



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**

**ESCUELA SUPERIOR DE CIUDAD SAHAGÚN**

**LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECÁNICA**



**Tesis**

**“DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN EQUIPO PARA REALIZAR  
ENSAYOS JOMINY EN ACEROS APLICADOS EN LA INDUSTRIA  
METALMECÁNICA”**

Que para obtener el título de

Licenciado en Ingeniería Mecánica

**Presenta**

Santiago Ruiz Jafet

**Asesor:**

Dr. Pacheco Cedeño José Sergio

**Co-Asesor:**

Dr. Rodríguez Muñoz José Luis

Cd. Sahagún, Hgo., Abril 2025.

## **RESUMEN**

Este trabajo se centra en el diseño, fabricación y puesta en marcha de un equipo especializado para realizar ensayos Jominy, que permite evaluar la templabilidad de aceros aplicados en la industria metalmeccánica. El principal objetivo es desarrollar un sistema eficiente para estos ensayos con probetas estandarizadas mediante la instrumentación con termopares y una tarjeta de adquisición de datos Ni-DAQ. Para el desarrollo del equipo, se tomó como referencia la norma ASTM-A255, el diseño y planos se realizaron en un software de modelado 3D, y para la fabricación se utilizaron procesos de mecanizado convencional (fresadora y segueta mecánica), así como, soldadura de arco eléctrico. Para la puesta en marcha, se fabricaron probetas cilíndricas en acero AISI-52100 con dimensiones estandarizadas, a las cuales se coloraron cinco termopares para medir la temperatura durante el enfriamiento. Los resultados obtenidos mostraron que el equipo desarrollado es capaz de realizar ensayos Jominy de manera precisa y repetible. Las mediciones de temperatura registradas por los termopares fueron consistentes y permitieron establecer perfiles de enfriamiento. La dureza y microestructura revelan un cambio importante en las zonas donde se colocaron los termopares permitiendo una mayor comprensión de la relación entre la estructura del acero y su templabilidad. Finalmente, este proyecto no solo proporciona una herramienta útil para la investigación de materiales, sino que también establece un protocolo que puede ser replicado en otros laboratorios, promoviendo la estandarización en la realización de ensayos de templabilidad.

**Palabras claves:** Ensayo Jominy, acero 52100, historia térmica, temple, ferrita, bainita, austenita, martensita, microestructura, diagrama TTT, diagrama CCT.

## **ABSTRACT**

This work focuses on the design, manufacture, and commissioning of specialized equipment for performing Jominy tests, which allow the evaluation of steel hardenability. The main objective is to develop an efficient system for these tests with standardized specimens using thermocouple instrumentation and a DAQ card. The equipment was developed using the ASTM A255 standard; the design and drawings were created using 3D modeling software; and conventional machining processes (milling machine and mechanical saw) and electric arc welding were used for manufacturing. For the start-up, cylindrical specimens with standardized dimensions were manufactured from AISI-52100 steel. Five thermocouples were attached to these specimens to measure the temperature during cooling. The results showed that the developed equipment can perform Jominy tests accurately and repeatably. The temperature measurements recorded by the thermocouples were consistent and allowed for the establishment of cooling profiles. The hardness and microstructure reveal a significant change in the areas where the thermocouples were placed, allowing for a better understanding of the relationship between steel structure and its hardenability. This project provides a useful tool for materials research and establishes a protocol that can be replicated in other laboratories, promoting standardization in hardenability testing.

**Keywords:** Jominy test, 52100 steel, thermal history, tempering, ferrite, bainite, austenite, martensite, microstructure, TTT diagram, CCT diagram.

## Índice

Índice de Figuras.....	7
Introducción.....	1
Antecedentes .....	3
Problemática .....	5
Solución a la problemática.....	6
Justificación.....	6
Objetivos .....	7
Objetivo general .....	7
Objetivos específicos.....	7
Aportaciones .....	8
Alcance .....	8
Limitaciones .....	8
Capítulo 1. Base teórica .....	9
1.1. Acero.....	9
1.2. Clasificación de los aceros.....	10
1.2.1. Aceros con mínimo porcentaje en carbono (SAE1005 a 1015). 10	
1.2.2. Aceros con bajo porcentaje de carbono (SAE 1016 a 1030) .....	10
1.2.3. Aceros con porcentaje medio de carbono .....	11
1.2.4. Aceros con alto porcentaje en carbono .....	11
1.2.5. Aceros de media aleación .....	11
1.2.6. Aceros de fácil maquinabilidad.....	11
1.3. Aceros aleados para aplicaciones en construcciones comunes . 12	
1.3.1. Aceros inoxidables .....	12
1.3.2. Aceros de alta resistencia y de baja aleación.....	12
1.3.3. Aceros para herramientas .....	13
1.4. Propiedades del acero.....	13
1.4.1. Propiedades Mecánicas .....	14
1.4.2. Propiedades Físicas del acero .....	15
1.5. Diagrama de las fases Hierro–Carbono (Fe-C).....	16
1.6. Fases .....	17

1.6.1. Austenita .....	17
1.6.2. Fase perlítica.....	19
1.6.3. Fase bainítica .....	20
1.6.4. Fase martensítica.....	21
1.7. Temple del acero .....	21
1.7.1. Proceso .....	22
1.7.2. Tratamiento térmico del templado .....	23
1.7.3. Curvas en el templado .....	25
1.7.4. Factores que influyen durante el proceso del templado .....	26
1.8. Martensita que se obtiene en el templado.....	28
1.8.1. Morfología interna de la martensita .....	28
1.9. Diagrama de transformación-tiempo-temperatura TTT .....	29
1.9.1. Curva por enfriamiento continuo CCT .....	30
1.10. Dureza del material – acero. ....	31
1.10.1. Dureza Rockwell.....	32
1.11. ACERO AISI-52100 .....	33
Capítulo 2. Metodología.....	34
2.1 Introducción .....	34
2.2 Parámetros para el diseño de la máquina bajo norma ASTM A25535	
2.3 Desarrollo de la calidad .....	35
2.4 Requerimientos del usuario .....	36
2.5 Diseño conceptual de la máquina.....	36
2.6 Proceso de diseño.....	36
2.6.1 Definición de requerimientos.....	37
2.6.2 Diseño conceptual.....	37
2.6.3 Diseño detallado .....	37
2.7 Procedimiento del ensayo Jominy .....	37
2.7.1 Probetas.....	37
2.7.2 Calentamiento .....	38
2.7.3 Enfriamiento.....	38
2.7.4 Medición de dureza después del templado .....	39

2.7.5	Apoyo de la probeta .....	40
2.7.6	Toma de lecturas .....	40
2.8	Fabricación y detallado de la estructura .....	40
2.9	Fabricación de probetas Jominy .....	41
2.10	Instrumentación y adquisición de datos térmicos .....	42
2.11	Pruebas de validación .....	44
2.12	Caracterización de la probeta.....	44
Capítulo 3.	Análisis de Resultados .....	47
3.1.	Requerimientos para el diseño del sistema de enfriamiento .....	47
3.1.	Diseño de la estructura.....	49
3.2.	Construcción de la estructura.....	51
3.3.	Fabricación e instrumentación de probetas.....	54
3.4.	Pruebas de validación .....	56
3.5.	Caracterización de la probeta.....	61
3.5.1.	Caracterización de la microestructura .....	61
3.5.2.	Caracterización de la dureza.....	64
Capítulo 4.	Conclusiones y Recomendaciones.....	65
4.1.	Conclusiones.....	65
4.2.	Recomendaciones.....	66
BIBLIOGRAFÍA.....		67

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b>	Principales elementos de aleación del acero.....	9
<b>Figura 2.</b>	Cable de acero para analizar sus propiedades físicas y mecánicas.....	13
<b>Figura 3.</b>	Diagrama Hierro–Carbono.....	16
<b>Figura 4.</b>	Estructura cristalina de la austenita .....	17
<b>Figura 5.</b>	Matriz perlítica de un acero eutectoide .....	20
<b>Figura 6.</b>	Microestructura multifásica de un acero de bajo carbono .....	20
<b>Figura 7.</b>	Microestructura ferrítico-martensítica de un acero de medio carbono ....	21
<b>Figura 8.</b>	Proceso del templeado del acero .....	25
<b>Figura 9.</b>	Correlación entre templabilidad y transformaciones de fases.....	26

<b>Figura 10.</b> Matriz martensítica en forma de: a) cintas; b) láminas.....	29
<b>Figura 11.</b> Curvas TTT del acero a) AISI-1018. b) AISI-4340 .....	30
<b>Figura 12.</b> Curva CCT de un acero eutectoide.....	31
<b>Figura 13.</b> Etapas de la medición de la dureza de Rockwell.....	33
<b>Figura 14.</b> Diagrama de flujo para el desarrollo del proyecto.....	34
<b>Figura 15.</b> Geometría de la probeta con sus dimensiones.....	35
<b>Figura 16.</b> Probeta para ensayo Jominy y ubicación de termopares.....	42
<b>Figura 17.</b> Esquema de adquisición de datos para los valores de las temperaturas en los moldes de solidificación .....	43
<b>Figura 18.</b> Cámara termográfica para obtener temperatura superficial de la probeta .....	44
<b>Figura 19.</b> Seccionamiento de la probeta para caracterización.....	45
<b>Figura 20.</b> Microscopio óptico para adquisición de imágenes.....	45
<b>Figura 21.</b> Ubicación de los puntos para el ensayo de dureza.....	46
<b>Figura 22.</b> Boquilla y válvula de apertura del sistema de enfriamiento .....	47
<b>Figura 23.</b> Sistema de enfriamiento .....	48
<b>Figura 24.</b> Dispositivo porta-probetas .....	49
<b>Figura 25.</b> Bosquejo inicial para el diseño de la máquina de ensayos Jominy.....	50
<b>Figura 26.</b> Dimensiones generales de la estructura.....	51
<b>Figura 27.</b> Fabricación de la estructura. a) Corte de perfiles. b) Estructura terminada .....	52
<b>Figura 28.</b> Ensamble de la máquina. a) Estructura detallada. b) Estructura pintada. c) Secado de la pintura. d) Colocación de acrílicos. e) Estructura terminada y ensamblada. f) Máquina con los componentes que la integran.....	53
<b>Figura 29.</b> Espectrómetro de emisión óptica para composición química .....	54
<b>Figura 30.</b> Maquinado de probetas para ensayo Jominy .....	55
<b>Figura 31.</b> Probeta cilíndrica normalizada para ensayo Jominy. b) Probeta barrenada para insertar termopares. c) Probeta cilíndrica instrumentada con termopares. ....	56
<b>Figura 32.</b> a) Esquema de la ubicación de los termopares. b) Datos térmicos adquiridos con la tarjeta DAQ. c) Probeta cilíndrica durante el enfriamiento	57

<b>Figura 33.</b> Perfil de enfriamiento de la probeta Jominy .....	58
<b>Figura 34.</b> Ubicación de la cámara termográfica.....	59
<b>Figura 35.</b> Evolución térmica superficial en la probeta Jominy a un tiempo de: a) 20 s. b) 60 s. c) 140 s. d) 205 s. e) 265 s y f) 477 s .....	60
<b>Figura 36.</b> a) Esquema de las zonas a seccionar para caracterización microestructural y medición de dureza. b) Probeta seccionada .....	61
<b>Figura 37.</b> Microestructura del acero AISI-52100 a) Antes del ensayo Jominy. b) Cara 1. c) Cara 2. d) Cara 3. e) Cara 4. f) Cara 5.....	63
<b>Figura 38.</b> Mapa de durezas de las cinco caras evaluadas .....	64

#### Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Temperaturas de normalización y Austenización de las probetas.....	38
<b>Tabla 2.</b> Perfiles estructurales para la fabricación de la estructura .....	51
<b>Tabla 3.</b> Composición química del acero AISI-52100 para los ensayos Jominy....	54

## Introducción

En la ingeniería mecánica, el tratamiento térmico de los aceros es un proceso esencial para ajustar sus propiedades mecánicas y optimizar su desempeño en aplicaciones industriales. La industria metalmecánica y automotriz tienen una alta aplicación de aceros avanzados de alta y ultra alta resistencia (DP, TRIP, IF, etc.) que superan las propiedades mecánicas de los aceros comerciales (A36, AISI-1020, AISI-1045, etc.), por lo que se requiere un análisis preciso de las variaciones microestructurales cuando son procesados en la fabricación de equipos y piezas automotrices. A través de técnicas como el recocido, temple, revenido, austempering y martempering, es posible modificar la dureza, la resistencia a la tracción y la tenacidad de los aceros, adecuándolos a las exigencias específicas de cada diseño. Sin embargo, para lograr un control preciso de estos tratamientos y asegurar la calidad del producto final, es fundamental contar con métodos de evaluación rigurosos y confiables.

Entre las herramientas más importantes para caracterizar la respuesta de los aceros a los tratamientos térmicos se encuentra el ensayo Jominy. Este ensayo proporciona información clave sobre la capacidad de un acero para endurecerse con el enfriamiento, generando un perfil de dureza a lo largo de una probeta cilíndrica que ha sido sometida a un enfriamiento brusco en uno de sus extremos. Este perfil de dureza permite a los ingenieros mecánicos evaluar cómo el material responde a diferentes velocidades de enfriamiento, ofreciendo datos cruciales para la optimización de procesos y el diseño de componentes mecánicos.

Los diagramas TTT (Time-Temperature-Transformation) y CCT (Continuous-Cooling-Transformation) son fundamentales para comprender el comportamiento del

acero durante el tratamiento térmico. Los diagramas TTT muestran las transformaciones de fase en función del tiempo y la temperatura, mientras que los diagramas CCT representan las transformaciones durante el enfriamiento continuo. Estos diagramas ayudan a predecir las propiedades del acero bajo diferentes regímenes de velocidad de enfriamiento, facilitando la toma de decisiones en el diseño del tratamiento térmico.

El ensayo Jominy se realiza utilizando una probeta cilíndrica de dimensiones estandarizadas, la cual es calentada hasta la temperatura de autenticado para posteriormente someterla a un enfriamiento rápido en uno de sus extremos, se procede a medir la dureza a lo largo de su longitud utilizando técnicas de prueba como Rockwell o Vickers. Esta medición produce un perfil de dureza que refleja la respuesta del material a las variaciones en la tasa de enfriamiento.

La caracterización de las probetas después del ensayo Jominy implica la interpretación de estos perfiles de dureza para generar curvas CCT, que son representaciones gráficas de las transformaciones de fase durante el enfriamiento continuo. Estas curvas son derivadas a partir de los datos obtenidos del ensayo Jominy, proporcionando una visión detallada de cómo el material se comporta bajo condiciones de enfriamiento similares a las que puede experimentar en aplicaciones reales.

Para garantizar la calidad y la consistencia del ensayo Jominy, se deben seguir normas específicas, como las normas ASTM A255, que establecen los procedimientos y requisitos técnicos para la realización de estos ensayos. Estas normas aseguran que los resultados sean precisos y comparables, facilitando la evaluación y la comparación entre diferentes materiales y tratamientos.

Este trabajo se centra en el diseño, manufactura y puesta en marcha de una máquina especializada para realizar ensayos Jominy, con el objetivo de mejorar la precisión y la eficiencia del proceso. La máquina diseñada estará en conformidad con las normas ASTM y contará con características avanzadas para optimizar el enfriamiento y la recolección de datos, facilitando la obtención de perfiles de dureza.

## **Antecedentes**

Las pruebas Jominy que también son conocidas como ensayos de templabilidad, es un tipo de técnica que se utiliza con la finalidad de evaluar la capacidad que posee un acero para endurecerse según procesos del templado. El ensayo Jominy fue desarrollado por el ingeniero suizo Albert Jominy en 1945, con la finalidad de poder analizar y estudiar las propiedades en el endurecimiento de los aceros.

A medida que pasa el tiempo, en las instituciones de educación superior se fomenta en los estudiantes la investigación de nuevos materiales y sus características para que sean aplicados en la industria con la finalidad de poder desarrollar elementos que tenga mejores propiedades como mayor durabilidad, sobre todo, cuando estén sometidos a trabajos extremos. En sí, la mejora en las características de los materiales se puede alcanzar cuando éste es sometido a tratamientos térmicos como el revenido o el temple en el cual cada uno de estos dos tratamientos poseen principios diferentes.

El temple del acero tiene propiedades propias como la distribución de la dureza en la parte interna del material y el nivel de profundidad que alcanza. En sí, el temple modifica los valores que posee el material respecto a la dureza en función de la geometría y su composición química, tomando como ejemplo el carbono que posee valores altos de dureza y después de haber pasado por la templabilidad tiene mejor

distribución. De esta manera se pueden aplicar en la industria después de haber sido procesados por este ensayo.

Los ensayos de templabilidad deben estar supervisados por parámetros establecidos con normativas vigentes en la cual se describen métodos apropiados para que se pueda realizar de mejor manera esta prueba y deben cumplir parámetros establecidos en las normas ASTM, la cual determina los métodos adecuados en las pruebas estándar del acero, y para realizar este tipo de ensayos se puede llevar a cabo de dos formas: 1) por un método cuantitativo o también llamado prueba de Jominy y 2) el método de Grossman que se basa en la composición química de los aceros para poder determinar la templabilidad.

El desarrollo de este tipo de pruebas resultó ser un recurso importante en la innovación de nuevos tipos de aceros, ya que, con el paso del tiempo, las constantes investigaciones para evaluar las composiciones en las aleaciones de los aceros resultaron de suma importancia, pues además de determinar la capacidad para endurecerse también muestra el efecto del carbono u otros elementos químicos como el cobre, molibdeno entre otros, en su capacidad térmica y dureza.

Hoy en día, este tipo de ensayos ha sido fundamental para poder desarrollar materiales de ingeniería y poder aplicarlos en forma crítica a componentes de maquinaria y piezas de autos, proporcionando de forma rápida el tipo de característica y el comportamiento de los aceros, todo esto, para facilitar el proceso de selección del material adecuado para cualquier aplicación a realizarse.

