



Diseño y construcción de un banco de pruebas para el ensayo Jominy

Luna Jaen, Jhon Alexander y Tamayo Izurieta, Luis Felipe

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Ing. Sánchez Sánchez, Xavier Rolando, PhD

28 de marzo del 2022



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS ...

Scanned on: 13:10 August 17, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text



Report generated by
XAVIER ROLANDO
SANCHEZ SANCHEZ

Identical Words	262
Words with Minor Changes	68
Paraphrased Words	483
Omitted Words	0



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **"Diseño y construcción de un banco de pruebas para el ensayo Jominy"** fue realizado por los señores **Luna Jaen Jhon Alexander y Tamayo Izurieta Luis Felipe**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 09 de agosto de 2022



Formado e impreso electrónicamente por:
**XAVIER ROLANDO
SANCHEZ SANCHEZ**

Ing. Sánchez Sánchez, Xavier Rolando

C. C. 1712575826



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Responsabilidad de Auditoria

Nosotros, Luna Jaen Jhon Alexander y Tamayo Izurieta Luis Felipe, con cédulas de ciudadanía N° 1725153801 y 1716334592, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **Diseño y construcción de un banco de pruebas para el ensayo Jominy** es de nuestra auditoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 09 de agosto de 2022

Luna Jaen Jhon Alexander

C. C. 1725153801

Tamayo Izurieta, Luis Felipe

C. C. 1716334592



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Autorización de publicación

Nosotros, Luna Jaen Jhon Alexander y Tamayo Izurieta Luis Felipe, con cédulas de ciudadanía N° 1725153801 y 1716334592, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular con título: **Diseño y construcción de un banco de pruebas para el ensayo Jominy** en el repositorio institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 09 de agosto de 2022

Luna Jaen Jhon Alexander

C. C. 1725153801

Tamayo Izurieta, Luis Felipe

C. C. 1716334592

Dedicatoria

Para mis padres, quienes han sabido guiarme por el camino del bien y han trabajado cada día por el porvenir de nuestra familia.

Luna Jaen, Jhon Alexander

A mis padres, quienes han sido el pilar fundamental en mi vida para conseguir todo lo que me he propuesto, gracias por toda su entrega, amor y tiempo, es gracias a ustedes que he llegado hasta aquí y llegaremos aún más lejos.

A quienes que, con su granito de arena aportaron en este proyecto de vida, amigos, profesores, familia; especialmente mis Tíos y Abuelos, sin toda su ayuda esto no sería posible.

Tamayo Izurieta, Luis Felipe

Agradecimiento

Quiero expresar mi agradecimiento a mi madre Shirley, por su apoyo incondicional, cariño y dedicación hacia sus hijos, por sus palabras de aliento cada día, brindándome todo su amor y paciencia. A mi padre Patricio, por enseñarme que con sacrificio y trabajo todo es posible, por su esfuerzo y cariño. Gracias a ustedes esto es posible.

A mis hermanos Jandry y Patricio, por siempre ser leales, sinceros y apoyarme en cada momento de dificultad que hemos pasado.

A mis amigos de toda la vida, Aldo y Josué, gracias por ser mis consejeros, confidentes y estar conmigo siempre que lo he necesitado, sé que siempre contaré con ustedes.

A Rose, que, sin duda alguna, me ha motivado a no desfallecer y me ha apoyado durante mi carrera universitaria, gracias por todo el cariño.

A los amigos que me llevo de la universidad, Mateo, Fito, Dagmar, Felipe, Leo, Daniela, Juanpa, Dany y Diego que me han demostrado una amistad verdadera.

A los docentes y quienes aportaron a la realización de este proyecto.

Luna Jaen, Jhon Alexander

A mi padre por siempre ser una guía y un ejemplo a seguir para mi futuro, por enseñarme a nunca rendirme ante nada, por todo el apoyo y sacrificio que has hecho para hacer de mi un hombre de bien.

A mi madre que con su entrega me ha demostrado siempre el amor infinito, gracias por todo el esfuerzo para que nunca me falte nada, por nunca dejarme caer y por siempre cuidar de mí.

A mi tía Mónica, que como una segunda madre siempre ha estado ahí para corregirme y apoyarme en todo momento, por más oscuro o disparatado sea.

A los grandes profesores con los que he coincidido a lo largo de mi carrera, especialmente a Roberto Buenaño, porque más que profesor ha sido un gran amigo y un gran apoyo para este logro.

A mis amigos, con los que he compartido indudablemente los mejores momentos de esta gran etapa, que, con su apoyo ya sea para la fiesta, estudio, problemas, momentos buenos y malos; nunca faltaron.

A las grandes personas que me dio la vida universitaria y me los llevo para siempre: Andrés, Mile, Eve, Rick, Mar, Jhon, Mateo, Mau.

Tamayo Izurieta, Luis Felipe

Índice de Contenido

Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Resumen	18
Abstract	19
Capítulo 1 Generalidades	20
Antecedentes	20
Definición del problema	20
Objetivos	21
Objetivo general	21
Objetivos específicos	21
Justificación e importancia	21
Alcance	22
Capítulo 2 Marco Teórico	23
Acero	23
Tratamientos Térmicos	23
Templado	24
Aceros de baja aleación	24
Aceros al carbono	24
Templabilidad de los aceros	25

	10
Diagrama de fase Hierro Carbono.....	26
Diagrama TTT.....	27
Transformaciones de la Austenita.....	28
Austenización.....	28
Transformación Martensítica.....	30
Acero AISI 4340.....	32
Acero AISI 1045.....	32
Dureza Rockwell.....	33
Ensayo Jominy.....	34
Sistema Hidráulico.....	38
Bombas Hidráulicas.....	38
Sistema de adquisición de datos.....	39
Termocuplas.....	40
Módulo MAX 6675.....	40
Arduino Mega 2560.....	40
Módulo Relé estado sólido de 2 canales.....	41
Sistemas de control.....	42
Capítulo 3 Diseño.....	44
Especificaciones generales del equipo.....	44
Especificaciones técnicas y requerimientos del equipo.....	44

	11
Diseño del equipo	44
Diseño Mecánico.....	45
Reservorio.....	45
Tanque porta probetas	49
Estructuras de soporte.....	51
Estructura reservorio	51
Estructura tanque porta probetas	53
Estructura soporte bombas	56
Soporte para filtro	60
Diseño Hidráulico.....	61
Selección Bomba.....	61
Selección de accesorios	62
Selección del sistema de tubería	63
Cálculo de la tobera de reducción	65
Conicidad de la tobera	66
Selección de Mangueras Hidráulicas	66
Selección Filtro	67
Selección de Caudalímetro	67
Diseño del sistema de adquisición de datos	68
Diseño de placa.....	70

	12
Diseño del sistema de control	72
Relés de control	72
Contactores	72
Diseño Armario eléctrico	74
Instrumentación.....	76
Sensores de temperatura – Termocuplas tipo K.....	76
Interfaz gráfica.....	77
Diseño del portatermocuplas.....	78
Metodología.....	82
Ensayo Jominy de los aceros AISI 4340, AISI 1045	82
Medición de dureza Rockwell en base a la Norma ASTM E18-15	83
Capítulo 4 Análisis de Resultados	85
Acero AISI 4340	85
Dureza experimental	85
Dureza teórica	86
Curvas de templabilidad acero AISI 4340.....	87
Comparación de curvas de templabilidad teórica y experimental.....	88
Análisis.....	90
Teoría de errores	91
Acero AISI 1045	92

	13
Dureza experimental	92
Dureza teórica	93
Curvas de templabilidad acero AISI 1045.....	93
Comparación de curvas de templabilidad teórica y experimental	94
Análisis.....	96
Teoría de errores	97
Curvas de enfriamiento Acero AISI 4340.....	98
Curvas experimentales de velocidad de enfriamiento Acero AISI 4340.....	99
Curvas de enfriamiento Acero AISI 1045.....	101
Curvas experimentales de velocidad de enfriamiento Acero AISI 1045.....	102
Microestructura de los Aceros AISI 4340 y 1045	103
Capítulo 5 Análisis Financiera	104
Costos directos.....	104
Costos indirectos.....	108
Costo Total	110
Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones.....	111
Conclusiones	111
Recomendaciones	112
Referencias.....	113
Apéndices.....	116

Índice de Tablas

Tabla 1: Características principales de los aceros al carbono	24
Tabla 2: Temperaturas de Normalizado y Austenización Norma ASTM A255-10	29
Tabla 3: Tipos de bombas hidráulicas.....	39
Tabla 4: Propiedades mecánicas del AISI 304.....	46
Tabla 5: Características de selección de geometría del reservorio.....	47
Tabla 6: Tabla de relaciones para tanques	48
Tabla 7: Fuerzas aplicadas por cada componente a la estructura del reservorio	51
Tabla 8: Resultados de la simulación estática para el soporte del tanque del reservorio	52
Tabla 9: Fuerzas aplicadas por cada componente a la estructura del Tanque porta probetas.....	54
Tabla 10: Resultados de la simulación estática para el soporte del tanque porta probetas.....	54
Tabla 11: Dimensiones de la bomba PKm-60	57
Tabla 12: Resultados de la simulación estática para el soporte de bombas.....	58
Tabla 13: Matriz de decisión de las bombas hidráulicas.....	61
Tabla 14: Matriz de decisión sistema hidráulico.....	63
Tabla 15: Matriz de decisión Filtro	67
Tabla 16: Matriz de decisión para el caudalímetro.....	68
Tabla 17: Matriz de decisión Tarjeta de adquisición de datos	69
Tabla 18: Identificación de contactores	73
Tabla 19: Listado de elementos en el tablero eléctrico	75
Tabla 20: Características Termocupla tipo K	77
Tabla 21 Datos de dureza experimental acero AISI 4340	85
Tabla 22: Datos de dureza experimental acero AISI 1045	92
Tabla 23 Gráficas de enfriamiento para las 3 probetas de Acero AISI 4340	98

Tabla 24: Costos directos para la fabricación y montaje del equipo	104
Tabla 25: Costos de fabricación y mano de obra del equipo	109
Tabla 26: Costos indirectos	109

Índice de Figuras

Figura 1: Diagrama de fase Hierro-Carbono	26
Figura 2: Diagrama TTT (Tiempo-Temperatura-Transformación)	28
Figura 3: Microestructura de la austenita	30
Figura 4: Microestructura de la Martensita	31
Figura 5: Propiedades Generales Acero AISI 4340	32
Figura 6: Composición química acero AISI 1045	33
Figura 7: Medición de dureza Rockwell	34
Figura 8: Esquema de un banco de pruebas Jominy	35
Figura 9: Espécimen de prueba para ensayo Jominy normalizado	36
Figura 10: Variación velocidad de enfriamiento probeta Jominy a lo largo de su longitud	37
Figura 11: Variación de dureza a lo largo de una probeta Jominy	37
Figura 12: Curvas de templabilidad para varios aceros con el mismo contenido de carbono (0.40% en peso)	38
Figura 13: Sistema de adquisición de datos	40
Figura 14: Placa Arduino Mega 2560	41
Figura 15: Modulo Relay SSR de 2 canales	42
Figura 16 Diagrama de un sistema de control	43
Figura 17: Esquema General del Banco de pruebas para el Ensayo Jominy	45
Figura 18: Dimensiones de la Bomba 1/2 HP PKm-60 MD	56

