

**Diseño y construcción de un banco de prueba para el ensayo Jominy de templabilidad
con apoyo en tecnologías de información y comunicación (TIC)**

LILY KARENA IGUARAN DUARTE

LUIS MIGUEL CHAVEZ REALES

Trabajo de grado para optar al título de Ingenieros Mecánicos

Director:

MANUEL DE JESUS MARTÍNEZ

Director of Philosophy

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERIA FISICO MECANICA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2026

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que, de una u otra manera, hicieron posible la culminación de este trabajo de grado, un proceso lleno de aprendizajes, retos y crecimiento personal.

En primer lugar, a mi familia, por ser mi pilar fundamental. Gracias por su amor incondicional, por su paciencia y por acompañarme en cada paso de este camino. Su apoyo constante y sus palabras de aliento fueron mi mayor motivación, especialmente en los momentos en que más lo necesité. Este logro también es de ustedes.

A mis amigos, gracias por estar presentes durante todo este proceso, por escucharme, animarme y hacer más llevadero cada desafío. Compartir con ustedes tanto los momentos difíciles como los logros alcanzados hizo que este camino fuera mucho más significativo.

De manera muy especial, agradezco al profesor Edgar Quintanilla Piña, por su guía, dedicación y disposición para brindarme su apoyo. Su conocimiento, orientación y confianza fueron fundamentales para superar los obstáculos y alcanzar este importante logro académico.

A todos ustedes, gracias por acompañarme y ser parte de este sueño cumplido.

Lily Iguaran

Contenido

Introducción	10
1 Planteamiento del problema	11
1.1 Justificación.....	12
2 Objetivos	13
2.1 Objetivo general	13
2.2 Objetivos específicos:.....	13
3 Marco de referencia.....	14
3.1 Marco teórico.....	14
3.1.1 Tratamientos térmicos en aceros	15
3.1.2 Templabilidad	16
3.2 Marco Histórico:	16
3.3 Marco Conceptual	18
3.3.1 Diagrama Hierro-Carbono.....	19
3.3.2 Diagrama CCT	20
3.3.3 Diagrama TTT	20
3.3.4 Perlita Bainita	20
3.3.5 Fases del acero.....	21
3.3.6 Austenita	21
3.3.7 Bainita	22
3.3.8 Cementita.....	22
3.3.9 Ferrita.....	23
3.3.10 Martensita	23
3.3.11 Perlita.....	23
3.3.12 Tratamiento Térmico.....	24

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE BANCO DE PRUEBA PARA ENSAYO JOMINY	4
3.3.13	Templabilidad25
3.3.14	Ensayo Jominy25
3.3.15	Dureza.....26
4	Aspectos metodológicos.....26
4.1	Tipo de estudio.....26
4.2	Método de investigación.....28
4.3	Fuentes y técnicas de información28
4.4	Variable29
4.4.1	Definición de variable.....29
4.4.2	Operacionalización de la variable.....29
4.4.3	Estado del arte.....30
5	Metodología32
5.1	Listado de requerimientos:32
5.2	Análisis de Alternativas:.....33
5.2.1	Alternativa 1.....33
5.2.2	Alternativa 2.....34
5.3	Cálculos de la alternativa 2.....36
5.4	Construcción del banco43
5.5	Manual de operaciones45
5.5.1	Implementos y medidas de seguridad45
5.6	Preparación del equipo para la prueba Jominy47
5.7	Manual del mantenimiento del equipo.....48
5.8	Prueba de funcionamiento.....49
5.8.1	Materiales.....49
5.8.2	Acero AISI 4140.....49

5.8.3	Equipos, insumos y herramientas	50
5.8.4	Procedimiento	51
5.9	Resultados	54
5.10	Análisis del resultado	56
6	Análisis de costos	58
7	Conclusiones de las pruebas	61
8	Recomendaciones.....	63
	Referencias Bibliográficas.....	64
	Apéndices	66

Lista de tabla

Tabla 1. Matriz QFD utilizada para la selección conceptual del diseño	32
Tabla 2. Matriz de Pugh	35
Tabla 3. Dureza vs distancia en 16 avos de pulgada	54
Tabla 4 Presupuesto	58

Lista de Apéndices

Apéndice A. Diagrama Hierro-carbono	66
Apéndice B. Diagrama CCT	67
Apéndice C. Diagrama TTT	68
Apéndice D. Tabla de rugosidad	69
Apéndice E. Tabla de propiedades del agua.....	70
Apéndice F. Tabla de longitudes equivalentes	71
Apéndice G. Tabla de la ficha técnica de la bomba.....	72
Apéndice H. Ficha técnica del tanque.....	73
Apéndice I. Planos del banco.....	74

Resumen

Título: Diseño y construcción de un banco de prueba para el ensayo Jominy de templabilidad con apoyo en tecnologías de información y comunicación (TIC)

Autores: Lily Karena Iguaran Duarte, Luis Miguel Chávez Reales

Palabras claves: Ensayo jominy, Templabilidad, Norma ASTM A255, Enfriamiento.

Descripción:

El presente trabajo tuvo como objetivo diseñar y construir un banco de prueba para el ensayo Jominy de templabilidad, conforme a la norma ASTM A255, con el fin de fortalecer la enseñanza práctica en el Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander. El proyecto se desarrolló mediante una metodología exploratorio-descriptiva con enfoque experimental, que incluyó la identificación de requerimientos, el análisis de alternativas de diseño, el dimensionamiento del sistema hidráulico, la construcción del prototipo y su validación mediante pruebas experimentales. El banco construido permitió realizar el ensayo bajo las condiciones establecidas por la norma, obteniendo resultados satisfactorios en su funcionamiento. Además, se integraron tecnologías de la información y la comunicación mediante un recurso audiovisual en la plataforma Moodle para apoyar el aprendizaje. Finalmente, el análisis costo-beneficio evidenció que el equipo desarrollado constituye una alternativa funcional, segura, económica y adecuada para uso académico

*

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería mecánica, Director Manuel del Jesus Martinez

Abstrac

Title: Design and construction of a test bench for the Jominy hardenability test supported by information and communication technologies (ICT).

Authors: Lily Karena Iguaran Duarte, Luis Miguel Chávez Reales

Keywords: Jominy Test, Hardenability, ASTM A255 Standard, Cooling.

Description:

The purpose of this work was to design and build a test bench for the Jominy hardenability test, in compliance with the ASTM A255 standard, to strengthen practical teaching in the Materials Laboratory of the School of Mechanical Engineering at the Universidad* Industrial de Santander. The project was developed through an exploratory-descriptive methodology with an experimental approach, which included the identification of requirements, the analysis of design alternatives, the sizing of the hydraulic system, the construction of the prototype, and its validation through experimental tests. The built bench allowed the test to be carried out under the conditions established by the standard, obtaining satisfactory results in its operation. In addition, information and communication technologies were integrated through an audiovisual resource on the Moodle platform to support learning. Finally, the cost-benefit analysis showed that the developed equipment constitutes a functional, safe, economic, and adequate alternative for academic use.

* Bachelor tesis

**Facultad de ingenierías Fisicomecánicas, escuela de ingeniería mecánica, Director Manuel del Jesus Martinez

Introducción

El tratamiento térmico es un proceso fundamental en la ingeniería de materiales, ya que permite modificar las propiedades mecánicas de los metales para adaptarlos a diversas condiciones de servicio. Uno de los tratamientos más utilizados en los aceros es el temple, el cual consiste en calentar el material por encima del punto crítico y luego enfriarlo con rapidez, generalmente con agua o aceite.

Este proceso genera una transformación en la microestructura del acero, incrementando su dureza y resistencia mecánica. Sin embargo, el grado de endurecimiento no es uniforme en toda la pieza y depende, entre otros factores, de su capacidad para endurecerse a diferentes profundidades desde la superficie.

Para evaluar esta propiedad, se utiliza el ensayo Jominy de templabilidad, método estandarizado por la norma ASTM A255, el cual consiste en calentar una probeta cilíndrica de acero hasta una temperatura de austenización (generalmente de 750°C - 950°C) aunque el valor exacto se selecciona a partir del diagrama hierro carbono o de tablas normativas para asegurar la transformación completa a austenita. y enfriar bruscamente en un solo extremo mediante un chorro de agua.

La correcta ejecución de este procedimiento garantiza un calentamiento uniforme de la probeta, un posicionamiento preciso y un sistema de enfriamiento que cumpla con los parámetros definidos por la norma (International, 2020).

En este contexto, la implementación de un banco de pruebas Jominy permite realizar este ensayo de forma segura, confiable y con apego a los estándares técnicos. Este desarrollo no solo busca fortalecer el aprendizaje práctico en el área de tratamiento térmico y caracterización de materiales, sino también ofrecer una solución accesible y funcional para los laboratorios académicos.

1 Planteamiento del problema

En la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander (UIS), los estudiantes de pregrado que cursan asignaturas del área de Materiales, particularmente Laboratorio de Materiales (23027), no cuentan con un banco de prueba Jominy para la realización del ensayo de templabilidad de los aceros conforme a la norma ASTM International A255.

La ausencia de este equipo limita la ejecución de prácticas de laboratorio relacionadas con tratamientos térmicos, impidiendo que los estudiantes analicen experimentalmente la influencia de las velocidades de enfriamiento sobre la microestructura y las propiedades mecánicas del acero.

Esta carencia restringe la experiencia práctica, dificulta el proceso de enseñanza e aprendizaje y genera un vacío en un tema fundamental para la formación del ingeniero mecánico, especialmente en el contexto de la industria metalmecánica colombiana, donde los tratamientos térmicos son procesos determinantes en el desempeño y calidad de los componentes.

1.1 Justificación

El ensayo de templabilidad Jominy es fundamental en la formación del ingeniero mecánico, ya que permite comprender de manera práctica la relación entre condiciones de enfriamiento, transformación microestructural y propiedades mecánicas del acero.

Contar con un banco de prueba que cumpla con los lineamientos de la norma ASTM A255 fortalecería el aprendizaje experimental, permitiría evidenciar de forma didáctica los fenómenos metalúrgicos asociados a los tratamientos térmicos y contribuiría al desarrollo de competencias técnicas alineadas con las necesidades del sector industrial.

Dado que los recursos institucionales son limitados, se justifica el diseño y construcción de un banco de prueba propio que sea funcional, seguro, económicamente viable y adaptado a los requerimientos académicos. Esta solución optimiza los recursos disponibles y fortalecería la formación académica y práctica de los futuros ingenieros mecánicos.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Diseñar y construir un banco de prueba para la realización del ensayo Jominy, en cumplimiento con los requisitos de la norma ASTM A255, con el fin de fortalecer la enseñanza y el aprendizaje práctico en la asignatura Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

2.2 Objetivos específicos:

Diseñar un banco de prueba para el ensayo Jominy conforme a la norma ASTM A255 -20^a la cual establece, los parámetros para las probetas de acero de cualquier denominación que son de 25.4 mm (1 pulg) de diámetros, por 101 mm (4.0 pulg) de largo, una altura del chorro de 63.5 mm (2.5 pulg) y después de colocar la probeta en el soporte esta debe ser de 12.7mm (0.5 pulg), siendo el mismo diámetro del orificio de salida.