Comparando el trabajo realizado en el diseño de la máquina para los ensayos Jominy, se puede establecer que esta máquina está capacitada para el análisis de aceros

de alta calidad, mientras que si se compara con el que se construyó por parte de Luna y Tamayo “Diseño y construcción de un banco de pruebas para el ensayo Jominy” su modelo busca el estudio de aceros comunes, además de estar redireccionado a bancos de pruebas y no a una máquina en específico.

En el trabajo realizado por Pilco y Merino, “Diseño y construcción de una máquina automatizada para ensayos Jominy de acuerdo con la normativa ASTM-A255 para la determinación de curvas de templabilidad en aceros”, lo realizan mediante el despliegue de QFD en el análisis de las normas ASTM-A255, mientras que en este proyecto trabaja con tarjeta DAQ para un mejor análisis de los datos y del ensayo de templabilidad en este tipo de máquina

La construcción de esta máquina también ayudará al control en la calidad de la producción, ya que este tipo de pruebas está integrado en los procesos de calidad de los aceros que son tratados térmicamente, de esta manera, los productores determinan si existe una distribución de dureza homogénea. Además, este método también permite desarrollar algunos modelos predictivos en aceros que podrían sufrir algún cambio durante el tratamiento térmico, se analizan sobre todo resultados en el enfriamiento por agua y las fases de las microestructuras que se forman en el proceso.

## **Problemática**

Uno de los problemas que existe actualmente en la Escuela Superior de Ciudad Sahagún y en las empresas de la zona que se relacionan con el diseño y utilización de aceros es el no contar con un espacio o máquinas para realizar el templado, es por ello, por lo que surge la necesidad de poder diseñar una máquina para el análisis en pruebas Jominy, y con esto, se pretende aplicar este tipo de procedimientos para mejorar

las propiedades mecánicas de los aceros. Considerando el costo de fabricación del presente equipo en comparación con la compra de una máquina comercial que por lo general suele ser demasiado alto y por tal razón, las empresas no lo consideran como algo importante para su implementación.

### **Solución a la problemática**

La solución nace en el diseño propio de este tipo de máquinas aprovechando los conocimientos adquiridos en la carrera durante, en el cual se identifica claramente las necesidades en la fabricación e implementación para poder realizar este tipo de pruebas que es muy importante para aumentar la dureza de los aceros, contando con un adecuado procedimiento durante su construcción y pruebas para verificar que realmente se cumple con el objetivo y la validación de datos.

### **Justificación**

Tomando en cuenta los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera, en lo que respecta a tratamientos térmicos en aceros y los ensayos Jominy, se planea el diseño y la fabricación de un equipo de bajo costo que pueda ser empleada en empresas de la región que actualmente no cuentan con estos equipos, los cuales ayudan a mejorar las propiedades de los materiales en sí, ya que en el mercado se ofrecen otro tipo de dispositivos, pero a precios muy elevados, y los que son de bajo costo no cuentan con algún estudio de diseño o de control además son fabricadas de manera rudimentaria.

A su vez aquellos dispositivos que cuentan con un precio alto muchas veces no tienen claro el tipo de norma que usan para poder validar este tipo de pruebas. Por lo tanto, se hace necesario un equipo en el cual se sepa con antelación cuál es el ensayo

para realizar y los resultados que se pueden obtener, además de otros beneficios para la empresa como la ubicación del equipo con un bajo consumo de agua. En sí, el diseño propuesto tiene como fin poder cuantificar y verificar todas las variables presentes durante el ensayo Jominy las cuales se podrán medir con instrumentos de medición y llevar a cabo los controles apropiados.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Fabricar un equipo para ensayos Jominy mediante el diseño en SolidWorks y la instrumentación con termopares de las probetas para un mejor análisis del comportamiento térmico y microestructural de aceros avanzados aplicados en la industria metalmecánica y automotriz.

### **Objetivos específicos**

- Diseñar la estructura de la máquina mediante el software SolidWorks.
- Obtener los planos de fabricación de la máquina para ensayos Jominy mediante el módulo de dibujo del software SolidWorks.
- Fabricar la estructura de la máquina para ensayos de templabilidad mediante la utilización de perfiles comerciales.
- Colocar el sistema de enfriamiento mediante la instalación de una bomba sumergible en el depósito de agua.
- Adquirir la historia térmica durante el ensayo Jominy mediante la instrumentación con termopares de las probetas.

## **Aportaciones**

Al realizar un diseño propio de una máquina para los ensayos Jominy se aporta con antecedentes tanto en diseño como en fabricación para empresas o talleres que deseen diseñarlo con el fin de poder mejorar las propiedades de dureza de los aceros. Además de que sirve para futuras investigaciones referente a este tipo de pruebas que se realizan generalmente en universidades o institutos relacionados con la carrera de ingeniería y su análisis en materiales sobre todo en aceros.

## **Alcance**

La máquina desarrollada podrá realizar ensayos Jominy en aceros comerciales y de nuevas aleaciones, donde las probetas podrán estar instrumentadas con termopares y adquirir su historia térmica durante el enfriamiento que podrá ser correlacionada con la microestructura y su dureza, así como para el diseño de tratamientos térmicos.

## **Limitaciones**

Una de las limitaciones es el factor económico, pues para realizar este tipo de máquinas de una forma más profesional se requiere un valor económico más alto en el cual las máquinas puedan realizar de una forma más profunda el tipo de análisis durante la prueba y la posterior recolección de datos para ser analizados.

## Capítulo 1. Base teórica

### 1.1. Acero

El acero es una aleación entre dos elementos que son el hierro y carbono, dónde el contenido de carbono puede variar entre el 0.01% y 2.0%. El acero también puede contener otros elementos químicos (ver Figura 1) que se encuentran en mínimas proporciones como manganeso (Mn), cromo (Cr), boro (B), fosforo (P), silicio (Si), etc. El carbono es el que tiene mayor efecto en las propiedades del acero, la dureza y la resistencia aumenta a medida que el porcentaje de carbono se eleva, aunque existe la desventaja que en el aumento del porcentaje de carbono vuelva más frágil al acero (Lee, y otros, 2024).



**Figura 1.** Principales elementos de aleación del acero. **Fuente:** (Gomez, 2020)

Al contener otros elementos de aleación dentro de su composición química presenta un efecto sobre la equivalencia del carbono. Estas fórmulas de carbono equivalente se desarrollaron para asignar un valor numérico para cada variación en la composición química del acero, debido a que el contenido de carbono contribuye a un

nivel equivalente de templabilidad para el nuevo compuesto formado (Sekhar, Pandya, Shah, Ghayvat, & Sharma, 2024).

## **1.2. Clasificación de los aceros**

Al modificar el porcentaje de carbono en el acero, se generan una gran variedad de aleaciones, por consiguiente, nuevas propiedades mecánicas, por la cual se les clasifica en base a su concentración de carbono. Los aceros con carbono al 0.76% se los denomina aceros **eutectoides**, al disminuir este porcentaje de carbono se los denomina **hipoeutectoide** y si supera este porcentaje se los denomina **hipereutectoide**. La norma SAE los clasifica en aceros al carbono, de media aleación, aceros aleados con otros elementos, aceros inoxidables, aceros de alta resistencia y aceros de herramientas.

### **1.2.1. Aceros con mínimo porcentaje en carbono (SAE1005 a 1015).**

Este tipo de aceros son utilizados principalmente en procesos de fabricación de embutido profundo, porque presentan cualidades en cuanto a la deformación y su acabado superficial. Este tipo de aceros son los que más se utilizan para trabajos de forjado. Además, son muy utilizados en las soldaduras y el brazing. Durante su proceso adquieren este tipo de propiedades cuando se los calienta por encima de los 600°C y después son estirados en frío.

### **1.2.2. Aceros con bajo porcentaje de carbono (SAE 1016 a 1030)**

Este tipo de aceros presentan mayor dureza y resistencia que los SAE 1005-1015, sin embargo, presentan una reducción en cuanto a su deformabilidad. Estos son denominados aceros de cementación.

### **1.2.3. Aceros con porcentaje medio de carbono.**

Todas las aleaciones de este tipo de aceros presentan un contenido entre 0.3% hasta un 0.6% de carbono en su estructura. Estos son muy utilizados para fabricar componentes de tractores, equipos de minería, maquinaria industrial, entre otros.

### **1.2.4. Aceros con alto porcentaje en carbono**

Son aceros que presentan una concentración de carbono superior al 0.6% y son muy utilizados en la fabricación de ruedas de ferrocarriles, resortes y otros objetos similares. Por lo general el contenido de carbono para estas aplicaciones oscilan entre un 2 al 4%, donde su estructura presenta distintas tonalidades en su estructura.

### **1.2.5. Aceros de media aleación**

Este tipo de aceros contienen otros elementos de aleación además del carbono, mejorando la capacidad del templado y endurecimiento. Los elementos de aleación que son añadidos están el manganeso (1.65%), silicio (0.6%) y el cobre (0.6%). Todos estos elementos adicionales su concentración se encuentran en una proporción igual o menor a los ya mencionados anteriormente. En este tipo de aleaciones el porcentaje del carbono alcanza el 1% y el porcentaje total de los otros elementos no supera el 5%. Este tipo de aceros se los utiliza principalmente en la fabricación de herramientas para la construcción, engranajes entre otros.

### **1.2.6. Aceros de fácil maquinabilidad**

Son aleaciones que contienen 0.1% de azufre en su composición química y en ocasiones contienen plomo que oscila entre el 0.15 a 0.35%. Este tipo de aceros con frecuencia presentan problemas para ser soldados y posterior al maquinado son tratados térmicamente para mejorar sus propiedades mecánicas.

### **1.3. Aceros aleados para aplicaciones en construcciones comunes**

Son todos los aceros que son utilizados en la vida cotidiana de todas las personas.

#### **1.3.1. Aceros *inoxidables***

Son aceros que presentan alta resistencia a la corrosión y en su composición química hasta un 11% de cromo, el cual forma una película delgada que protege a la reacción con el oxígeno, es decir no reaccionan con el oxígeno del ambiente formando óxidos metálicos. En este grupo encontramos algunas variaciones las cuales son:

- Aceros inoxidables ferríticos. Estos aceros presentan en su composición química hasta el 30% en cromo y menos del 0.12% en carbono.
- Aceros inoxidables martensíticos. Presentan en su composición química un 17% de cromo y 0.5% de carbono. Cuando esta aleación es calentada a 1200°C se forma austenita, que se convierte en martensita posterior al templado en aceite. Este acero presenta una dureza y resistencia alta.
- Aceros inoxidables endurecidos mediante precipitación. Son aleaciones que contienen aluminio, niobio o tantalio, que posteriormente son tratados térmicamente para mejorar sus propiedades mecánicas iniciales como son la resistencia y dureza, dónde el acero es trabajado o moldeado en frío para que después se ha sometido a dicho tratamiento térmico. Este proceso es conocido como endurecimiento por envejecimiento.

#### **1.3.2. Aceros *de alta resistencia y de baja aleación***

De este tipo de aceros poseen un porcentaje mínimo de carbono y en ocasiones se les añade otros elementos también en mínima cantidad. En estos aceros esta especificada la resistencia de la fluencia hasta los 552 MPa. Así mismo, al contener una

mínima cantidad de elementos aleantes presentan cierta resistencia a la fluencia sin el tratamiento térmico. Esto permite la precipitación de carburos y nitruros de niobio, vanadio, titanio y zirconio que permiten u otorgan el endurecimiento al acero por dispersión y un tamaño fino de grano.

### **1.3.3. Aceros para herramientas**

Son aceros a los que se les añade un porcentaje alto en carbono, por ende, presentan demasiada dureza durante el tratamiento térmico del templeado y enfriado. Entre sus aplicaciones son usados como herramientas de corte, herramientas de albañilería, entre otros.

### **1.4. Propiedades del acero**

El acero al ser una aleación de varios elementos químicos con carbono presenta una serie de propiedades generales y particulares. En la Figura 2, se muestra la aplicación del acero para la fabricación de cables de alta resistencia y el cual requiere de un control estricto de sus propiedades mecánicas.



**Figura 2.** Cable de acero para analizar sus propiedades físicas y mecánicas. **Fuente:** (Askeland & Wright, 2017)

### **1.4.1. Propiedades Mecánicas**

Las propiedades mecánicas son propias para cada aleación de acero entre las cuales destacan las siguientes.

- **Plasticidad.** Generalmente el acero es un material duro y resistente, en ciertas circunstancias es maleable, es decir que puede ser moldeable, permitiendo dar forma a piezas con geometrías complejas sin llegar agrietarse o fracturarse.
- **Resistencia.** Capacidad de un acero para soportar fuerzas o cargas externas y se mide en función del tipo de esfuerzo al que se somete el material, como pueden ser tracción, compresión, flexión, corte o torsión. Esta propiedad es crucial en la ingeniería, ya que determina la factibilidad de un material para diferentes aplicaciones estructurales y mecánicas. Algunas propiedades relacionadas con la resistencia mecánica incluyen: Resistencia a la tracción: Capacidad de un material para resistir fuerzas que intentan estirarlo. Resistencia a la compresión: Capacidad de resistir fuerzas que intentan aplastarlo y Resistencia al impacto: Capacidad de absorber energía sin fracturarse.
- **Maleabilidad.** Todos los aceros presentan la capacidad para deformarse sin fracturarse gracias a la presencia del carbono en su composición. Existe una relación inversa, mientras más maleable posee menos resistencia y mientras más resistencia es menos maleable.
- **Dureza.** Es la resistencia de un material a la deformación permanente, ya sea por rayado, penetración o desgaste. Es una propiedad mecánica fundamental

en la ingeniería y la ciencia de materiales. Existen varias escalas para medir la dureza según el método utilizado. Algunas de las más comunes son: Escala de Mohs, se usa principalmente en minerales. Escala Brinell (HB), esta utiliza una esfera de acero o carburo de tungsteno para medir la resistencia a la penetración en materiales metálicos y se usa en materiales como aceros y fundiciones. Escala Rockwell (HR) tiene diferentes escalas según la dureza del material: HRC: Para aceros endurecidos (cono de diamante). HRB: Para metales más blandos (bola de acero). Escala Vickers (HV): Usa una pirámide de diamante con una carga determinada y permite medir dureza en materiales muy delgados o pequeños.

#### **1.4.2. Propiedades Físicas del acero**

Entre las propiedades físicas que se puede destacar de los aceros se tienen:

- Presentan resistencia a la tracción, es decir presentan un máximo esfuerzo de tensión antes que tienda a fracturarse.
- Dureza, qué es la resistencia que ofrecen estos materiales a procesos externos como abrasiones, desgaste, penetración entre otros.
- Cuando el hacer está sometido a cargas dinámicas cíclicas presentan fatiga, por la cual tienden a romperse con el transcurso del tiempo.
- Generalmente este tipo de aceros son fabricados en forma de láminas o barras alargadas por lo que presentan fluencia qué es el punto exacto donde comienza el período de la deformación plástica del acero.

### 1.5. Diagrama de las fases Hierro–Carbono (Fe-C)

El hierro al entrar en contacto con el carbono presenta una serie de variaciones que son importantes en la industria. El elemento principal del acero es el hierro donde al ser fundido a cierta temperatura es añadido un porcentaje de carbono permitiendo formar una aleación con diferentes propiedades.

El diagrama hierro-carbono cuenta con varios constituyentes bien diferenciados y tres fases, en la Figura 3 se muestra el diagrama Fe-C, en el cual se observa que el eje vertical indica la temperatura a la cual es sometido el hierro, mientras que el eje horizontal indica el porcentaje del carbono a considerar, el cual debe ser inferior al 6.67%. A medida que la temperatura aumenta o disminuye y el porcentaje de carbono añadido se forma una nueva aleación. Cabe indicar que este diagrama es estable y los nuevos productos formados parten de condiciones de equilibrio y sin considerar la presencia de otros elementos de aleación (Mukhti, Gucunski, & Kee, 2024).

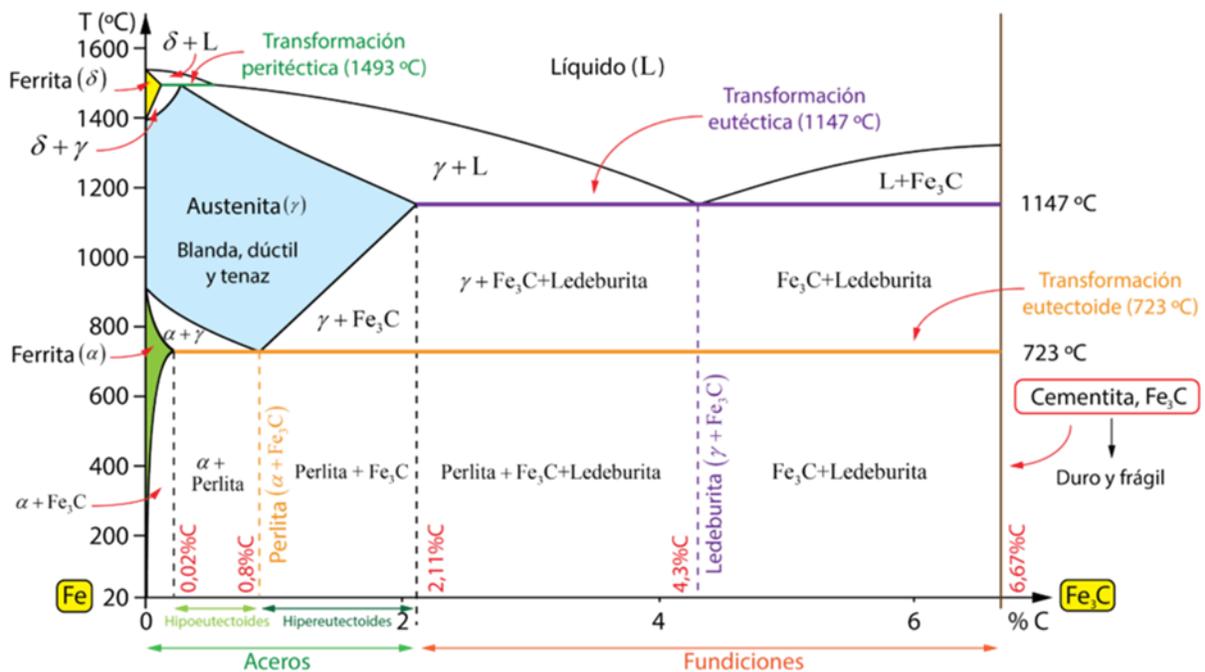


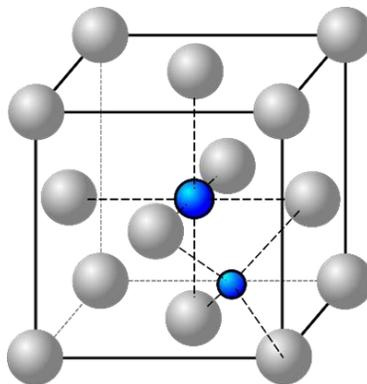
Figura 3. Diagrama Hierro–Carbono. Fuente: (Ju, Chiu, & Huang, 2024)

## 1.6. Fases

### 1.6.1. Austenita

Es un término que se aplica a una solución compuesta de hierro y carbono FCC. Esta austenita presenta cierta solubilidad definida para el carbono, que en condiciones normales se encuentra en un rango de 0 a 2%, y en temperatura ambiente esta fase no existe en los aceros al carbono simple. La austenita se forma en los aceros que son enfriados desde la zona austenítica obteniendo es su estructura nuevas propiedades mecánicas que influyen en el temple del acero.