Figura 19: Dimensiones de la base soporte de bombas y porta filtros.....	57
Figura 20: Filtro anti sedimentos Rotoplas para protección de bombas	60
Figura 21: Dimensiones del soporte del filtro de agua	60
Figura 22: Características Bomba Pedrollo 1/2 HP	62
Figura 23: Diseño preliminar	63
Figura 24: Diagrama para selección de tamaño de tubería	64
Figura 25: Dimensiones tubería de acero AISI 304"	65
Figura 26: Placa Arduino instalada en la placa	70
Figura 27: Diseño de placa en Proteus 8	71
Figura 28: Instalación de componentes en la placa.....	71
Figura 29: Módulo de Relay SSR 2 canales	72
Figura 30: Disposición contactores en el tablero.....	73
Figura 31: Diagrama del circuito eléctrico	74
Figura 32: Tablero eléctrico final	75
Figura 33: Termocupla tipo K	76
Figura 34: Menú HMI	78
Figura 35: Dimensiones de la porta probetas.....	79
Figura 36: Partes de la Termocupla Tipo K 1/8" NPT	80
Figura 37: Dimensiones de los elementos de la termocupla	80
Figura 38: Partes y dimensiones de la Porta Termocuplas	81
Figura 39: Detalle de Sistema de contacto Termocuplas-Probeta.....	81
Figura 40: Proceso del ensayo Jominy.....	83
Figura 41 Medidas de dureza en la probeta Jominy.....	84
Figura 42: Gráfica comparativa templabilidad acero AISI 4340	87

Figura 43: Curva de templabilidad teórica acero AISI 4340	88
Figura 44: Comparación de curvas experimental vs teórica - AISI 4340	89
Figura 45: Variación de la dureza HRC en base al contenido de carbono	91
Figura 46: Error porcentual de la dureza en el Acero AISI 4340	91
Figura 47: Gráfica comparativa templabilidad acero AISI 1045	93
Figura 48: Curva de templabilidad teórica acero AISI 1045	94
Figura 49: Comparación de curvas experimental vs teórica - AISI 1045	95
Figura 50: Error porcentual de la dureza en el Acero AISI 1045	97
Figura 51 Curvas de velocidad de enfriamiento Acero AISI 4340	99
Figura 52: Velocidad de enfriamiento vs distancia - Acero AISI 4340	100
Figura 53: Curvas de velocidad de enfriamiento Acero AISI 1045	102
Figura 54: Velocidad de enfriamiento vs distancia - Acero AISI 1045	103

Resumen

El presente trabajo de titulación detalla el proceso de diseño y construcción de un banco de pruebas del ensayo Jominy describiendo las etapas del diseño mecánico de recipientes, selección de componentes hidráulicos y electrónicos. El dispositivo deberá sostener la probeta verticalmente de modo que el extremo inferior de la probeta este a $\frac{1}{2}$ " por encima del orificio de salida del acople reductor de enfriamiento rápido. Este enfriamiento debe proporcionar una corriente vertical de agua que pueda controlar su caudal a una altura de $2\frac{1}{2}$ " y una salida de $\frac{1}{2}$ " de diámetro, este chorro de agua será dirigido a una temperatura de 5 a 30 °C contra la cara inferior durante no menos de 10 minutos, suministrada con una bomba, siendo provista de una válvula de apertura rápida.

Además, el equipo implementa una interfaz para el usuario HMI desde el cual se controla la operación del experimento, es decir encendido y apagado de bombas, medición de caudal y se registrara las temperaturas en 6 puntos distintos a lo largo de la probeta, además se grafica en tiempo real la respuesta de enfriamiento de la probeta y se exportan los datos medidos por termocuplas tipo K hacia una hoja de cálculo de Excel.

Con esta experimentación se busca estudiar la respuesta de templabilidad de los aceros según la norma ASTM A255-10, específicamente estudiando la dureza del espécimen y la velocidad de enfriamiento a la que es sometido durante el ensayo, el equipo estará a disposición de los estudiantes y docentes del Laboratorio de Ciencia de los materiales.

Palabras clave: dureza, templado, construcción

Abstract

The present degree work details the design and construction process of a test bench for the Jominy test, describing the stages of the mechanical design of vessels, selection of hydraulic and electronic components. The fixture shall hold the specimen vertically so that the lower end of the specimen is ½" above the outlet port of the quench reducing coupling. This cooling must provide a vertical current of water that can control its flow at a height of 2 ½" and an outlet of ½" in diameter, this water jet will be directed at a temperature of 5 to 30 °C against the lower face during not less than 10 minutes, supplied with a pump, being provided with a quick opening valve.

In addition, the equipment implements an interface for the HMI user from which the operation of the experiment is controlled, that is, pumps on and off, flow measurement and the temperatures will be recorded at 6 different points along the test tube, in addition It graphs in real time the cooling response of the specimen and the data measured by type K thermocouples are exported to an Excel spreadsheet.

With this experimentation seeks to study the hardenability response of steels according to the ASTM A255-10 standard, specifically studying the hardness of the specimen and the cooling rate to which it is subjected during the test, the equipment will be available to students and teachers of the Materials Science Laboratory.

Keywords: hardness, hardenability, construction.

Capítulo 1 Generalidades

Antecedentes

El ensayo Jominy es un procedimiento estándar utilizado ampliamente para determinar la templabilidad. En este ensayo se mantienen constantes todos los factores que influyen en la profundidad de endurecimiento de la pieza exceptuando la composición; como por ejemplo tamaño y forma de la pieza y tratamiento de temple. (Callister, 2020)

En el Ecuador existen varios estudios acerca de la templabilidad, de los cuales se destacan tanto los campos de investigación como prácticos incluyendo en estos algunos ensayos de laboratorio, en donde se puede encontrar una fuerte participación en los campos de Sistemas de medición y control (Suarez, 2007), Soldadura en aceros (Chávez, 2017), Diseño y construcción (Proaño & Sánchez, 2014).

Sin embargo, ninguno de los estudios se encuentra directamente relacionado con el análisis de la templabilidad mediante ensayo Jominy.

Definición del problema

La templabilidad es una propiedad mecánica que poseen prácticamente todos los aceros aleados, cuyo valor incrementa o decrece en base al tratamiento térmico aplicado y la composición del acero. Para el cálculo de esta propiedad es necesario partir de los resultados obtenidos mediante un análisis con base al ensayo Jominy; el cual ha permitido definir una metodología para poder predecir de forma exacta la capacidad de endurecimiento de los aceros.

Actualmente el equipo de ensayo Jominy existente en la universidad se encuentra en condiciones desfavorables, por lo cual el equipo propuesto no solo responde a las necesidades planteadas, sino que también será una actualización de práctica de laboratorio, la cual contará con adquisición de datos y control de las diferentes variables que intervienen en el templeado, las cuales

influyen en las propiedades internas del acero. Por ende, se puede realizar un estudio de templabilidad más preciso.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar y construir un banco de pruebas para ensayo Jominy con una interfaz (HMI) para la interpretación de resultados

Objetivos específicos

- Elaborar el diseño mecánico del recipiente para el ensayo Jominy.
- Determinar las mejores opciones para la obtención de datos relacionados con curvas de enfriamiento y fenómenos a fin.
- Realizar los procedimientos necesarios de manufactura mecánica y electrónica para la obtención de un banco funcional.

Justificación e importancia

El equipo a diseñarse y construirse es de suma importancia para el ámbito académico, ya que proporciona información con la cual se puede comparar el fenómeno físico con los datos teórico de templabilidad, los cuales son corroborados con ensayos como: templabilidad, microestructura y dureza del acero en base a la norma ASTM A255.

Se realizará el diseño y construcción de un “Banco de pruebas para ensayo Jominy”, adicionalmente se diseñará: un sistema de adquisición de datos y una interfaz de usuario; se seleccionará la instrumentación digital acorde a las necesidades de obtención de datos del equipo, por lo cual se le entregará al Laboratorio de Ciencia de Materiales un equipo moderno acorde a las exigencias de la calidad de la educación superior.

Es importante señalar que se generarán guías de práctica, manual de usuario y manual de mantenimiento.

Por lo anteriormente señalado se justifica la realización del presente proyecto

Alcance

Se iniciará con el estudio de la norma ASTM A255, que servirá como punto de partida para la elaboración del banco de pruebas, para posteriormente realizar el diseño mecánico y pruebas de funcionamiento. Se desarrollará la interfaz que permitirá acceder a la información de los sensores mediante la adquisición de datos. Adicionalmente se entregarán: memoria de cálculo, planos del equipo, manuales de funcionamiento, guías de práctica de laboratorio.

Capítulo 2 Marco Teórico

Acero

El acero es una aleación de hierro-carbón que dependiendo de la aplicación final puede contener pequeñas cantidades de otros elementos. La combinación del acero puede contener hasta un 2.1% de carbón, ya que a partir de dicho porcentaje se considera un material demasiado frágil para una aplicación industrial. Las propiedades mecánicas del acero pueden variar dependiendo del tratamiento térmico que se le aplique, de tal manera que incremente o disminuya su dureza y fragilidad. (Güemes & Martín, 2012)

A diferencia del hierro, el acero es caracterizado por su gran resistencia a la deformación, debido al cambio de estructura molecular cristalina a causa del aumento de carbono; debido a estas propiedades el acero constituye el material básico del siglo XX. Hoy en día, el 92% de acero global es al carbono, mientras que el restante es acero aleado con otros elementos especiales como: cromo, titanio, vanadio, níquel, wolframio, etc. (Ma San, 2013)

Tratamientos Térmicos

Los tratamientos térmicos se definen como procesos de calentamiento y enfriamiento súbito aplicados a las aleaciones de metal en estado sólido, bajo los parámetros de: tiempo de duración, presión y velocidad. Mediante los cuales, se busca incrementar las propiedades mecánicas y obtener condiciones específicas como: dureza, tenacidad, elasticidad y resistencia. (Apraiz , 2003)

Los tratamientos térmicos más comúnmente utilizados en aceros se clasifican en:

- Templado
- Revenido
- Recocido

- Normalizado

Templado

Es un proceso empleado especialmente en aceros de baja aleación y aceros al carbono, que consiste en el enfriamiento brusco de piezas con el objetivo de alterar la microestructura y así conseguir propiedades específicas en los materiales. Este tipo de tratamiento térmico, evita las transformaciones de fase (procesos de baja temperatura), llevando a cabo espacios cortos de tiempo en donde las reacciones son favorables termodinámicamente. A nivel microscópico el endurecimiento por temple genera el constituyente martensítico, provocando así la ausencia del constituyente perlítico. En este proceso el agua es el medio de enfriamiento más común, pero no el de mayor efectividad. (Molera, 1991)

Aceros de baja aleación

Son aquellos que además de ser una composición entre Hierro y carbono, presentan elementos añadidos que no superan el 5% de contenido en peso. Entre los cuales se destacan por su composición: el vanadio, molibdeno, manganeso, níquel, cromo, silicio, titanio, entre otros. Estos aceros son de mayor empleo industrialmente y se los puede clasificar en base a su contenido de carbono en: bajos, medios y altos.