Construir el banco de prueba de acuerdo con las especificaciones del diseño desarrollado, garantizando seguridad, funcionalidad y durabilidad en su aplicación docente e instruir al estudiantado en el uso de la TIC mediante una simulación.

Implementar el diseño realizado en el laboratorio a través del uso de las TIC, utilizando la plataforma Moodle para alojar un video explicativo que muestra el funcionamiento del banco de prueba, con el fin de complementar y fortalecer el

aprendizaje de los estudiantes.

Analizar la relación costo–beneficio del banco construido frente a un banco disponible en el mercado.

3 Marco de referencia

3.1 Marco teórico

Los materiales son las sustancias que componen cualquier objeto o producto utilizado por el ser humano. Desde el comienzo de la civilización, los materiales junto con la energía han sido fundamentales para el desarrollo de la tecnología y para el mejoramiento de la calidad de vida, el progreso de la ciencia de materiales ha permitido comprender la relación existente entre la estructura interna, el procesamiento y las propiedades finales de los materiales (Smith, 1998).

En ingeniería, la correcta selección de materiales requiere conocer no solo su composición química, sino también su estructura cristalina y su comportamiento mecánico. Las propiedades de los materiales dependen directamente de la forma en que sus átomos se organizan y enlazan en el estado sólido, Cuando los átomos se ordenan siguiendo un patrón repetitivo en el espacio, el material se considera cristalino; en caso contrario, se clasifica como amorfo.

Un ejemplo clásico que ilustra la importancia de la estructura cristalina es el carbono, El grafito y el diamante están formados únicamente por átomos de carbono,

pero presentan propiedades completamente diferentes debido a su distinta estructura atómica, Este fenómeno demuestra que la estructura interna influye de manera determinante en las propiedades mecánicas y físicas del material (Van Vlack, 1989).

Dentro de los materiales metálicos, el acero ocupa un lugar importante en la ingeniería moderna. El acero es una aleación de hierro y carbono cuyo contenido de carbono es $< 2\%$. De acuerdo con (Avner, 1979), dependiendo del porcentaje de carbono, los aceros pueden clasificarse en hipoeutectoides ($< 0,8\% \text{ C}$), eutectoides (aproximadamente $0,8\% \text{ C}$) e hipereutectoides ($0,8\% < \text{C} < 2\%$), lo cual determina la microestructura resultante compuesta por ferrita, perlita y cementita principalmente.

3.1.1 Tratamientos térmicos en aceros

El desarrollo de los tratamientos térmicos tiene antecedentes históricos muy antiguos, Se han hallado utensilios de hierro en Egipto que datan aproximadamente del año 3000 a.C. (Poveda Ramos, 2010) y ya en la antigüedad se conocían técnicas rudimentarias de endurecimiento mediante calentamiento y enfriamiento controlado, Con el tiempo, estos procesos evolucionaron hasta convertirse en procedimientos científicamente controlados.

Los tratamientos térmicos se definen como cualquier operación calentamiento y enfriamiento aplicadas a los materiales con el propósito de modificar su microestructura y sus propiedades mecánicas, sin alterar su composición química

(Bain & Grossmann, 1972). En el caso de los aceros, estos tratamientos permiten ajustar propiedades como la dureza, resistencia, ductilidad y tenacidad, dependiendo de las condiciones de temperatura y de la velocidad de enfriamiento.

Entre los tratamientos térmicos más comunes se encuentran:

El recocido.

El normalizado.

El temple.

El revenido.

3.1.2 Templabilidad

La templabilidad en un acero es la propiedad que determina la profundidad y distribución de la dureza obtenida después del temple. Está asociada con la facilidad del acero para formar martensita y con la resistencia a la formación de otros productos de transformación como la troostita, la cual corresponde a una estructura muy fina compuesta por ferrita y cementita. Esta se forma cuando el enfriamiento de la austenita ocurre a una velocidad ligeramente inferior a la crítica de temple, generalmente en un rango aproximado entre 500 °C y 600 °C. Sus propiedades mecánicas son intermedias entre las de la martensita y las de estructuras revenidas como la sorbita (Bain & Grossmann, 1972).

3.2 Marco Histórico:

Desde los primeros desarrollos metalúrgicos de la antigüedad, el ser humano

ha buscado mejorar las propiedades del hierro mediante procesos de calentamiento y enfriamiento, teniendo en cuenta que civilizaciones como la egipcia y la griega ya aplicaban técnicas rudimentarias de endurecimiento desde muchos siglos atrás, aunque sin comprender aún los fundamentos científicos que explican dichos fenómenos (Bain & Grossmann, 1972).

Con el avance de la Revolución Industrial y el desarrollo de la metalurgia física en los siglos XIX y XX, se logró una mayor comprensión de las transformaciones estructurales del acero, El estudio del diagrama hierro-carbono y posteriormente de los diagramas de transformación permitió explicar cómo la velocidad de enfriamiento influye directamente en la formación de fases como perlita, bainita y martensita (Avner, 1979).

(Bain & Grossmann, 1972) publicaron estudios fundamentales relacionados con la templabilidad del acero y estableció el concepto de diámetro crítico como parámetro para medir la capacidad de endurecimiento en profundidad. Sus investigaciones marcaron un punto de partida para la evaluación cuantitativa del temple en aceros de distintas composiciones.

Posteriormente, el ensayo Jominy fue adoptado como método estandarizado para determinar la templabilidad mediante el enfriamiento controlado de un extremo de una probeta cilíndrica, Este procedimiento permitió obtener curvas comparativas de dureza en función de la distancia al extremo enfriado, facilitando la selección de materiales en aplicaciones industriales.

A partir de la segunda mitad del siglo XX, numerosos autores y especialistas en ciencia de materiales, como William F. Smith, continuaron desarrollando y difundiendo los fundamentos teóricos de la templabilidad, siempre tomando como referencia los principios establecidos por (Bain & Grossmann, 1972).

En la actualidad, el ensayo Jominy sigue siendo un método de referencia en laboratorios de ingeniería y centros de investigación. Sin embargo, los avances tecnológicos han permitido integrar sistemas digitales de medición, adquisición y almacenamiento de datos, lo que mejora la precisión y confiabilidad de los resultados experimentales.

En este contexto se enmarca el presente proyecto, orientado al diseño y construcción de un banco de pruebas Jominy para evaluar, bajo los lineamientos de la norma ASTM A255, la templabilidad de distintos aceros mediante el apoyo de tecnologías de la información y la comunicación.

3.3 Marco Conceptual

En este proyecto se emplean diversos conceptos técnicos relacionados al área de la metalurgia y la ciencia de los materiales. Algunos de ellos fueron definidos previamente en el marco teórico. No obstante, a continuación, se presenta un glosario con los términos complementarios más relevantes para facilitar la comprensión del lector.

3.3.1 *Diagrama Hierro-Carbono*

El diagrama hierro–carbono (Anexo A) es una representación gráfica que muestra las fases y transformaciones que se presentan en las aleaciones de hierro con carbono bajo condiciones de equilibrio, es decir, calentamiento y enfriamiento lento.

Nos permite comprender el comportamiento térmico de los aceros. En él se identifican fases como ferrita (α), austenita (γ) y cementita (Fe_3C), así como microestructuras como la perlita. También se destacan reacciones importantes, como la eutectoide, que se presentan a una temperatura cercana a los 727 °C según el diagrama, es fundamental en los tratamientos térmicos. El diagrama nos permite analizar lo siguiente:

Diferenciar aceros ($\text{C} < 2\%$) y fundiciones ($\text{C} > 2\%$).

Clasificar los aceros en hipoeutectoides, eutectoides e hipereutectoides.

Establecer las temperaturas adecuadas de austenización previas al temple.

En el contexto del presente proyecto, el diagrama hierro–carbono es esencial para conocer la temperatura a la cual debe calentarse la probeta antes de realizar el ensayo Jominy, ya que la formación previa de austenita es condición indispensable para que durante el enfriamiento se produzca la transformación martensítica y pueda evaluarse la templabilidad del acero.

3.3.2 Diagrama CCT

Es una representación gráfica que muestra las transformaciones de la austenita cuando el acero se enfría de manera continua (Anexo B). A diferencia del diagrama TTT, el CCT describe condiciones más cercanas a los procesos reales de enfriamiento industrial.

En él se indican las temperaturas y tiempos en los que se forman fases como perlita, bainita o martensita según la velocidad de enfriamiento aplicada.

En el presente proyecto es importante porque el ensayo Jominy se basa en un enfriamiento continuo, por lo que el diagrama CCT permite interpretar la formación de microestructuras y la variación de dureza a lo largo de la probeta.

3.3.3 Diagrama TTT

El diagrama TTT es una representación gráfica que muestra cómo se transforma la austenita en diferentes microestructuras del acero cuando este se mantiene a temperatura constante (Anexo C). En este diagrama se relacionan tres variables fundamentales: tiempo, temperatura, transformación microestructural

Generalmente se representa con curvas en forma de “C”, que indican el inicio y el fin de la transformación de la austenita en fases como:

3.3.4 Perlita Bainita

Martensita (esta última no depende del tiempo, sino de la temperatura de enfriamiento)

El diagrama TTT permite determinar: el tiempo necesario para que ocurra una

transformación, La velocidad crítica de enfriamiento y La microestructura que se obtendrá según el tratamiento térmico aplicado. Es una herramienta fundamental para comprender procesos como el temple, el recocido isotérmico y la formación de bainita, ya que permite predecir el comportamiento del acero frente a diferentes velocidades de enfriamiento.

3.3.5 Fases del acero

Antes de abordar las microestructuras específicas del acero, es importante comprender que este material experimenta diferentes fases y transformaciones según su composición química y los tratamientos térmicos aplicados. Estas transformaciones determinan la formación de distintas microestructuras, las cuales influyen directamente en las propiedades mecánicas del acero, como la dureza, la resistencia y la tenacidad

3.3.6 Austenita

La austenita es el constituyente más denso de los aceros y está formada por una solución sólida donde el carbono se integra en el hierro gamma, La cantidad de carbono disuelto en esta fase puede variar aproximadamente entre 0.8 % y 2.14 %, siendo este último valor cercano a su máxima solubilidad a altas temperaturas dentro del diagrama hierro-carbono. La austenita no es magnética y, en los aceros al carbono convencionales, no es estable a temperatura ambiente, Sin embargo, existen algunos aceros aleados, como los aceros al cromo-níquel denominados austeníticos, cuya estructura permanece como austenita incluso a temperatura ambiente debido al efecto estabilizador de los elementos de aleación. Esta fase es fundamental en los tratamientos térmicos, ya que todas las transformaciones microestructurales del acero, como la perlita, la bainita y la martensita, se originan a partir de la austenita, dependiendo de la velocidad de enfriamiento a la que este

ocurra.

3.3.7 Bainita

De acuerdo con Steels: Microstructure and Properties, la bainita consiste en una mezcla de ferrita y cementita con morfología acicular o en placas y puede clasificarse en bainita superior y bainita inferior.