En la Figura 4 se muestra la estructura cristalina de la austenita, donde el hierro está representado por las esferas grises dispuestas en un retículo cubico y en todos los centros de las caras dando la forma de un cubo, mientras que las esferas azules representan al carbono que se presenta como un defecto intersticial. En cuanto a la solubilidad máxima del carbono en hierro alfa o ferrita es el 0.25% cuando alcanza una temperatura de 725°C. A temperatura ambiente esta fase sólo puede disolverse a 0.08 %C. Para que exista el cambio o transformación de la austenita en nuevas fases va a depender de su composición química, su velocidad de enfriamiento para convertirse en una fase sólida y a su microestructura que presente.



**Figura 4.** Estructura cristalina de la austenita. Fuente: (Gomez, 2020).

### **1.6.1.1. Acero Eutectoide**

Es un acero que contiene carbono al 0.8% que se forma en un compuesto sólido en intervalo de temperatura que va desde los 725°C hasta los 1370°C. A estas temperaturas el acero con 0.8% de carbono se convierte en un compuesto sólido que es simple y homogénea que a su vez forma dos fases sólidas nuevas. Este cambio se da cuando existe una temperatura constante y con la evolución del calor (Carlbom, 2000).

Esta nueva fase en la que se forma este compuesto son ferrita y cementita, ambas se forman al mismo tiempo. Estos dos nuevos elementos están formados por una reacción eutectoide, donde su producto final es llamado perlita y este nuevo producto está compuesto por placas alternas o laminares de ferrita y cementita (Smith, 2006).

### **1.6.1.2. Aceros Hipoeutectoide**

Son aceros que presentan en su composición menos del 0.8% de carbono, también nombrados aceros hipoeutectoide. Se caracterizan por estar formados por una mezcla de ferrita y perlita, estos compuestos se pueden clasificar en tres tipos:

- Acero bajo en carbono. Con un porcentaje inferior al 0.2%, su estructura es maleable, dúctil deformable y de mínima resistencia.
- Aceros con un porcentaje medio en carbono. Presenta un porcentaje que oscila entre el 0.2% y el 0.5 % que son utilizados comúnmente en la industria.
- Aceros altos en carbono. Presentan un porcentaje que oscila entre el 0.5% y el 0.8% denominados aceros perlíticos de alta resistencia y dureza.

### **1.6.1.3. Aceros Hipoeutectoide**

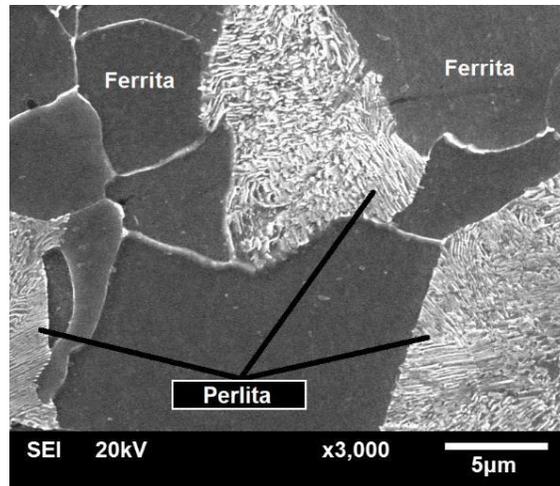
Son aceros que contienen carbono que oscila desde el 0.8% y el 2%. El principal compuesto es la cementita que es del carburo de hierro. Esta variedad de acero por lo

general presenta una alta resistencia y es difícil de mecanizar. Para ser utilizados es necesario realizar un tratamiento térmico de esferoidización, hasta que el carburo de hierro adopte una forma redonda con lo cual se mejora su maquinabilidad y ductilidad (Vasan, Venkatesh, Vaithyanathan, & Aghaei, 2024).

### **1.6.2. Fase perlítica**

Se forma por la transformación isotérmica de la austenita, esto ocurre en la descomposición eutectoide de la austenita donde los átomos de carbono formando un nuevo producto llamado perlita. Su estructura de manera general presenta capas en las que se alternan los compuestos de cementita y la ferrita. La formación de este compuesto es un proceso de nucleación y crecimiento, es decir, se requiere algún tiempo para que sus átomos se carguen energéticamente para iniciar el proceso (Pilco & Merino, 2021).

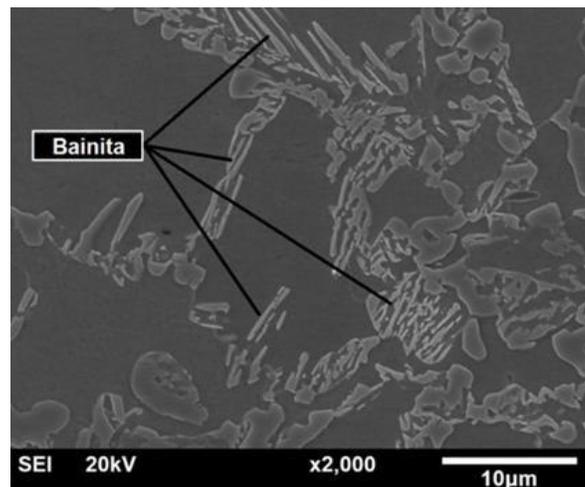
Esta fase es de importancia en la microestructura del acero, debido a que brinda la resistencia mecánica al material. En el caso de los aceros eutectoides la perlita generalmente se clasifica en dos: Perlita gruesa, que se presenta cuando existe un enfriamiento lento y alcanza una temperatura de 272°C, mientras que la otra variación de perlita se denomina fina, porque se forma cuando la temperatura empieza a disminuir haciendo que sus láminas microestructurales se hagan más delgadas, adquiriendo propiedades de resistencia, dureza y ductilidad (Newell, 2010) (Pilco & Merino, 2021). En la Figura 5 se muestra la microestructura ferrítico-perlítica de un acero eutectoide, donde la ferrita son las zonas oscuras y la perlita son las zonas claras.



**Figura 5.** Matriz perlítica de un acero eutectoide. Fuente: Propia.

### 1.6.3. Fase bainítica

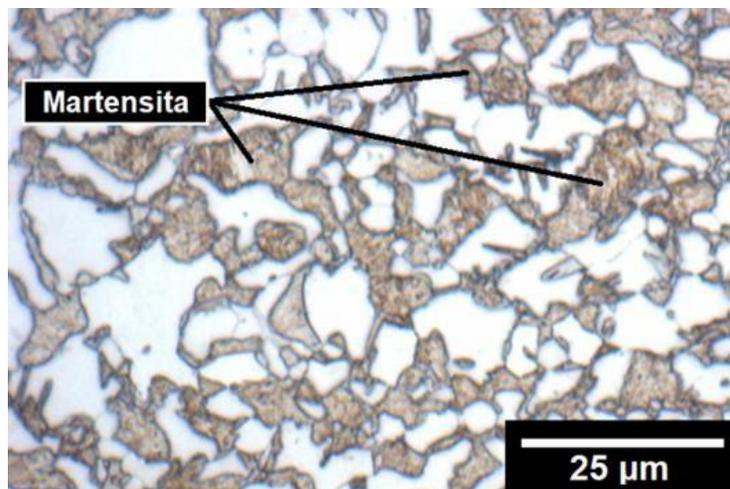
Esta fase es resultado de la difusión imparcial del carbono que se encuentra contenido en la austenita al ser sometido a bajas temperaturas, estas temperaturas son inferiores a  $565^{\circ}\text{C}$  y superior a la temperatura del inicio de la transformación martensítica ( $M_s$ ). Esta nueva estructura brinda resistencia, mayor dureza y son dúctiles (Callister, 2017) (Gomez, 2020). En la Figura 6 se muestra la microestructura multifásica de un acero de bajo carbono en la cual existe la presencia de agujas de bainita.



**Figura 6.** Microestructura multifásica de un acero de bajo carbono. Fuente: Propia.

#### 1.6.4. Fase martensítica

Es el resultado cuando el acero alcanza temperaturas inferiores a los 275°C diferenciándose de las otras estructuras, donde su formación es violenta e instantánea una vez que alcanza dicha temperatura. Esta nueva fase formada se llama martensita la cual se forma con facilidad en los aceros templados con un porcentaje de 0.8% de carbono, con esto sus propiedades varían en cuanto a la dureza resistencia y fragilidad (Askeland & Wright, 2017, Rodriguez, 2022).



**Figura 7.** Microestructura ferrítico-martensítica de un acero de medio carbono. Fuente: Propia.

#### 1.7. Temple del acero

El temple es un tratamiento térmico que consiste en calentar y enfriar la pieza de forma súbita con la finalidad de modificar las propiedades mecánicas. Este término se aplica en la metalurgia y es utilizado para describir el endurecimiento del acero, en la que se promueve la formación de martensita para que después sea enfriado inmediatamente a través de su punto eutectoide.

Cuando el acero presenta otros elementos de aleación como el manganeso y níquel, la temperatura del acero eutectoide debe ser muy baja, pero el proceso en esta

fase sigue siendo la misma. Con esto se permite mejorar el templado en una temperatura netamente inferior para que el proceso sea más sencillo. En el caso de los aceros de alta velocidad también se añade otro elemento químico que es el tungsteno o wolframio que actúa elevando todas las barreras cinéticas. Todas las aleaciones al enfriarse lentamente al medio ambiente la mayoría de ellos presentan efectos de temple, es decir que al ser enfriados bruscamente se evita formaciones adicionales como estructuras cristalinas causando metales amorfos (Vasan, Venkatesh, Vaithyanathan, & Aghaei, 2024).

### **1.7.1. Proceso**

El templado de los aceros es una secuencia de pasos, porque primeramente se debe calentar a una temperatura requerida, que comúnmente es 30°C por arriba de la temperatura de austenitización ( $A_{c3}$ ) y darle un tiempo de homogenización o remojo, este tiempo de homogenización depende del espesor de la pieza a templar y que como regla se considera 60 minutos de permanencia por cada 25.4 mm de espesor, para evitar el calentamiento desigual o el recalentamiento así como variaciones en los productos terminados (Zuo, y otros, 2024).

Después de esto se procede al enfriamiento de la pieza, para lo cual se utiliza agua para que adquiera la dureza máxima, sin embargo, existe una pequeña posibilidad de que se formen pequeñas grietas o deformaciones. Para minimizar los efectos de la distorsión las piezas cilíndricas largas se templan verticalmente mientras que las piezas planas en el borde y las secciones gruesas deben entrar primero en el baño.

Es importante indicar que antes del templado, la microestructura del acero comúnmente es ferrítico-perlítica siempre y cuando se trate de un acero con un porcentaje de carbono inferior al 0.8%, la cual se genera posterior al proceso de

laminación en caliente y se deja enfriar lentamente. Para realizar el temple del acero caliente, los medios de enfriamiento más utilizados son: el aire, aceite, salmuera, sales fundidas y agua.

### **1.7.2. Tratamiento térmico del templado**

#### **1.7.2.1. Calentamiento**

Para calentar el acero y producir el temple requerido se debe evitar la oxidación y decarburación, así que dependiendo del tipo de material y la calidad del tratamiento térmico, se presentan las siguientes recomendaciones (Ju, Chiu, & Huang, 2024):

- En el caso de los sólidos con buen espesor y que posteriormente serán maquinados se utilizan generalmente hornos eléctricos.
- Para herramientas de corte o en las partes de las maquinarias que se requiere un tratamiento térmico uniforme y de buen control de temperatura se utilizan sustancias líquidas como es el caso de las sales fundidas.
- Finalmente, para piezas con un acabado final y se requiere modificar las propiedades de manera superficial, se utilizan las sustancias gaseosas como el dióxido de carbono  $\text{CO}_2$ , monóxido de carbono  $\text{CO}$ , hidrógeno molecular  $\text{H}_2$  y nitrógeno molecular  $\text{N}_2$ , para este tipo de tratamiento térmico se recomienda en hornos al vacío.

También es importante tener cuidado cuando se sube la temperatura porque generalmente se puede producir un sobrecalentamiento del material y con ello un crecimiento de los granos cristalinos, además de que, si el tratamiento térmico es en atmosfera abierta, se incorpora el oxígeno produciendo oxidación, fragilidad excesiva y decarburación.

### 1.7.2.2. Enfriamiento

Para su enfriamiento, los fluidos que se utilizan con mayor frecuencia son: el aire, aceite, salmuera sales fundidas y agua (Sekhar, Pandya, Shah, Ghayvat, & Sharma, 2024). Además, se debe evitar la exposición a dichos fluidos teniendo en cuenta lo siguiente:

- La velocidad alta de enfriamiento en el intervalo  $A_1-M_s$  con la finalidad de evitar formaciones de bainita o perlita.
- El líquido debe estar presente en todo momento con el metal caliente y no debe descompensarse.

En esta fase hay que diferenciar los fluidos que no producen ebullición como es el aire y los que sí producen como las sales fundidas. En cuanto a los primeros, el enfriamiento es uniforme relativamente en todo momento, mientras que, en el segundo, los líquidos refrigerantes que se evaporan se van a producir en tres etapas:

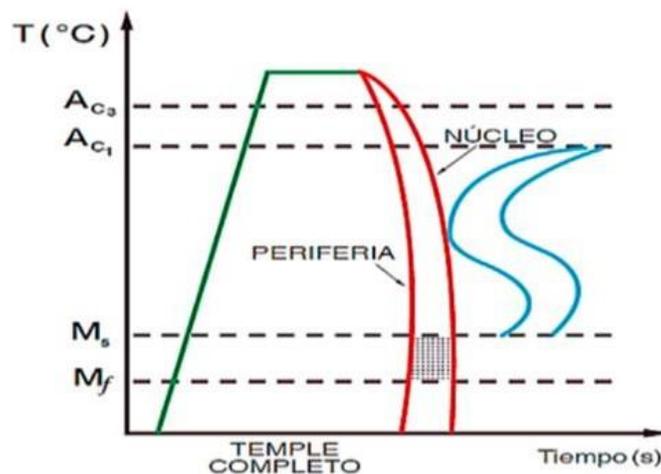
- Cuando existe el primer contacto del medio líquido con la pieza se forma una película de vapor que la aísla provocando un enfriamiento lento y progresivo.
- Cuando esta película formada alrededor de la pieza se rompe, el líquido que se encuentra circundante toca la pieza absorbiendo el calor hasta alcanzar la máxima eliminación de energía.
- Cuando se encuentra por debajo de la temperatura de ebullición se produce una disminución en la eliminación del calor.

Los resultados o cambios del temple van a variar en función de la composición del acero, la agitación, y el tiempo que se demora en enfriar, el cual depende de lo siguiente:

- La cantidad de calor durante las fases y el poder de conducción del calor en los nuevos productos formados.
- La forma, masa y el estado superficial del producto formado.
- El poder de enfriamiento del medio de temple.
- La temperatura del medio de temple mientras se realiza el templado.

### 1.7.3. Curvas en el templeado

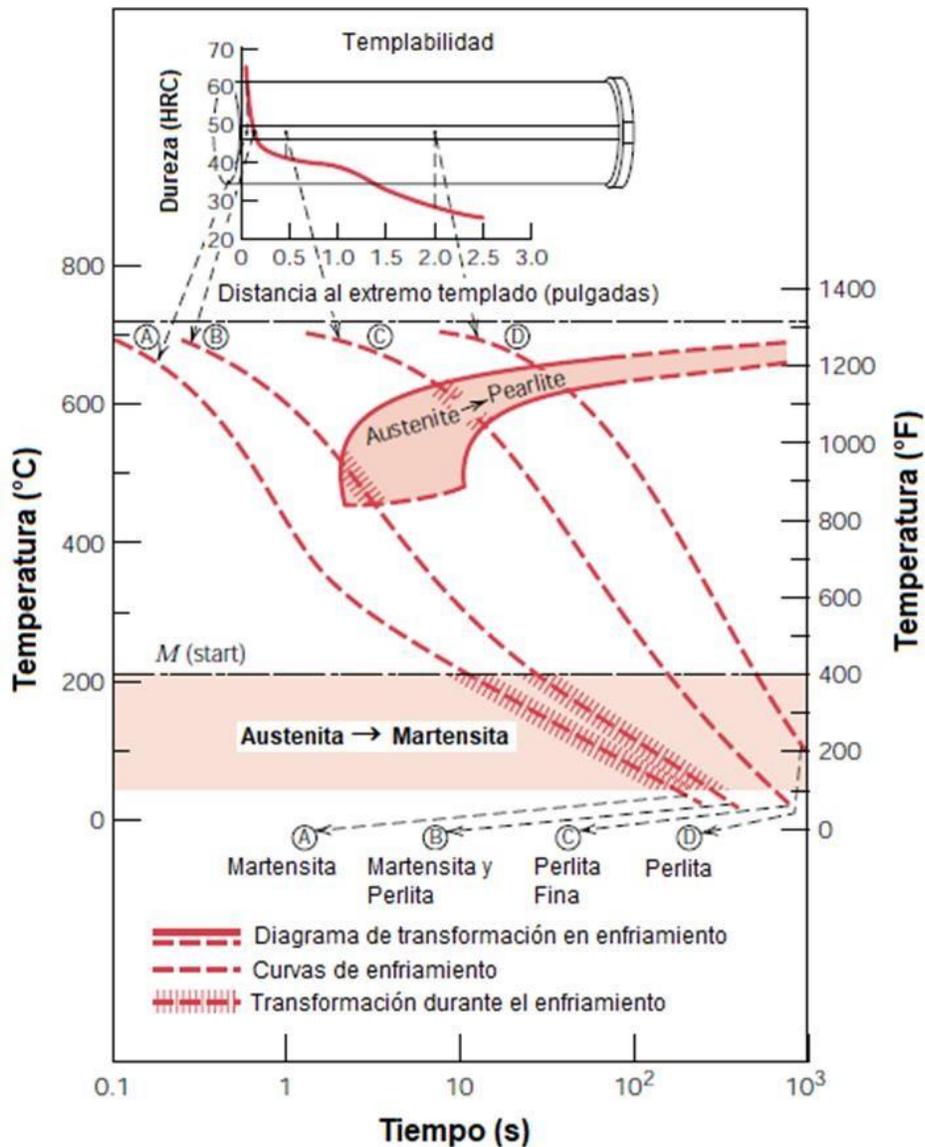
Son representaciones gráficas de la dureza de Rockwell que presenta contra la distancia del extremo del temple de una probeta como se visualiza en la Figura 8. En este diagrama se observa como su enfriamiento es violento y su dureza va disminuyendo a medida que aumenta la distancia del temple. En lo que respecta a los aceros de alta templabilidad, mientras más aumente su distancia se eleva más su dureza, esto es algo que no sucede con los aceros de bajo temple.



