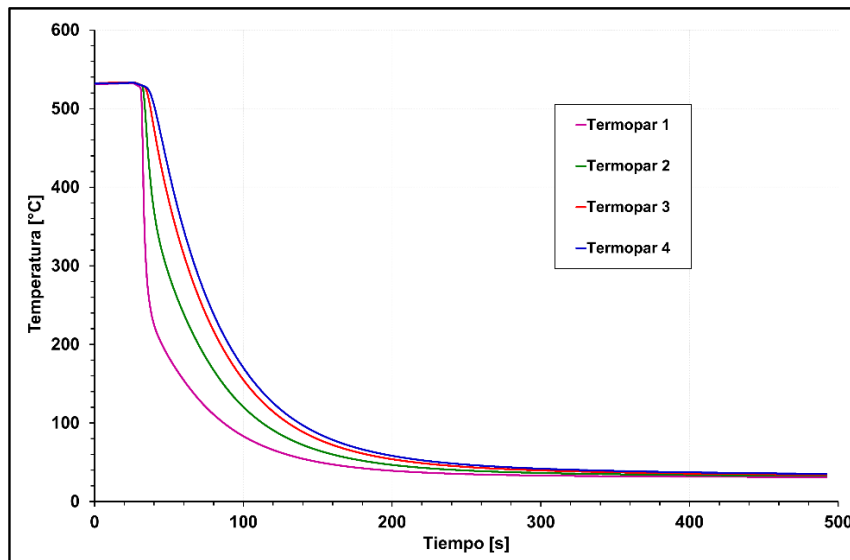


Figura 4.1 Curvas de enfriamiento en una probeta reducida 3:4 en 4 posiciones diferentes durante el temple desde 530 °C.

La rapidez de enfriamiento se calculó con una derivada numérica de dos puntos de la curva de enfriamiento. En la Figura 4.2 (rapidez de enfriamiento en función del tiempo para distintas posiciones) se observa que la rapidez de enfriamiento está también en función de la posición. La probeta tiene una mayor rapidez de enfriamiento máxima en la posición de TC1 (-100 °C/s) debido a que su ubicación está cerca del extremo templado, mientras que en TC4 cuya posición se ubica lejos del extremo templado, la rapidez de enfriamiento máxima (-10 °C/s) resulta ser menor en comparación con las demás.

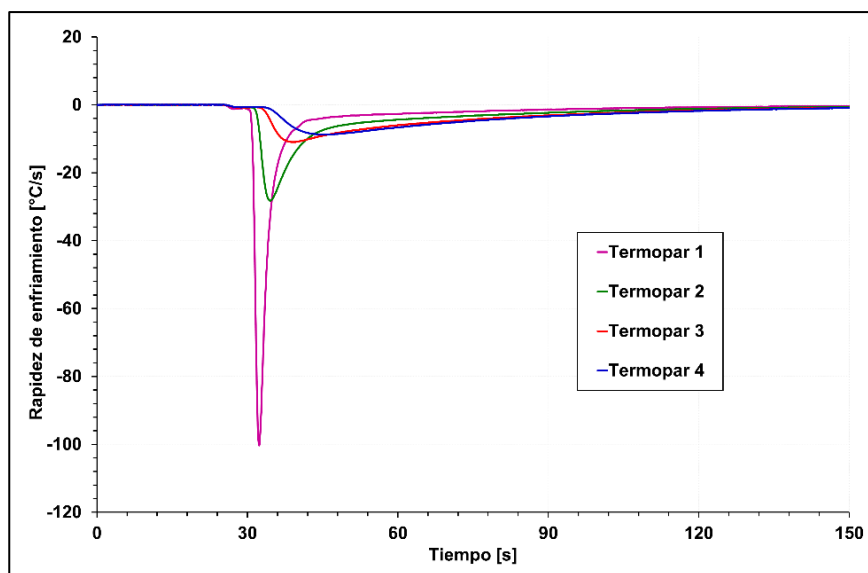


Figura 4.2 Curvas de rapidez de enfriamiento en una probeta reducida 3:4 en 4 posiciones diferentes durante el temple desde 530 °C.

En la Figura 4.3 se grafican las curvas de enfriamiento medidas con el termopar TC1 durante el temple desde 530 °C de una probeta de tamaño reducido en tres experimentos independientes. La forma de las curvas indica que el enfriamiento ocurre más rápidamente al inicio del ensayo y, conforme va pasando el tiempo, el enfriamiento es más lento. Se puede apreciar una muy buena repetitividad de los experimentos, dado que las curvas son prácticamente idénticas.

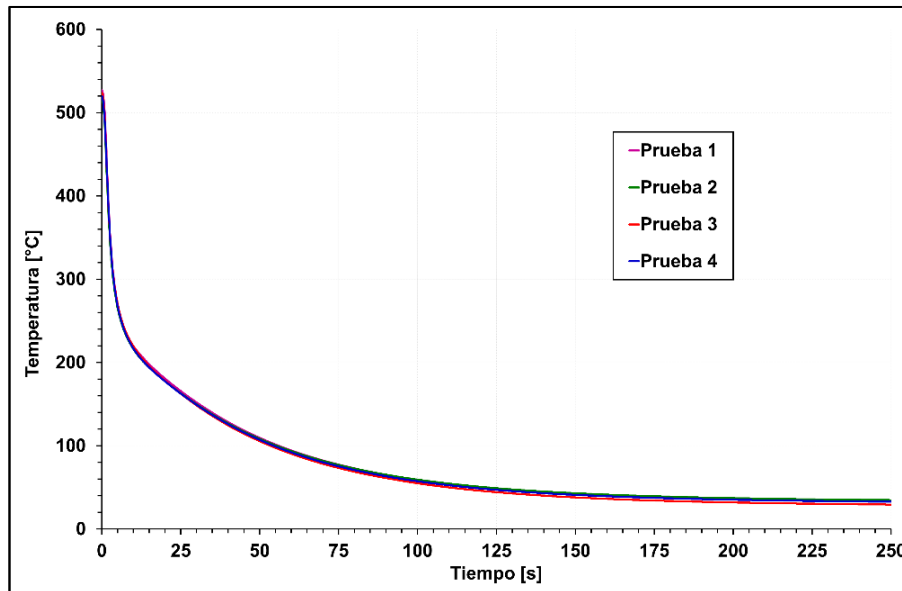


Figura 4.3 Curva de enfriamiento en una probeta reducida, en la posición del termopar TC1 durante el temple desde una temperatura de 530 °C para 4 pruebas independientes.

En la Figura 4.4 se aprecia la gráfica de las curvas de rapidez de enfriamiento que se obtuvieron mediante diferenciación numérica de las curvas de enfriamiento medidas (ver Figura 4.3). De nuevo se observa que existe buena repetitividad en los experimentos. La rapidez de enfriamiento máxima oscila entre -90 y -100 °C/s y ocurre aproximadamente a los 2 s.

La forma de las curvas es consecuencia del enfriamiento causado por el impacto de la columna de agua en la base de la probeta, que evita tanto la formación de una capa de vapor como la formación de burbujas, fenómenos que ocurren en el proceso de temple por inmersión.