La bainita se forma a partir de la transformación de la austenita cuando el enfriamiento ocurre a temperaturas intermedias, generalmente entre 250 °C y 500 °C, bajo condiciones isotérmicas. La bainita superior se presenta aproximadamente entre 500 °C y 580 °C y está compuesta por una matriz de ferrita que contiene carburos distribuidos entre las placas.

3.3.8 Cementita

De acuerdo con Materials Science and Engineering: An Introduction, la cementita es una fase fundamental dentro del diagrama hierro-carbono, que participa en la formación de microestructuras como la perlita y la bainita, esto influyendo directamente en el aumento de la dureza y resistencia del acero, y es el carburo de hierro cuya fórmula química es Fe_3C , compuesto por aproximadamente 6.67 % de carbono y 93.33 % de hierro. Es uno de los microconstituyentes más duros y frágiles de los aceros al carbono, pudiendo alcanzar valores de dureza cercanos a 700 HB (68 HRC). Cristaliza en una estructura ortorrómbica y a diferencia de la ferrita y la austenita, la cementita no es una solución sólida donde el carbono se disuelve en el hierro, sino un compuesto químico con proporción fija entre hierro y carbono.

3.3.9 Ferrita

De acuerdo con el libro *Materials Science and Engineering: An Introduction*, la ferrita posee estructura cúbica centrada en el cuerpo, por lo cual limita la cantidad de carbono que puede disolverse en ella, explicando así su baja dureza y alta ductilidad en comparación con otras fases del acero. La ferrita es una solución sólida de carbono en hierro alfa, a temperatura ambiente, su solubilidad de carbono es muy baja, a eso del orden de 0.008 %, por lo cual se considera casi como hierro puro. Según el diagrama hierro-carbono la máxima solubilidad del carbono en el hierro alfa es aproximadamente de 0.02 % a 723 °C.

3.3.10 Martensita

La martensita se forma por el enfriamiento rápido del acero desde su estado austenítico a altas temperaturas, mediante un proceso de temple, y está conformada por una solución sólida sobresaturada de carbono en hierro, donde el carbono queda atrapado en la estructura debido a la rapidez del enfriamiento. De acuerdo con *Phase Transformations in Metals and Alloys*, esta fase se origina mediante una transformación sin difusión, es decir por un cambio estructural rápido en la red cristalina sin que los átomos de carbono tengan tiempo de desplazarse, lo cual le confiere alta dureza y alta resistencia, pero también causando mayor fragilidad frente a otras microestructuras del acero.

3.3.11 Perlita

De acuerdo con *Materials Science and Engineering: An Introduction*, la perlita se forma por la transformación eutectoide de la austenita a una temperatura

cercana a los 727°C, mediante un enfriamiento relativamente lento. Su nombre se debe a las irisaciones que adquiere al iluminar bajo el microscopio, semejantes al brillo de las perlas, es el microconstituyente eutectoide del acero, formado por capas alternadas de ferrita y cementita, que están conformadas aproximadamente por 88 % de ferrita y 12 % de cementita, lo cual corresponde a una composición cercana al 0.8 % de carbono, y presenta una dureza aproximada de 250 HB.

3.3.12 Tratamiento Térmico

Los tratamientos térmicos son procesos destinados a modificar las propiedades de los aceros a través de ciclos controlados de calentamiento, mantenimiento y enfriamiento. Su aplicación busca ajustar parámetros como la dureza, la resistencia, la ductilidad y la tenacidad, de acuerdo con los requerimientos de servicio. De acuerdo con la presentación de la (Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Universidad Nacional de Rosario, s.f.), estos procesos dependen principalmente de tres variables: la temperatura alcanzada, el tiempo de permanencia y la velocidad de enfriamiento, ya que de ellas se deriva la microestructura final obtenida. En este sentido, el control de dichos factores permite generar fases como perlita, bainita, martensita o esferoidita, cada una con propiedades mecánicas diferenciadas.

Entre los principales tratamientos se encuentran: el recocido, orientado a ablandar y homogeneizar el material; el normalizado, que refina el tamaño de grano y mejora la resistencia; el temple, que produce martensita mediante un enfriamiento brusco, aumentando notablemente la dureza; el revenido, aplicado tras el temple para reducir la fragilidad y ajustar la tenacidad; y el cementado, que incrementa la

dureza superficial mediante la incorporación de carbono, manteniendo un núcleo dúctil. En conjunto, estos procesos permiten adecuar el comportamiento del acero a diversas condiciones de trabajo y aplicaciones industriales, como lo señalan los fundamentos expuestos en la bibliografía consultada (Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Universidad Nacional de Rosario, s.f.).

3.3.13 Templabilidad

La templabilidad es una propiedad de los aceros que expresa su capacidad de endurecerse en profundidad cuando son sometidos a tratamientos térmicos de temple. Este concepto se asocia con la penetración del endurecimiento desde la superficie hacia el interior de la pieza, de manera que cuanto más uniforme sea la distribución de la dureza, mayor será la templabilidad. Es importante aclarar que no debe confundirse con la dureza máxima alcanzada, la cual depende principalmente del contenido de carbono; en cambio, la templabilidad está determinada por factores como la composición química, los elementos de aleación y el tamaño de grano austenítico. Para su evaluación se emplean diferentes metodologías, siendo el ensayo de Jominy el más utilizado en la práctica (Universidad de Valladolid, s.f.).

3.3.14 Ensayo Jominy

El ensayo jominy es un método estandarizado que permite evaluar la templabilidad de los aceros, es decir, la capacidad que tienen de endurecerse en profundidad durante un tratamiento de temple. Consiste en calentar una probeta cilíndrica hasta la fase austenítica y luego enfriar mediante un chorro de agua en un

extremo, generando un gradiente de velocidades de enfriamiento a lo largo de su longitud. Posteriormente, se mide la dureza en diferentes puntos de la probeta, obteniendo un perfil que indica cómo varía la profundidad del endurecimiento. Este ensayo, ampliamente utilizado en la industria metalúrgica, permite comparar la respuesta al temple de diferentes aceros y se relaciona con las curvas de transformación TTT y los parámetros de composición química del material (Callister & Rethwisch, 2018)

3.3.15 Dureza

La dureza es una propiedad mecánica que mide la resistencia de un material a la deformación plástica localizada, generalmente por penetración, rayado o desgaste. En los aceros, la dureza se relaciona directamente con el tratamiento térmico aplicado y con la microestructura resultante, ya que fases como la martensita presentan mayor dureza en comparación con la ferrita o la perlita. Existen diversos métodos para su determinación, entre los más utilizados se encuentran Rockwell, Brinell y Vickers, los cuales emplean penetradores de diferentes geometrías y cargas de aplicación. Esta propiedad resulta de gran importancia práctica, pues permite estimar de manera indirecta la resistencia al desgaste y, en algunos casos, la resistencia mecánica del material (Callister & Rethwisch, 2018).

4 Aspectos metodológicos

4.1 Tipo de estudio

Considerando que el presente proyecto consiste en el diseño, construcción y puesta en marcha de un equipo destinado a la realización de prácticas de

laboratorio, además de su adecuación al espacio disponible dentro del taller de máquinas y herramientas, la investigación se clasifica como de tipo exploratorio-descriptivo.

El carácter exploratorio se fundamenta en la necesidad de desarrollar diferentes pruebas experimentales, evaluaciones de funcionamiento y ajustes técnicos durante el proceso de diseño y construcción del equipo, con el fin de garantizar que cumpla adecuadamente con los objetivos planteados y con las condiciones operativas requeridas para su implementación en el laboratorio.

Por otra parte, el estudio posee un enfoque descriptivo debido a que, una vez finalizada la etapa de construcción y validación del sistema, se realiza la documentación detallada de sus características técnicas, condiciones de operación, procedimientos de uso, mantenimiento y normas de seguridad. Como resultado, se elabora un manual de operación, seguridad y mantenimiento que servirá de apoyo para los encargados y usuarios del laboratorio en el desarrollo de las prácticas académicas correspondientes.

Adicionalmente, este proyecto constituye una base de referencia para futuras investigaciones relacionadas con el diseño, optimización y aplicación de equipos experimentales en el área de ingeniería, permitiendo que posteriores trabajos puedan apoyarse en los resultados obtenidos y en la metodología implementada.

4.2 Método de investigación

El método de investigación es de tipo experimental, ya que implicó el diseño y la construcción de un prototipo del banco de ensayo Jominy, cuyo funcionamiento fue verificado mediante pruebas experimentales y mediciones. Los resultados obtenidos fueron comparados con los requisitos establecidos en la norma ASTM A255, permitiendo evaluar el desempeño del equipo e implementar los ajustes necesarios hasta garantizar el cumplimiento de las especificaciones técnicas del ensayo. que luego se aplicaron en la construcción de un prototipo, debido a que fue necesario realizar cálculos de diseño relacionados con el dimensionamiento de la estructura, la selección del sistema hidráulico, la determinación del caudal y la presión del chorro de agua, así como la selección de los materiales y componentes, con el fin de garantizar el cumplimiento de los requisitos establecidos en la norma ASTM A255, si no presenta los resultados esperados, debía ser sometido a el prototipo fue sometido a un proceso iterativo de pruebas, evaluación y ajuste, mediante el análisis de su desempeño frente a los requisitos establecidos por la norma ASTM A255. Los resultados obtenidos permitieron identificar oportunidades de mejora y realizar las modificaciones necesarias hasta lograr un funcionamiento adecuado.

4.3 Fuentes y técnicas de información

Para reunir la información necesaria para el desarrollo de este proyecto se consultaron diferentes fuentes secundarias, como libros relacionados con tratamientos térmicos y materiales de ingeniería, artículos y revistas técnicas, además de algunos proyectos de grado que sirvieron como apoyo y guía durante la

elaboración del marco teórico y del desarrollo general del trabajo.

De igual manera, se obtuvo información mediante conversaciones y entrevistas realizadas a personas con conocimientos y experiencia en el área, entre ellos los ingenieros Alberto David Pertuz, Huber Alexander Anaya Palencia y Manuel de Jesús Martínez, quienes aportaron recomendaciones y conceptos importantes para el desarrollo del proyecto.

4.4 Variable

4.4.1 Definición de variable

De acuerdo con la temática desarrollada en el diseño, construcción y puesta en servicio del equipo Jominy, se concluye que la templabilidad se convierte en la variable principal del proyecto, debido a que a partir de esta propiedad es posible analizar el comportamiento del material sometido a tratamiento térmico y evaluar los resultados obtenidos durante el ensayo.

4.4.2 Operacionalización de la variable

VAR IABLE	SUB-DIMENSIONES	INDICADORES
NORMA ASTM	Diseño	• Área asignada • Forma del equipo • Espacio disponible
	Construcción	• Tipo de materiales • Recursos - Económico - Humanos - Técnicos - tecnológicos

4.4.3 *Estado del arte*

MEJIA, Jorge Armando. Diseño y construcción de una máquina de ensayo Jominy de templabilidad. Trabajo de grado ingenieros mecatrónicos. Ibarra, Universidad técnica del norte.2016. P.79-84.