**Figura 8.** Proceso del templeado del acero. **Fuente:** (Callister, 2017)

Además, en la Figura 9 se hace una correlación entre la templabilidad medida en grados centígrados (eje vertical) y el tiempo en segundos (eje horizontal), donde se visualiza que el hierro es calentado a temperaturas que superan los  $700^{\circ}\text{C}$  combinado

con un porcentaje de carbono. Esto demuestra que mientras más tiempo se demora su curva o se alarga, forma nuevas variaciones y adquiere mayor templabilidad.



**Figura 9.** Correlación entre templabilidad y transformaciones de fases. **Fuente:** (Callister, 2017)

#### 1.7.4. Factores que influyen durante el proceso del templado

Existen algunos factores que ocasionan una variación o cambio en el proceso del templado entre los cuales se menciona los siguientes:

#### **1.7.4.1. La composición química del acero durante el templado**

Los elementos aleantes añadidos al acero y su composición química tienen como objetivo mejorar la templabilidad, extender el periodo de incubación de la austenita antes de su transformación y facilitar la formación de diversas microestructuras. Por ejemplo, al enfriar un acero al carbono y un acero aleado bajo las mismas condiciones, el primero genera ferrita y perlita, mientras que el segundo produce bainita, martensita y pequeñas cantidades de ferrita o perlita. Además, los elementos aleantes afectan la dureza. En el acero al carbono, la dureza superficial es mayor en comparación con el núcleo, mientras que el acero aleado mantiene la dureza uniforme a lo largo de toda la sección.

#### **1.7.4.2. La concentración de carbono**

El carbono que interviene en el hierro está determinado en porcentaje, que generalmente está disuelto en la austenita antes del enfriamiento permitiendo el aumento en la dureza del acero por su elevada densidad al disociarse y la distorsión de la red cristalina de la martensita. En los aceros donde el contenido de carbono es mayor a 0.5%, su enfriamiento produce aumento ligero en su dureza, pero a su vez, produce una reducción en la tenacidad de la martensita debido a que se encuentra sobresaturado con carbono, produciendo alta resistencia en el material.

Durante el enfriamiento influye la velocidad enfriamiento a la que es sometido el acero, que son influenciadas por la geometría y las dimensiones de la probeta, debido a que varían en función de todas las posibilidades distribuidas a lo largo de su sección tanto horizontal como vertical. Para verificar estos cambios se hace uso de curvas de templabilidad descritas en la Figura 8.

## **1.8. Martensita que se obtiene en el templado**

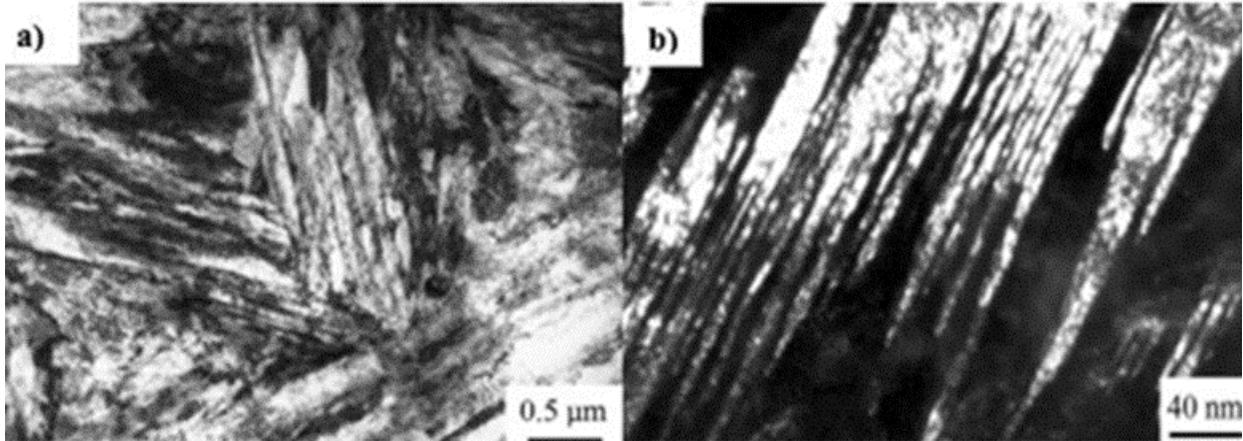
Para obtener la martensita, se realiza un tratamiento térmico que consiste en enfriar súbitamente el acero y transformarlo en martensita. Existen diferentes formas de realizar el temple como son el temple martensítico o escalonado, y el temple por inducción. Este proceso se le realiza de la siguiente manera:

- Se calienta la pieza de acero hasta que toda su masa cambie a austenita.
- Posteriormente se realiza un enfriamiento rápido de toda la austenita hasta transformarse en martensita.

La velocidad durante el enfriamiento es fundamental debido a que los átomos se reordenan. Este templado es un tratamiento que se utiliza para aumentar la resistencia y la dureza del acero, sin embargo, en ocasiones aporta fragilidad a la pieza templada.

### **1.8.1. Morfología interna de la martensita**

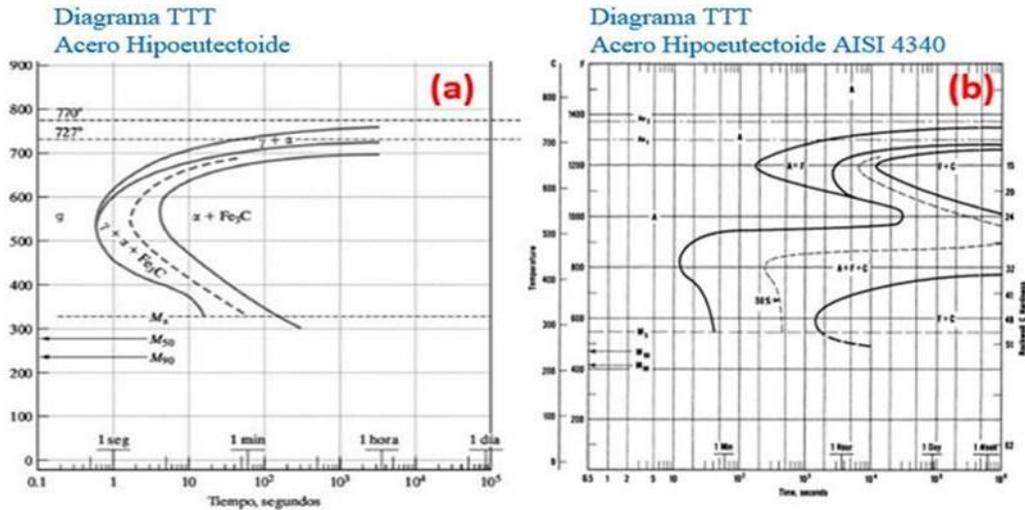
Esta fase se forma por un descenso o enfriamiento rápido ( $<215^{\circ}\text{C}$ ) que es resultado de una transformación de la austenita. En este producto formado se produce un reordenamiento colectivo de los átomos de hierro y carbono, donde su estructura que era cúbica de caras centradas pasa a ser una estructura tetragonal pero centrado en el cuerpo, similar a un cubo, pero con un lado más largo. La morfología puede variar dependiendo del contenido de carbono que se encuentra presente (ver Figura 10). Cuando este contenido es inferior al 0.6%, la martensita presenta una forma de cintas con diversas orientaciones, En cambio cuando supera este porcentaje, su forma cambia a unas láminas paralelas. La matriz de la martensita presenta laminas en forma de agujas porque es una estructura cristalina que presenta distorsiones. En cuanto a las placas de martensita son microestructuras que se comparan o se asemejan a lentejas.



**Figura 10.** Matriz martensítica en forma de: a) cintas; b) láminas. **Fuente:** (Askeland & Wright, 2017)

### 1.9. Diagrama de transformación-tiempo-temperatura TTT

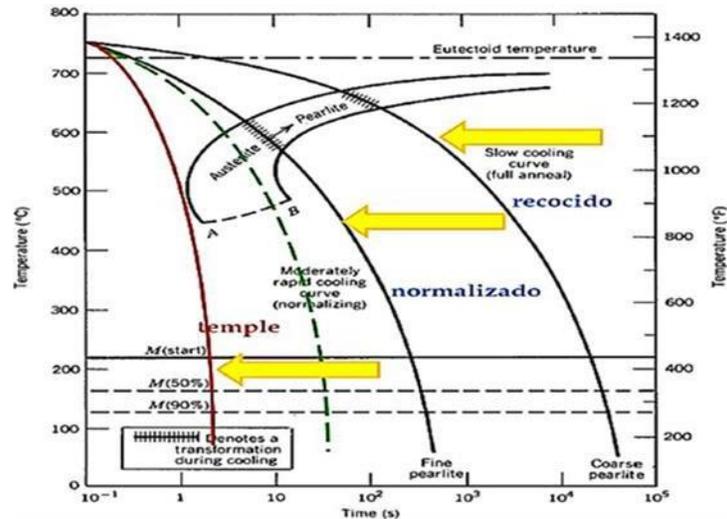
En la Figura 11 se muestran los diagramas que representan la transformación de la austenita en forma cuantitativa, es decir, el porcentaje de transformación y de forma cualitativa donde se indican los componentes en función de la temperatura y el tiempo. Estos diagramas se clasifican en diagramas de transformación isotérmica (IT) en la que se indica todas las etapas de transformación de la austenita con una temperatura constante; y el diagrama de enfriamiento continuo (CT) en dónde se indican las fases en las cuales se descompone o se transforma la austenita a diferentes velocidades de enfriamiento, es decir, una variación en la disminución de temperatura. Estos nuevos elementos que se encuentran presentes en el acero modifican las curvas TTT porque a medida que aumenta su templabilidad, se retarda la transformación de la bainita y de perlita, favoreciendo la aparición de martensita con una disminución brusca de la temperatura. Cada uno de estos diagramas son diferentes para cada variante o composición del acero porque sus temperaturas de inicio de la martensita son únicas.



**Figura 11.** Curvas TTT del acero a) AISI-1018. b) AISI-4340. **Fuente:** (Haybron, 2008).

### 1.9.1. Curva por enfriamiento continuo CCT

Cuando en el tratamiento de calentado del acero se puede evidenciar que hay una variación en cuanto a la temperatura cuando se enfría el metal, esta es la razón por la cual se utilizan las curvas CCT (Figura 12). Estos diagramas varían en relación con las curvas TTT porque muestran mayores transformaciones de tiempos y temperaturas más bajas, también se indica su microestructura y dureza del acero. Estos diagramas son aplicados con más frecuencia en el campo de la ingeniería, debido a que el material que se utilizará es monitoreado, donde se grafican las curvas desde que el material disminuye su temperatura en el proceso de enfriamiento, reduciendo los costos de producción.



**Figura 12.** Curva CCT de un acero eutectoide. **Fuente:** (Pilco & Merino, 2021)

### 1.10. Dureza del material – acero.

Se define como la resistencia que ofrece el acero en su superficie antes de ser deformada o penetrada. Esta es una característica física y mecánica esencial que está relacionado con las propiedades de templabilidad y la composición del acero. En los aceros con mayor temple son resistentes a los golpes y desgaste. Es por ello que son utilizados en estructuras que requieren alto rendimiento. En cambio, mientras menos temple posea el acero se vuelve blando y más fácil de deformar, son utilizadas en aplicaciones que no requieran realizar mayor esfuerzo.

La dureza del acero depende de su composición química y del tratamiento térmico. En el caso de aceros aleados con silicio, cromo o manganeso, estos elementos hacen que aumente su dureza. Mientras más porcentaje de carbono, mayor dureza presentará el acero final. Otro factor que influye es el temple que ya se había explicado anteriormente es la variación de temperatura durante el calentamiento o enfriamiento que incide en la formación de nuevos compuestos con mayor o menor dureza.

### **1.10.1. Dureza Rockwell**

Para medir la dureza del acero se realizan varios métodos estandarizados, en los que se utiliza un penetrador de acero endurecido como el carburo de tungsteno (WIDIA). El ensayo Rockwell utiliza un penetrador cónico de diamante, este determina la profundidad de penetración bajo cargas. La dureza del acero se expresa en grados Rockwell C (HRC). Estos valores de dureza comúnmente son plasmados directamente en el durómetro. Para realizar esta medición existen dos métodos: El primero es la prueba de dureza de Rockwell, y el segundo es la prueba de dureza superficial de Rockwell. La diferencia entre ambos métodos radica en el valor de la fuerza con la que es aplicado sobre la superficie del acero. En cuanto a la primera, se aplica una fuerza inicial o preliminar de 10 kgf mientras para la segunda, se toma un valor de 60 kgf.

#### **1.10.1.1. Etapas en la medición de la dureza Rockwell**

Durante la medición de la dureza del material se seguirán tres etapas (Figura 13):

- En la primera etapa, el indentador se le ubica hasta que se encuentre en contacto con la cara de análisis de la probeta. Después se aplica una precarga ( $F_0$ ) y se mantiene durante un tiempo específico con la finalidad de medir la profundidad de dicha hendidura tomada de la línea base.
- En la etapa 2, se aplica una fuerza adicional ( $F_1$ ) sobre el indentador para que la velocidad aumente gradualmente que es controlada por la precarga inicial hasta alcanzar la fuerza total ( $F$ ) y se mantiene esta fuerza por largo tiempo.
- En la etapa 3, se retira la fuerza adicional ( $F_1$ ), para que se mantenga con el valor de la precarga durante un tiempo específico. En este punto, se mide la profundidad de la huella dejada por el indentador.

El valor resultante de la dureza está marcado por la diferencia de profundidades resultantes de la línea base, es decir que este valor de profundidad de la indentación final se encuentra debajo de la fuerza preliminar.

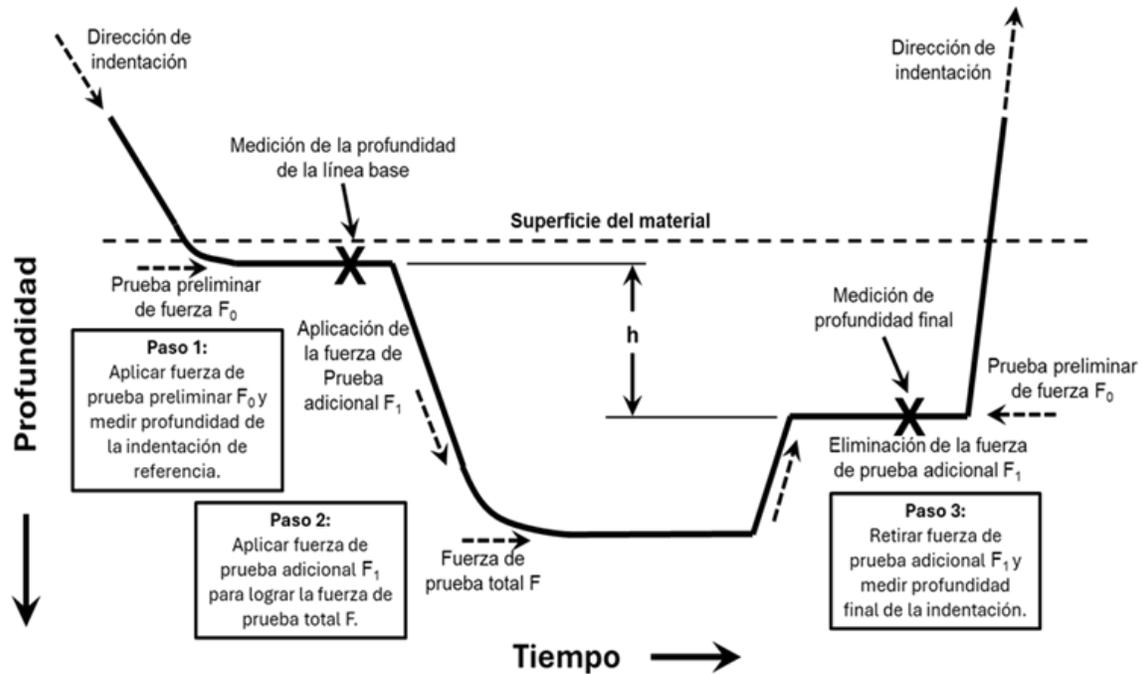


Figura 13. Etapas de la medición de la dureza de Rockwell. Fuente: (Pilco & Merino, 2021)

### 1.11. ACERO AISI-52100

El acero 52100, está definido por la AISI (American Iron & Steel Institute) y SAE (Society of Automotive Engineers), la cual es una aleación que presenta un alto contenido de carbono que presenta una densidad de  $7,81 \text{ g/cm}^3$ . No se utiliza para soldar, pero se puede utilizar en la fabricación de rodamientos, rodillos de molino y piezas de vehículo gracias a su combinación de alta resistencia y durabilidad. Además, se clasifica como un acero aleado con cromo de templabilidad elevada y su composición química está compuesta por carbono (0.98-1.13%), cromo (1.3-1.6%) manganeso (0.25-0.45%) y silicio (0.15-0.30%).