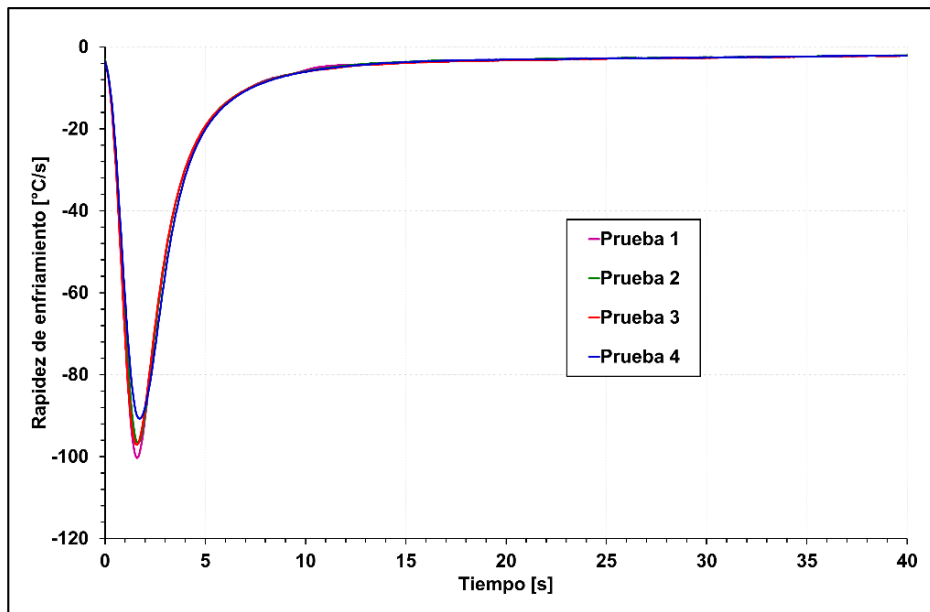


Figura 4.4 Rapidez de enfriamiento en función del tiempo para la probeta reducida en la posición del termopar TC1 durante el temple desde 530 °C para 4 pruebas independientes

En la Figura 4.5 se grafican las curvas de enfriamiento en la posición TC1 en una probeta de tamaño estándar. Muestran un comportamiento muy parecido al de los resultados obtenidos de la probeta de tamaño reducido (ver Figura 4.3); debido a diferencia de las dimensiones entre una probeta estándar y una reducida, la probeta estándar tarda un poco más en enfriarse. Al igual que con la probeta reducida, en la probeta estándar también hay una buena repetitividad en los resultados.

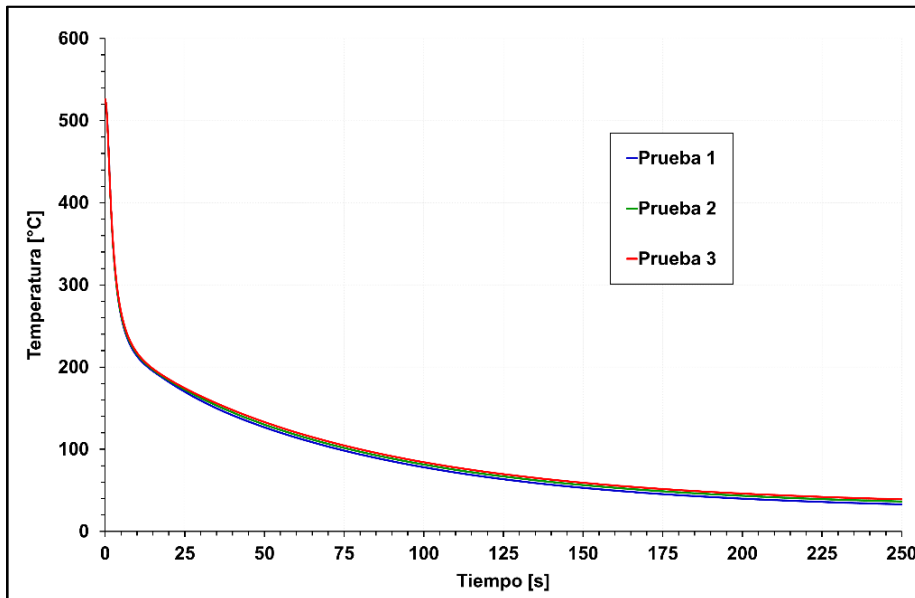


Figura 4.5 Curva de enfriamiento en una probeta estándar, en la posición del termopar TC1 durante el temple desde una temperatura de 530 °C para 3 pruebas independientes.

En la Figura 4.6 se grafican las curvas de rapidez de enfriamiento. La máxima rapidez de enfriamiento que se obtuvo en una probeta estándar oscila entre -95 y -100 $^{\circ}\text{C/s}$, la cual ocurre aproximadamente a los 2 segundos, que son valores bastante parecidos a los que se obtuvieron para la probeta reducida (ver Figura 4.4).

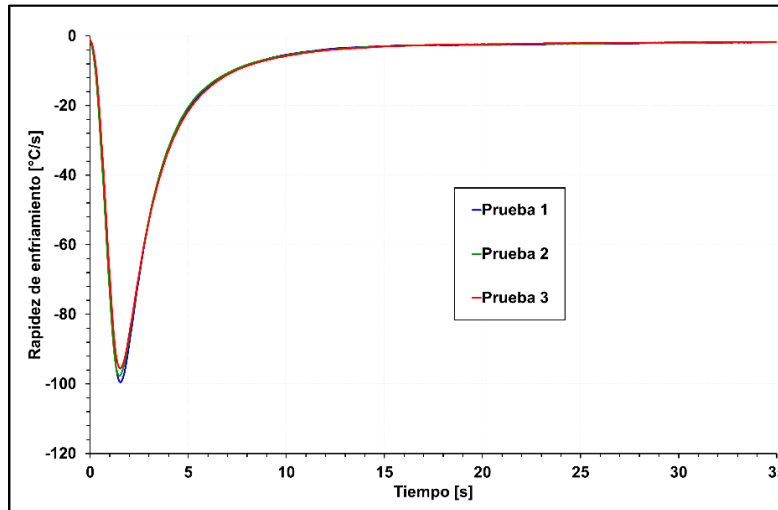


Figura 4.6 Rapidez de enfriamiento en función del tiempo para la probeta estándar en la posición del termopar TC1 durante el temple desde 530 $^{\circ}\text{C}$ para 3 pruebas independientes.

En la Figura 4.7 se aprecia la gráfica de las curvas de enfriamiento obtenidas con una probeta estándar. Al igual que en la probeta reducida, el enfriamiento está en función de la posición, con la diferencia de que, debido a las dimensiones de la probeta estándar, el enfriamiento es más lento en posiciones alejadas del extremo templado.

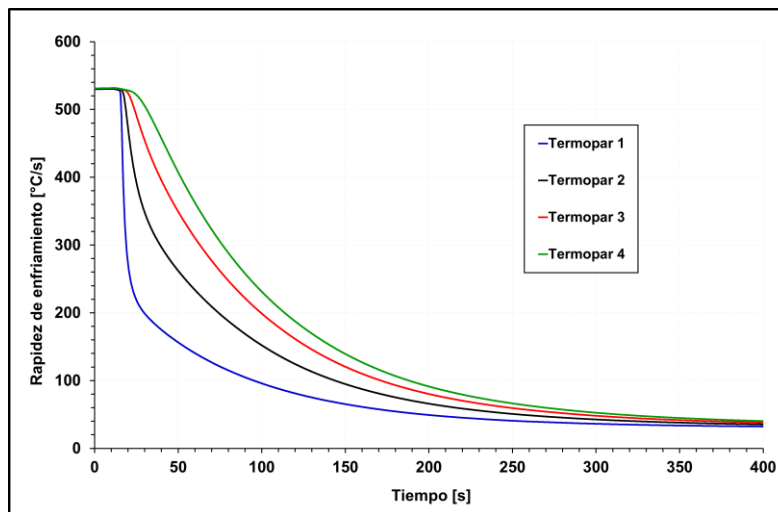


Figura 4.7 Curvas de enfriamiento en una probeta reducida estándar en 4 posiciones diferentes durante el temple desde 530 $^{\circ}\text{C}$.

4.1.3 Perfiles de dureza

En la Figura 4.8 se grafican los perfiles de dureza de una probeta de tamaño reducido en condición de llegada (tal vez T6) y en condición inicial (T0) en 3 puntos a lo largo de la probeta. Se puede observar que el perfil de dureza en la condición de llegada tiene valores mayores con respecto a los obtenidos después del tratamiento T0. Los valores iniciales de la probeta son similares a los de una pieza de una aleación de aluminio 6061 que está en condición de T6 ¹. En ambos casos, la dureza es uniforme a lo largo de la probeta.