Aceros al carbono

En la Tabla 1 se muestra la información más relevante acerca de los aceros de bajo, medio y alto carbono.

Tabla 1

Características principales de los aceros al carbono

Tipo de acero	Contenido de carbono	Propiedades generales	TT aplicables
Bajo carbono	$< 0.25\%$	Blando y de baja resistencia, altamente dúctiles	Trabajos en frío, cementado
Medio carbono	$0.25\% \leq C < 0.6\%$	Duros y de media resistencia, baja templabilidad	Austenización, temple y revenido
Alto carbono	$0.6\% \leq C < 1.4\%$	Alta dureza y resistencia a la deformación, baja ductilidad	Templado, revenido y recocido

Nota. Información obtenida de (Callister, 2020)

Templabilidad de los aceros

Se la define como la capacidad mediante la cual una aleación metálica transforma su composición en martensita, logrando así por propiedad la condición austenítica. Templabilidad no significa lo mismo que dureza, ya que esta es la resistencia a la penetración de un material. La templabilidad es definida en base al contenido de carbono presente en una aleación (Molera, 1991) . En un acero con composición fija, la templabilidad depende de:

- Tamaño de grano austenítico.
- Aleantes. Todos los elementos que se añaden al acero aumentan la templabilidad menos el cobalto. (Molera, 1991)

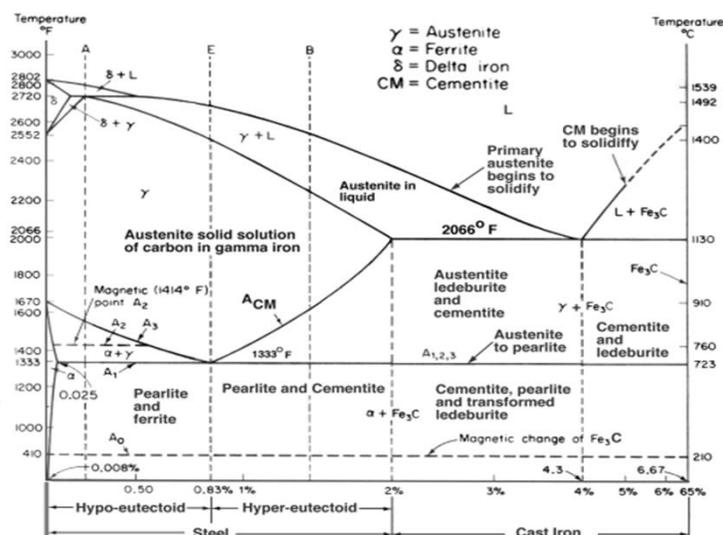
Diagrama de fase Hierro Carbono

Se define como diagrama de fase a: los límites de constitución de las zonas de cambio, temperatura de equilibrio y las reacciones que ocurren entre fases de un conjunto de aleaciones, representado de manera gráfica. En el caso del acero se presenta el equilibrio para el sistema de elementos hierro y carbono, en donde se muestra las fases presentes en base al contenido de carbono y la temperatura. Este diagrama mostrado en la Figura 1 se utiliza para valorar el acero y el hierro vaciado con relación a su capacidad de soldadura, conformado, endurecimiento, etc. (Güemes & Martín, 2012)

En el diagrama Fe-C se ubica al contenido de carbono en el eje X y la temperatura en °C o °F en el eje Y. En relación al contenido de carbono en el eje X se tiene el 100% de hierro en el extremo izquierdo, mientras que en el extremo derecho se tiene el 6,67% por peso de contenido de carbono. Superior a este valor no es relevante, ya que en esta fase el acero es únicamente carburo Fe₃C (cementita). (Askeland, 2011)

Figura 1

Diagrama de fase Hierro-Carbono



Nota. Tomado de: <http://carlossaiz.blogspot.com/2012/12/diagrama-hierro-carbono.html>

Diagrama TTT

El diagrama Hierro-Carbono explicado previamente, proporciona únicamente la información pertinente acerca de las estructuras formadas bajo condiciones de equilibrio. Por ende, es necesario analizar las transformaciones de la austenita en sus estructuras variantes respectivas bajo condiciones de no equilibrio (velocidades bruscas de enfriamiento y calentamiento). Algunas de estas transformaciones son: vainita, perlita, martensita (Molera, 1991). Los diagramas TTT se clasifican en:

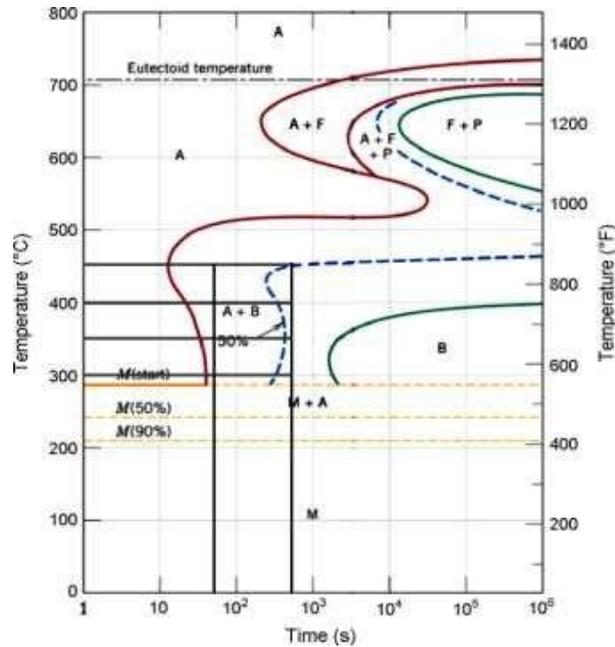
- Diagramas de transformaciones isotérmicas (IT), que significa las etapas de la Austenita a temperaturas constantes
- Diagrama de enfriamiento continuo (CT), en el cual se presenta las fases de transformación de la Austenita conforme disminuye la temperatura y las velocidades de enfriamiento varían. (Molera, 1991)

La importancia del diagrama TTT, es conocer los parámetros de temperatura y velocidades de enfriamiento necesarios para lograr alcanzar dichas transformaciones. Por lo tanto, en base a cada diagrama se puede obtener los parámetros necesarios para transformar austenita en: perlita, martensita o vainita.

La Figura 2, detalla el diagrama TTT de un acero al carbono de contenido igual a 0.8%. Cabe recalcar, que existe para cada tipo de acero un diagrama TTT. (Ma San, 2013)

Figura 2

Diagrama TTT (Tiempo-Temperatura-Transformación)



Nota. Diagrama TTT para acero 4340 Tomado de (Ma San, 2013)

Transformaciones de la Austenita

Austenización

Se define como la transformación total de la estructura de un acero en austenita. Para lograr esto se debe realizar un calentamiento a la aleación, tal que, en dicha temperatura solo la estructura austenítica sea estable y mantenerla el tiempo requerido para que la transformación se produzca. Si el acero es hipoeutectoide, la temperatura deberá estar por encima de A_{c3} , en cambio al ser hipereutectoide, deberá estar por encima de A_{cm} , como se detalla en la Figura 1.

Se debe elegir una temperatura adecuada de austenización para los distintos aceros, por ejemplo, si la temperatura se encuentra en una cantidad baja por encima del punto crítico, se verá afectada la difusión y la permanencia en el horno será elevada. Pero en cambio si la temperatura es muy

elevada, se puede ver afectado el tamaño de grano de la Austenita, lo cual no es favorable para las propiedades mecánicas del acero (Lefevre, 2020). En la Tabla 2 se encuentran algunas temperaturas de austenización para los distintos grupos de aceros del mercado.

Según la norma ASTM A255-10, esta temperatura varía entre ± 30 , e incluso hasta 80 según sea el caso.

Tabla 2

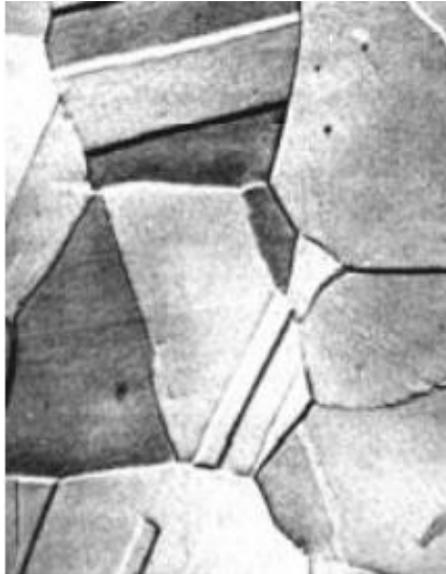
Temperaturas de Normalizado y Austenización Norma ASTM A255-10

Grupo de Aceros	Contenido máximo de carbono, %	Temperatura de Normalizado °C	Temperatura de Austenización °C
1000,1300,1500,3100,4000,4100	0.25 e inferiores	925	925
4300, 4400, 4500, 4600, 4700, 5000	0.26 a 0.36, incluido	900	870
2300, 2500, 3300, 4800, 9300	0.37 y superiores	870	845
	0.25 e inferiores	925	845
	0.26 a 0.36, incluido	900	815

Nota. Tomado de (ASTM International, 2014)

Una vez lograda la estructura austenítica, esta se transformará en otras estructuras o fases dependiendo de su velocidad durante el enfriamiento, como se ve en la Figura 3. Dado que es imposible mantener austenita a temperatura ambiente, incluso con velocidades de enfriamiento abruptas.

(Güemes & Martín, 2012)

Figura 3*Microestructura de la austenita*

Nota. Zonas de interacción entre el hierro (parte más clara) y carbono (zonas más oscuras). Tomado de: (Ávila & Chaves, 2017)

Transformación Martensítica

Cuando se procede a realizar un enfriamiento térmico lento desde la región austenítica, por ejemplo, dejándolo enfriar dentro del horno, esta estructura austenítica se transformará progresivamente en ferrita y posteriormente lo restante se transformará en perlita, dependiendo las fases correspondientes del diagrama Fe-C, tal como se conoce en los aceros hipoeutectoides y el cruce en los límites de fase.