## Capítulo 2. Metodología

### 2.1 Introducción

De una forma general, el dispositivo para enfriar que está descrito en la normativa ASTM A255 puede suministrar de forma continua el fluido para poder enfriar a la probeta, el cual debe cumplir con características en condiciones de caudal y tiempo de enfriamiento con la finalidad de poder alcanzar la mayor efectividad del ensayo y dar cumplimiento a los parámetros establecidos.

En la Figura 14 se muestra el diagrama de flujo para el diseño, fabricación y puesta en marcha del equipo para ensayos Jominy.

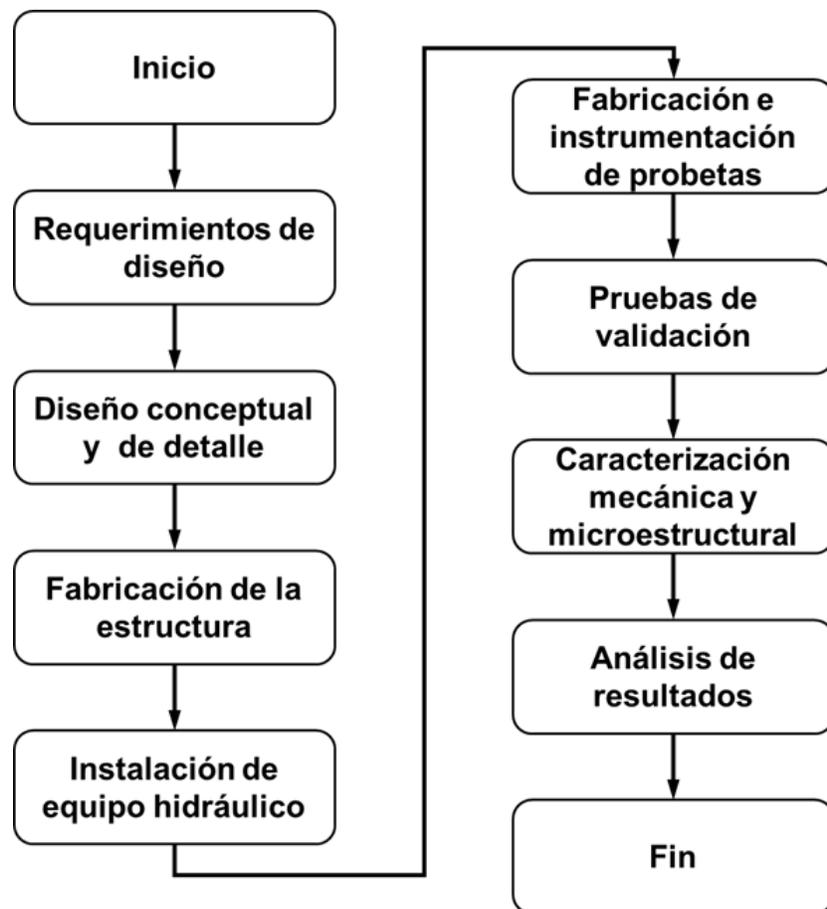


Figura 14. Diagrama de flujo para el desarrollo del proyecto. Fuente: Propia.



## **2.4 Requerimientos del usuario**

El diseño y construcción de esta máquina para realizar pruebas Jominy surge como una necesidad laboral, así que el diseño también debe cumplir con:

- Máquina compacta y eficiente.
- Cumplir con los parámetros de la norma ASTM-A255.
- Operación fácil y segura.
- Un proceso de enfriamiento de manera automatizada.
- Un mantenimiento fácil y seguro.
- Durabilidad en los equipos de construcción de la máquina y accesorios.
- Confiabilidad en los resultados que se obtienen al realizar la prueba.
- Estabilidad estructural.

## **2.5 Diseño conceptual de la máquina**

El desarrollo del proyecto se dividió en cinco etapas, la primera es el proceso de diseño de la máquina, en la segunda se realizó la fabricación de la máquina, la tercera etapa consistió en la fabricación e instrumentación de la probeta para el ensayo Jominy, mientras que en la cuarta etapa se llevó a cabo la puesta en marcha de la máquina y finalmente, se realizó la caracterización de la probeta Jominy después del ensayo.

## **2.6 Proceso de diseño**

El proceso de diseño de la máquina para realizar ensayos Jominy implica tres etapas que son la definición de requerimientos, diseño conceptual y diseño de detalle.

### **2.6.1 Definición de requerimientos**

En esta etapa se determinaron las especificaciones de la máquina, las cuales deben cumplir con la norma ASTM-A255, como son, el tamaño de la muestra, el intervalo de temperaturas, la capacidad de enfriamiento, y las dimensiones generales.

### **2.6.2 Diseño conceptual**

Para crear el diseño conceptual de la máquina se consideraron tres puntos, el primero es el diseño conceptual mediante bocetos, que incluya los principales componentes y sus posiciones. El segundo punto es la selección de materiales para la fabricación de la estructura, considerando factores como resistencia, durabilidad, y costo. Finalmente, la estabilidad estructural, ya que la estructura debe tener la capacidad de soportar las cargas estáticas que se generarán durante el ensayo.

### **2.6.3 Diseño detallado**

Para el diseño detallado se utilizó un software comercial de CAD, en el cual se indicaron las dimensiones de cada uno de los componentes de la estructura y soportes del sistema hidráulico, así como el ensamble general.

## **2.7 Procedimiento del ensayo Jominy**

### **2.7.1 Probetas**

Las probetas que fueron elegidas para el ensayo deben normalizarse para garantizar todas las características durante su endurecimiento y los resultados no contengan información errónea, por eso, esta muestra debe mantenerse a una temperatura de austenización aproximadamente por 1 hora y posteriormente se enfriará por aire. En la Tabla 1 se muestran las temperaturas promedio de normalizado y austenitizado de aceros en función del contenido de carbono.

**Tabla 1.** Temperaturas de normalización y Austenización de las probetas.

<b>Series de aceros</b>	<b>Contenido de Carbono (% máximo)</b>	<b>Temperatura de normalizado (°C)</b>	<b>Temperatura de austenizado (°C)</b>
1000 1300 1500 3100 4000 4100 4300 4400 4500 4600 4700 5000 5100 6100 8100 8600 8700 8800 9400 9700 9800	0.25 y menos 0.26 a 0.36 0.37 y más	925 900 870	925 870 845
2300 2500 3300 4800 9300	0.25 y menos 0.26 a 0.36 0.37 y más	925 900 870	845 815 800
9200	0.50 y más	900	870

Fuente: (Pilco & Merino, 2021)

### **2.7.2 Calentamiento**

La muestra se coloca en un horno a la temperatura de austenización de acuerdo con la composición química del acero y se mantendrá durante 60 minutos por cada pulgada de espesor. Es necesario calentar la muestra en un ambiente que evite que se produzca la descarburación. Para lograr este calentamiento, la muestra debe colocarse en posición vertical en el interior del recipiente que debe contener a su vez capas de viruta de hierro fundido donde se va a apoyar la cara inferior de la muestra. Otra forma de calentado es colocando la probeta en una cavidad de dimensiones similares fabricado en bloque de grafito que debe estar unida a una base plana. Finalmente se coloca un disco de grafito o una capa de carbón en la parte inferior del tubo para evitar la formación de escamas.

### **2.7.3 Enfriamiento**

Una vez que el metal ha adquirido su punto máximo de temperatura se procede al enfriamiento, para esto, se le agrega un chorro de agua a una altura de 12.7 mm que

esté por encima del orificio de la boquilla de enfriamiento. La porta probeta debe estar completamente seca debido a que ahí es donde se apoyará la muestra calentada. Para sujetar se toma por su extremo superior. Posteriormente, se procederá al enfriamiento mediante agua que es inyectada por una válvula que se encuentra instalada en la línea de enfriamiento.

En la norma ASTM-255 se indica que el tiempo de extracción y su posterior enfriamiento no debe ser mayor a los 5 segundos y que la permanencia del chorro de agua durante su enfriamiento no debe exceder los 10 minutos. Mientras se enfría el metal no debe existir turbulencias o corriente de aire alrededor de la muestra, porque puede provocar salpicaduras de agua superior a los 100°C y si después del proceso no se encuentra completamente fría después de retirar el accesorio se apagará con agua inmediatamente.

#### ***2.7.4 Medición de dureza después del templado.***

Para este paso hay que mecanizar de forma longitudinal la probeta para generar dos caras paralelas a 180°, las mismas deben mecanizarse a una profundidad mínima de 0.38 mm a lo largo de toda la barra para la medición de la dureza de Rockwell. Durante este proceso de rectificado no debe existir agrietamientos ni cambios ligeros para que no exista cambios en su estructura interna, entonces, se sugieren cortes leves con enfriamiento por agua. Esto se debe realizar utilizando una rueda abrasiva de grano grueso la finalidad de evitar el calentamiento de la muestra. Las propiedades mecánicas más bajas en la base pueden afectar el resultado final y su correlación con las velocidades durante el enfriamiento.

Para detectar los cambios estructurales producidas durante el temple, la probeta se debe preparar mediante desbaste con papel abrasivo y pulida con paño y pasta de diamante para posteriormente revelar la microestructura con nital al 3%.

Durante la preparación metalográfica y el ataque con el reactivo, la probeta se debe lavar en agua, después debe ser sumergida en la solución de ácido nítrico hasta cambiar su coloración negra, luego se procede a lavarla y otra vez es sumergido en la solución de ácido clorhídrico durante 2 a 3 segundos. Finalmente, se enjuaga con agua caliente y se pone a secar donde exista corriente de aire. Cuando existe presencia de áreas claras y oscuras en la pieza quiere decir que su estructura ha sido alterada durante la fase del esmerilado, por lo que se procede a realizar o preparar caras nuevas.

#### ***2.7.5 Apoyo de la probeta***

Después de preparar la probeta de metal se realizará la prueba de dureza, para esto, debe descansar sobre uno de sus planos en un yunque fijo y ser sujetado a la máquina de dureza.

#### ***2.7.6 Toma de lecturas***

Mientras el bloque metálico está sometido a la prueba de dureza ejerce una presión que es registrada en un programa que toma automáticamente la lectura a la cual está siendo presionada.

### **2.8 Fabricación y detallado de la estructura**

Se utilizó perfil estructural PTR de 38 mm calibre 14, y cada uno de los elementos de la estructura fueron cortados mediante sierra mecánica de corte y pulidora manual. La unión de los elementos estructurales se realizó por medio del proceso de soldadura de arco eléctrico con electrodo revestido E-6013 de 3.175 mm de diámetro.

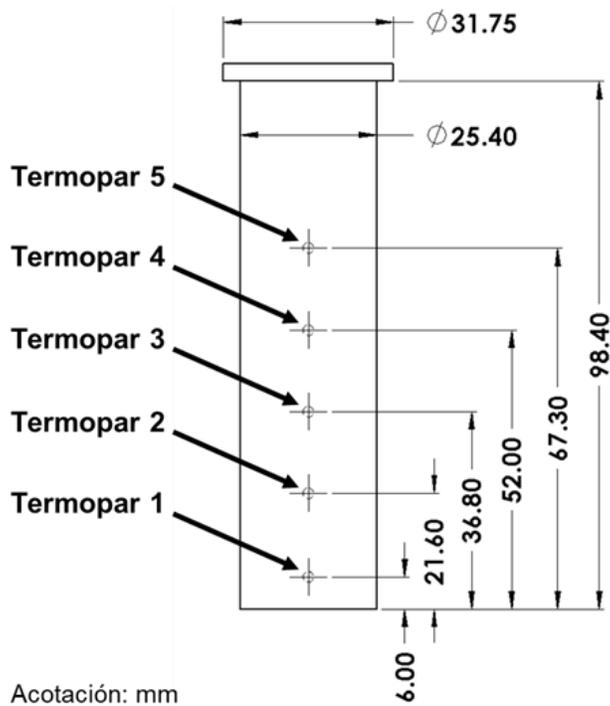
El acabado final de la máquina se realizó con la aplicación de pintura epóxica de grado automotriz para evitar la corrosión, ya que la estructura estará expuesta de forma continua a un ambiente húmedo. Para la aplicación de la pintura, se preparó la superficie mediante desbaste con papel abrasivo (#220-#1000) y enseguida se aplicó desengrasante para aplicar la pintura base (primer blanco) y posteriormente la pintura epóxica de dos componentes en color azul.

Se colocaron cuatro acrílicos transparentes de 450 x 625 mm y 5 mm de espesor, los cuales fueron colocados alrededor de la zona de enfriamiento para impedir las corrientes de aire durante el ensayo, evitar que se derrame el líquido refrigerante, así como, tener visibilidad de la probeta durante el ensayo.

Posterior al detallado de la máquina, se colocó el sistema hidráulico, el cual consta de una olla de acero inoxidable con capacidad de 100 litros, una bomba sumergible de 3200 L/h, una manguera de plástico de 12 mm de diámetro y una válvula de esfera de 1/2" para limitar el flujo de agua.

## **2.9 Fabricación de probetas Jominy**

Se fabricaron mediante torneado mecánico tres probetas cilíndricas de acero AISI-52100 de 19 mm de diámetro y 101.4 mm de longitud (Figura 16), y con un taladro fresador se realizarán cinco barrenos de 1.587 mm de diámetro en cada probeta para colocar termopares tipo K para registrar el cambio de temperatura y determinar la velocidad de enfriamiento de la probeta durante el ensayo.



**Figura 16.** Probeta para ensayo Jominy y ubicación de termopares. Fuente: Propia.

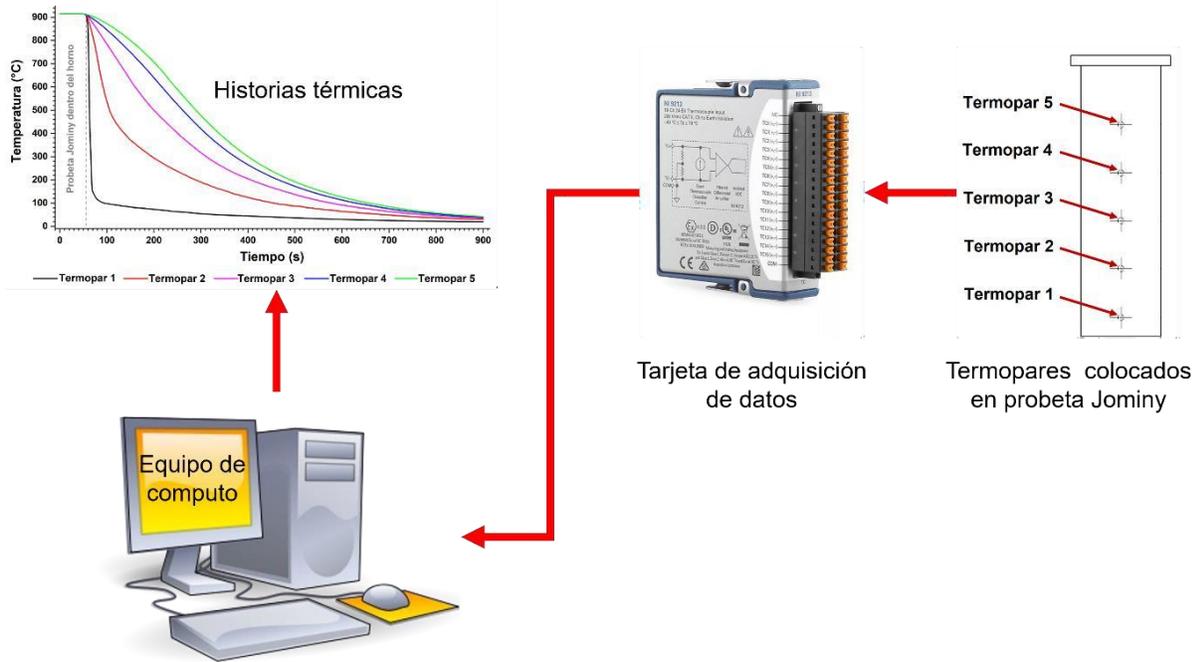
## 2.10 Instrumentación y adquisición de datos térmicos

Para obtener la historia térmica del proceso de solidificación, se utilizó una tarjeta de adquisición de datos DAQ de National Instruments, modelo NI 9213 con 16 canales diferenciales, a una velocidad de adquisición de 10 datos/s. Algunas de las ventajas de usar la tarjeta DAQ en las piezas a realizar tratamiento térmico son:

- Monitorear en tiempo real la temperatura de la pieza durante el proceso de tratamiento térmico.
- Determinar velocidades de enfriamiento que permitan correlacionar con diferentes medios de enfriamiento como pueden ser: agua, salmuera, sales, aceite.

En la Figura 17 se muestra el esquema de conexión de la tarjeta DAQ, termopares y la probeta del ensayo Jominy para la adquisición de datos térmicos. En donde, el equipo de cómputo recibe los datos procesados por la DAQ, cuya información térmica proviene

de los termopares instalados en la probeta y, que permite analizar la evolución durante el proceso de enfriamiento de la probeta, así como de la temperatura en el tanque de almacenamiento del fluido refrigerante.



**Figura 17.** Esquema de adquisición de datos para los valores de las temperaturas en los moldes de solidificación. Fuente: Propia.

El comportamiento térmico de la probeta durante el enfriamiento también fue registrado mediante una cámara termográfica marca FLUKE modelo Ti400, con la cual se tomó video del comportamiento térmico durante 15 minutos. En la Figura 18 se muestra el equipo utilizado para obtener la temperatura superficial de la probeta durante el enfriamiento.