El diseño implementado para la construcción del banco de pruebas el cual consta de un tanque porta probetas, un sistema hidráulico, un tanque alimentador, auxiliar de enfriamiento, un tanque, una boquilla y una porta probetas mostró, durante los ensayos una gran similitud entre las gráficas de referencias y las obtenidas de los aceros AISI 4340 y 4140, evidenciando el correcto funcionamiento del sistema (Mejía, 2016).

RIVERA, Martin; VEGA, Daniel. Diseño y construcción de un banco de pruebas Jominy en el laboratorio de metalurgias y tratamientos térmicos. Trabajo de grado ingenieros mecánicos automotriz. Cuenca, Universidad del Azuay. 2009. P.53-57.

Diseñaron y construyeron un banco de prueba Jominy siguiendo la norma ASTM A-255, Si bien el equipo cumplió con los ensayos básicos, no incorpora sistemas de control de caudal ni automatización de datos, lo que limitó la repetitividad de los resultados. evidenciando la viabilidad de la construcción local y señala oportunidades de mejora (Rivera & Vega, 2009).

PILCO, Erika; MERINO, Marcelo. Diseño y construcción de una maquina automatizada para ensayos Jominy de acuerdo a la normativa ASTM A255 para la determinación de curvas de templabilidad en aceros. Trabajo de grado ingenieros

mecánicos. Ecuador, Escuela superior politécnica de Chimborazo.2021. P. 71-73.

Mediante el seguimiento de la norma implementaron un diseño el cual automatiza el proceso, el cual cuenta con un tablero de control en el que se encuentran no solo la manera de realizar el proceso ya sea manual o regulado, sino un temporizador para el tiempo que debe estar la probeta sobre el chorro de agua (Merino, 2021)

ALARCON, Guillermo; BERROCAL, Carlos. Diseño, construcción y validación de una máquina de ensayo Jominy para la determinación de la templabilidad en aceros aleados según la norma ASTM A255 para el laboratorio de materiales de la escuela profesional de ingeniería mecánica, mecánica eléctrica y mecatrónica de la UCSM. Trabajo de grado ingenieros mecánicos. Perú, Universidad Católica de Santa María. 2018. P.104-121

Siguiendo la norma implementaron un diseño con una carcasa en la cual se lleva a cabo el proceso de enfriamiento evitando que el agua se riegue, también cuenta con un sistema cerrado en el cual se encuentra el agua almacenada para el proceso evitando se encuentren presentes partículas que puedan afectar a la bomba (Berrocal, 2018)

5 Metodología

Para el desarrollo de este proyecto, se inició con el planteamiento de una lista de requerimientos con el fin de identificar las características técnicas y las peticiones del usuario que debe cumplir el banco de prueba jominy (International, 2020). Esta etapa permitió establecer las bases para el diseño y asegurar que la solución propuesta responda de manera adecuada a las necesidades y condiciones del contexto de aplicación.

5.1 Listado de requerimientos:

Usuario	Funcionales
Bajo costo	Materiales económicos
Precisión del ensayo	Control del caudal y boquilla
Seguridad del operador	Sistema de fijación sencillo
Durabilidad	Protección y válvulas sencillas
Facilidad de uso	Materiales anticorrosivos
Mantenimiento sencillo	Acceso a mantenimiento

Tabla 1.

Matriz QFD utilizada para la selección conceptual del diseño

	Peso	Materiales económicos		Control de caudal y boquilla		Sistema de fijación sencillo		Protección y válvulas sencillas		Materiales anticorrosivos		Acceso a mantenimiento	
Bajo costo	6	9	54	3	18	1	6	1	6	3	18	3	18
Precisión del ensayo	5	1	5	9	45	3	15	3	15	1	5	1	5
Operador	4	1	4	3	12	3	12	9	36	3	12	3	12
Durabilidad	3	1	3	3	9	1	3	3	9	9	27	3	9

Facilidad de uso	2	1	2	3	6	9	18	3	6	1	2	3	6
Mantenimiento o sencillo	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	9	9
Total			69		91		55		75		67		59
porcentaje			29%		39%				32%				

A partir de los resultados, se inició la etapa de análisis de alternativas en el cual se plantea dos alternativas de diseño que cumplen condiciones anteriores.

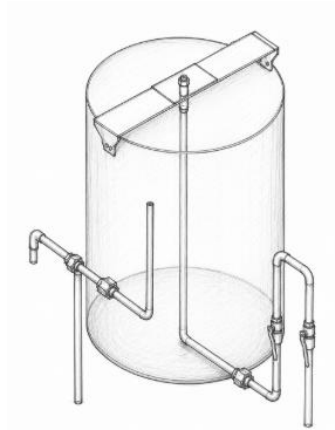
5.2 Análisis de Alternativas:

5.2.1 Alternativa 1

Descripción técnica: Se construirá en lámina de acero al carbono laminada en caliente (HR), sobre la cual se aplicará una capa de imprimante anticorrosivo y posteriormente una capa de pintura, con el fin de proteger el material frente a la corrosión ocasionada por la exposición al agua y la humedad durante la operación del equipo, prolongando así su vida útil., La estructura tendrá forma cilíndrica y contará con una ubicación fija, ya que su soporte estará conformado por tres patas metálicas, que proporcionarán estabilidad y sostén al dispositivo durante la operación, El sistema incluirá una bomba instalada externamente, la cual se encargará de mantener el flujo de agua necesario para el desarrollo de las prácticas de laboratorio.

Figura 1.

Alternativa 1



5.2.2 Alternativa 2

Descripción técnica: está conformado por un lavaplatos, que será el punto de recolección del agua utilizada durante la prueba y donde se procederá al enfriamiento de la probeta. El lavaplatos estará soportado por una estructura fabricada en tubos cuadrados, la cual también sostendrá la bomba y permitirá estabilidad al conjunto, La altura total del sistema se estima en máximo de 1,2 metros, con el fin de facilitar la operación por parte de los estudiantes durante las prácticas de laboratorio, El equipo incluye además un tanque para almacenamiento de agua, un interruptor de encendido y apagado y una bomba sumergible para su impulsión, garantizando el flujo necesario para lo requerido por la norma A255 y Finalmente, el diseño incorporará llantas, para permitir el desplazamiento y la movilidad del dispositivo dentro de los laboratorios.

Figura 2.

Alternativa 2



Una vez planteadas las diferentes alternativas de solución, se procedió a la aplicación de la matriz de Pugh, herramienta que permitió realizar una evaluación comparativa entre las opciones propuestas, mostrando la alternativa a escoger como se observa en la figura 2.

Tabla 2.

Matriz de Pugh

		Alternativa 1		Alternativa 2	
Control de caudal y boquilla	0.39	3	1.17	5	1.95
Protección y válvulas sencillas	0.32	1	0.32	1	0.32
Materiales económicos	0.29	2	0.58	3	0.87
Total		2.07		3.14	

A través de este análisis, se determinó que la alternativa 2 la cual cumple en mayor medida con los requerimientos previamente establecidos, para el desarrollo del proyecto. En consecuencia, se procede a realizar los cálculos correspondientes.

5.3 Cálculos de la alternativa 2

Con el fin de analizar el comportamiento del flujo dentro del sistema, se emplea la ecuación de Bernoulli como herramienta fundamental para la conservación de la energía en fluidos en movimiento. Esta relación permite establecer un balance energético entre diferentes puntos del sistema:

Ecuación de Bernoulli

$$\frac{P_A}{\gamma} + Z_A + \frac{V_A^2}{2g} = \frac{P_B}{\gamma} + Z_B + \frac{V_B^2}{2g} \quad (1)$$

P_A : Presión en el punto A

γ : Peso específico del agua

Z_A : Altura del punto A desde un punto referencial

V_A : Velocidad del fluido en el punto A

g : gravedad

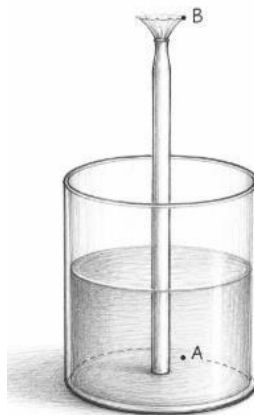
P_B : Presión en el punto B

ZB: Altura del punto B desde un punto referencial

VB: Velocidad del fluido en el punto B

Figura 3.

Descripción del chorro



Se procede a realizar el análisis como se observa en la figura 3, en la cual los puntos A y B están a 0.5 m de distancia, expuestos a la atmósfera lo que significa que sus presiones se desprecian, seguido a esto, la velocidad en el punto B es igual a 0 ya que es el punto máximo hasta donde llegará el fluido para así comenzar a descender de nuevo. Entonces tenemos que:

$$V_A = \sqrt{Z_B \cdot 2g} \quad (2)$$

Despejando V_A se tiene:

$$V_A = \sqrt{0.50m \cdot 2(9.81) \frac{m}{s}} = 3.1 \frac{m}{s}$$

una vez calculada la velocidad se procede a calcular el caudal que requiere el sistema hidráulico, por ello se tiene en cuenta el diámetro de forma circular que es de 12.5 mm para determinar el área utilizamos la siguiente ecuación:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (3)$$

$$A = \frac{\pi \cdot 0.0125^2}{4} = 1.23 \cdot 10^{-4} \text{m}^2$$

Ecuación de Caudal

$$Q = A \cdot V \quad (4)$$

$$Q = 1,23 \cdot 10^{-4} \text{m}^2 \cdot 3.1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 3.8 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 22.8 \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

Teniendo en cuenta que la norma establece un diámetro interno de la salida es 12,5 mm, y considerando la disponibilidad comercial de tuberías en PVC, se seleccionó una tubería

– $\frac{1}{2}$ in .

$$v = \frac{3.8 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\frac{\pi \cdot 0.0127^2}{4}} = 3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Considerando que el material de las tuberías es plástico se halla la rugosidad (véase en el Anexo D)

$$\varepsilon = 3 \cdot 10^{-7} \text{m}$$

Una vez determinada la rugosidad del material se procede al cálculo del número de Reynolds, con el fin de caracterizar el tipo de flujo presente en el sistema. Este parámetro permite establecer si el flujo es laminar, turbulento o de transición.

Número de Reynolds

$$NR = \frac{V \cdot D \cdot \rho}{u} \quad (5)$$

- V= velocidad
- D= diámetro
- ρ = densidad
- u = viscosidad dinámica

Se tomaron los valores de las propiedades del agua teniendo en cuenta una temperatura promedio de 25 C (Véase en el Anexo E)

$$T = 25C$$

- $\rho = 997 \text{ kg/m}^3$
- $u = 8.91 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
- Reemplazando los datos en la ecuación del número de Reynold:

$$NR = \frac{3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0.0127 \text{m} \cdot 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{8.91 \cdot 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{s}} = 42633$$

Se puede afirmar que el flujo es turbulento debido a que los valores superan los 4000.