Por otra parte, si se tiene una gran velocidad de enfriamiento aplicada, no se pueden tomar en cuenta las transformaciones del diagrama, ya que, son de tipo térmicas. Lo cual implica difusión y tiempo necesario para que los átomos puedan ubicarse en la red cristalina. Cuando se tiene velocidades de enfriamiento muy elevadas se descartan transformaciones térmicas, debido a esto, la austenita presente que no es estable a temperatura ambiente se transforma en otra estructura produciendo así una

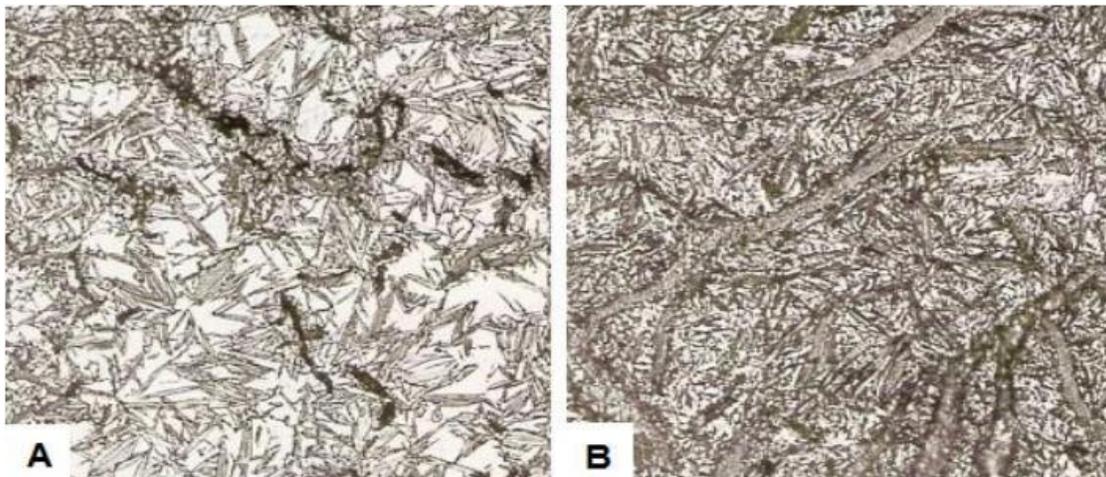
transformación atérmica, lo cual derivará en una transformación inexistente en el diagrama Fe-C llamada martensita.

En esta fase la dureza se ve incrementada de manera significativa, debido al aumento de dislocaciones formadas durante la transformación martensítica.

La martensita posee las siguientes propiedades: una red tetragonal centrada en el cuerpo, se forma mediante el deslizamiento de planos y maclado en la red austenítica, presenta forma de agujas al ser observada en un microscopio, entre otras que se observan en la Figura 4. Cuando se produce la transformación de austenita en martensita, también se produce un incremento de volumen, ya que, se tiene un cambio de red compacta por una que no lo es, en la cual incrementa conforme mayor sea el porcentaje de carbono presente en el acero. (Güemes & Martín, 2012)

Figura 4

Microestructura de la Martensita



Nota. Tomado de: (Ávila & Chaves, 2017)

Acero AISI 4340

Este es un acero de medio carbono aleado con componentes como Cromo, Níquel y Molibdeno, presenta alta templabilidad, resistencia a la fatiga y tenacidad. Se lo utiliza para piezas y herramientas que son sometidas a grandes exigencias (Cia. General de Aceros, 2022). En la Figura 5 se observan la composición química del acero y su dureza HRC.

Figura 5

Propiedades Generales Acero AISI 4340



Composición química (%)			
C	0.38 - 0.43	S	0.04 Max.
Mn	0.60 - 0.80	Cr	0.70 - 0.90
Si	0.15 - 0.35	Ni	1.65 - 2.00
P	0.035 Max.	Mo	0.20 - 0.30

Dureza de suministro 28 - 32 HRC.

Nota. Tomado de: <https://www.cga.com.co/>

Acero AISI 1045

Es un acero de medio contenido de carbono, con las siguientes propiedades: buena maquinabilidad y baja soldabilidad, apto para tratamiento térmico. Se lo utiliza para fabricación de componentes de maquinaria por su buena templabilidad y tenacidad (Cia. General de Aceros, 2022). La composición química de este acero se observa en la Figura 6.

Figura 6

Composición química acero AISI 1045



Composición química (%)			
C	0.43 - 0.50	P	0.04 Max.
Mn	0.60 - 0.90	S	0.05 Max.
Si	0.20 - 0.40		

Dureza de suministro 180 - 220 HB.

Nota. Tomado de: <https://www.cga.com.co/>

Dureza Rockwell

Debido a la facilidad de ejecución, el ensayo Rockwell es el método más empleado para obtener la dureza de un material, lo cual significa obtener el valor de resistencia a la penetración de un material. La existencia de varios indentadores (penetradores) y cargas, permite que este ensayo pueda realizarse sobre casi todos los metales o aleaciones. En lo que refiere a indentadores, existen dos tipos: de bola esférica de acero endurecido y cónicos de punta de diamante. (ASTM International, 2016)

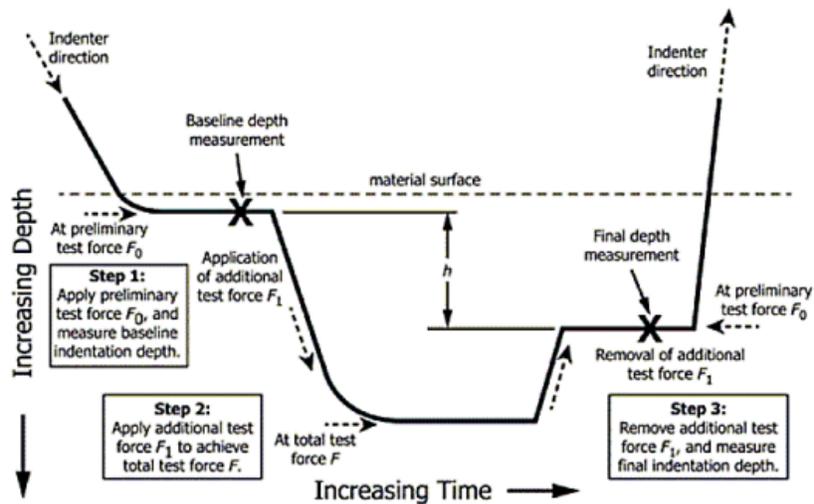
El ensayo consiste en ubicar el material sobre una superficie plana y aplicar una precarga de 10 kg, con el fin de suprimir la deformación elástica y que el resultado sea más preciso. Luego de esto se aplica una carga que va desde los 60 kg a los 150 kg a compresión, y se la mantiene unos segundos para que el indentador deje una huella. Se retira la carga existente y se procede a leer la medida reflejada en la pantalla del durómetro, en la Figura 7 se observar un esquema de la indentación hecha en el material. (Rockford, 1982)

Para evitar errores se debe tomar en cuenta el material a utilizar, ya que, los valores varían dependiendo del espécimen a ensayar. Así mismo se debe tomar en cuenta el espesor de la probeta y la

escala a utilizar. Los valores inferiores a 20 HRC y superiores a 100 HRC son despreciables debido a su imprecisión, por ende, se debe optar por un cambio de escala. (ASTM International, 2016)

Figura 7

Medición de dureza Rockwell



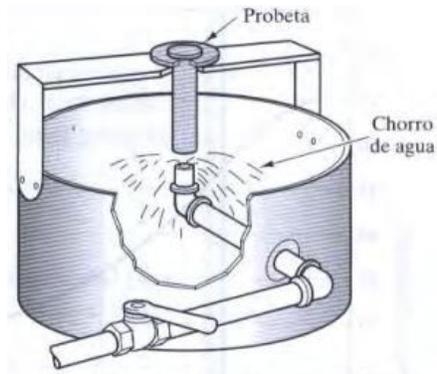
Nota. Tomado de (ASTM International, 2016)

Ensayo Jominy

Como ya se mencionó la templabilidad es la capacidad relativa que tiene el acero para endurecerse mediante el temple. Con base a los diagramas TTT se tiene amplia información sistemática acerca de la tendencia general que poseen los aceros, sin embargo, se debe tomar en cuenta que los aceros comerciales poseen un gran rango de composición y comportamiento diferente. Debido a esta problemática, a nivel industrial ha sido necesario normalizar un ensayo simple que permita obtener una comparativa sistemática, el cual se denomina ensayo Jominy.

Figura 8

Esquema de un banco de pruebas Jominy

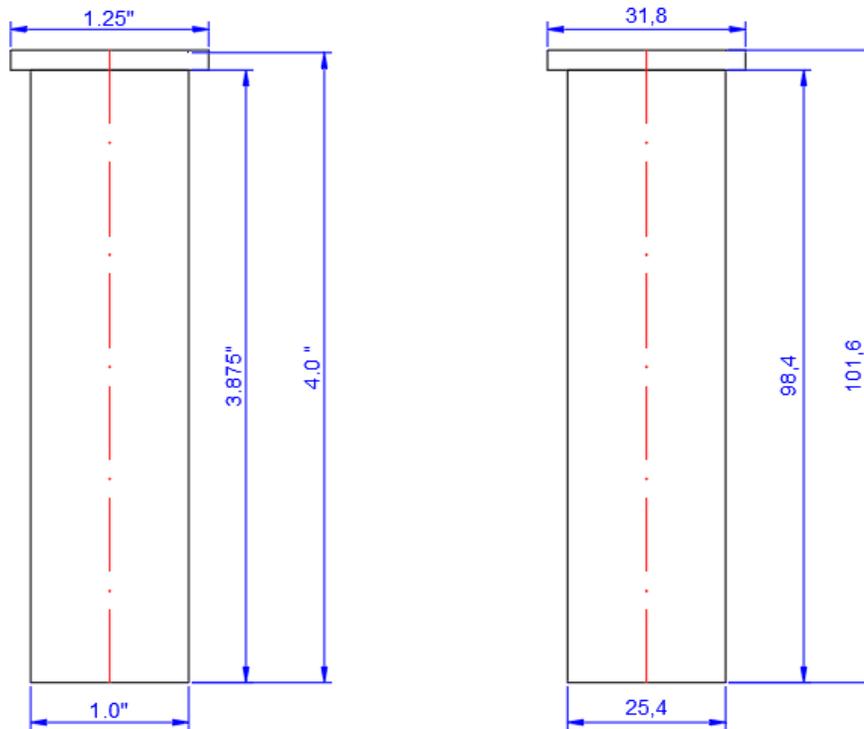


Nota. Tomado de (Shackelford, 2010)

Este ensayo consiste en llevar hasta la temperatura de austenización una barra de acero normalizada con dimensiones especificadas en la Figura 9, y luego de esto, hacer incidir un chorro de agua contra su cara inferior, el equipo básico para este ensayo se lo puede observar en la Figura 8, el cual consiste en un contenedor capaz de sostener a la probeta mientras a este se le aplica el chorro de agua. (Shackelford, 2010)

Figura 9

Espécimen de prueba para ensayo Jominy normalizado



Nota. Tomado y redibujado de (ASTM International, 2014)

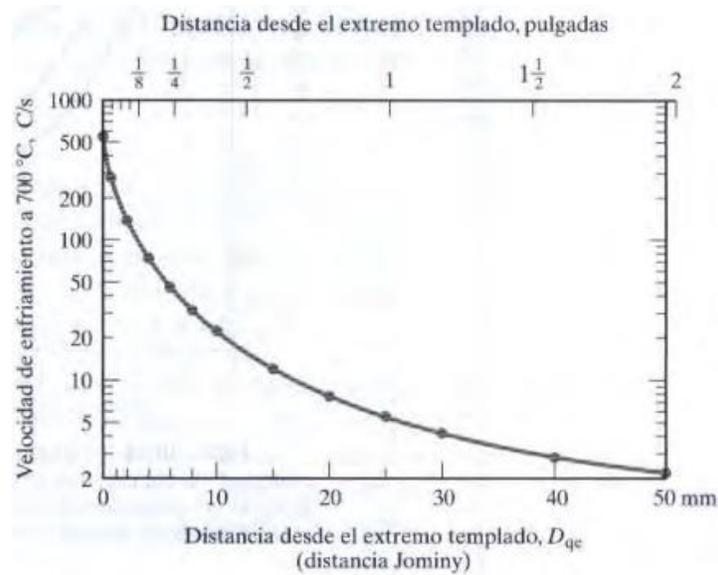
Cabe recalcar que es necesario que la probeta se encuentre en la temperatura el tiempo necesario para que todo el espécimen llegue a la temperatura de austenización. Para esto generalmente se usa la estimación empírica de mantener dentro del horno 2 minutos por cada milímetro de espesor.