**Figura 18.** Cámara termográfica para obtener temperatura superficial de la probeta. Fuente: Propia.

## 2.11 Pruebas de validación

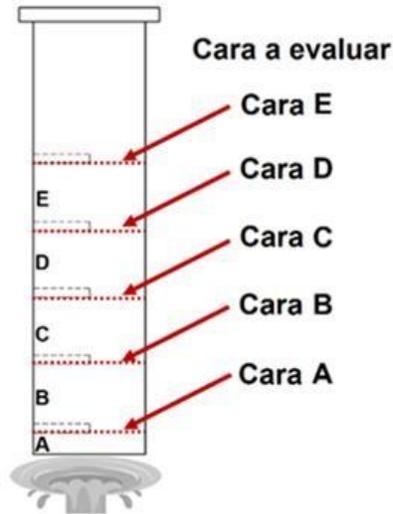
Para validar el diseño y funcionamiento del equipo, se realizará el calentamiento de la probeta fabricada en acero AISI-52100 a una temperatura de 915°C, con tiempo de permanencia dentro del horno de 2700 segundos para austenitizar la microestructura, posteriormente, la probeta será colocada en la máquina activándose el sistema hidráulico e inyectar un flujo de agua de 0.75 L/s a una temperatura de 12°C sobre la superficie inferior y dar inicio al enfriamiento de la probeta.

Los cinco termopares instalados en la probeta censarán la temperatura de la probeta desde la salida del horno y durante el ensayo Jominy para obtener la historia térmica en cada uno de los cinco puntos de la probeta y generar la curva de enfriamiento.

## 2.12 Caracterización de la probeta

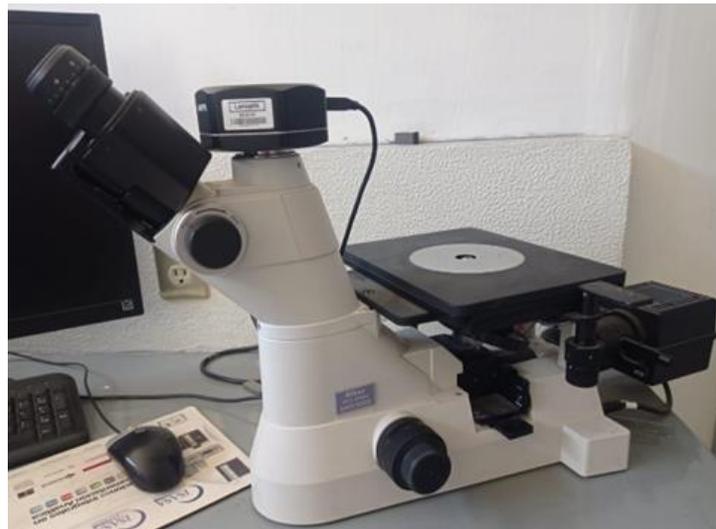
La caracterización consiste en la medición de dureza y el revelado de la microestructura en cinco zonas de la probeta cilíndrica. Para lo cual, la probeta será

seccionada en cinco partes, estos seccionamientos se realizaron en la zona donde se colocaron los termopares (Figura 19).



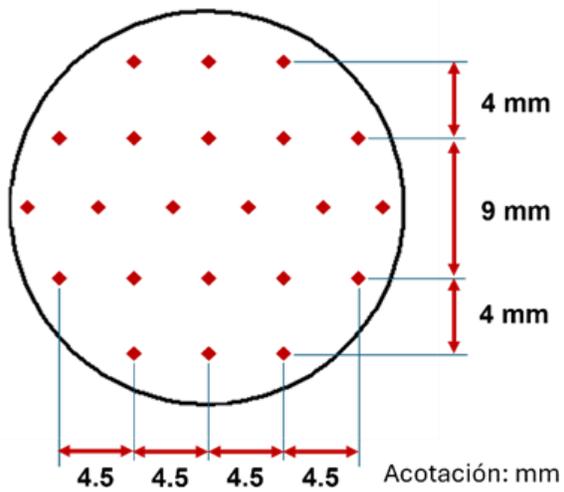
**Figura 19.** Seccionamiento de la probeta para caracterización. Fuente: Propia.

Las imágenes de la microestructura se tomaron con un microscopio óptico Nikon modelo ECLIPSE MA100 (Figura 20). Para revelar la microestructura se realizó preparación metalográfica manual con papel abrasivo (#180-#2000), y pulido con pasta de diamante de  $3\mu\text{m}$  y  $1\mu\text{m}$ , y el revelado de la microestructura se realizó con nital al 3%.



**Figura 20.** Microscopio óptico para adquisición de imágenes de la microestructura. Fuente: Propia.

La caracterización de la dureza en cada cara seleccionada se determinó con el promedio de 22 mediciones de dureza distribuidas en la superficie (Figura 21a) utilizando un Durómetro HOYTOM (Figura 21b).



(a)



(b)

**Figura 21.** Ubicación de los puntos para el ensayo de dureza. Fuente: Propia.

## Capítulo 3. Análisis de Resultados

### 3.1. Requerimientos para el diseño del sistema de enfriamiento

La norma ASTM-A255 es un método de prueba estandarizada que se usa para determinar la templabilidad o temple del acero. En esta norma define el procedimientos estandarizado del ensayo Jominy, donde se indican los parámetros que se deben seguir en el diseño, las etapas en el proceso de templado, la geometría de la probeta y el proceso que se debe seguir en la medición de la dureza.

#### 3.1.1. Dispositivo para enfriar

En la Figura 22 se muestra el dispositivo de enfriamiento el cual está conformado por una boquilla de enfriamiento fabricada en plástico de polipropileno con un orificio de salida de 12.7 mm de diámetro; y está conectada a la válvula de apertura.



**Figura 22.** Boquilla y válvula de apertura del sistema de enfriamiento. Fuente: Propia.

La boquilla de enfriamiento y válvula de apertura a su vez se conectan por medio de una manguera a la bomba sumergible que se encuentra dentro del tanque de almacenamiento del fluido refrigerante con capacidad de 100 litros y que mantiene al fluido a una temperatura que oscila entre los 5 a 30°C (Figura 23).



**Figura 23.** Sistema de enfriamiento. Fuente: Propia.

### **3.1.2. Porta-probetas**

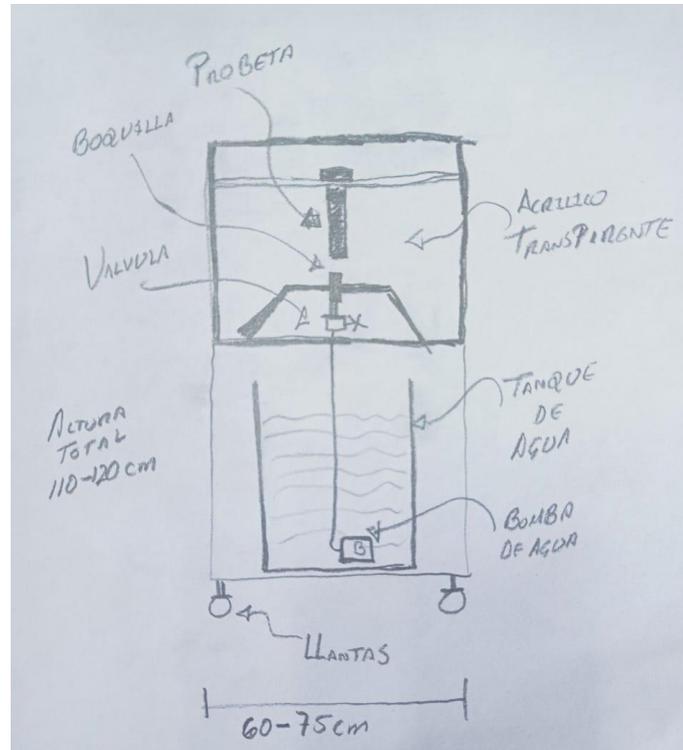
En la Figura 24 se muestra el porta-probetas fabricado con solera de acero A-36 con dimensiones de 6.35 mm de espesor y 50.8 mm de ancho, y el cual permite mantener verticalmente la probeta durante el ensayo, que se encuentra ubicado en el tanque de enfriamiento, este debe garantizar una distancia mínima de 12.7 mm entre el orificio de salida de la boquilla de enfriamiento y el extremo inferior de la probeta.



**Figura 24.** Dispositivo porta-probetas. Fuente: Propia.

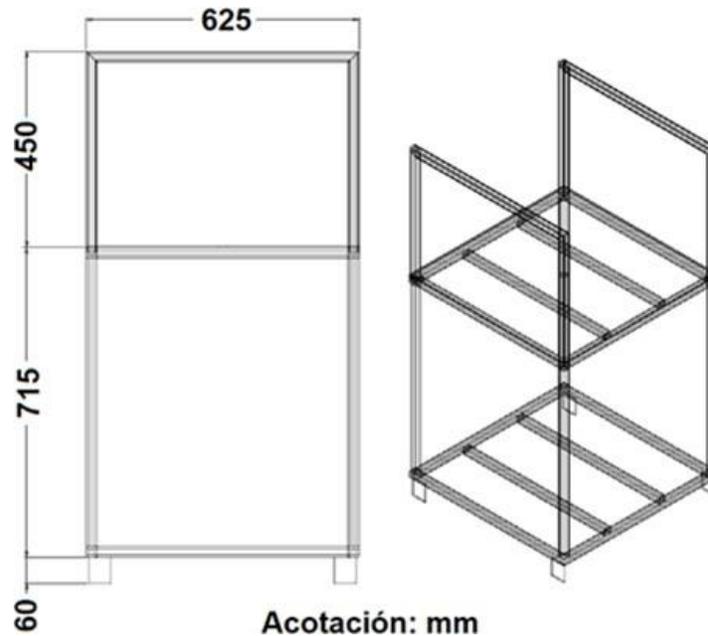
### **3.1. Diseño de la estructura**

En la Figura 25 se muestra el bosquejo realizado para el diseño y fabricación de la estructura, en este bosquejo se considera el espacio para el tanque de almacenamiento del fluido refrigerante con capacidad de 100 litros, el soporte de la boquilla de refrigeración, el porta-probetas, llantas para desplazamiento de la máquina de una forma facial, además de la colocación de acrílicos transparentes que funcionan como barreras de contención del agua impidiendo salpicaduras al exterior, así como, evitar corrientes de aire que puedan alterar las condiciones de enfriamiento.



**Figura 25.** Bosquejo inicial para el diseño de la máquina de ensayos Jominy. Fuente: Propia.

En la Figura 26 se muestran las dimensiones finales de la estructura, la cual tiene 625 mm de cada lado y una altura total de 1250 mm, la cual consta de dos niveles, en el nivel inferior se utilizará para colocar un recipiente de acero inoxidable con capacidad de 100 litros que servirá como tanque del líquido refrigerante, mientras que en el nivel superior, se encuentran el soporte de sujeción de la válvula de apertura y boquilla de refrigeración, así como el dispositivo porta-probetas donde se coloca la probeta cilíndrica caliente que sale del horno de calentamiento.



**Figura 26.** Dimensiones generales de la estructura. Fuente: Propia.

Después de realizar el diseño de la estructura, se determinaron las dimensiones de cada uno de los perfiles que dan forma a la estructura. En la Tabla 2 se muestran las especificaciones de cada uno de los perfiles utilizados.

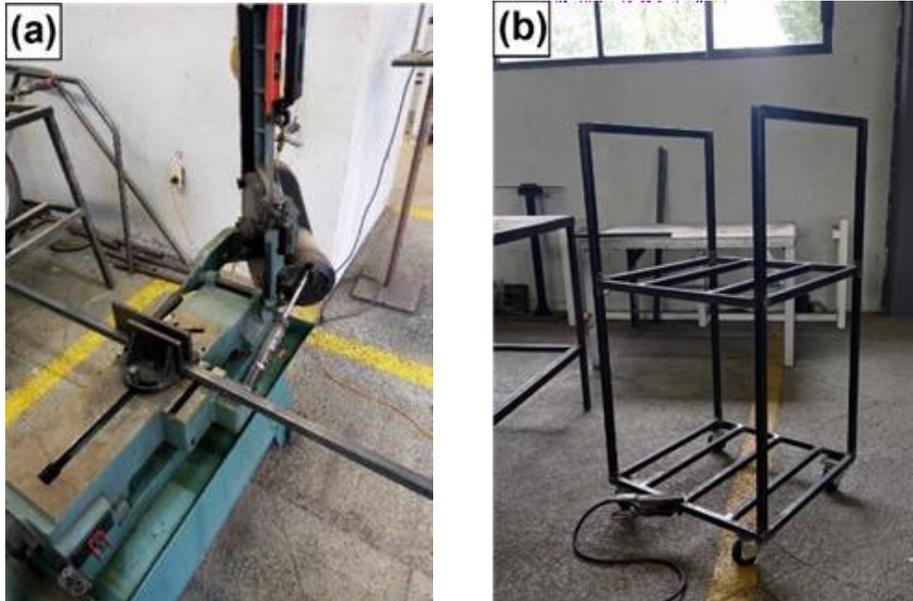
**Tabla 2.** Perfiles estructurales para la fabricación de la estructura.

Descripción.	Cantidad	Dimensiones (mm)	Aplicación
PTR cuadrado de acero cal. 14	4	25.4 x 25.4 x 1165	Postes.
	12	25.4 x 25.4 x 625	División de nivel.
	4	25.4 x 25.4 x 620	Refuerzo niveles.
Ángulo de acero cal. 18	4	25.4 x 25.4 x 400	Marco para acrílico.
	4	25.4 x 25.4 x 635	
Acrílico transparente	4	5 x 415 x 630	Ventana.
Placa de acero de 1/8"	2	625 x 625	Base.

### 3.2. Construcción de la estructura

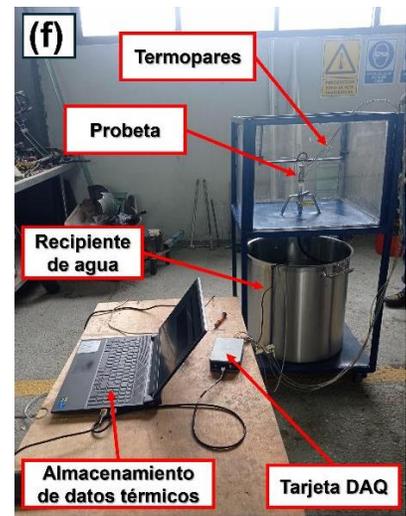
Para la fabricación de la estructura se utilizaron lámina, perfil estructural PTR, solera y ángulo de acero, los perfiles seleccionados fueron cortados a la dimensión

requerida mediante sierra mecánica (Figura 27a) y posteriormente unidos con soldadura de arco eléctrico con electrodo revestido E-6013, en la Figura 27b se muestra la estructura de la máquina.



**Figura 27.** Fabricación de la estructura. a) Corte de perfiles. b) Estructura terminada. Fuente: Propia.

Después de soldar todos los perfiles, la estructura fue detallada con papel abrasivo (#240-#800) para eliminar imperfecciones y rebabas (Figura 28a), después del detallado se aplicó pintura epóxica para protegerla de la corrosión debido al contacto directo y continuo con el agua (Figura 28b), después de la aplicación de tres capas de pintura, la estructura se expuso al sol para un secado rápido (Figura 28c) para poder colocar los acrílicos en el nivel superior (Figura 28d), los cuales tienen la función de contener el agua utilizada durante el ensayo (Figura 28e) y finalmente se instaló el recipiente de almacenamiento, la bomba sumergible que inyectará el agua a la probeta durante el ensayo y el sistema de adquisición de datos térmicos (Figura 28f).



**Figura 28.** Ensamble de la máquina. a) Estructura detallada. b) Estructura pintada. c) Secado de la pintura. d) Colocación de acrílicos. e) Estructura terminada y ensamblada. f) Máquina con los componentes que la integran. Fuente: Propia.

### 3.3. Fabricación e instrumentación de probetas

Previo a la fabricación de las probetas para el ensayo Jominy, se realizó un análisis químico del acero AISI-52100 adquirido con la finalidad de confirmar la composición química del acero y determinar la temperatura de austenitización, el análisis químico del acero se realizó por medio de la prueba de Espectrometría de emisión óptica (Figura 29).



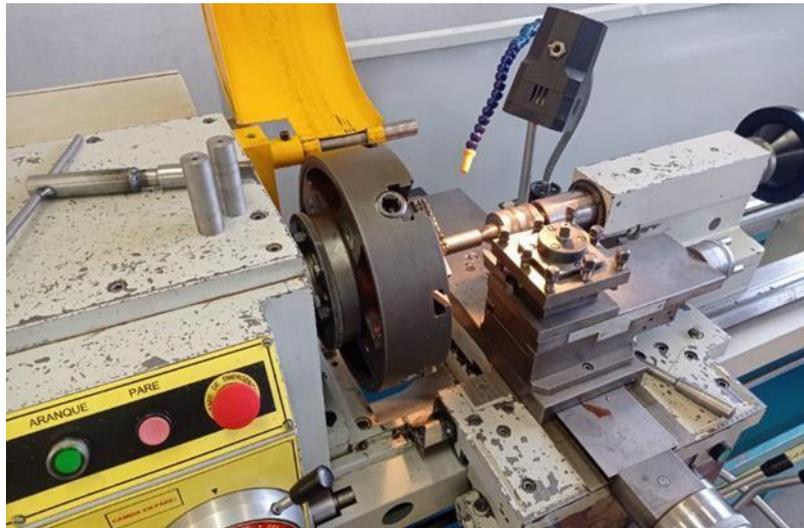
**Figura 29.** Espectrómetro de emisión óptica para determinar composición química. Fuente: Propia.

En la Tabla 3, se muestran los resultados del análisis químico, en la cual se puede observar que los elementos químicos principales (C, Cr, Mn y Si) están dentro del intervalo que caracterizan a un acero AISI-52100, por lo tanto, el acero adquirido para la validación del equipo de ensayos Jominy es el solicitado.