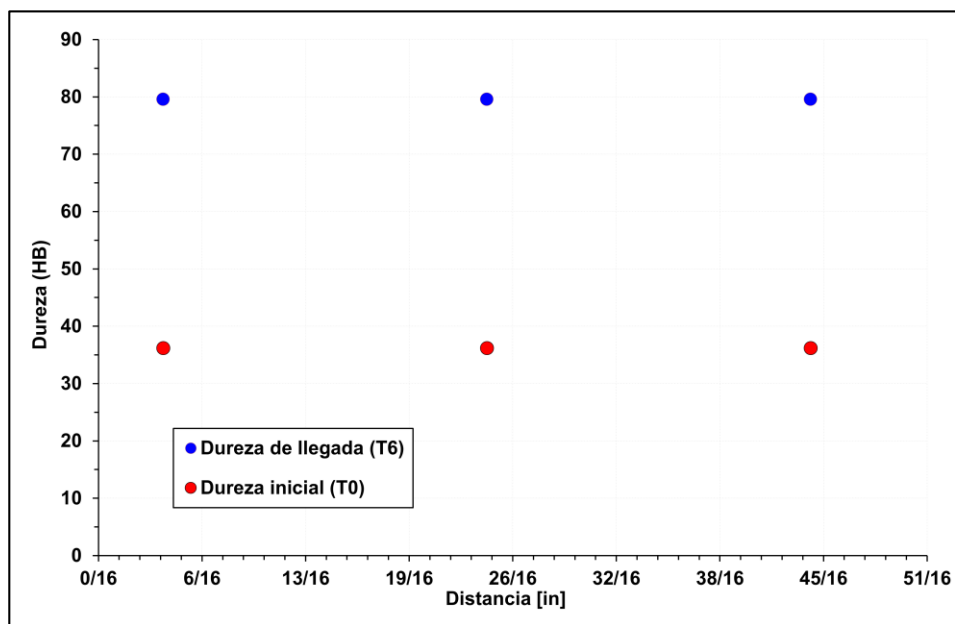
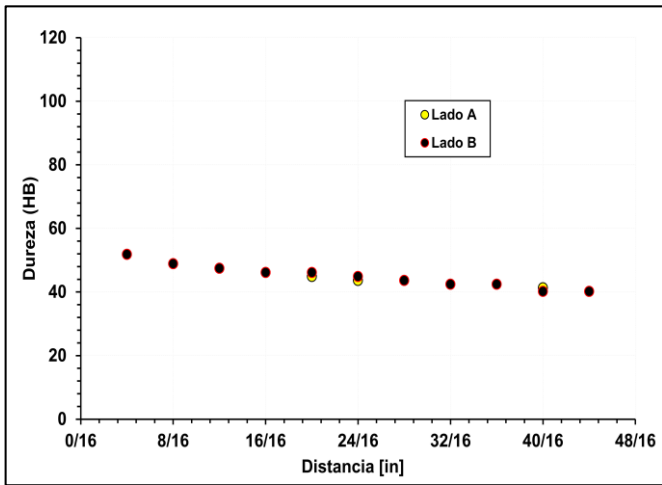
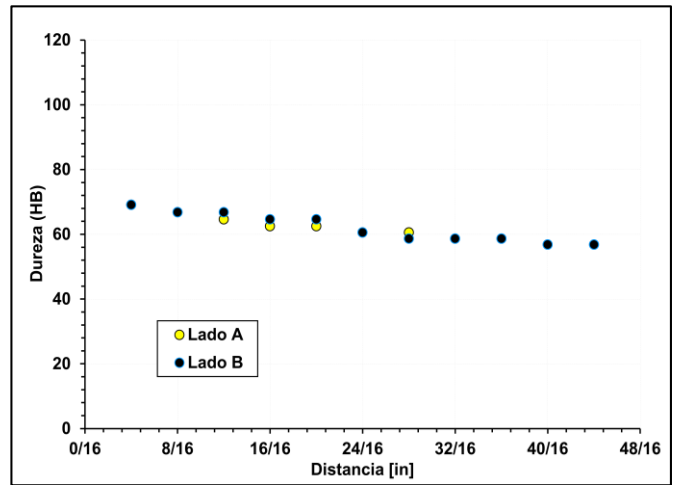


Figura 4.8 Perfil de dureza en una probeta de tamaño reducida en condición de llegada (posiblemente T6) y después del tratamiento (T0).

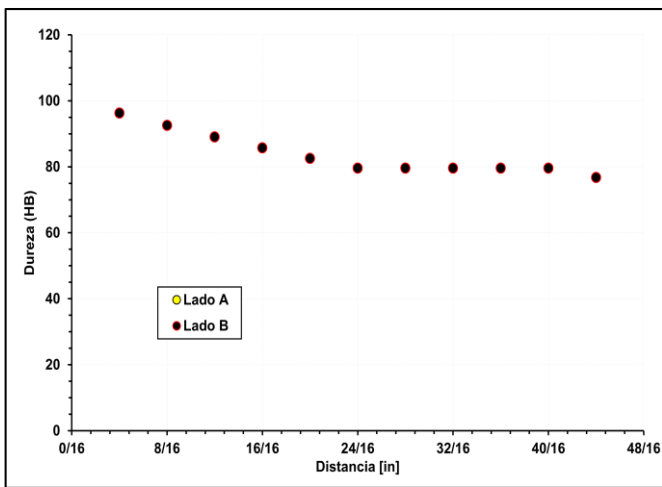
En la Figura 4.9 se muestran los perfiles de dureza obtenidos después del temple y después de los envejecimientos (natural y artificial), medidos en las dos caras opuestas de cada probeta. La dureza que se produjo después del temple (Figura 4.9a) es menor en comparación con la dureza obtenida después de todos los tratamientos de envejecimiento a los que fueron sometidas las probetas durante las pruebas; la dureza va en aumento conforme el tiempo de envejecimiento artificial aumenta. El envejecimiento natural se realizó manteniendo la probeta a temperatura ambiente durante un tiempo de 9 días; como resultado de ese tratamiento, la dureza obtenida es mayor a la dureza después del temple, pero es menor con respecto a los valores después de los envejecimientos artificiales.



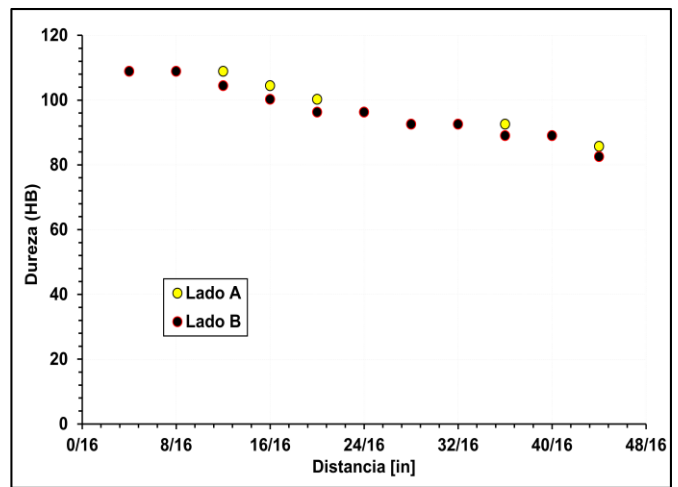
a)



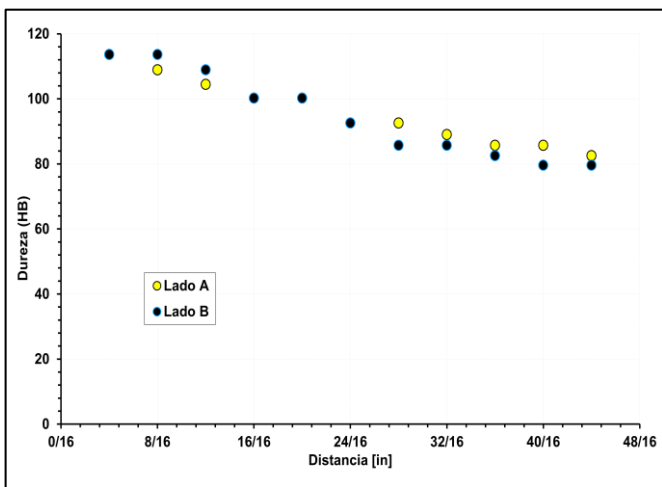
b)