Industrialmente los aceros más empleados para endurecimiento por temple son los aceros al carbono y aceros de baja aleación, debido que, mediante este proceso se genera gradientes de velocidad de enfriamiento a lo largo del espécimen de prueba Jominy (Shackelford, 2010). En la Figura 10 se aprecia como varía la velocidad de enfriamiento en base a la distancia desde el extremo templado, en donde la velocidad de enfriamiento es superior en el extremo en el cual el chorro de agua golpea la

probeta. Así mismo en base a la Figura 11 y 12, se tiene datos acerca de la variación de la dureza que posee una probeta típica para ensayo Jominy.

Figura 10

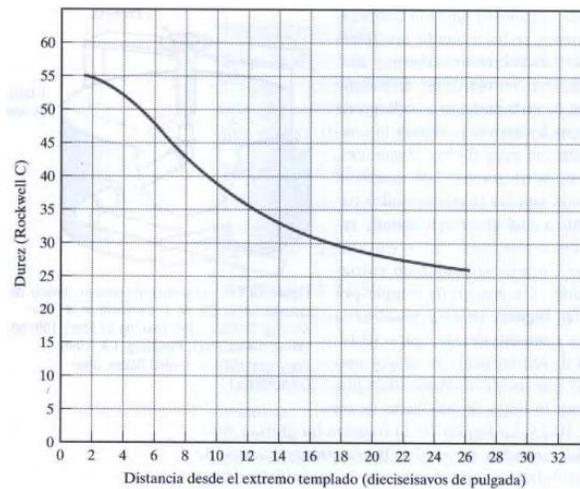
Variación velocidad de enfriamiento probeta Jominy a lo largo de su longitud



Nota. Tomado de: (Van Vlack, 1989)

Figura 11

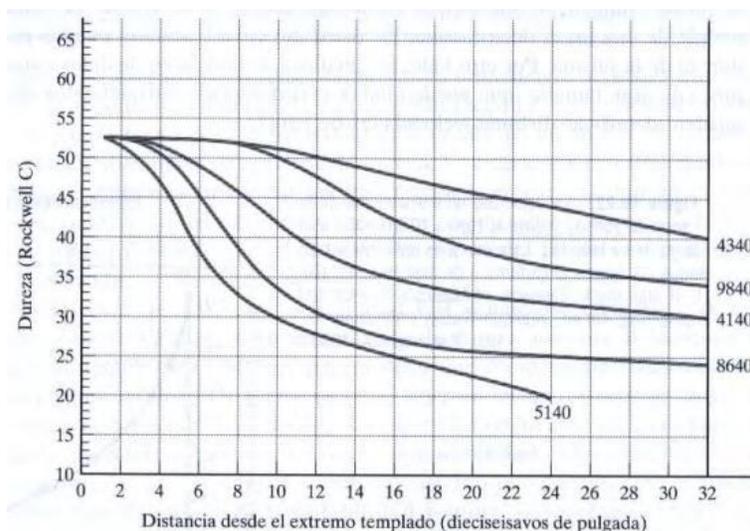
Variación de dureza a lo largo de una probeta Jominy



Nota. Tomado de (Shackelford, 2010)

Figura 12

Curvas de templabilidad para varios aceros con el mismo contenido de carbono (0.40% en peso)



Nota. Tomado de (Shackelford, 2010)

Todos los parámetros necesarios para llevar a cabo el ensayo Jominy (Dispositivo de enfriamiento, temperaturas de austenización, parámetros para medición de dureza después del temple, medidas estándar, probetas de ensayo, procedimiento, calentamiento, enfriamiento, apoyo de la probeta, identador, toma de lecturas) Se encuentra en la norma adjuntada en la sección de anexos.

Sistema Hidráulico

Bombas Hidráulicas

Una bomba hidráulica (o bomba de agua) es un dispositivo el cual transforma la energía mecánica en hidráulica mediante el trabajo con fluidos principalmente agua. El fin de una bomba es lograr transferir la energía producida a un fluido para provocar su transporte en una instalación. Existen algunos tipos de bombas hidráulicas entre las cuales se destacan las características descritas en la Tabla 3.

Tabla 3*Tipos de bombas hidráulicas*

Tipo	Descripción	Ventajas	Desventajas	Ilustración
Bombas de engranajes	Poseen pocas piezas móviles, Caudal constante y de mayor velocidad de trabajo.	- Precio asequible - Cilindrada fija	- Baja eficiencia volumétrica	
Bombas de pistón	Grandes caudales a altas presiones. Basado en el movimiento alternado de pistones	- Mayor eficiencia volumétrica - Presiones más elevadas	- Mayor costo	
Bombas de paleta	Se componen de un rotor con ranuras en las cuales se insertan las paletas	- Menos ruido - Reducción del consumo de energía	- Mayor costo - Fragilidad	

Nota. Tomado de: <https://guide.directindustry.com/es/que-bomba-hidraulica-elegir/>

Sistema de adquisición de datos

La adquisición de datos de equipos semiautomatizados se logra mediante el acondicionamiento de señales analógicas a digitales de los sensores de medición a través de Tarjetas de adquisición de datos (DAQ, Arduino, etc.) y se da paso a su digitalización mediante un software, para el caso de este proyecto se usó LabVIEW. El proceso descrito se observa en la Figura 13.

Figura 13

Sistema de adquisición de datos



Nota. Tomado de (Ambato & Bravo, 2021)

La adquisición de datos es indispensable para obtención de gráficas de enfriamiento y su posterior comparación con gráficas teóricas, y de esta forma determinar el tipo de acero de acuerdo a su curva y predecir la variabilidad de dureza en las probetas a ensayar.

Termocuplas

Las termocuplas o termopar se basan en el efecto de unión de dos cables o metales (unión de medida y unión de referencia) que forman un circuito cerrado por el cual circula una corriente. Esta diferencia de voltaje existente libera una medida en el termopar, la cual será interpretada por un módulo o transistor. (Creus, 2010)

Módulo MAX 6675

Este módulo realiza la amplificación, compensación y conversión de la señal analógica a digital de un termopar tipo K, con una resolución de 12 bits y una apreciación de 0.25 grados, con un alcance de 1024 °C.

Arduino Mega 2560

La plataforma Arduino, basada en la placa electrónica con microcontrolador reprogramable de hardware libre, es uno de los softwares de programación más utilizados en el mundo, por su fácil uso,

bajo coste y accesibilidad. Para su programación utiliza el lenguaje Arduino que se basa en Wiring y el software Arduino (IDE), en base a Processing. (Arduino, 2010)

Existen varias librerías de uso libre para adaptar el software usado en este proyecto sin necesidad de una programación compleja a los accesorios necesarios como, por ejemplo: módulos acondicionadores de señal para sensores de temperatura. En la Figura 14 se observa el módulo de Arduino usado en este proyecto.

Figura 14

Placa Arduino Mega 2560



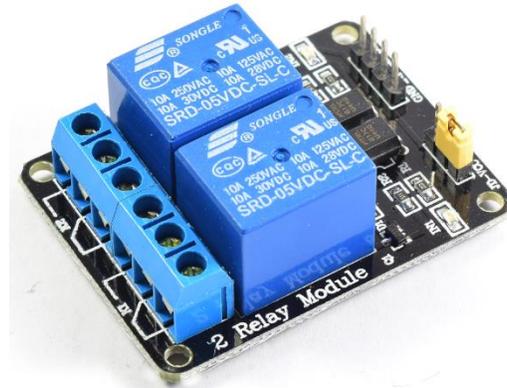
Nota. Tomado de: <https://Arduino.cl/Arduino-mega-2560/>

Módulo Relé estado sólido de 2 canales

Los Relays de estado sólido son un avance a los relés clásicos de tipo electromecánico por sus ventajas como: menor tiempo de respuesta, mayor tiempo de vida, etc. como se ve en la Figura 15. Su principio de funcionamiento básico es que al paso de un voltaje de control en la entrada del Relay, se cierra el contacto interno y se ilumina un Led, lo cual permite el paso de corriente en la carga. Estos módulos en la zona de fuerza, poseen 3 entradas: normalmente abierta, normalmente cerrada y el común que debe ir energizado desde la fuente de voltaje.

Figura 15

Modulo Relay SSR de 2 canales



Nota. Tomado de: <https://naylampmechatronics.com/>

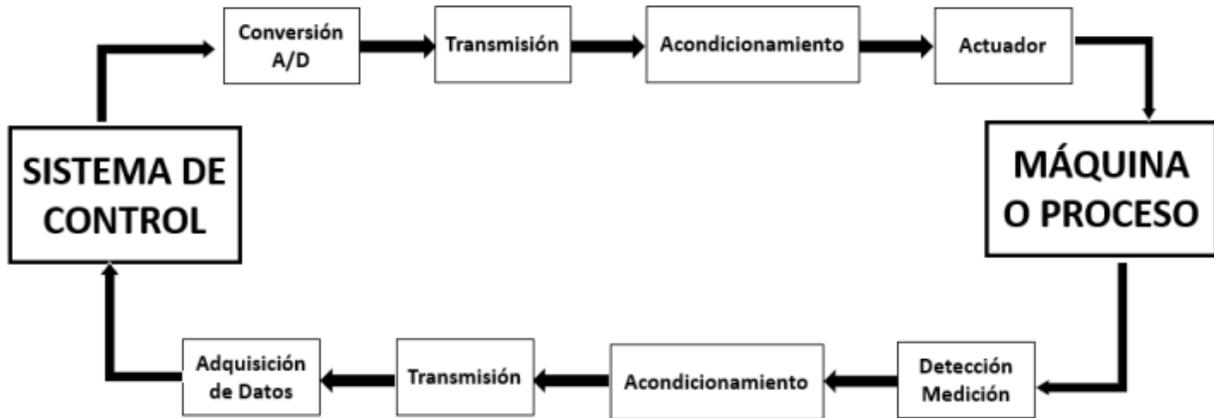
Sistemas de control

Un sistema de control automático es un conjunto de conexiones de dispositivos de diferente tipo, ubicados de tal manera que puedan cumplir con un objetivo determinado y sea capaz de controlarse por sí mismo. Basado en 3 elementos principales: la variable a controlar, el actuador y un punto de referencia. (Ambato & Bravo, 2021)

Se tiene dos tipos de sistemas de control: de lazo abierto, el cual no presenta retroalimentación sobre la variable que se busca controlar, esto significa que la salida es independiente de la entrada. En cambio, cuando se posee información acerca de la variable durante todo el sistema, tenemos un sistema de control de lazo cerrado. Para ello se emplean sensores distribuidos de manera uniforme, para así conseguir que el proceso sea autónomo como se muestra en la Figura 16.