Ecuación de factor de fricción flujo turbulento

$$f_t = \frac{0.25}{[\log(\frac{1}{3.7 \cdot \frac{D}{\varepsilon}} + \frac{5.74}{NR^{0.9}})]^2} \quad (6)$$

$$f_t = \frac{0.25}{[\log(\frac{1}{3.7 \cdot \frac{0.0127m}{3 \cdot 10^{-7}}} + \frac{5.74}{42633^{0.9}})]^2} = 0.027$$

Ahora realizamos el cálculo de la longitud total de la tubería

Longitud total de tubería

$$L_t = L_{ap} + L_{acc} \quad (7)$$

$$L_t = L_{ap} + L_{acc}$$

$$L_{ap} = 0.50m$$

$$L_{acc} = \frac{K_t \cdot D}{f_t}$$

Ecuación pérdidas totales (kt)

$$K_t = K_{ent} + K_{sal} + K_{acc} \quad (8)$$

Para continuar con los cálculos debemos tener en cuenta los accesorios presentes en la construcción, por ello tenemos en cuenta las longitudes equivalentes

(Véase en el Anexo F).

$$Leq / D = 35$$

$$Kt = 0.5m + 1m + (0.027 \cdot 35) = 2.45 \text{ m}$$

$$Lacc = \frac{2.45 \cdot 0.0127}{0.027} = 1.15 \text{ m}$$

$$Lt = 0.5 + 1.15 = 1.65 \text{ m}$$

Posteriormente, se aplica la ecuación de Darcy-Weisbach para determinar las pérdidas de carga en el sistema.

Ecuación Darcy – Weisbach

$$hf = ft \frac{Lt}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (9)$$

A continuación, se definen cada una de sus variables junto con sus unidades de medida en el Sistema Internacional (SI):

Variables de la ecuación\

- **hf** (Pérdida de carga por fricción): Representa la pérdida de energía del fluido debido al roce con las paredes de la tubería. Se mide en metros de columna de fluido(m).
- **f** (Factor de fricción de Darcy): Es un coeficiente adimensional (no tiene unidades) que depende del régimen del flujo (número de Reynolds) y de la rugosidad interna de la tubería.

- **L** (Longitud de la tubería): Es la distancia lineal total del tramo de tubería que se está analizando. Se mide en metros (m).
- **D** (Diámetro interno de la tubería): Es el diámetro neto interior por donde circula el fluido. Se mide en metros (m/s).
- **V** (Velocidad media del fluido): Es la velocidad promedio a la que el fluido se desplaza a través de la sección transversal de la tubería. Se mide en metros por segundo (m/s).
- **g** (Aceleración de la gravedad): Es una constante física que representa la fuerza de gravedad. Su valor estándar en la Tierra es aproximadamente 9.81 m/s^2

$$hl = 0.0027 \frac{1.65}{0.0127m} \frac{3m^2/s}{2*9.81m/s} = 0.54 \text{ m}$$

Una vez determinadas las pérdidas de carga en el sistema, se procede a calcular la altura total que debe vencer la bomba, considerando tanto las pérdidas por fricción como las diferencias de altura y las condiciones de operación del sistema.

Ecuación de Altura que debe vencer la bomba

$$Hb = hg + hl + hch \quad (10)$$

$$Hb = 0.5m + 0.54m + 0.063m = 1.1m$$

Con la altura definida, se continúa con el cálculo de la potencia hidráulica necesaria, considerando el caudal del sistema y la eficiencia de la bomba, para asegurar su correcto funcionamiento.

Ecuación de Potencia de la bomba

$$Pot = \rho \cdot g \cdot Q \cdot Hb \quad (11)$$

$$Pot = 997 \frac{kg}{m} \cdot 9.81 \frac{m}{s} \cdot 3.8 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{s} \cdot 1.1 = 4.1 W$$

Con los datos obtenidos se buscó una bomba que cumpliera con los requisitos (Véase en el Anexo G).

$$Pot = 997 \frac{kg}{m} \cdot 9.81 \frac{m}{s} \cdot 3.8 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{s} \cdot 1.1 = 4.1 W$$

Para determinar el volumen de agua en el tanque a utilizar en el banco jominy se emplea la siguiente ecuación Ecuación de Volumen de agua

$$Vol = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (12)$$

$$Vol = \pi \cdot (0.154m)^2 \cdot 0.184m = 0.013m^3 = 13l$$

Como el agua regresa nuevamente al tanque (Véase en el Anexo H) lo que se necesita para el sistema es el volumen de agua que sobrepase el nivel de la bomba más 13 litros para asegurarnos que la bomba no cavite por el nivel de agua.

5.4 Construcción del banco

Para la construcción de la estructura principal se utilizaron tubos estructurales cuadrados de acero al carbono de 1" x 1,5", seleccionados por su disponibilidad comercial, facilidad de fabricación mediante procesos de corte y soldadura, y por ser una sección ampliamente utilizada en estructuras metálicas de soporte para este tipo de aplicaciones. Una vez finalizada la estructura, se aplicó una capa de pintura anticorrosiva con el fin de proteger el material frente a la oxidación y posteriormente una capa de pintura de acabado color negro para mejorar su

apariciencia y aumentar su resistencia a las condiciones de operación.

Posteriormente, se instalaron ruedas en cada una de las patas de la estructura, permitiendo la movilidad del banco y facilitando su transporte dentro del laboratorio o área de trabajo. Seguidamente, se fabricó la parte superior de la mesa, sobre la cual se instaló una lámina de acero inoxidable y una poceta comercial fabricada en el mismo material.

Debido a que el prototipo opera con agua durante su funcionamiento, se decidió emplear acero inoxidable en la superficie de trabajo y sellar completamente los bordes de la mesa con este material, con el propósito de incrementar la resistencia a la corrosión, evitar filtraciones y garantizar una mayor vida útil del equipo.

Para la fabricación del sistema de soporte de la probeta se utilizaron platinas de acero inoxidable de 3/16" de espesor y 3" de ancho. La selección de este material obedeció a su resistencia a la corrosión, ya que el equipo opera en presencia de agua, y a su rigidez, adecuada para soportar la probeta durante la ejecución del ensayo.

La porta probeta se fabricó mediante la unión por soldadura de las platinas que conforman su estructura, garantizando la rigidez y estabilidad del conjunto. Posteriormente, este conjunto se fijó a los laterales del banco mediante tornillos de presión, lo que permite regular su altura de montaje de acuerdo con los requerimientos establecidos en la norma ASTM A255. Además, este sistema de fijación facilita las labores de mantenimiento, inspección o sustitución de la porta probeta, ya que únicamente es necesario aflojar los tornillos para desmontar el conjunto sin afectar la estructura del banco. Este sistema permite ajustar la altura de montaje de acuerdo con los requerimientos establecidos por la norma aplicable. Adicionalmente, la configuración desmontable facilita las labores de mantenimiento, inspección o sustitución de la porta probeta, ya que únicamente es necesario aflojar los tornillos de fijación para retirar o reemplazar el componente.

Figura 4.

Proceso de construcción del banco

**Figura 5.**

Banco de pruebas



5.5 Manual de operaciones

5.5.1 Implementos y medidas de seguridad

Para la realización del ensayo de templabilidad y tratamientos térmicos de materiales, los operarios deben utilizar los siguientes implementos de seguridad:

- Careta de seguridad dotada con visor de protección contra radiación lumínica.
- Delantal aluminizado.
- Guantes y mangas de asbestos con una capa de pintura aluminizada.
- Bata de trabajo.

Además, el operario debe cumplir con las siguientes medidas de seguridad personal:

- Usar pantalón largo.
- Tener calcetines.
- Colocarse las botas sobre el pantalón.
- Usar zapatos cerrados.
- Colocarse el delantal de seguridad.
- Colocarse los guantes y las mangas de protección.
- Utilizar la careta de seguridad durante toda la práctica.
- Evitar el uso de prendas como anillos, pulseras, cadenas, relojes o argollas.
- Recogerse el cabello durante la realización de la prueba, en caso de tenerlo largo.
- No realizar bromas ni distracciones durante la manipulación de la probeta caliente.

- Sacar las probetas del horno únicamente con tenazas metálicas, nunca con los guantes ni con las manos desnudas.
- No sujetar materiales metálicos con las manos desnudas, a menos que se tenga plena seguridad de que se encuentran fríos.

5.6 Preparación del equipo para la prueba Jominy

Para realizar la prueba Jominy se deben seguir las siguientes instrucciones:

1. Colocar la probeta en el horno a la temperatura de austenización correspondiente.
2. Preparar el equipo Jominy de la siguiente manera:
 - Tener la válvula totalmente cerrada, la cual se encuentra antes de la salida del chorro de agua.
 - Verificar que el interruptor se encuentre apagado, para evitar que la bomba se energice al conectarla a la corriente.
 - Cerrar el interruptor para energizar la bomba.
 - Abrir la válvula ubicada antes de la salida del chorro de agua hasta obtener una altura de 63.5 mm (International, 2020).
 - Abrir nuevamente el interruptor para desenergizar la bomba.
 - Justo antes de sacar la probeta del horno, abrir completamente la válvula y colocar un difusor a la salida del tubo vertical.
3. Cumplido el tiempo de sostenimiento de la probeta, correspondiente a una hora a la temperatura de austenización, esta debe retirarse rápidamente del horno, pero conservando todas las medidas de seguridad, y colocarse

inmediatamente en el dispositivo Jominy.

4. Retirar el difusor para que el chorro de agua incida directamente sobre el extremo de la probeta.
5. Una vez transcurridos 10 minutos de prueba, retirar la probeta del dispositivo y sumergirla en un tanque con agua para lograr su enfriamiento total.
6. Realizar un aplanado de la probeta en una rectificadora, obteniendo dos superficies planas de 3 mm de ancho, correspondientes a dos generatrices diametrales opuestas. Sobre cada una de estas superficies se debe efectuar una serie de mediciones de dureza, tomadas cada 1/16 de pulgada desde el extremo directamente enfriado hasta la zona próxima a la cabeza de la probeta.
7. Trazar un diagrama que relacione la variación de la dureza con respecto a la distancia desde el extremo enfriado directamente.

5.7 Manual del mantenimiento del equipo

Debido a que durante el ensayo Jominy las probetas desprenden cascarillas y partículas del material, estas terminan cayendo al agua del sistema. Durante la prueba se instala un filtro en el desagüe, antes de que el agua llegue nuevamente al tanque, con el fin

de retener la mayor cantidad posible de partículas. Sin embargo, parte de estas cascarillas logra pasar directamente al tanque, por lo que se recomienda limpiar dicho filtro cada vez que se utilice la máquina.

Además, se recomienda que una vez por semana se vacíe y limpie completamente el tanque de almacenamiento de agua. Para realizar esta limpieza se debe abrir la válvula ubicada en el punto de desagüe, en la parte inferior del tanque, hasta evacuar totalmente el agua contenida en él. Posteriormente, se debe desenroscar la unión universal localizada en la salida inferior del tanque, realizar la limpieza completa de esta zona y volver a enroscar y ajustar correctamente las uniones universales. Con este procedimiento se mantiene el agua del tanque en mejores condiciones y se contribuye a prolongar la vida útil de la bomba sumergible instalada dentro del sistema.

Además, se recomienda que al finalizar cada semestre se realice un mantenimiento general de la máquina. Debido a que la estructura del banco de ensayo Jominy está fabricada principalmente en tubo de acero, es recomendable aplicar una capa de anticorrosivo y posteriormente una capa de pintura, con el fin de aumentar la durabilidad y conservación del equipo.