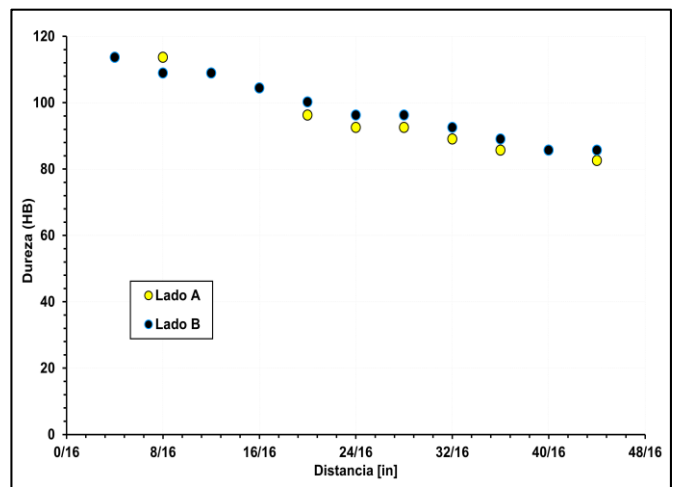
c)



d)



e)



f)

Figura 4.9 Perfiles de dureza de una probeta de tamaño reducido: a) después del temple, b) después del envejecido natural por 9 días, c) después del envejecido a 200 °C por 30 minutos, d) después del envejecido a 200 °C por 60 minutos, e) después del envejecido a 200 °C por 120 minutos, f) después del envejecido a 200 °C por 240 minutos.

4.2 Análisis de resultados

4.2.1 Curvas de enfriamiento y de rapidez de enfriamiento

En las Figuras 4.1 y 4.2 se graficaron las curvas de enfriamiento y de rapidez de enfriamiento, respectivamente obtenidas con la probeta de dimensiones reducidas. Como se mencionó anteriormente, el enfriamiento de la probeta está en función de la distancia, es decir que en la posición cercana al extremo templado donde contacta con el chorro de agua el enfriamiento es más rápido y a medida que la posición está más alejada del extremo templado el enfriamiento se vuelve más lento. En las Tablas 4.2 y 4.3 se muestran los valores máximos obtenidos de la rapidez de enfriamiento durante el temple desde 530 °C para probetas de tamaño reducido y de tamaño estándar, respectivamente. Se observa que los valores en la posición del termopar TC1 son muy parecidos entre sí; esto se debe a que la distancia desde el extremo templado a esa posición es parecida entre ambas probetas. A medida que la medición de dureza se realiza más alejada del extremo templado los valores disminuyen, siendo más notorio en la probeta estándar; recuérdese que las posiciones de los termopares son distintas (ver Figura 3.3).

Tabla 4.2 Rapidez de enfriamiento máxima después del temple de una probeta de tamaño reducido en cada posición de termopar.

| Termopar | $\frac{dT}{dt} \left[\frac{^{\circ}C}{s} \right]$ |
|----------|--|
| TC1 | 99.6 |
| TC2 | 27.8 |
| TC3 | 10.9 |
| TC4 | 8.78 |

Tabla 4.3 Rapidez de enfriamiento máxima después del temple de una probeta estándar en cada posición de termopar.

| Posición | $\frac{dT}{dt} \left[\frac{^{\circ}C}{s} \right]$ |
|----------|--|
| TC1 | 99.6 |
| TC2 | 20.9 |
| TC3 | 7.76 |
| TC4 | 5.08 |

4.2.2 Perfiles de dureza

En la Figura 4.10 se grafica el perfil de dureza después del temple y después del envejecido artificial por 30 minutos a 200 °C que se aplicó a una probeta estándar. Al igual que en las pruebas de probetas de tamaño reducido, la dureza después del envejecido es mayor a la dureza que se obtuvo después del temple. Comparando la gráfica obtenida de la probeta estándar con la que se obtuvo de la probeta de tamaño reducido (ver Figura 4.9c), se observa que los valores son parecidos, aunque los datos de la probeta reducida son ligeramente mayores. En ambas se conserva la misma tendencia de la dureza, es decir que en el extremo templado es mayor y conforme la medición de dureza se aleja de es extremo van disminuyendo.

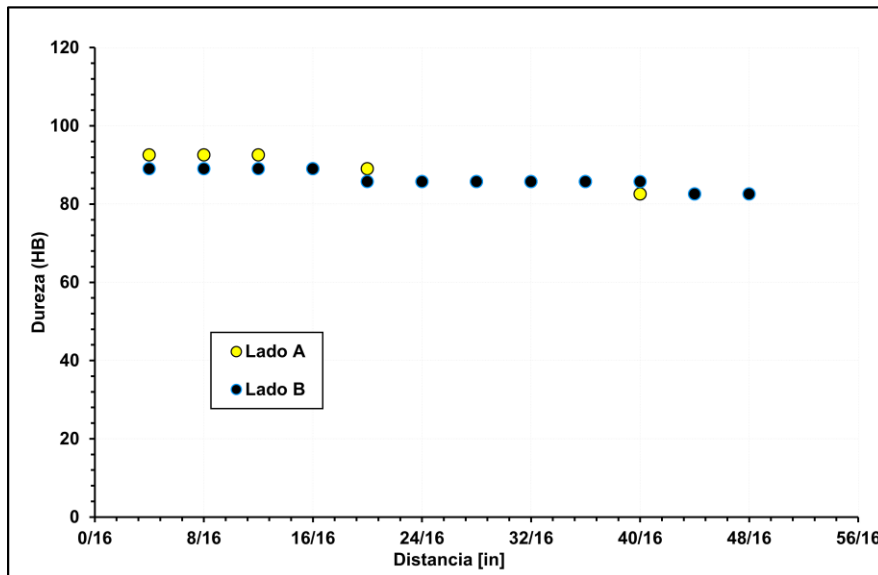
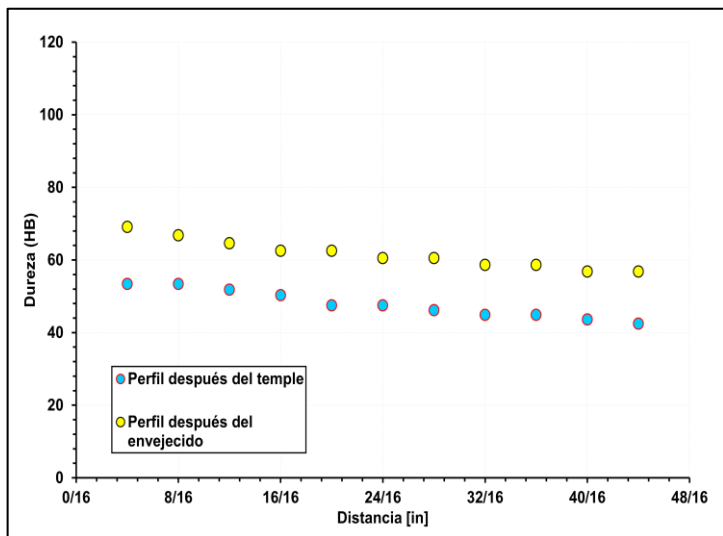
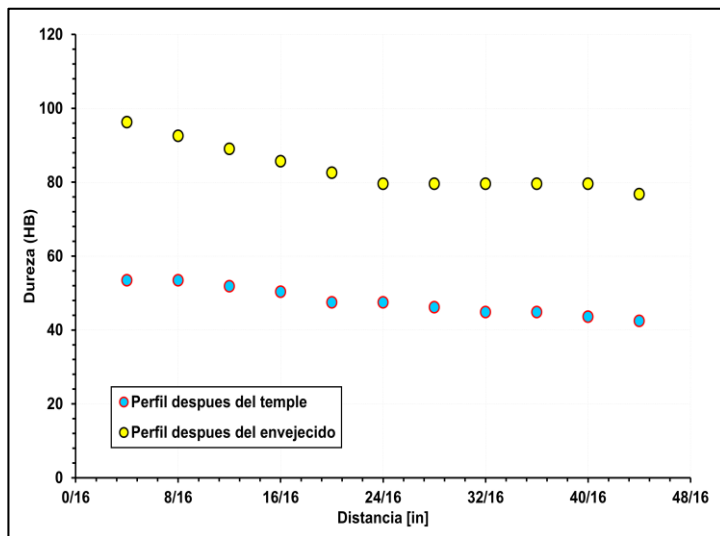