Figura 16

Diagrama de un sistema de control



Nota. Tomado de (Ambato & Bravo, 2021)

Capítulo 3 Diseño

Especificaciones generales del equipo

En referencia con lo establecido por la norma ASTM A255-10 (2014) en la sección 3.1, la prueba consiste en enfriar con agua un extremo de la probeta de 1" de diámetro y medir la respuesta de endurecimiento en función de la distancia desde el extremo enfriado.

El dispositivo deberá sostener la probeta verticalmente de modo que el extremo inferior de la probeta este a ½" por encima del orificio de salida del acople reductor de enfriamiento rápido. Este enfriamiento debe proporcionar una corriente vertical de agua que se pueda controlar su caudal a una altura de 2 ½" y una salida de ½" de diámetro, este chorro de agua será dirigido a una temperatura de 5 a 30°C contra la cara inferior durante no menos de 10 minutos, suministrada con una bomba, además provista de una válvula de apertura rápida.

Especificaciones técnicas y requerimientos del equipo

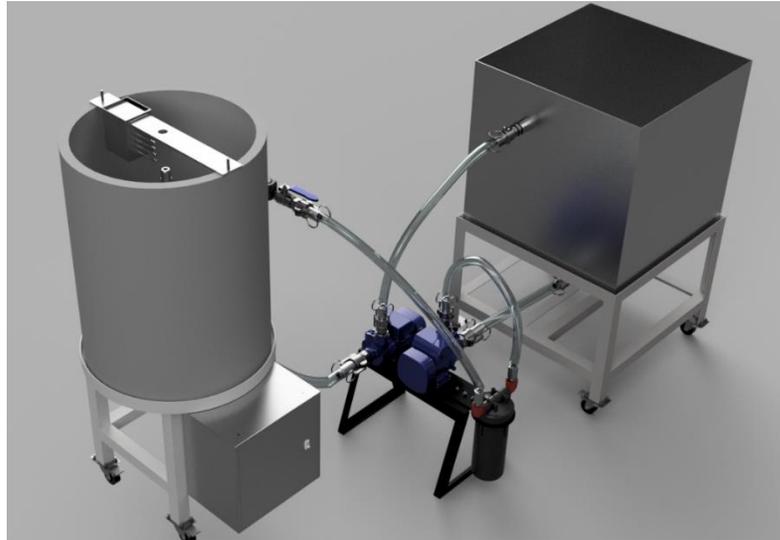
- Bomba ½ HP.
- Tubería AISI 304 para el circuito de alimentación del ensayo.
- Material adecuado para equipos de laboratorio.
- Facilidad de montaje y traslado dentro del laboratorio.
- Facilidad de mantenimiento.
- Condiciones de funcionamiento de tanques a presión atmosférica.
- Dimensionamiento máximo de largo de 1800 mm, ancho de 1200 mm y alto de 1400 mm, en el laboratorio.

Diseño del equipo

El esquema general del equipo representado en la Figura 17, se puede identificar la sección del reservorio, de las bombas, del ensayo y control.

Figura 17

Esquema General del Banco de pruebas para el Ensayo Jominy



Nota. Renderizado realizado en FUSION 360. Fuente propia.

Diseño Mecánico

Reservorio

El tanque reservorio se diseñó de acuerdo a los requerimientos técnicos del laboratorio de Ciencia de los Materiales y los parámetros establecidos en la norma ASTM A255-10, tales como: el volumen necesario para el circuito hidráulico, la selección de material, la geometría del tanque y las condiciones de trabajo del ensayo sometido a presión atmosférica, según estándares de diseño de tanques.

En cuanto al volumen de agua requerido para cumplir con el abastecimiento para el desarrollo de la práctica, el caudal máximo suministrado por la bomba de ½ HP es de 20 L/min y debe ser aplicado durante un tiempo de no menos de 10 minutos, para el enfriamiento completo de la probeta.

$$V = Q_{max} \cdot t \quad (1)$$

Donde:

V = Volumen del tanque, L.

Q_{max} = Caudal máximo suministrado, L/min.

t = tiempo del ensayo máximo, min.

De la ecuación (1) obtenemos un volumen de para el circuito hidráulico de $V = 200 L$.

Para la selección del material, se ha elegido el acero inoxidable AISI 304, el cual es idóneo para trabajos de: conformado mecánico, resistencia a la corrosión, de fácil maquinabilidad y soldabilidad, las propiedades mecánicas de este acero se las puede ver en la Tabla 4. Así como también es muy utilizado en equipos de laboratorio e industria.

Tabla 4

Propiedades mecánicas del AISI 304

Material	Resistencia a la tracción MPa/psi	Límite elástico MPa/psi	Densidad $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Esfuerzo máximo admisible MPa/psi	Módulo de Young MPa/psi
Acero AISI 304	500/72520	293/42496	7930	110/16000	200/2.9x10 ⁷

Nota. Tomado de (Ramadar & Boghdadi, 2020), Propiedades del Acero AISI 304 (p. 8).

La geometría seleccionada para la fabricación del reservorio se determinó de acuerdo a las dimensiones establecidas para la ubicación del equipo dentro del laboratorio, además de la facilidad de abastecimiento de agua al estar a condiciones de presión atmosférica y temperatura ambiente. En la Tabla 5 se presenta las dos alternativas de selección con las características más influyentes para la selección de geometría del reservorio. Por el menor número de planchas utilizadas y mayor facilidad de maquinabilidad y soldabilidad se seleccionó la geometría cubica.

Tabla 5*Características de selección de geometría del reservorio*

Característica/Geometría		Cúbica	Cilíndrica
	Dimensiones	600x600x600	600xø650
	Numero de planchas estimadas	1	2
Procesos de fabricación	Doblado	Si	No
	Barolado	No	Si
	Soldadura	Si	Si
	Maquinabilidad (MB-B-M)	MB	M
	Soldabilidad (MB-B-M)	MB	B

Nota. MB: Muy Bueno; B: Bueno M: Malo.

Se diseño el recipiente de forma rectangular basado en las condiciones ambientales y geométricas del laboratorio, para esto se utilizó la teoría de esfuerzo admisible y deflexión máxima según (Megyesy, 2008), con las ecuaciones 2 y 3. En estas ecuaciones se utilizaron los valores predeterminados de la Tabla 6.

$$t = L \sqrt{\frac{\beta \cdot H \cdot 0.036 \cdot G}{S}} \quad (2)$$

$$y_{max} = \frac{\alpha \cdot 0.036 \cdot G \cdot H \cdot L^4}{E \cdot t_a^4} \quad (3)$$

Donde:

- H = Altura del tanque, in

- L = Longitud del tanque, in.
- E = Modulo de Young, psi.
- G = Gravedad específica, para el agua es igual a 1
- S = Esfuerzo máximo admisible, psi.
- y_{\max} = Máxima deflexión, in.
- t = Espesor requerido, in.
- α, β = Factores que depende de la relación entre la longitud y la altura del tanque, H/L

Parámetros de diseño

- $L=600$ mm= 23.62 in
- $H=600$ mm= 23.62 in

Los factores α, β en función de $H/L=1$, son obtenidos de la Tabla 6.

Tabla 6

Tabla de relaciones para tanques

Relación	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
H/L							
α	0.16	0.26	0.34	0.38	0.43	0.47	0.49

β	0.022	0.043	0.060	0.070	0.078	0.086	0.091
---------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Nota. Tomado de (Megyesy, 2008), de la sección Tanques Rectangulares a presión hidrostática (p. 213).

De la ecuación 2 se calcula el valor del espesor requerido de $t = 0.069 \text{ in} = 1.75 \text{ mm}$, donde obtenemos el espesor adaptado de 2 mm.

Aplicando la ecuación (3) obtenemos una deflexión máxima de $2.51 \times 10^{-5} \text{ in} = 0.00064 \text{ mm}$.

Como $y_{max} < \frac{t_a}{2}$, el espesor adoptado es satisfactorio para la manufactura del tanque.

Para la fabricación del tanque reservorio se seleccionó planchas de Acero AISI 304 de un espesor de 2 mm.

Tanque porta probetas

Para el diseño del tanque porta probetas se consideró parámetros tales como: geometría, selección de material, volumen de agua que será suministrado por la bomba de ½ HP y su cálculo en base a la teoría de resistencia de materiales.

En cuanto a la geometría del tanque, se escogió la alternativa cilíndrica, debido a la facilidad de ejecución del ensayo, ya que se evita el estancamiento de agua en la base, evitando así, la oxidación y alargando la vida útil del equipo. Obteniendo medidas preliminares de 660 mm y un diámetro de 450 mm. El material seleccionado es el mismo con respecto al del reservorio, por las ventajas presentadas anteriormente

El cálculo para determinar el espesor y resistencia se basa en la teoría de recipientes de paredes delgadas según (Beer & Johnston, 2009) con las siguientes ecuaciones:

Se considera un recipiente de pared delgada si:

(4)

$$\frac{R_m}{t} \geq 10$$

$$p = \rho \cdot g \cdot h_T \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{p \cdot r}{t} \quad (6)$$

Donde:

- R_m = Radio del recipiente, m.
- p = Presión hidrostática, N/m².
- σ = esfuerzo permisible, N/m².
- t = Espesor de pared del recipiente, m.
- g = Gravedad, m/s².
- h_T = Altura del tanque, m.
- ρ = Densidad del agua, kg/m³.
- Parámetros de diseño
- $R_m = 0.225$ m
- $t = 0.002$ m
- $h_T = 0.660$ m

De acuerdo a la ecuación 4, verificamos que este caso de estudio es un recipiente de paredes delgadas.

Mediante la ecuación 5 se obtiene la presión hidrostática que es de 6.47×10^3 N/m². Ahora para el cálculo del esfuerzo al que se somete el tanque se utiliza la ecuación 6, con un valor de 728.4×10^3 N/m² que es inferior al esfuerzo admisible del material de 110×10^6 N/m², por lo tanto, se cumple con las condiciones de diseño y soporta la presión hidrostática de trabajo para el tanque.