**Tabla 3.** Composición química del acero AISI-52100 para los ensayos Jominy.

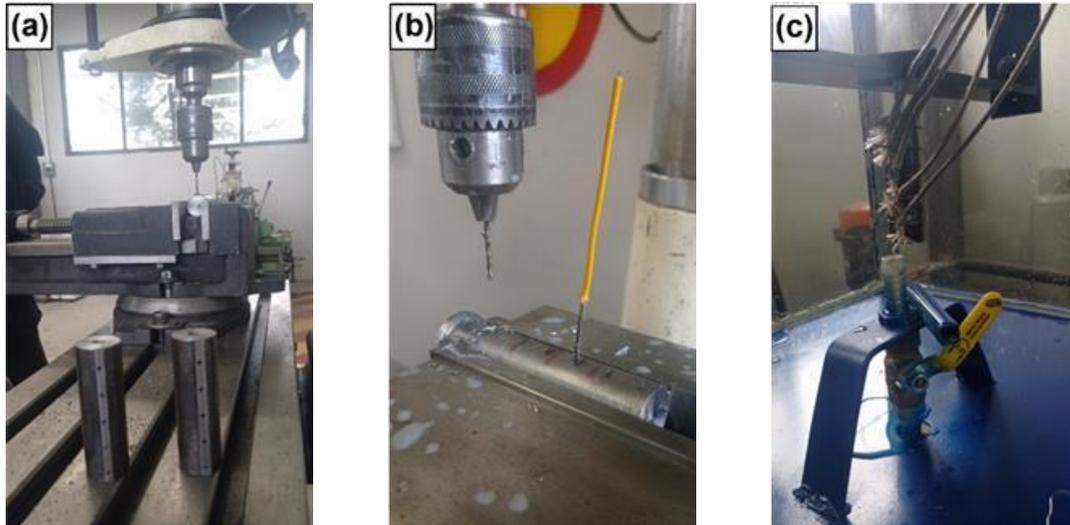
<b>C</b> <b>(% en Peso)</b>	<b>Cr</b> <b>(% en Peso)</b>	<b>Mn</b> <b>(% en Peso)</b>	<b>Si</b> <b>(% en Peso)</b>
1.01	1.44	0.30	0.29

En la Figura 30 se muestra el maquinado en torno mecánico de las probetas para el ensayo Jominy, las cuales quedaron de 25.4 mm de diámetro y una longitud de 100 mm. Posterior al maquinado en el torno mecánico, las probetas fueron barrenadas en el taladro fresador.



**Figura 30.** Maquinado de probetas para ensayo Jominy. Fuente: Propia.

En la Figura 31a se muestra el proceso de barrenado de las probetas después del maquinado en torno mecánico, se realizaron cinco barrenos en cada una para insertar los termopares tipo K (Figura 31b) y registrar la temperatura de la probeta durante el ensayo Jominy (Figura 31c).

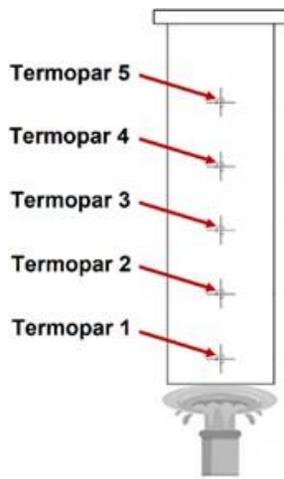


**Figura 31.** Probeta cilíndrica normalizada para ensayo Jominy. b) Probeta barrenada para insertar termopares. c) Probeta cilíndrica instrumentada con termopares. Fuente: Propia.

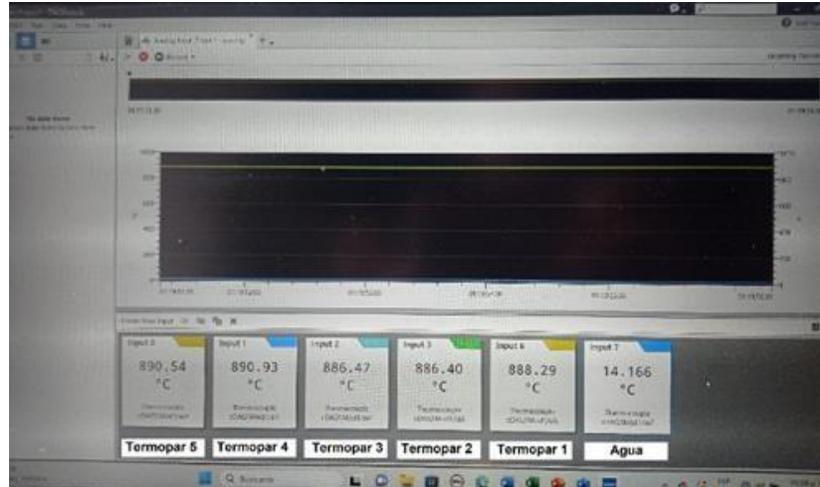
### 3.4. Pruebas de validación

Para la validación del funcionamiento del equipo para ensayos Jominy, se realizó el calentamiento de la probeta de acero AISI-52100 en una mufla a una temperatura de 915°C con tiempo de permanencia de 2700 segundos para austenitizar la microestructura del acero, posteriormente, la probeta se colocó en la máquina activándose el sistema hidráulico e inyectar un flujo de agua de 0.75 L/s a una temperatura de 14°C sobre la superficie inferior y dar inicio al enfriamiento de la probeta. En la Figura 32a se muestra el esquema de la ubicación de los termopares instalados en la probeta cilíndrica, los cuales detectaron la temperatura mediante la tarjeta DAQ y almacenados en la computadora (Figura 32b). Como se puede observar, al momento de colocar la probeta en la máquina, la temperatura de la probeta en los cinco puntos registrados es homogénea de 890°C. Los datos térmicos se obtuvieron durante 15 minutos y en la Figura 32c se muestra la probeta 30 segundos antes de terminar el

ensayo, en la cual se puede observar la decarburación generada en la superficie, la cual se manifiesta por la formación de cascarilla metálica.



(a)



(b)

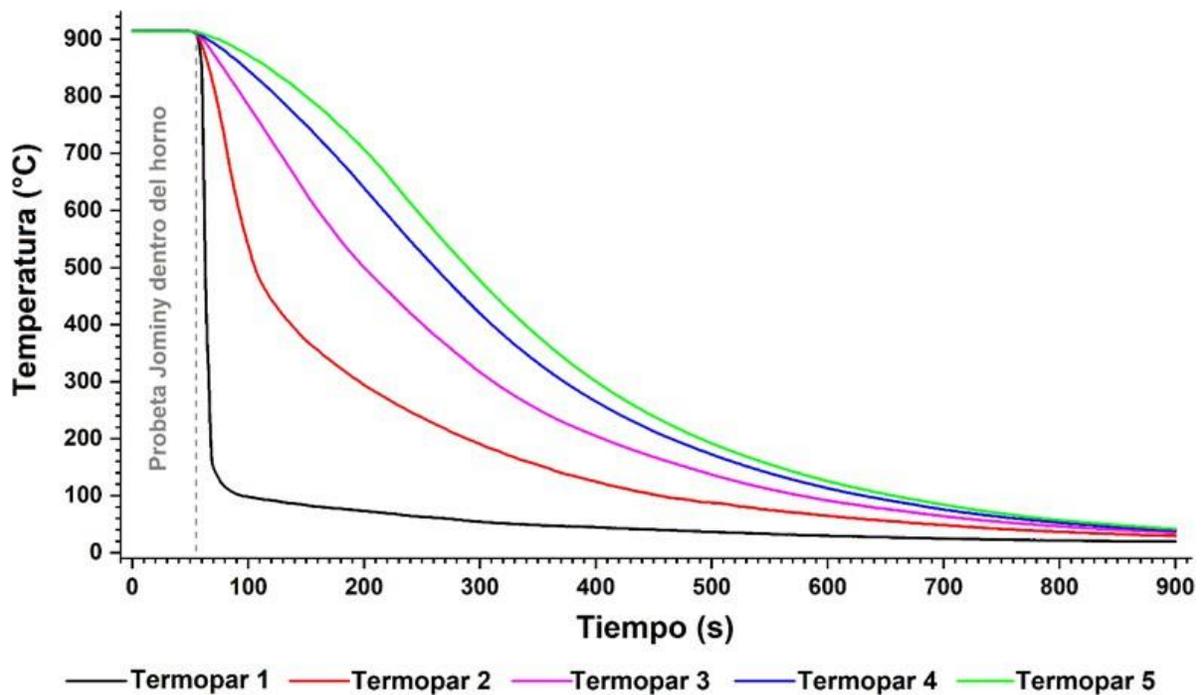


(c)

**Figura 32.** a) Esquema de la ubicación de los termopares. b) Datos térmicos adquiridos con la tarjeta DAQ. c) Probeta cilíndrica durante el enfriamiento. Fuente: Propia.

En la Figura 33 se muestra el perfil de enfriamiento de los cinco termopares colocados en la probeta, y como se puede observar, la velocidad de enfriamiento es diferente en cada termopar, la máxima velocidad de enfriamiento registrada fue de  $52.8^{\circ}\text{C/s}$ , la cual se presentó en el termopar 1 que se encuentra a 6 mm de la cara donde hace contacto el agua de enfriamiento, al aumentar la distancia (21.6 mm) entre la cara

de enfriamiento y el termopar 2, la velocidad de enfriamiento disminuye un 84% hasta un valor de  $8.3^{\circ}\text{C/s}$ . A partir del termopar 3, la velocidad de enfriamiento continúa disminuyendo a un porcentaje menos significativo, el termopar 3, alcanzó una velocidad de enfriamiento de  $2.89^{\circ}\text{C/s}$ , mientras que la velocidad de enfriamiento del termopar 4 fue de  $2.02^{\circ}\text{C/s}$ , la mínima velocidad de enfriamiento fue de  $1.8^{\circ}\text{C/s}$  y se registró en el termopar 5.



**Figura 33.** Perfil de enfriamiento de la probeta Jominy. Fuente: Propia.

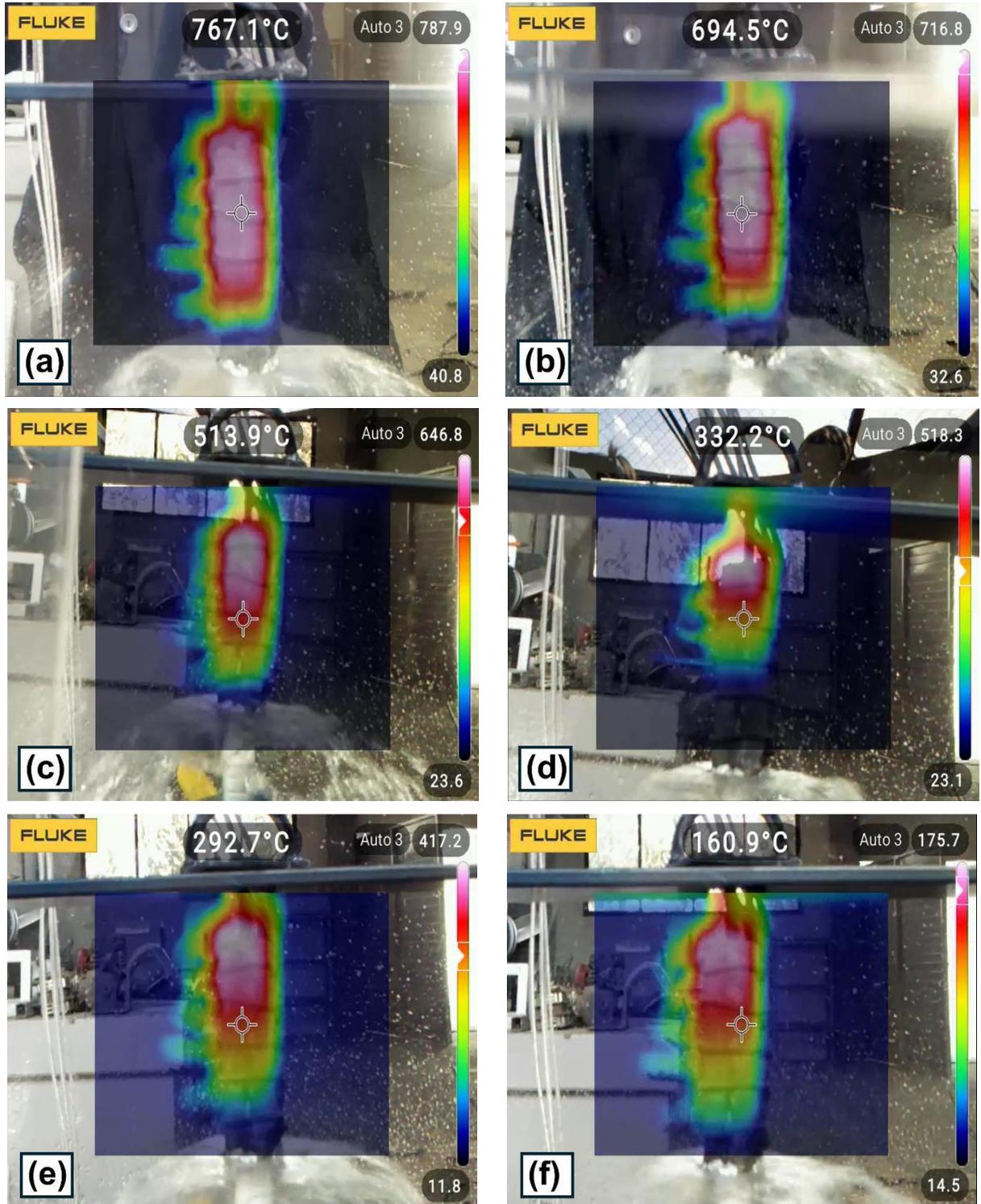
En la Figura 34 se muestra la forma en que se colocó la cámara termográfica, la cual se utilizó para obtener la temperatura superficial de la probeta. La ubicación de dicha cámara es de suma importancia, ya que, el sensor debe enfocar la zona de interés, y en este caso, se requiere que toda la probeta este enfocada y dentro de la ventana de captación de medición, así que para lograr esto, la cámara termográfica se colocó a 40

cm de distancia de la probeta, por lo cual fue necesario hacer una perforación en uno de los acrílicos de contención para que la radiación fuera captada por el sensor de la cámara sin que hubiese interferencia por parte del acrílico.



**Figura 34.** Ubicación de la cámara termográfica. Fuente: Propia.

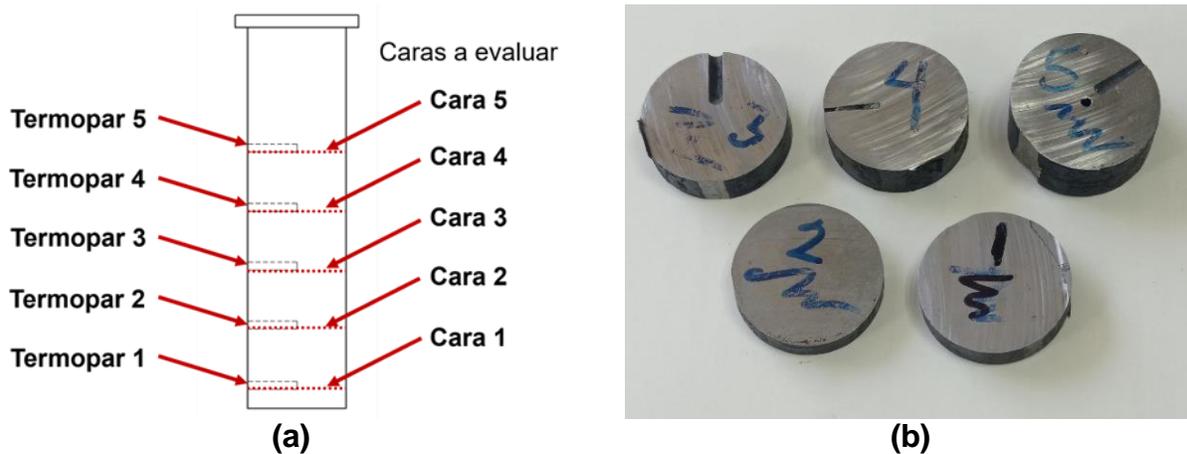
En la Figura 35 se muestra la evolución térmica superficial en la posición cercana al termopar 3 y fue captada mediante seis lecturas de temperatura con la cámara termográfica, como se puede observar, la evolución térmica es muy similar a la registrada con los termopares. La primer lectura fue  $767.1^{\circ}\text{C}$  y se realizó a los 20 segundos de iniciar el ensayo (Figura 35a), la segunda lectura ( $694.5^{\circ}\text{C}$ ) se realizó a las 60 segundos (Figura 35b), en la tercer lectura obtenida a los 140 segundos se registró una temperatura de  $513.9^{\circ}\text{C}$  (Figura 35c) la cual descendió a  $332.2^{\circ}\text{C}$  después de 205 segundos de iniciar el ensayo (Figura 35d), la quinta lectura se obtuvo a los 265 segundos y registro  $292.7^{\circ}\text{C}$  (Figura 35e) y finalmente, después de 477 segundos de haber iniciado el ensayo, la temperatura registrada con la cámara termográfica fue de  $160.9^{\circ}\text{C}$  (Figura 35f).



**Figura 35.** Evolución térmica superficial en la probeta Jominy a un tiempo de: a) 20 s. b) 60 s. c) 140 s. d) 205 s. e) 265 s y f) 477 s. Fuente: Propia.

### 3.5. Caracterización de la probeta

La variación en la velocidad de enfriamiento durante el temple de las probetas tiene un importante efecto en la microestructura y las propiedades mecánicas, En la Figura 36a se muestra el esquema de seccionamiento para la caracterización de la microestructura y de la dureza en la probeta Jominy, en la Figura 36b se muestra la probeta seccionada.