Figura 4.10 Perfil de dureza de una probeta de tamaño estándar después del envejecido a 200 °C por 30 minutos

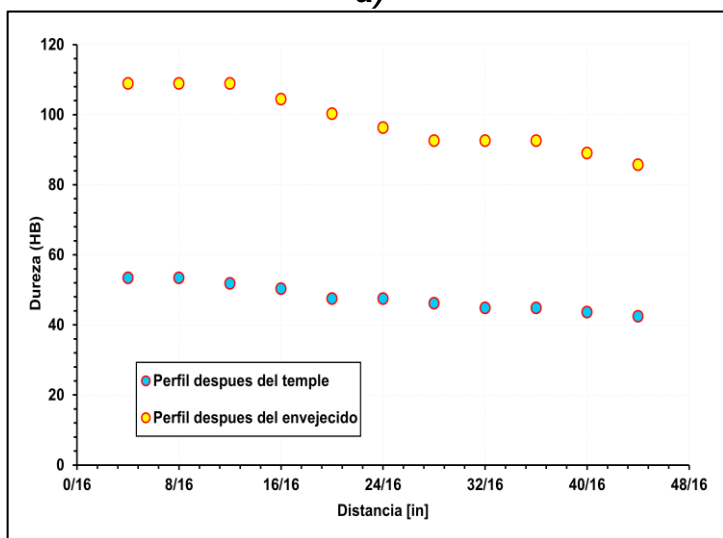
En la Figura 4.11 se muestran los perfiles de durezas que se obtuvieron después del temple y después del envejecimiento al que se sometió cada probeta. Al comparar cada gráfica con respecto a la dureza después del temple, se observa que la dureza va aumentando a medida que aumenta el tiempo de envejecido, llegando a una dureza máxima que se alcanza para un tiempo de 120 minutos (Ver Figura 4.9e).



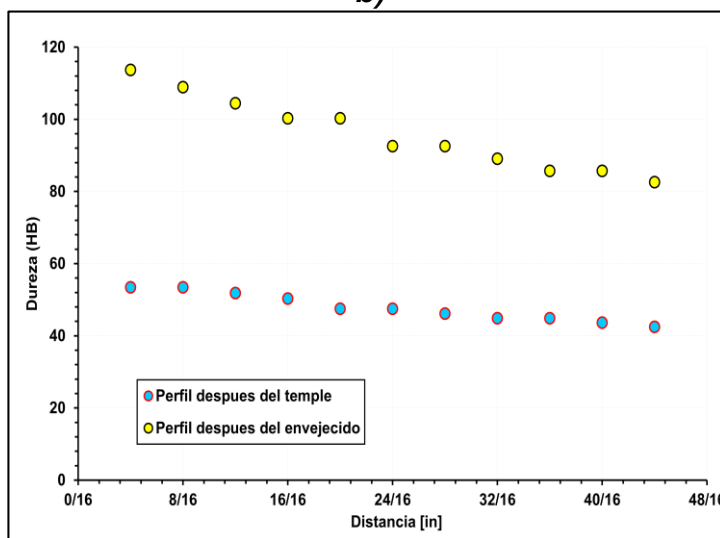
a)



b)

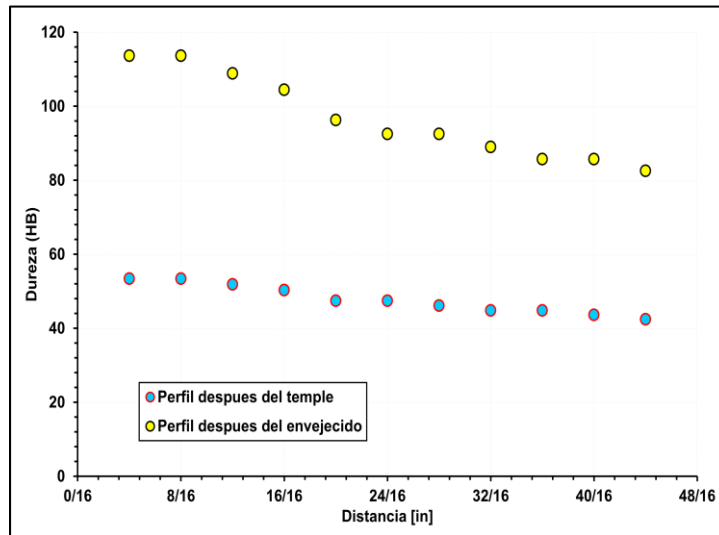


c)



d)

Figura 4.11 Perfiles de dureza de una probeta de tamaño reducido: a) temple y envejecido natural, b) temple y envejecido a 200 °C por 30 minutos, c) temple y envejecido a 200 °C por 60 minutos, d) temple y envejecido a 200 °C por 120 minutos, e) temple y envejecido a 200 °C por 30 minutos.



e)

Figura 4.11 (cont.) Perfiles comparativos de dureza de una probeta reducida: a) temple y envejecido natural, b) temple y envejecido a 200 °C por 30 minutos, c) temple y envejecido a 200 °C por 60 minutos, d) temple y envejecido a 200 °C por 120 minutos, e) temple y envejecido a 200 °C por 30 minutos

En la Figura 4.12 se comparan todos los perfiles de dureza obtenidos con el trabajo experimental. La dureza después del envejecimiento natural es mayor que la que se obtiene después del temple, pero mucho menor que después del envejecimiento artificial. Además, el cambio en el valor de dureza es mas apreciable en regiones cercanas al extremo templado.

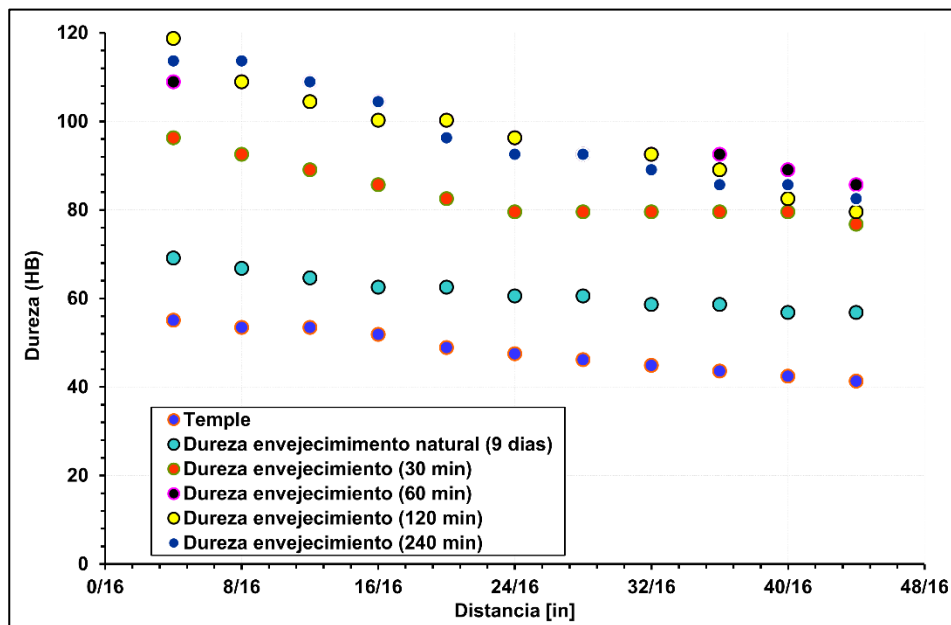


Figura 4.12 Perfil de dureza después del temple desde 530°C, envejecidos artificiales a 200 °C por 30, 60, 120 y 240 minutos y envejecido natural por 9 días.