Por lo anteriormente calculado, se determinó para la fabricación del tanque porta probetas, planchas de Acero AISI 304 de un espesor de 2 mm.

Estructuras de soporte

Para el diseño de las estructuras, se consideró las cargas a las que serán sometidos los soportes, siendo estas, el peso del tanque y el volumen de líquido máximo que cada tanque puede almacenar.

Además, las estructuras están diseñadas con el fin de que puedan ser portables dentro del laboratorio.

Estructura reservorio

Las condiciones de diseño de la estructura del reservorio se establecieron de acuerdo a su geometría y las cargas a las que está sometido el soporte, tales como, el peso del recipiente y el volumen máximo de agua al que puede llegar a almacenar. Se detalla en la Tabla 7 las cargas a las que se somete el reservorio.

Tabla 7

Fuerzas aplicadas por cada componente a la estructura del reservorio

Elemento	Fuerza aplicada [N]
Reservorio	300
Volumen de agua máximo	2120
Total	2420

Nota. El detalle de las fuerzas aplicadas de cada elemento se encuentra en el Anexo E.

Para el análisis estático se aplicó una carga en la superficie de contacto de 3000 N, a continuación, los resultados de la simulación se pueden observar en la Tabla 8. Destacando los resultados de:

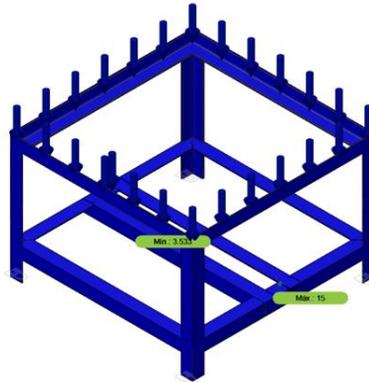
- Factor de seguridad mínimo de 3.53
- Máxima deflexión estructural de 0.3mm
- Esfuerzo máximo obtenido de 58.6 MPa.

Tabla 8

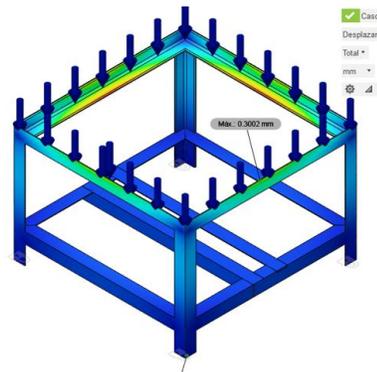
Resultados de la simulación estática para el soporte del tanque del reservorio

Resultado de simulación	Esquema	Gradiente
--------------------------------	----------------	------------------

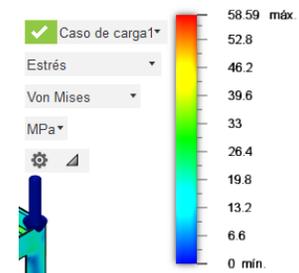
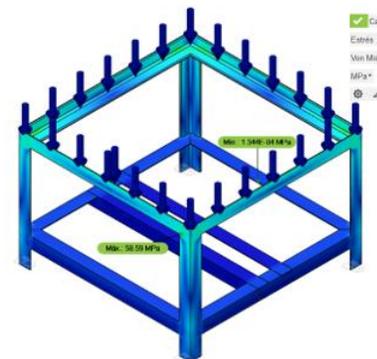
Factor de Seguridad de
la Estructura soporte
del Reservorio



Deflexión de la
Estructura soporte del
Reservorio



Esfuerzos aplicados a la
Estructura soporte del
Reservorio



Estructura tanque porta probetas

Para esta estructura se realizó un estudio estático de acuerdo a la geometría del tanque porta probetas, donde se incluye los pesos de la probeta, porta probetas, peso del recipiente y volumen de

agua al máximo del recipiente, obteniendo los valores de fuerza aplicada en la superficie de contacto del soporte como se ve en la Tabla 9.

Tabla 9

Fuerzas aplicadas por cada componente a la estructura del Tanque porta probetas

Componente	Fuerza aplicada [N]
Tanque porta probetas	515
Volumen de agua máximo	1080
Probeta	5
Porta Probetas	15
Porta Termocuplas	5
Total	1620

Nota. El detalle de las fuerzas aplicadas de cada elemento se encuentra en el Anexo E.

Para el análisis estático se aplicó una carga de 3000 N (por seguridad se analizó la estructura, aplicando el doble de carga aproximadamente) a la superficie de contacto del soporte diseñado, mediante una simulación estática para comprobar su factor de seguridad, deflexión y esfuerzos sometidos, en la Tabla 10 se detallan los resultados obtenidos y dichos valores son:

- Factor de seguridad mínimo de 7.862
- Máxima deflexión estructural de 0.14 mm
- Esfuerzo máximo obtenido de 26.33 MPa.

Tabla 10

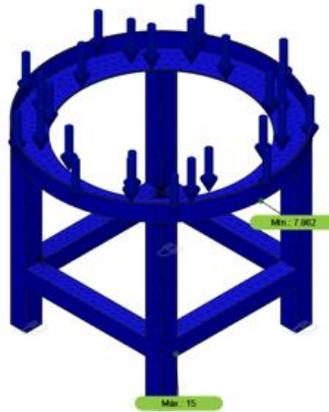
Resultados de la simulación estática para el soporte del tanque porta probetas

Resultado de
simulación

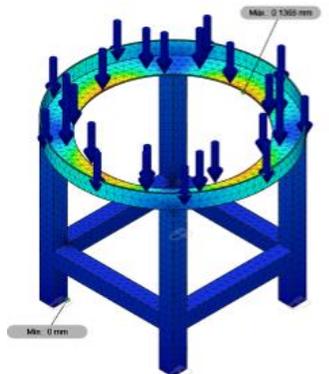
Esquema

Gradiente

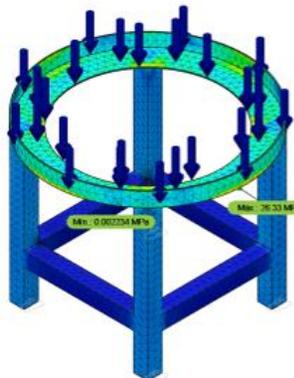
Factor de Seguridad de
la Estructura soporte
del tanque porta
probetas



Deflexión de la
Estructura soporte del
tanque porta probetas



Esfuerzos aplicados a la
Estructura soporte del
tanque porta probetas



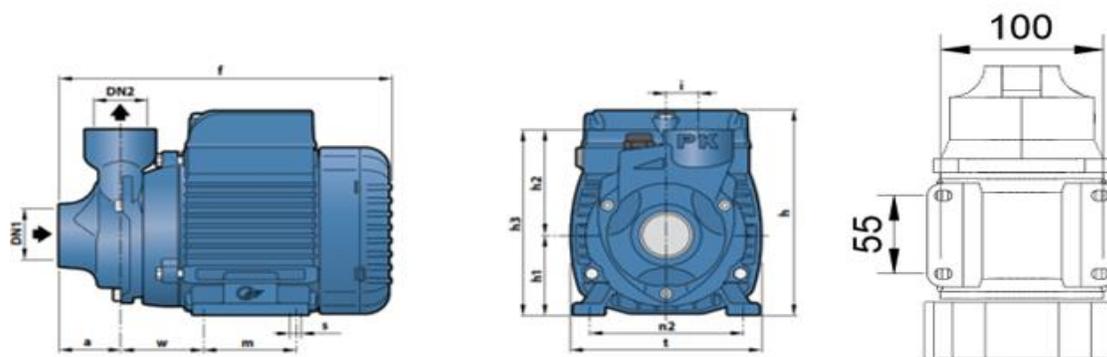
Estructura soporte bombas

La estructura se ha diseñado en base a la geometría y peso de las bombas, además de la geometría del soporte para el filtro de purga del agua. La geometría de la base de las bombas permite ubicar ambas de forma tal que no interfieran en su flujo, ni en el montaje de las mangueras.

El diseño geométrico se basó en la disposición de empernado de las bombas de acuerdo al modelo seleccionado (Información de selección en la sección de diseño hidráulico), que se detalla en la Figura 18 y en la Tabla 11, además de utilizar perfiles tipo L para la manufactura de los soportes de la estructura.

Figura 18

Dimensiones de la Bomba 1/2 HP PKm-60 MD



Nota. Tomado de (Pedrollo, 2020), Hoja Técnica Bomba PKm-60 de ½ HP.

Tabla 11

Dimensiones de la bomba PKm-60

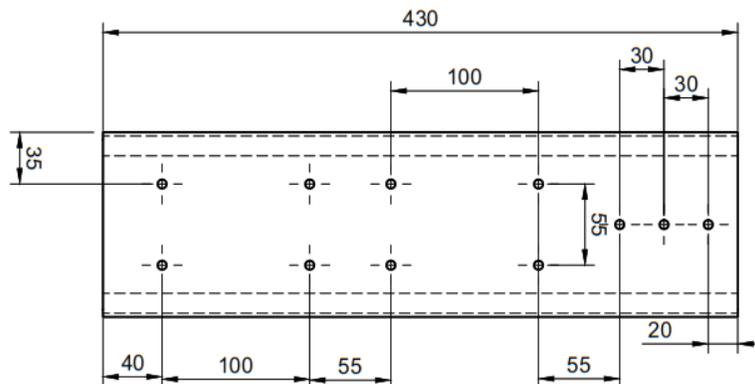
MODELO	BOCAS		Dimensiones mm											
	N1	N2	a	f	h	l	h2	h3	i	m	t	n2	w	s
PKm 60-MD	"	"	8	208	145	56	75	131	20	55	118	94-100	53	7

Nota. Tomado de (Pedrollo, 2020), Hoja Técnica Bomba PKm-60 de ½ HP.

Las dimensiones de la base, fue el factor determinante para el posicionamiento geométrico de las perforaciones en el esquema diseñado conjuntamente con el soporte para el filtro de las bombas. En la Figura 19, se presenta el posicionamiento y perforaciones necesarias, para la ubicación de los componentes:

Figura 19

Dimensiones de la base soporte de bombas y porta filtros.



Nota. Fuente propia

Para verificar que resiste las cargas que ejercen las bombas, filtro y porta filtro, se realizó una simulación de su comportamiento estático frente a dichas fuerzas aplicadas en la superficie del soporte, como se ve en la Tabla 12, con los resultados destacables de:

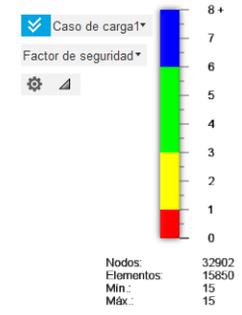
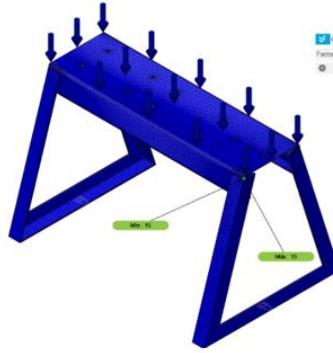
- Factor de seguridad mínimo de 15
- Máxima deflexión estructural de 0.03 mm
- Esfuerzo máximo obtenido de 11.04 MPa.