5.8 Prueba de funcionamiento

5.8.1 Materiales

Entre los materiales utilizados para la realización de las pruebas se tienen el acero AISI 4140.

5.8.2 Acero AISI 4140

El acero AISI 4140 es un acero aleado al cromo-molibdeno, con buena

penetración de temple y excelentes características de estabilidad en caliente hasta temperaturas cercanas a los 400 °C, sin presentar fragilidad por revenido. Es un material muy versátil y adecuado para soportar esfuerzos de fatiga y torsión.

Puede endurecerse superficialmente mediante temple directo, obteniendo durezas entre 57 y 62 HRC (Atlas Steels, 2021). Generalmente se utiliza en estado bonificado para la fabricación de ejes, engranajes, cigüeñales, cilindros de motores, bielas, rotores, árboles de turbinas a vapor, ejes traseros, barras de conexión, engranajes de transmisión, partes de bombas y ejes de reducción.

Además, se emplea en espárragos, tuercas y tornillos de alta resistencia utilizados en plantas que trabajan a temperaturas entre 150 °C y 300 °C, como calderas, turbinas de vapor y plantas químicas.

5.8.3 Equipos, insumos y herramientas

A continuación, se detallan los equipos, insumos y herramientas utilizados durante la realización de las pruebas:

- Equipo para ensayo Jominy.
- Horno.
- Durómetro Rockwell
- Torno.

- Ácido nítrico
- Papeles esmeril (lijas de agua).
- Cronómetro.

5.8.4 Procedimiento

Como se había mencionado anteriormente, el procedimiento se rige bajo la norma ASTM A255. El primer paso corresponde a preparar la probeta según las dimensiones especificadas en la norma, teniendo en cuenta que previamente el material debió haber sido normalizado, tal como lo exige el procedimiento establecido.

Posteriormente, se coloca la probeta en un horno a la temperatura de austenización correspondiente al acero bajo consideración y se mantiene allí entre 30 y 35 minutos. La probeta puede introducirse desde el momento en que el horno inicia su calentamiento o mantenerse durante una hora (60 minutos) cuando se introduce con el horno ya estabilizado a la temperatura de austenización, buscando así una completa homogenización de la microestructura.

La temperatura de austenización depende del porcentaje de carbono presente en el acero. En el caso del acero AISI 4140, la austenización se realizó a una temperatura de 845 °C (International, 2020).

Luego se prepara el dispositivo Jominy de manera que el chorro de agua

templante alcance una altura de 65 mm a partir de la boca del tubo de salida o tubo vertical.

Posteriormente, se extrae la probeta del horno y se coloca en el dispositivo de ensayo Jominy lo más rápido posible, en un tiempo máximo de 5 segundos.

La probeta se mantiene en contacto con el chorro de agua durante un tiempo mínimo de 10 minutos, después de lo cual se retira completamente. Si luego de este tiempo la pieza aún no se encuentra totalmente fría, se debe temprar inmediatamente en agua después de desmontarla del dispositivo. Durante todo el ensayo se deben conservar condiciones de aire quieto alrededor del equipo.

Figura 6.

Montaje de la probeta



Después del enfriamiento, se preparan dos generatrices diametralmente opuestas a lo largo de la probeta, con una profundidad aproximada de 0,4 mm, utilizando una rectificadora. Este procedimiento debe realizarse cuidadosamente para evitar el calentamiento del material, ya

que este puede alterar los resultados del ensayo.

Posteriormente, se realizan mediciones de dureza a lo largo de la generatriz, espaciadas según las distancias establecidas para el ensayo Jominy, iniciando desde el extremo templado y avanzando progresivamente a lo largo de la probeta.

La dureza se mide utilizando un durómetro Wilson Rockwell Serie 500, empleando la escala Rockwell C (HRC), adecuada para materiales endurecidos mediante tratamiento térmico. Finalmente, los resultados se representan en una gráfica donde las ordenadas corresponden a los valores de dureza Rockwell C y las abscisas a la distancia desde el extremo templado, obteniéndose la curva Jominy del acero analizado.

Las mediciones de dureza se realizan en la Universidad Industrial de Santander, específicamente en la Escuela de Ingeniería Civil, utilizando un durómetro Rockwell. Este equipo determina la dureza como la resistencia a la penetración mediante la aplicación de cargas cuasiestáticas.

En el ensayo Rockwell C se emplea un penetrador que actúa sobre la superficie de la probeta en dos etapas: una precarga o carga inicial de 10 kgf y una carga adicional de 140 kgf. La carga total del ensayo corresponde a la suma de ambas cargas, permitiendo determinar la dureza del material a partir de la profundidad de penetración generada.

Figura 7.

Montaje en el durómetro



5.9 Resultados

Los resultados de las pruebas Jominy realizadas para los aceros tratados se presentan mediante la tabla de dureza según la distancia al extremo templado y la curva Jominy correspondiente.

El análisis de resultados y la curva Jominy desarrollada corresponden al acero AISI 4140, material que sí presentó una respuesta adecuada al tratamiento térmico realizado.

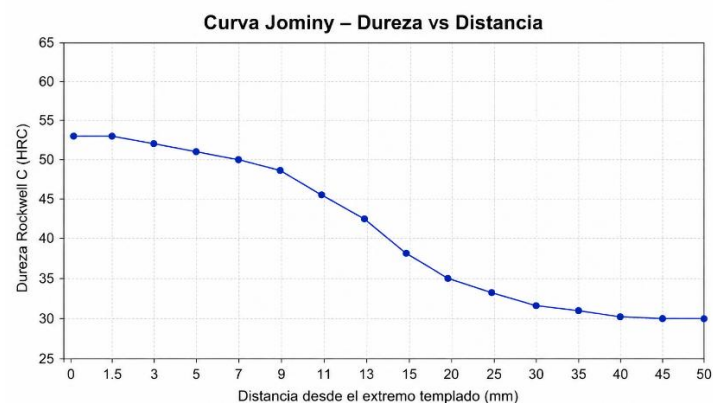
Tabla 3.

Dureza vs distancia en 16 avos de pulgada

Distancia al extremo templado (in)	4140 probeta1 HRC	4140 probeta HRC	Promedio HRC
1/16	53.4	53.8	53.6
2/16	52.2	52.2	52.2
3/16	51.9	51.7	51.8
4/16	51.2	51.6	51.4
5/16	50.3	50.9	50.6
6/16	50.3	50.5	50.4
7/16	48.0	48.0	48.0
8/16	47.7	47.5	47.6
9/16	45.8	46.2	46.0
10/16	45.2	45.2	45.2
11/16	43.4	43.4	43.4
12/16	42.3	41.7	42.0
13/16	40	40	40.0
14/16	39.0	39.4	39.2
15/16	38.5	39.1	38.8
16/16	36.8	36.8	36.8
20/16	34.2	34.6	34.4
24/16	34.4	34	34.2
28/16	31.0	31.0	31.0
32/16	30.06	30.02	30.4
36/16	30.2	30.2	30.2
40/16	30.1	29.9	30.0
44/16	29.8	29.8	29.8

Figura 8.

Curva de templabilidad jominy obtenida para el acero AISI 4140 y la encontrada en la literatura



Hardenability Diagram



Nota: esta tabla se sacó de Atlas Steels

5.10 Análisis del resultado

El análisis de resultados de la práctica realizada se basa principalmente en las curvas de templabilidad Jominy obtenidas para el acero AISI 4140 enfriado en agua, ya que estas permiten observar el comportamiento de la dureza a lo largo de la probeta después del tratamiento térmico y, de esta manera, evaluar la capacidad de penetración del temple en cada material.

Un primer parámetro de comparación corresponde a la dureza obtenida en las zonas más cercanas al extremo templado de cada probeta, debido a que esta región es la que experimenta la mayor velocidad de enfriamiento y, por tanto, donde se presentan los mayores efectos del temple. En el acero AISI 4140 se observaron valores de dureza elevados y una disminución gradual de la misma a medida que aumentaba la distancia al extremo templado, lo cual evidencia una buena templabilidad del material. Compartiendo muy parecido al observado (Atlas Steels, 2021)

Otro aspecto importante de comparación corresponde a la forma de las curvas de templabilidad. El acero AISI 4140 presentó una curva con una disminución progresiva de la dureza a medida que aumentaba la distancia al extremo templado, comportamiento característico de los aceros aleados con buena capacidad de penetración de temple. Esto se debe a las elevadas tasas de enfriamiento que favorecen la formación de estructuras endurecidas incluso en zonas alejadas del extremo enfriado.

En general, los resultados obtenidos durante el ensayo permitieron validar el adecuado funcionamiento del banco de pruebas Jominy construido, ya que fue posible observar diferencias claras en el comportamiento mecánico del material analizado y obtener una curva acorde con las características teóricas del acero analizado. La curva de templabilidad obtenida presentó un comportamiento similar al reportado por Atlas Steels (2021). En las diferentes distancias de medición, los valores de dureza obtenidos se mantuvieron dentro del intervalo reportado en la literatura para el acero AISI 4140, con diferencias del orden de 0 a 3 HRC, siendo más cercanos al límite inferior del rango de referencia. Esto indica que el comportamiento del material evaluado es consistente con el esperado para este tipo de acero.

6 Análisis de costos

La Tabla 4 presenta el presupuesto estimado para el diseño y construcción del banco de ensayo Jominy. En ella se relacionan los materiales, equipos, software y recursos de apoyo requeridos para el desarrollo del proyecto, indicando la cantidad, el valor unitario, el valor total y la fuente de financiación correspondiente. Los costos de los materiales se estimaron a partir de cotizaciones y precios comerciales obtenidos en establecimientos especializados de la ciudad de Bucaramanga, mientras que los costos asociados al software, la consulta de normas bibliográficas y la asesoría docente corresponden a recursos aportados por la Universidad Industrial de Santander (UIS). La financiación del proyecto se distribuyó entre recursos propios de los autores y los recursos institucionales proporcionados por la universidad.

Tabla 4

Presupuesto

Concepto	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total	Fuente de financiación
MATERIALES					
Tubo cuadrado	Utilizado para la estructura móvil del banco	2 und	40,000	80,000	Recursos propios
Ruedas		4 und	15,000	60,000	Recursos propios
Soldadura E60131/8	Utilizado para las uniones de los tubos en la construcción	10 kg	21,900	219,000	Recursos propios
Lavaplatos	Utilizada para el diseño de plomería para el suministro de agua	1 und	60,000	60,000	Recursos propios
Tubería ½"		1 m	4,000	4,000	Recursos propios
Tubería 1"		½ m	5,000	2,500	Recursos propios
Platinas	Utilizados para dar soporte a las probetas	3 und	17,000	51,000	Recursos propios
Tornillos		2 und	2,000	4,000	Recursos propios

Bomba	Utilizada para impulsar el agua	1 und	60,000	60,000	Recursos propios
Llave de paso o Flancho tapón	Utilizada para el sistema de desagüe del tanque	1 und	4,000	4,000	Recursos propios
Lamina de acero inoxidable	Utilizada como mesa de trabajo	1 und	80,000	80,000	Recursos propios
Clavija	Utilizado para conectar la bomba	1 und	4,000	4,000	Recursos propios
Interruptor	Utilizado para permitir el paso de corriente a la bomba	1 und	8,000	8,000	Recursos propios
Probetas	Materia para realizar las pruebas	2 und	17,500	35,000	Recursos propios
Sifon de lavaplatos	Utilizado para reducir el ingreso de partículas	1 und	10,000	10,000	Recursos propios
Válvula de compuerta	Utilizado para graduar la cantidad de agua	1 und	12,000	12,000	Recursos propios
Subtotal				698,500	Recursos propios
SOFTWARE DE SOPORTE Y AYDA BIBLOTECA					
Licencia de SolidWorks	Utilizado para la realización de planos			15,560,000	UIS
Consulta de biblioteca	Utilizado para consulta de normas			1,000,000	UIS
Subtotal				16,560,000	UIS
ASESORIA PROFESIONAL					
Horas de consulta docente		16 hrs	250,000	4,000,000	UIS
Subtotal				4,000,000	UIS
Total, financiado por la UIS				20,560,000	
Total, de recursos propios				698,500	

Total, valor del proyecto	21,258,500
---------------------------	------------

Figura 9.