En la Figura 4.13 se muestran los valores de dureza máxima obtenidos con respecto al tiempo de envejecimiento artificial a 200°C, junto con el valor después del temple que se le realizó desde 530 °C. Con esta información se determinó que la máxima dureza que se obtuvo en todas las pruebas realizadas a diferentes tiempos de envejecimiento fue para el tratamiento de 120 minutos, mientras que la dureza mínima obtenida en estos experimentos fue para el tratamiento realizado durante 30 minutos. Es importante señalar que, para el tiempo de 240 minutos, la dureza baja con respecto a la máxima dureza obtenida. Esto se explica porque el magnesio es el responsable de que el envejecimiento se vuelva lento, es decir no permite que los precipitados se formen correctamente [18].

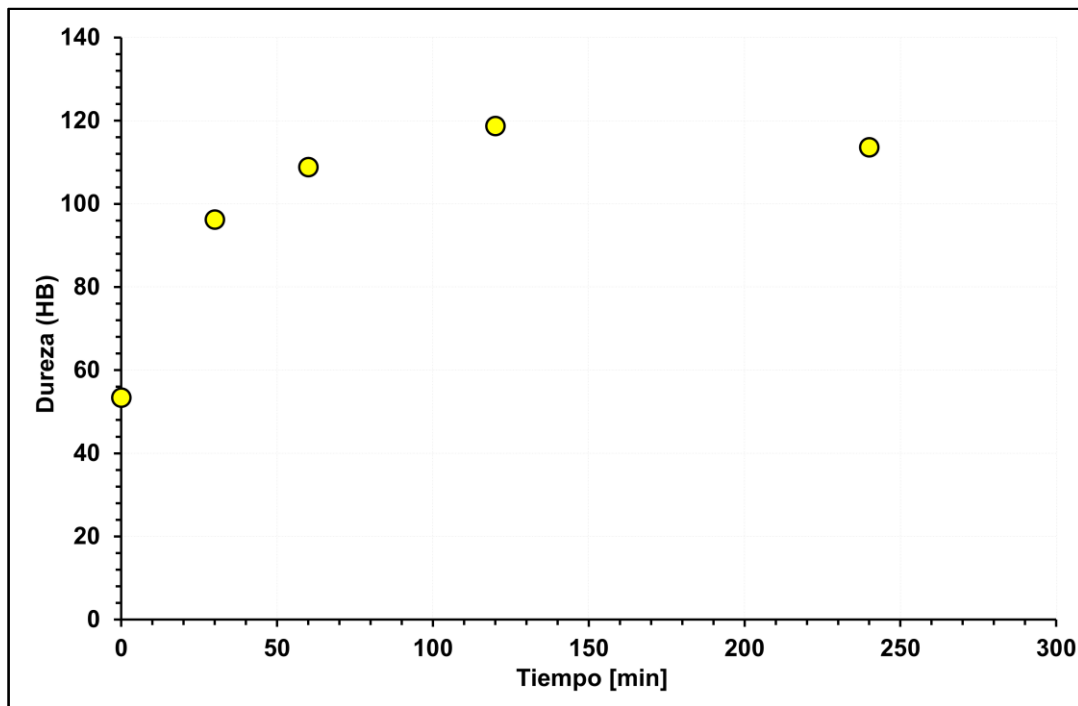


Figura 4.13 Dureza máxima para varias condiciones de tiempo de envejecimiento a 200 °C. Se incluye, también el valor después del temple desde 530 °C.

En la literatura [19] se reporta un ciclo de tratamiento térmico de envejecimiento (ver Figura 4.14), que se usó como referencia para el trabajo experimental, realizándose modificaciones con respecto al ciclo original de manera que se pudiera trabajar en él laboratorio satisfactoriamente. Estas modificaciones generaron resultados diferentes con variaciones con respecto a lo que se reportó en la literatura (Ver Tabla 4.4).

En la Figura 4.15 se grafica la dureza (HV) en función del tiempo de envejecido artificial reportada en [18]. Se observa bajos valores para tiempos de hasta 30 minutos, seguidos de un aumento que llega a un máximo para un tiempo de 120 minutos, después del cuál disminuye por sobre envejecimiento.

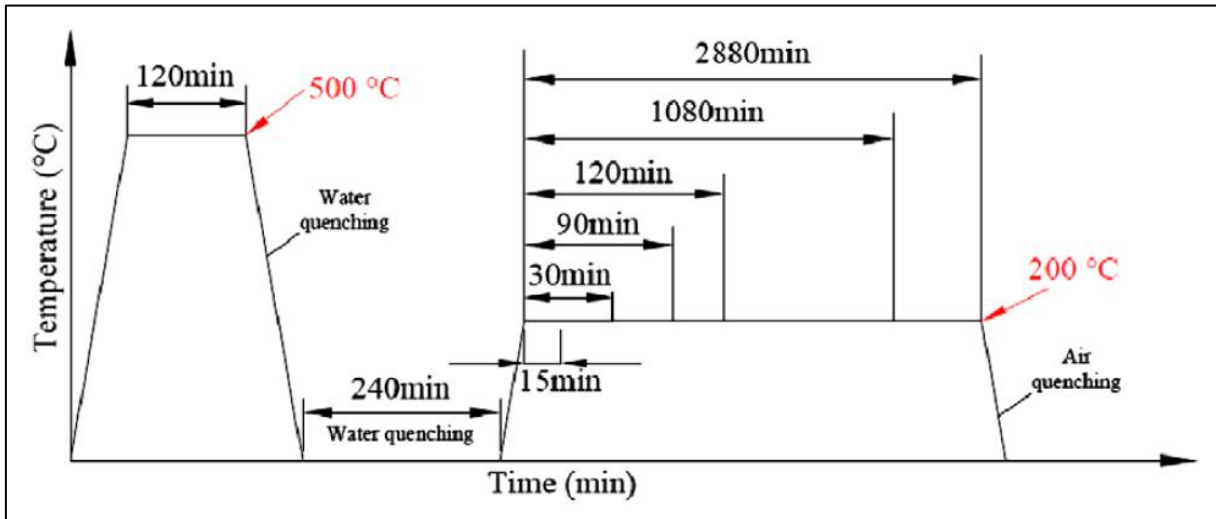


Figura 4.14 Diagrama del proceso de envejecimiento que se reportó [18].