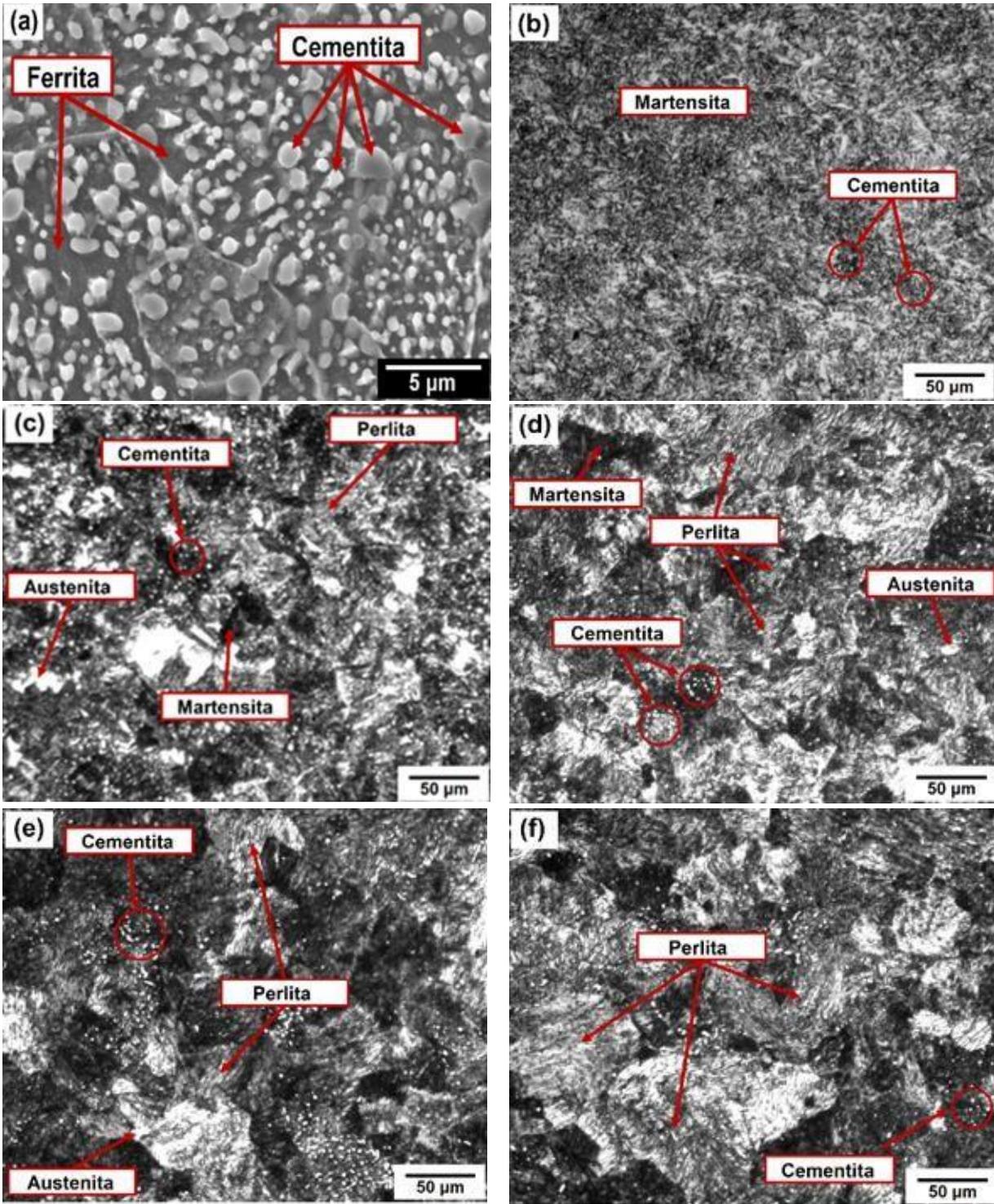


**Figura 36.** a) Esquema de las zonas a seccionar para caracterización microestructural y medición de dureza. b) Probeta seccionada. Fuente: Propia.

#### 3.5.1. Caracterización de la microestructura

En la Figura 37 se muestra la microestructura del acero AISI-52100 antes y después del ensayo de templabilidad. La Figura 37a muestra la microestructura del acero antes del ensayo de templabilidad, y como se puede observar, su microestructura consta de ferrita y esferas de cementita, lo cual es indicativo de que el acero tuvo un tratamiento térmico de esferoidizado. La Figura 37b muestra la microestructura de la cara 1, en la cual se puede observar una microestructura martensítica y cementita, esta microestructura es producto de la velocidad de enfriamiento la cual fue de  $52.8^{\circ}\text{C/s}$ . En la cara 2, la microestructura cambia debido a la reducción en la velocidad de enfriamiento

la cual fue de  $8.3^{\circ}\text{C/s}$ , con esta velocidad, la presencia de martensita se redujo considerablemente y permitió la presencia de Perlita, así como de austenita y Cementita, este cambio microestructural se puede observar en la Figura 37c. Con una velocidad de enfriamiento de  $2.89^{\circ}\text{C/s}$ , la cual se presentó en la cara 3, la microestructura también muestra la presencia de Martensita, Perlita, Austenita y Cementita, sin embargo, la principal diferencia con respecto a la microestructura de la cara 2, es que, en la cara 3 hay una mayor cantidad de Perlita (Figura 37d), la cual se debe al enfriamiento lento que se presentó en esa zona en comparación con la cara 1 y cara 2. En la Figura 37e se muestra la microestructura de la cara 4, en la cual se puede observar que las fases presentes son Martensita, Perlita, Austenita y Cementita, que en comparación con la cara 3, no hay una diferencia significativa en la distribución y morfología de las fases presentes, esto se debe a que la velocidad de enfriamiento en esta cara fue de  $2.02^{\circ}\text{C/s}$  y que en comparación con la cara 3, solo disminuyó  $0.67^{\circ}\text{C/s}$ . Finalmente, la cara 5 registró la mínima velocidad de enfriamiento con  $1.8^{\circ}\text{C/s}$  generando una microestructura compuesta por Perlita, Cementita y Austenita (Figura 37f). Como se puede observar en la Figura 37, la velocidad de enfriamiento ha generado cambios importantes en la microestructura en diferentes zonas de la probeta Jominy, lo cual influye en las propiedades mecánicas.



**Figura 37.** Microestructura del acero AISI-52100 a) Antes del ensayo Jominy. b) Cara 1. c) Cara 2. d) Cara 3. e) Cara 4. f) Cara 5. Fuente: Propia

### 3.5.2. Caracterización de la dureza

La dureza en cada cara seccionada se determinó con el promedio de 22 mediciones de dureza distribuidas en la superficie. En la Figura 38 se muestra el mapa de durezas de las cinco caras evaluadas, en la cual se puede observar que la cara 1 con la mayor velocidad de enfriamiento es la más dura con 63.85 HRC, en la cara 2 la dureza disminuyó 24% alcanzando 48.52 HRC, en la cara 3 la dureza fue de 40.23 HRC lo que representa un reducción de la dureza del 37% con respecto a la cara 1, mientras que en la cara 4 la dureza fue de 33.74 HRC y finalmente, en la cara 5 se presentó la menor dureza con un valor de 31.30 HRC, lo cual representa una reducción de la dureza con respecto a la cara 1 del 51%. El comportamiento de dureza en cada cara es congruente con la microestructura obtenida producto de la velocidad de enfriamiento durante el temple, por tal razón, se puede dar como validos los resultados.

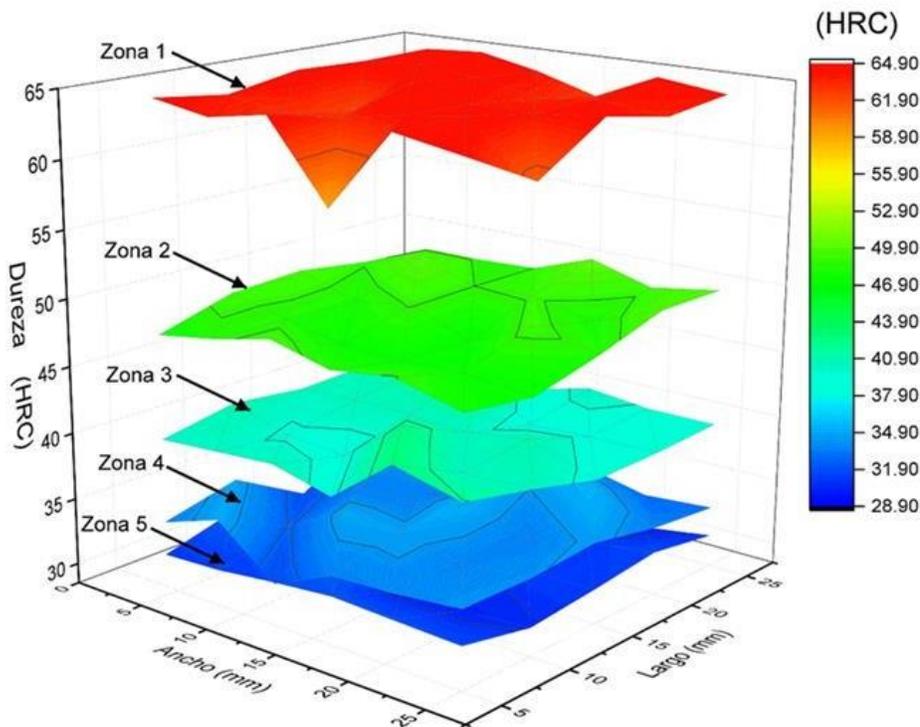


Figura 38. Mapa de durezas de las cinco caras evaluadas. Fuente: Propia.

## Capítulo 4. Conclusiones y Recomendaciones

### 4.1. Conclusiones

El diseño realizado para la máquina de ensayos Jominy cumple con los requerimientos técnicos de la norma ASTM-A255, donde el principal requerimiento es el suministro del líquido refrigerante durante 10 minutos, y que, para esta máquina se tiene un flujo constante de agua de 0.75 L/s durante al menos 30 minutos. Por otra parte, la estructura fabricada con PTR de acero A-36 mostró buena estabilidad durante los ensayos realizados, y debido a las dimensiones y el material con la cual se construyó la máquina, puede ser desplazada y operada con facilidad por una sola persona.

Las curvas de velocidad de enfriamiento obtenidas mediante los termopares instalados en la probeta permitieron visualizar el comportamiento de la temperatura en los diferentes puntos de la probeta, esto resulta importante porque es posible calcular la velocidad específica de enfriamiento en dichos puntos, y esto, se puede correlacionar con diferentes medios de enfriamiento para tener un control más preciso durante el tratamiento térmico de piezas a nivel industrial.

La historia térmica obtenida mediante los termopares instalados en la probeta, muestran una diferencia importante en la velocidad de enfriamiento a lo largo de ella, lo cual se ve reflejado tanto en la evolución microestructural como en la dureza, donde la zona expuesta al chorro de agua con velocidad de enfriamiento de 52.8°C/s presenta una microestructura martensítica con dureza de 63.85 HRC, y que conforme la velocidad de enfriamiento disminuye la microestructura y dureza cambian. Es importante tener en cuenta que, con altas velocidades de enfriamiento se consigue una mayor dureza, sin

embargo, también se pueden generar defectos como distorsión o fracturas de la pieza debido al choque térmico, lo importante en el diseño del tratamiento térmico de temple es encontrar el medio de enfriamiento que proporcione las condiciones donde no aparezcan defectos como la distorsión o fracturas, pero que genere las mejores propiedades mecánicas del material. Y esto se puede observar en los resultados de la cara 2 donde la velocidad de enfriamiento se redujo un 84% y la dureza bajó únicamente un 24%.

#### **4.2. Recomendaciones**

Al momento de realizar este tipo de tratamientos térmicos de temple es recomendable hacer previamente un análisis de espectrometría en la probeta para poder conocer realmente la composición química, el cual servirá como referencia para un contraste entre datos teóricos y experimentales.

La instrumentación de probetas y adquisición de datos térmicos durante el tratamiento térmico es una herramienta poderosa que ayuda a determinar mejores condiciones para llevarlo a cabo, por lo que en futuros ensayos, se sugiere colocar más termopares a lo largo de la probeta con la finalidad de obtener más curvas de velocidad de enfriamiento que posteriormente puedan ser correlacionadas con diferentes medios de enfriamiento como podrían ser agua, aceite y sales que inclusive puedan estar a una determinada temperatura, y que permitan generar las velocidades de enfriamiento determinadas en el ensayo con la finalidad de optimizar el proceso de temple a nivel industrial.

## BIBLIOGRAFÍA

- Askeland, D., & Wright, W. (2017). *Ciencia e ingeniería en Materiales*.
- Callister, W. (2017). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los metales*.
- Carlbom, P. (2000). *Carrocería y pasajeros en la dinámica de vehículos ferroviarios*. Obtenido de <https://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A8777&dswid=9984>
- Ganster, D., Schaubroeck, J., Sime, W., & Mayes, B. (2010). *The nomological validity of the Type A personality among employed adults*. *Journal of Applied Psychology*. doi:doi:10.1037/0021-9010.76.1.143
- Gilbert, D., McClernon, J., Rabinovich, N., Sugai, C., & Plath, L. (2004). *Effects of quitting smoking on EEG activation and attention last for more than 31 days and are more severe with stress, dependence, DRD2 A1 allele, and depressive traits*. *Nicotine and Tobacco Research*. doi:doi:10.1080/14622200410001676305
- Gomez, V. (2020). *CLASIFICACION DE LOS ACEROS*. Obtenido de [https://www.academia.edu/32721631/CLASIFICACION\\_DE\\_LOS\\_ACEROS](https://www.academia.edu/32721631/CLASIFICACION_DE_LOS_ACEROS)
- Haybron, D. (2008). *Philosophy and the science of subjective well-being*. En M. Eid & R. J. Larsen (Eds.), *The science of subjective well-being*.
- Ju, S., Chiu, C., & Huang, Y. (2024). *Comparación de pilotes tradicionales y de succión en el diseño de estructuras de acero para turbinas eólicas*. doi:https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.109169.
- Lee, S., Lee, J., Seo, B., Kim, D., Kim, D., Jo, Y., & Choi, W. (2024). *Evaluación de la rigidez de una conexión semirrígida mediante abrazaderas de acero en una estructura plástica de invernadero*. doi:https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.11.018.
- Lu, S., Chen, Y., Tseng, C., Chung, T., Yang, Y., & Chen, J. (2024). *Relación entre comportamientos mecánicos y estructuras deformadas de ferrita masiva y alotriomórfica en un acero libre de intersticios*. doi:https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.147648.

- Minhao, J., Li, M., & Hu, Y. (2024). *Estudio experimental sobre el comportamiento mecánico y el cálculo de la capacidad portante de la estructura compuesta de hormigón proyectado de acero en el sostenimiento primario del túnel.* doi:<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107960>.
- Mukhti, J., Gucunski, N., & Kee, S. (2024). *Análisis de ondas ultrasónicas asistido por IA para la clasificación automatizada de daños en el hormigón inducidos por la corrosión del acero.* doi:<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105704>.
- Newell, J. (2010). *Ciencias Materiales - Aplicaciones en Ingeniería.*
- Pilco, E., & Merino, M. (2021). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA AUTOMATIZADA PARA ENSAYOS JOMINY DE ACUERDO A LA NORMATIVA ASTM A255 PARA LA DETERMINACIÓN DE CURVAS DE TEMPLABILIDAD EN ACEROS.* Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/15098/1/15T00756.pdf>
- Rodriguez, A. (2022). *La clasificación del acero según normas internacionales.* Obtenido de <https://www.ulbrinox.com.mx/blog/la-clasificacion-del-acero-segun-normas-internacionales>
- Sekhar, R., Pandya, S., Shah, P., Ghayvat, H., & Sharma, D. (2024). *Clasificación robusta al ruido del desgaste de herramientas de carburo en el mecanizado de acero dulce mediante un enfoque de aprendizaje por transferencia basado en la extracción de textura para el mantenimiento predictivo.* doi:<https://doi.org/10.1016/j.rico.2024.100491>.
- Smith, W. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales.*
- Tao, M., Wang, Y., & Zhao, J. (2024). *Investigación numérica sobre el efecto de restricción de estructuras compuestas de doble placa de acero y hormigón.* doi:<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107926>.
- Vasan, V., Venkatesh, N., Vaithyanathan, S., & Aghaei, M. (2024). *Detección y clasificación de defectos superficiales en acero laminado en caliente mediante transformadores de visión.* doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38498>.

- Xiong, F., Chen, W., Ge, O., & Xiong, H. (2024). *Análisis del desempeño estructural de una nueva estructura de muro sándwich de hormigón prefabricado con conexión de pernos y placas de acero*. doi:<https://doi.org/10.1139/cjce-2023-0291>.
- Xiong, S., Yang, N., Guan, H., Shi, G., Luo, M., & Deguchi, Y. (2024). *Combinación de señal de emisión acústica de plasma y espectroscopía de ruptura inducida por láser para una clasificación precisa del acero*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aca.2024.343496>.
- Zuo, W., Yang, Y., Su, Z., Duan, X., Fang, X., Wu, Y., & Mi, Z. (2024). *Mejora de la sinergia de resistencia-ductilidad en acero de manganeso medio mediante una estructura de gradiente fabricada mediante procesamiento por fricción y agitación*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.114623>.



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo  
Escuela Superior de Ciudad Sahagún

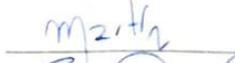
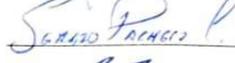
LIM-015-2025

Asunto: Autorización de impresión de tesis

**P.D.L.I.M. Jafet Santiago Ruiz  
Presente.**

Por este conducto le comunico que el jurado que le fue asignado a su trabajo de titulación denominado "DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN EQUIPO PARA REALIZAR ENSAYOS JOMINY EN ACEROS APLICADOS EN LA INDUSTRIA METALMECÁNICA", y que después de revisarlo han decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del jurado:

PRESIDENTE	Dr. Martin Ortiz Domínguez	
VOCAL	Dr. José Sergio Pacheco Cedeño	
SECRETARIO	Dr. Carlos Ernesto Borja Soto	
SUPLENTE	Dr. José Luis Rodríguez Muñoz	

Sin otro particular, reitero a usted la seguridad de mi atenta consideración.

Atentamente

"Amor, orden y progreso"

Fray Bernardino de Sahagún, Hgo., a 09 de junio de 2025



Dra. Yira Muñoz Sánchez

Coordinadora de la Licenciatura en Ingeniería Mecánica



c.c.p.- Expediente  
YMS



Carretera Otumba - Cd. Sahagún No. 7, Colonia Legaspi, Zona Industrial, Ciudad Sahagun, Hidalgo, México.C.P. 43996  
Teléfono: 52 (771)7172000 Ext. 50201  
essahagun@uaeh.edu.mx

uaeh.edu.mx