Máquina comercial de ensayo Jominy utilizada como referencia para el análisis económico



Nota: tomada de (Jinan Liangong Testing Technology Co., Ltd., s.f.)

El análisis económico permitió evidenciar el beneficio que representa para la Escuela de Ingeniería Mecánica la construcción del banco de pruebas Jominy desarrollado en este proyecto. El objetivo de la comparación con equipos comerciales no es establecer una equivalencia en cuanto a prestaciones o capacidad operativa, ya que estos pueden incorporar funciones adicionales, como la realización simultánea de ensayos, sistemas automatizados y otras características propias de equipos industriales. La comparación se realiza con el propósito de mostrar el costo que habría representado para la Universidad implementar esta práctica de laboratorio mediante la adquisición de un equipo comercial.

En este sentido, el costo total del proyecto fue de COP \$21.258.500; sin embargo, este valor incluye recursos institucionales como licencias de software, acceso a bibliografía especializada y horas de asesoría docente, los cuales forman parte de la infraestructura académica de la Universidad Industrial de Santander y no constituyen una inversión adicional para la implementación del banco. Por otra parte, el costo directo de fabricación correspondió a COP \$698.500 en materiales y componentes.

En consecuencia, el desarrollo de este banco de pruebas permitió a la Escuela de Ingeniería Mecánica disponer de un equipo funcional para la ejecución del ensayo Jominy conforme a los requisitos de la norma ASTM A255, evitando la adquisición de un equipo comercial cuyo costo en el mercado internacional oscila entre COP \$28.544.454 y COP \$57.088.908. Esto demuestra la viabilidad técnica y económica de la propuesta para fines académicos y de investigación, aprovechando la infraestructura y los recursos institucionales ya disponibles en la Universidad.

7 Conclusiones de las pruebas

El desarrollo de este proyecto permitió validar el correcto funcionamiento del banco de pruebas Jominy construido, logrando realizar satisfactoriamente los ensayos de templabilidad y obteniendo resultados coherentes con el comportamiento teórico de los materiales analizados. Esto demuestra que el equipo diseñado constituye una herramienta útil para el desarrollo de prácticas académicas y estudios relacionados con tratamientos térmicos y propiedades mecánicas de los materiales.

Usando una matriz QFD, fue posible seleccionar una alternativa que nos

permite, construir y realizar el ensayo Jominy ASTM A255-20^a y ahora el laboratorio de materiales de la escuela cuenta con un equipo para realizar las practicas semestre a semestre.

Los resultados de tratamiento térmico obtenidos utilizando el equipo construido mediante este trabajo de grado, permitió durante las pruebas preliminares evidenciar que la dureza alcanzada por un acero utilizado AISI 4140 templado en agua que el equipo funciona adecuadamente y permite realizar ensayos Jominy para la formación de los venideros estudiantes de la escuela.

También, se observó mediante tratamiento que el comportamiento del acero depende principalmente de su composición química, especialmente del contenido de carbono y de la presencia de elementos aleantes, ya que estos influyen directamente en la formación de estructuras martensíticas durante el temple.

En el acero AISI 4140, se observó un comportamiento adecuado frente al ensayo Jominy, presentando una buena penetración de temple y una disminución gradual de la dureza a medida que aumentaba la distancia al extremo templado. Esto demuestra la influencia positiva de los elementos aleantes presentes en este acero, como el cromo y el molibdeno, los cuales favorecen la formación de martensita y mejoran la templabilidad del material.

De igual manera, se concluye que para obtener un temple satisfactorio es necesario contar con un contenido adecuado de carbono que permita la formación de martensita y, adicionalmente, con elementos aleantes que faciliten su formación incluso a velocidades de enfriamiento moderadas.

8 Recomendaciones

Debido a que durante el ensayo Jominy se produce desprendimiento de cascarilla de las probetas y parte de estas partículas terminan llegando al tanque de almacenamiento, se recomienda realizar una limpieza periódica del sistema, especialmente del fondo del tanque y del filtro instalado en el desagüe, con el fin de evitar acumulación de residuos y prolongar la vida útil de la bomba sumergible.

Asimismo, se recomienda que al finalizar cada semestre académico se efectúe un mantenimiento general al banco de pruebas, realizando limpieza completa de la estructura y aplicando una capa de anticorrosivo y otra de pintura. Esto permitirá conservar en mejores condiciones los elementos fabricados en acero y aumentar la durabilidad del equipo.

También se considera conveniente estudiar la posibilidad de implementar un sistema alternativo de desagüe que permita reutilizar el agua empleada durante las pruebas, por ejemplo, en actividades de riego dentro de la universidad, evitando así que esta sea descargada directamente al alcantarillado y promoviendo un mejor aprovechamiento del recurso hídrico.

Finalmente, se recomienda que la Escuela de Ingeniería Mecánica contemple la adquisición de un durómetro universal para uso propio del laboratorio, ya que actualmente las mediciones de dureza deben realizarse en otras dependencias de la universidad. Contar con este equipo facilitaría el desarrollo de prácticas académicas, proyectos de investigación y ensayos relacionados con tratamientos térmicos y propiedades mecánicas de los materiales.

Referencias Bibliográficas

- Atlas Steels. (10 de septiembre de 2021). *Through-Hardening Low Alloy Steel Bar 4140 Grade Data Sheet*. Obtenido de Atlas Steels: <https://atlassteels.com.au/wp-content/uploads/2021/09/Through-Hardening-Low-Alloy-Steel-Bar-4140-Grade-Data-Sheet-10-09-21-1.pdf>
- Avner, S. H. (1979). *Introducción a la metalurgia física*. Madrid: McGraw-Hill.
- Bain, E. C., & Grossmann, M. A. (1972). *Principios de tratamiento térmico*. Madrid: Blume.
- Berrocal, G. A. (2018). Diseño, construcción y validación de una máquina de ensayos jominy para determinar la templabilidad en aceros aleados según la norma ASTM A255 para el laboratorio de materiales de la UCSM. Perú: Universidad Católica de Santa María.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Fundamentos de ciencia e ingeniería de materiales*. México: JrEDITORIAL.
- Instituto de Inspección y Ensayos Técnicos A.C. (s.f.). *Ensayo Jominy*. Obtenido de <https://www.iita.com.mx/ensayojominy.php>
- International, A. (2020). *ASTM A255-20a: Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel*. ASTM International.
- Jinan Liangong Testing Technology Co., Ltd. (s.f.). *Máquina de prueba de enfriamiento final DZ-2 de 2 estaciones Jominy*. Obtenido de Alibaba: https://www.alibaba.com/product-detail/DZ-2-2-Station-Jominy-End_1601772151963.html
- Mejía, J. A. (2016). Diseño y construcción de una máquina de ensayo Jominy de templabilidad. Ibarra: Universidad Técnica del Norte.
- Merino, E. P. (2021). 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. Ecuador: Escuela superior politécnica de Chimborazo.
- Rivera, M., & Vega, D. (2009). Diseño y construcción de un banco de pruebas Jominy en el laboratorio de metalurgias y tratamientos térmicos. Cuenca: Universidad del Azuay.
- Universidad de Valladolid. (s.f.). *Templabilidad*. Obtenido de <https://www.eii.uva.es/metalo/metalografiaAc/templabilidad.html>

Van Vlack, L. H. (1989). *Elements of Materials Science and Engineering*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley.

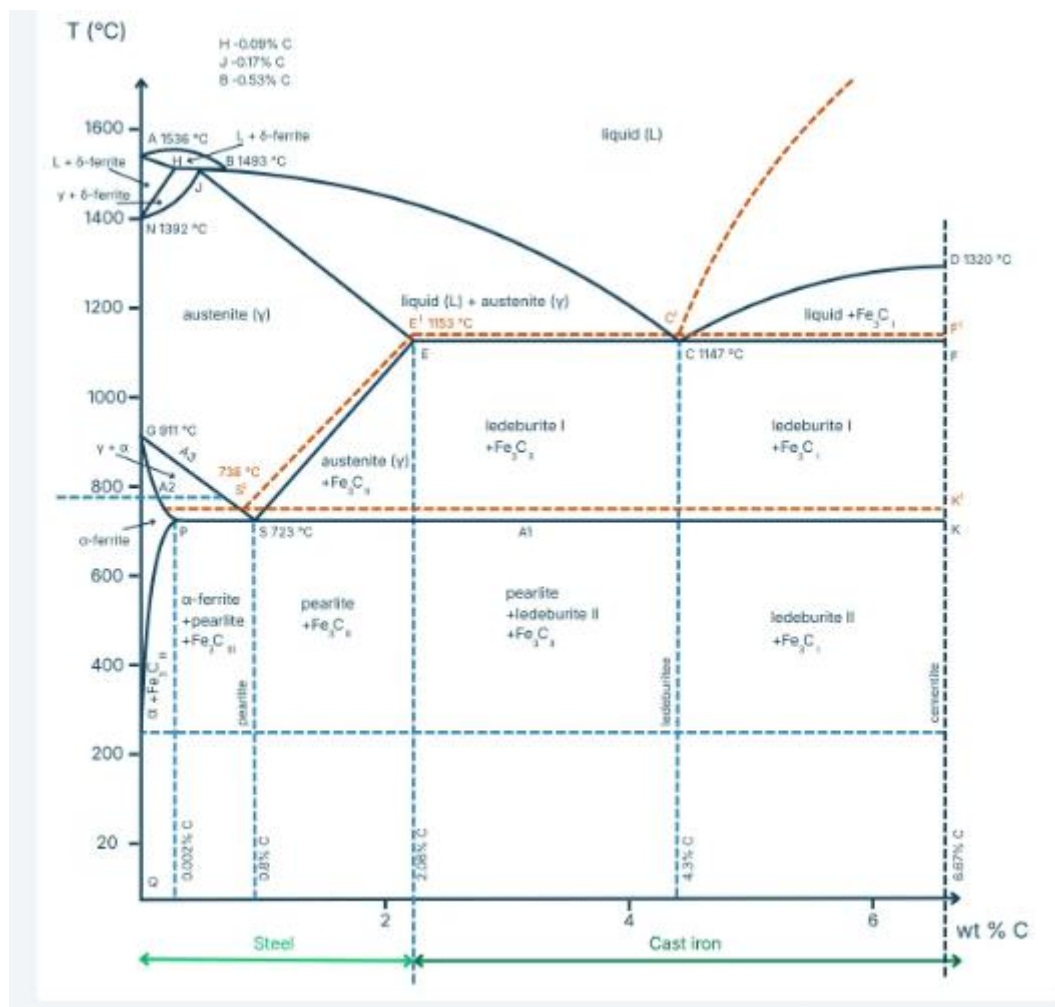
Apéndices

Apéndice A.