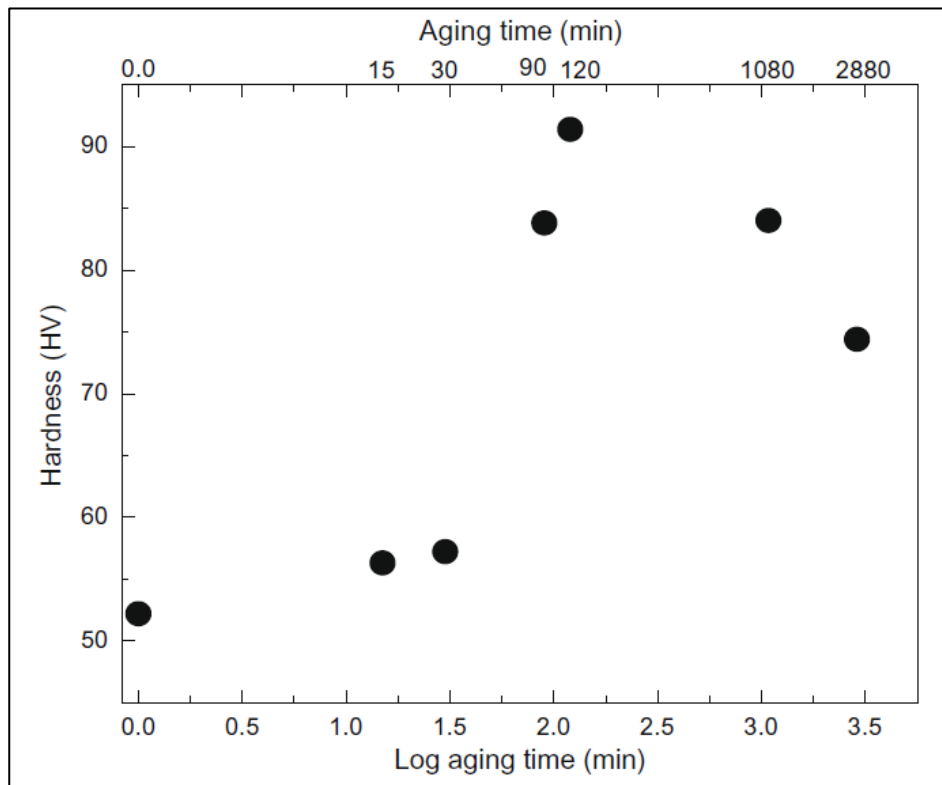


Figura 4.15 Mediciones de dureza para varias condiciones de envejecimiento reportadas en la literatura [19].

Para comparar los resultados reportados en la literatura con los del trabajo experimental, en la Tabla 4.4 se tabularon los valores de dureza máximos obtenido en el laboratorio y reportado en la literatura. La máxima dureza que se obtuvo en el laboratorio resultó ser mayor al que se obtuvo en la literatura. Es importante tener en cuenta que no se reporta ningún dato de rapidez de enfriamiento durante el temple en [18], por lo que no es posible comparar directamente los resultados. El rango de durezas reportado en este trabajo para la condición de envejecimiento que produjo la máxima dureza esta entre 79.6 y 118.7 HB, que incluye al valor de 88.3 HB reportado en la literatura.

Tabla 4.4 Dureza máxima reportada en la literatura [18] y obtenida del trabajo experimental.

| Valor reportado de dureza máxima [HV] | Valor reportado de dureza máxima experimental [HB] |
|---------------------------------------|--|
| 92 = [88.3 HB] | 118.7 |

En la Figura 4.16 se grafica el perfil de dureza después del temple desde 530 °C y el perfil de rapidez de enfriamiento a los 55 s de iniciado el temple (los valores se reportan en la Tabla 4.5). Nótese que los valores de rapidez de enfriamiento son negativos. En la gráfica se ve claramente que la dureza después del temple va disminuyendo a medida que la rapidez de enfriamiento durante el temple también disminuye.

Tabla 4.5 Perfil de dureza después del temple y de rapidez de enfriamiento a los 55 s de iniciado el temple.

| Distancia | Dureza [HB] | dT/dt [°C/s] |
|-----------|-------------|--------------|
| 1 | 53.4 | |
| 2 | 53.4 | -7.4 |
| 3 | 50.3 | |
| 4 | 50.3 | |
| 5 | 48.8 | -6.8 |
| 6 | 48.8 | |
| 7 | 46.1 | |
| 8 | 44.9 | -4.9 |
| 9 | 44.9 | |
| 10 | 44.9 | |
| 11 | 42.4 | -2.8 |

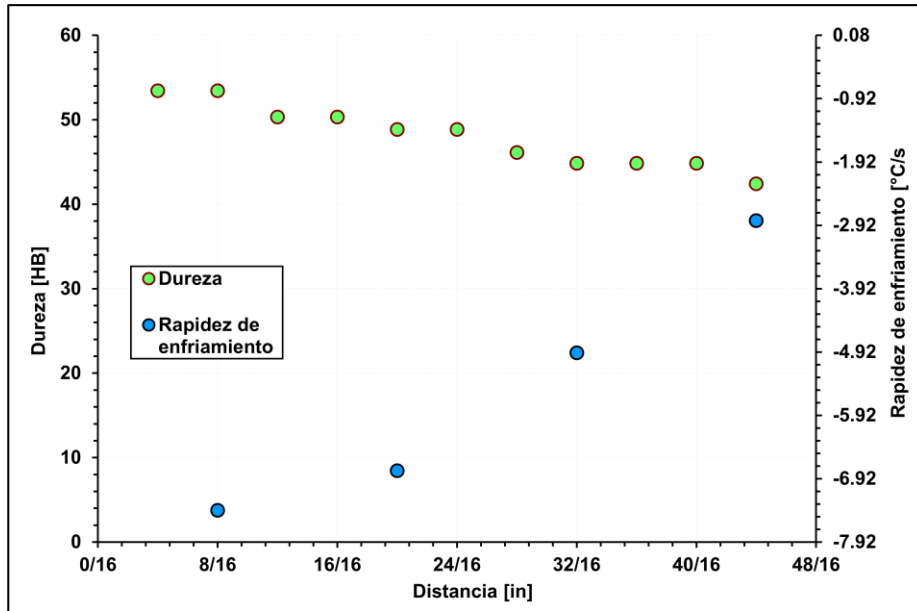


Figura 4.16 Perfil de dureza después de temple (círculos verdes) y de rapidez de enfriamiento a los 55 s de iniciado el temple (círculos azules).

En la Figura 4.17 se grafica la rapidez de enfriamiento durante el temple (a los 55 s de iniciado) en una probeta estándar y en una de tamaño reducido. Se observa que la rapidez de enfriamiento en la posición TC1 es mayor para la probeta estándar con respecto a la de tamaño reducido. A partir de aproximadamente 2 pulgadas, la diferencia entre los valores de rapidez de enfriamiento disminuye notablemente.

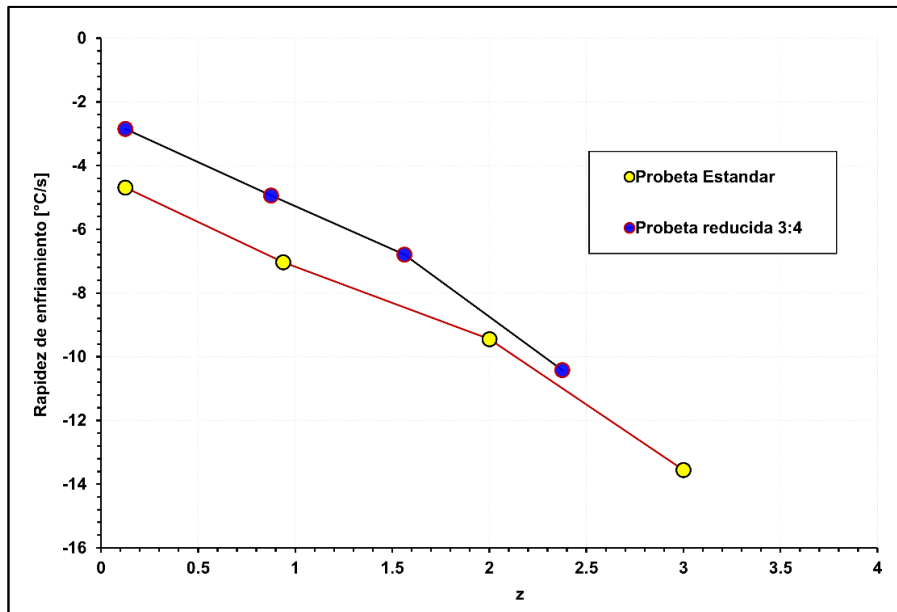


Figura 4.17 Rapidez de enfriamiento en función de la distancia en la probeta estándar (círculos amarillos) y en la probeta de tamaño reducido 3:4 (círculos morados) a un tiempo de 55 segundos.

En la Figura 4.18 se grafica la dureza después del tratamiento térmico de envejecido artificial por 30 minutos a 200 °C en función de la rapidez de enfriamiento máxima, ambas en las posiciones de los termopares, para la probeta de tamaño reducido y la estándar. De la gráfica se deduce que la respuesta metalúrgica de ambas probetas es equivalente, puesto que para rapidezces de enfriamiento durante el temple similares se producen valores de dureza después del tratamiento térmico similares.