Diagrama Hierro-carbono

Figura 10.

Diagrama hierro-carbono



Nota. Tomado de *Diagrama Hierro-Carbono: Guía 2026 sobre Aceros y Fundiciones*, por Weerg Staff (2026), Weerg.

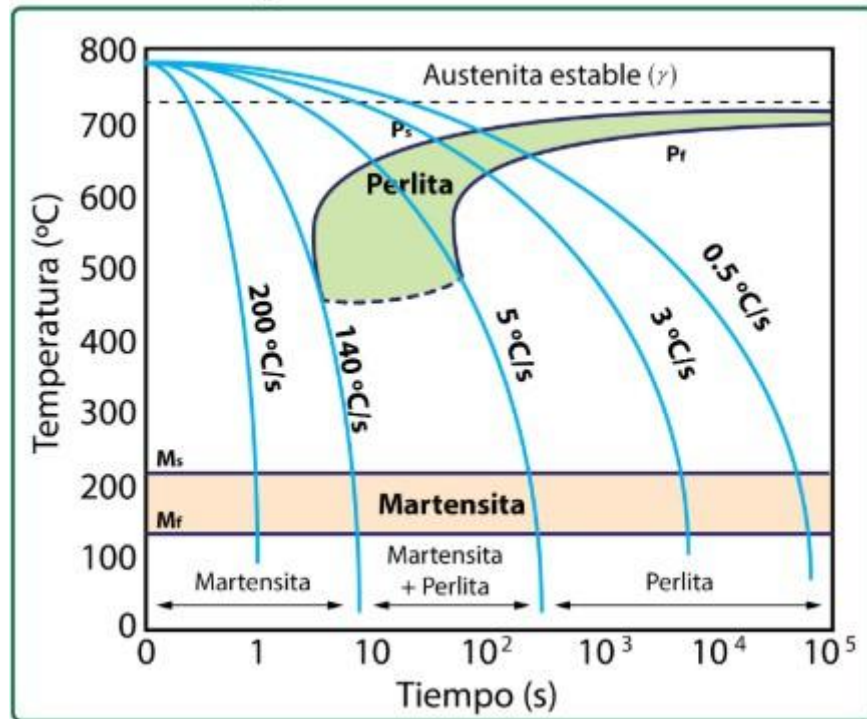
<https://www.weerg.com/es/guias/diagrama-hierro-carbono>

Apéndice B.

Diagrama CCT

Figura 11.

Diagrama CCT



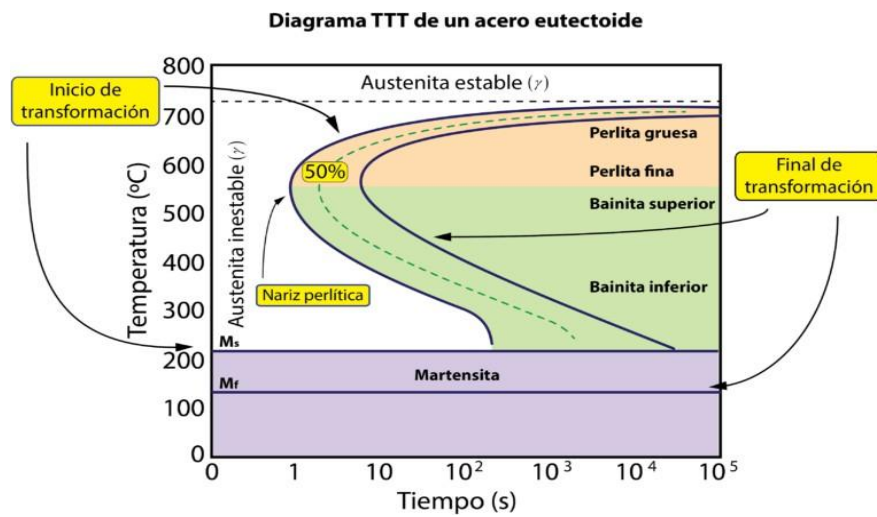
Nota: Tomado Fuente: <https://lawebdeingeniosos.com/diagramas-cct/>

Apéndice C.

Diagrama TTT

Figura 12.

Diagrama TTT



Nota. Tomado de [La Web de Ingeniosos](http://LaWebdeIngeniosos.com), s.f.

Apéndice D.

Tabla de rugosidad

Figura 13.

Rugosidad

Material	Rugosidad ϵ (m)	Rugosidad ϵ (ft)
Vidrio	Liso	Liso
Plástico	3.0×10^{-7}	1.0×10^{-6}
Tubo estirado; cobre, latón, acero	1.5×10^{-6}	5.0×10^{-6}
Acero, comercial o soldado	4.6×10^{-5}	1.5×10^{-4}
Hierro galvanizado	1.5×10^{-4}	5.0×10^{-4}
Hierro dúctil —revestido	1.2×10^{-4}	4.0×10^{-4}
Hierro dúctil —sin revestir	2.4×10^{-4}	8.0×10^{-4}
Concreto, bien hecho	1.2×10^{-4}	4.0×10^{-4}
Acero remachado	1.8×10^{-3}	6.0×10^{-3}

Nota. Adaptado de Mecánica de fluidos aplicada (6.^a ed., p. 492), por Robert L. Mott,

2015.

Apéndice E.

Tabla de propiedades del agua

Figura 14.

Propiedades del agua

Temperatura (°C)	Peso específico γ (kN/m ³)	Densidad ρ (kg/m ³)	Viscosidad dinámica η (Pa·s)	Viscosidad cinemática ν (m ² /s)
0	9.81	1000	1.75×10^{-3}	1.75×10^{-6}
5	9.81	1000	1.52×10^{-3}	1.52×10^{-6}
10	9.81	1000	1.30×10^{-3}	1.30×10^{-6}
15	9.81	1000	1.15×10^{-3}	1.15×10^{-6}
20	9.79	998	1.02×10^{-3}	1.02×10^{-6}
25	9.78	997	8.91×10^{-4}	8.94×10^{-7}
30	9.77	996	8.00×10^{-4}	8.03×10^{-7}

Nota. Adaptado de *Mecánica de fluidos aplicada* (6.^a ed., p. 492), por Robert L. Mott,

2015.

Apéndice F.

Tabla de longitudes equivalentes

Figura 15.

Longitud equivalente de diámetro

Tipo	Longitud equivalente en diámetros de conducto, L_e / D
Válvula de globo – completamente abierta	340
Válvula de ángulo – completamente abierta	150
Válvula de compuerta – completamente abierta	8
– $\frac{3}{4}$ abierta	35
– $\frac{1}{2}$ abierta	160
– $\frac{1}{4}$ abierta	900

Nota. Adaptado de *Mecánica de fluidos aplicada* (6.^a ed., p. 492), por Robert L. Mott,

2015.

Apéndice G.

Tabla de la ficha técnica de la bomba

Figura 16.

Ficha técnica de la bomba

ESPECIFICACIONES TECNICAS													
MODELO	Potencia (W)	Voltaje (V)	Corriente	Factor Potencia (λ)	Flujo Máximo (l/min)	Altura Máxima (m)	Succión	Descarga	Protección	Inmersión Total	Temperatura de Operación	Peso (Kg)	Longitud del cable (m)
AQUA 3W	7	127 V + 60Hz 1 Φ	54 mA	0.99	2.95	0.79	SUMERGIDA	1/4"	IP68	2 m	(5 - 40) °C	0.160	1.3
AQUA 5W	8		62 mA	0.96	4.3	0.76		1/4"				0.210	1.3
AQUA 12W	12		180 mA	0.82	10.2	1.08		1/4"				0.340	1.3
AQUA 18W	16		240 mA	0.70	12.76	1.38		1/4"				0.380	1.3
AQUA 30W	29		490 mA	0.48	20.6	1.99		1/2"				0.740	1.6
AQUA 45W	45		900 mA	0.46	23.7	2.2		1/2"				1	1.6
AQUA 60W	53		1 A	0.44	33	2.46		3/4"				1,650	2.7
FONT 85W	70		1.15 A	0.51	49	3.19		3/4"				2,110	4.7
FONT 150W	170		1.85 A	0.73	74	3.93		3/4"				3,320	4.7

Nota: durante la selección de la bomba se deben tomar en cuenta las pérdidas por fricción en las tuberías (distancia, diámetros, conexiones etc.)

Apéndice H.

Ficha técnica del tanque

Figura 17.

Ficha técnica del tanque

REFERENCIA: CÑ 19	
DESCRIPCIÓN GENÉRICA: Cuñete con capacidad de 19 L (5 gal). Asa plástica.	
PESO: 1.38 Kg (+/- 0.2) (3.04 lb) con tapa.	
ESPESOR PROMEDIO DE PARED: 2.2 mm (+/-0.30) (0.087" in) mínimo.	
CAPACIDAD NOMINAL: 19 Litros 5,00 Galones. CAPACIDAD AL REBOSE: 20 Litros 5,28 Galones	
DIMENSIONES: Diámetro 304 mm (+/-5) 12.00" in. Altura 368 mm (+/-5) 14.50" in con tapa.	
MATERIAL: Polietileno de Alta Densidad.	
CARGA ESTÁTICA: Resiste una carga estática por 28 días sin deformación significativa, estando con 19 L de agua a 25°C. ESTIBA: 9 cuñetes por estiba. NIVELES: 3 en arrumes.	INTemperismo: Exposición a la intemperie por 1 año sin afectar las propiedades mecánicas.
COMPATIBILIDAD: El envase está manufacturado con polietileno de alta densidad (PEAD) haciéndolo compatible con una amplia variedad de productos. El usuario debe realizar pruebas de compatibilidad de su producto antes de envasar y distribuir.	
TEMPERATURA MÁXIMA DE LLENADO: 85°C máximo; sin someter el cuñete a esfuerzo mecánico hasta que tenga temperatura ambiente.	
CIERRE: Tapa plástica ajustable, con cierre hermético (Utilizar martillo de caucho).	
NOTA: Todas las pruebas de resistencia mecánicas, se realizan con el cuñete herméticamente cerrado con 19 L de agua a una temperatura ambiente. Las especificaciones aquí descritas pueden ser cambiadas por el	

Nota. Tomado de *Ficha técnica del cuñete CÑ 19, capacidad de 19 L (5 gal.)* (s. f.), Scribd (<https://es.scribd.com/document/572049608/FICAH-TECNICA-CUNETE>).

Apéndice I.

Planos del banco

Figura 18.

Planos