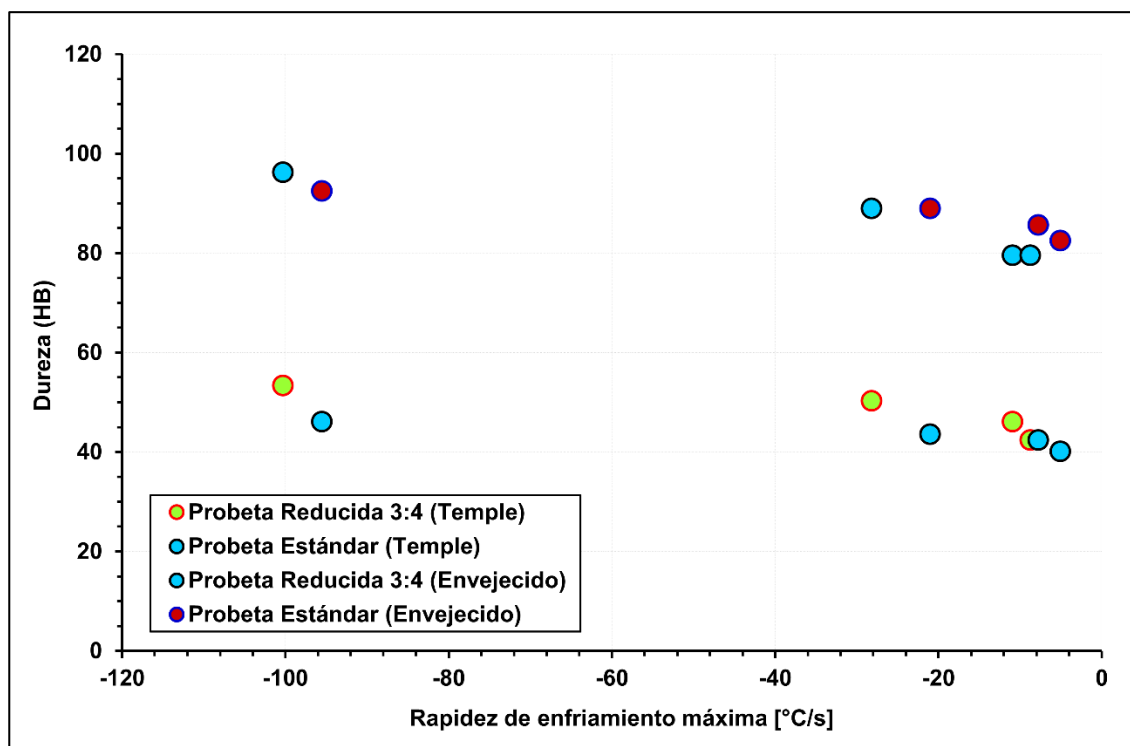


Figura 4.18 Comparación de la rapidez de enfriamiento máxima en la posición de cada termopar con respecto a la dureza entre una probeta estándar y una probeta reducida 3:4 después del temple a 530 °C y después del envejecimiento por 30 minutos a 200 °C

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Las condiciones (temperatura y tiempo de envejecimiento) para producir la dureza máxima después del tratamiento térmico de un envejecido para una probeta de tamaño reducido de la aleación AA6061 son: 200 °C y 120 minutos.
- La dureza final, al igual que la rapidez de enfriamiento durante el temple, son función de la posición, de manera que a mayor distancia desde el extremo templado la rapidez de enfriamiento es menor durante el temple y también se produce una menor dureza.
- Las probetas de tamaño reducido de la aleación de aluminio AA6061 permiten reproducir a escala los resultados que se esperarían de las probetas estándar si se sometieran a las mismas condiciones de temple y de envejecimiento.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda

- Realizar experimentos a tiempos más prolongados o tiempos más cortos de envejecimiento natural y artificial.
- Realizar experimentos aumentando la temperatura de envejecimiento
- Averiguar si en otro tipo de aleaciones de aluminio se puede realizar este mismo tipo de estudio.

6. REFERENCIAS

- [1] *Aleaciones de Aluminio: importancia y tipos - Blog - Perfiles de aluminio.* (s. f.). Perfiles de Aluminio. Recuperado 16 de marzo de 2023, de <https://perfilesdealuminio.net/articulo/aleaciones-de-aluminio-importancia-y-tipos/8>
- [2] De la Garza Garza, M. (1999). *Caracterización de precipitados en la aleación de aluminio 6061 por medio de microscopia de fuerza atómica* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de Nuevo León.
- [3] SA, A. (s. f.). *Aluminio, información técnica, historia y propiedades · Alu-Stock* S.A. Alustock. Recuperado 16 de marzo de 2023, de <https://www.alu-stock.es/es/informacion-tecnica/el-aluminio/>
- [4] Esmeralda A. (2012). *Propiedades mecánicas en aleaciones de aluminio vaciadas desde temperatura ambiente hasta 300°C.* (Tesis de Licenciatura) Universidad Nacional Autónoma de Nuevo León.
- [5] Aluminio. (s. f.). Química. Recuperado 16 de marzo de 2023, de <https://www.quimica.es/enciclopedia/Aluminio.html>
- [6] Smith, W.F. (1998) “*Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*”, McGraw-Hill Interamericana, 3º ed., Madrid, España.
- [7] E. Totten, G., y MacKenzie, S. (Eds.). (2003). *Handbook of Aluminum Physical Metallurgy and Processes* (Vol. 1). Marcel Dekker, New York, EEUU.
- [8] Zolotarevsky, V. S., Белов, Н. А., & Glazoff, M. V. (2007). *Industrial casting aluminum alloys.* En “*Casting Aluminum Alloys*”, Capítulo 5, pp. 327-396, Elsevier, Amsterdam.
- [9] *ASM Handbook: Heat Treating* (10.^a ed., Vol. 4). (1991). ASM International. Metals Park, OH, EEUU.
- [10] *Aluminio 6061 (composición).* (s. f.). Aluminios y Metales Unicornio. Recuperado 17 de marzo de 2023, de <http://www.aluminiosymetalesunicornio.com.mx/6061.html>
- [11] Mukhopadhyay, P. (2012). Alloy Designation, Processing, and Use of AA6XXX Series Aluminium Alloys, *International Scholarly Research Notices*, vol. 2012, 15 pp. <https://doi.org/10.5402/2012/165082>

- [12] Tash, M. M., Samuel, F. H., Mucciardi, F., Doty, H. W., & Valtierra, S. (2006). Effect of metallurgical parameters on the machinability of heat-treated 356 and 319 aluminum alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 434(1-2), 207-217. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.06.129>
- [13] Sjölander, E. (2011). Heat treatment of Al-Si-Cu-Mg casting alloys (Tesis de Doctorado). Jönköping University.
- [14] *Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel*. (2014). ASTM. Recuperado 10 de abril de 2023, de <https://www.astm.org/a0255-10r14.html>
- [15] Smoljan, B., Ijkić, D., Hanza, S. S., & Traven, F. (2009). An analysis of modified Jominy-test (JMC®-test). *Archives of materials science and engineering*, 1(2), 120-124.
- [16] Dolan, G., Flynn, R. J., Tanner, D. A., & Robinson, J. S. (2005). Quench factor analysis of aluminium alloys using the Jominy end quench technique. *Materials Science and Technology*, 21(6), 687-692 .
- [17] *Standard test method for brinell hardness of metallic materials*. (2018). ASTM. Recuperado 10 de abril de 2023, de <https://www.astm.org/e0010-18.html>
- [18] Öztürk, F., Şişman, A., Toros, S., Kılıç, S., & Picu, C. R. (2010). Influence of aging treatment on mechanical properties of 6061 aluminum alloy. *Materials in engineering*, 31(2), 972-975. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.08.017>