Tabla 12

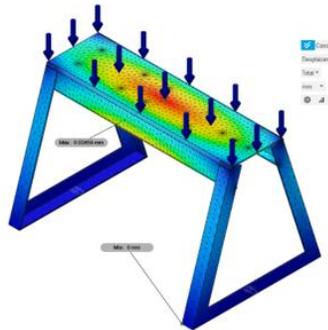
Resultados de la simulación estática para el soporte de bombas

Resultado de simulación	Esquema	Gradiente
--------------------------------	----------------	------------------

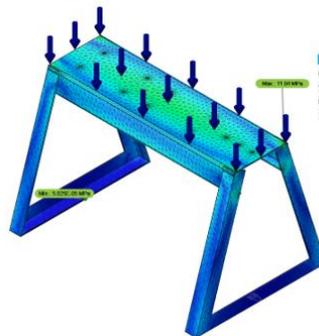
Factor de Seguridad
de la Estructura
soporte de bombas



*Deflexión de
la Estructura soporte
de bombas*



Esfuerzos aplicados a
la Estructura soporte
de bombas



Soporte para filtro

En cuanto al diseño del soporte para el filtro de agua, por su geometría, se dimensionó el elemento de la Figura 21 que se ensambló en el soporte de bombas previamente diseñado. el filtro utilizado en el proyecto se observa en la Figura 20.

Figura 20

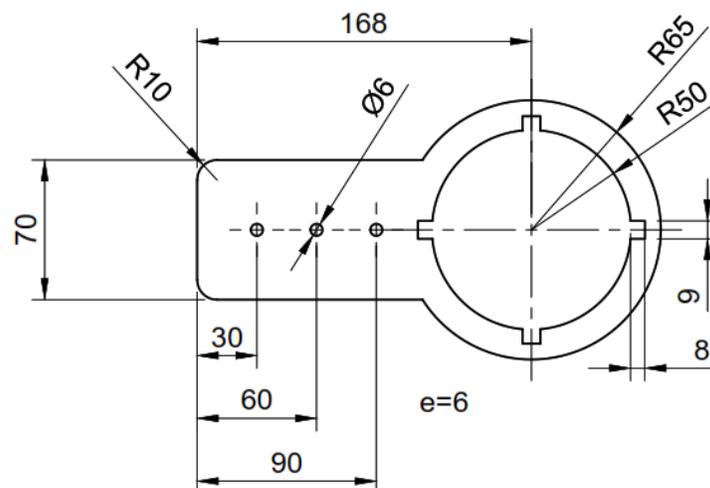
Filtro anti sedimentos Rotoplas para protección de bombas



Nota. Tomado de (Frecuento, 2021)

Figura 21

Dimensiones del soporte del filtro de agua



Nota. Fuente propia

Diseño Hidráulico

Selección Bomba

En base a lo establecido en la norma ASTM A 255, fue necesario el empleo de una bomba periférica con la menor potencia existente en el mercado, por lo tanto, se estableció la búsqueda de una bomba hidráulica de ½ HP. Para la selección de las bombas hidráulicas se tomaron en cuenta los parámetros de la Tabla 13.

Tabla 13

Matriz de decisión de las bombas hidráulicas

Parámetro	Ponderación	Bomba ½ HP	
		Pedrollo	Bomba ½ HP Tritón
Disponibilidad en el mercado	5	5	5
Costo del equipo	5	3	5
Funcionalidad	5	5	4
Prestigio	5	5	3
Total	20	18	17

Después de realizar el análisis pertinente entre las 2 opciones más factibles en el mercado se optó por escoger la bomba periférica de ½ HP de la marca Pedrollo con las características de la Figura 22.

Figura 22

Características Bomba Pedrollo 1/2 HP

ELECTROBOMBA PERIFERICA															
 								<p>Límites de empleo: Temp. del líquido: -10 °C a +60 °C Temp. ambiente hasta +40 °C Altura aspiración hasta 8 m. Funcionamiento continuo S1</p>							
<p>La bomba periférica confiable, fácil de usar y económica. Ideal para la distribución del agua con pequeños tanques de presión, para riego de huertos, jardines, etc. La bomba se debe proteger de factores eléctricos y la intemperie.</p>		<p>Características Tipo Agua: Limpia Aplicación: doméstic o Uso: Superficie</p>			<p>Impulsor en Bronce de acople estriado</p>										
CODIGO ECUAIMCO	MODELO	POTENCIA (HP)	VOLTAJE-FASE	MAX AMP	SUCC / DESC (PULG)	Q ==>	m3/h	0	0.3	1.5	3.0	3.6	4.2	USO	
							lpm	0	5	25	50	60	70		
07731	PKm60-MD	0.5	110V MONOF	6.5				30	29	20.5	9.5	5		GEN	
03896	PKm65	0.75	110V MONOF	11.5	1 x 1	H ==>	m.	55	50	31	8			GEN	
03898	PKm80	1.0	110V MONOF	13.0				70	66	46	22				GEN
03899			220V MONOF	6.5											GEN
03892	PKm100	1.5	220V MONOF	9.0				85	80	60	35	25	15		GEN

Nota. Tomado de (Pedrollo, 2020)

Selección de accesorios

Según un diseño preliminar presentado en la Figura 23, fue necesario utilizar ciertos accesorios tales como:

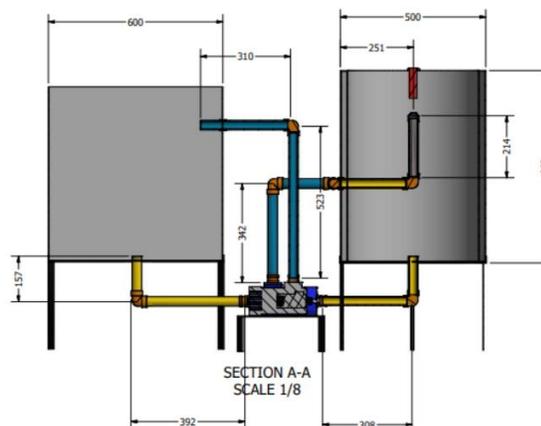
- Codo soldable ¾"
- Codo roscable ¾"
- Válvula de Bola de ¾"
- 2 codos roscables de 1"
- 3 válvulas de bola de 1"
- 3 reductores de 1" a ¾"

Todos estos accesorios de acero inoxidable AISI 304 por los requerimientos del equipo de prueba: Es un equipo de laboratorio, sometido a condiciones ambiente y constante exposición al agua.

Selección del sistema de tubería

Figura 23

Diseño preliminar



Nota. Fuente propia

Tabla 14

Matriz de decisión sistema hidráulico

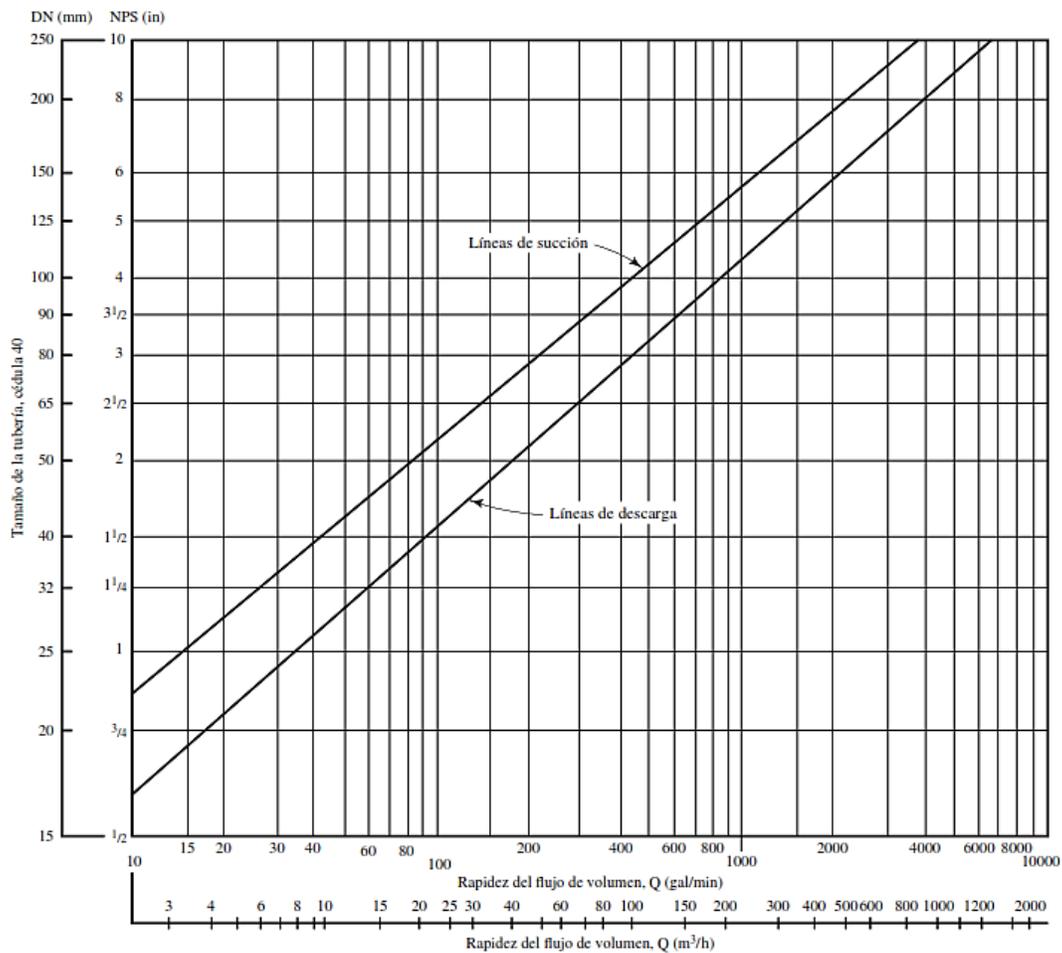
Parámetro	Ponderación	Tubería PVC	Mangueras Hidráulicas
Disponibilidad en el mercado	5	5	4
Costo del equipo	5	5	3
Funcionalidad	5	4	5
Vida útil	5	3	5
Portabilidad	5	3	5
Desmontaje	5	3	5
Total	30	23	27

El primer diseño fue previsto con un sistema de tuberías PVC, pero la condición principal del proyecto requería que el equipo sea de fácil movilidad y portabilidad, debido a esto, con un sistema rígido de tuberías se presentarían problemas a la hora de la movilización y desunión de los sistemas. Por lo tanto, se optó por la elección de un sistema de mangueras hidráulicas, según la Tabla 14.

Para la sección del interior del tanque circular; al estar expuesto directamente a la acción del agua residual del ensayo es necesario que la sección de tubería sea fija y sea de acero inoxidable AISI 304, la cual fue seleccionada en base al diagrama de la Figura 24.

Figura 24

Diagrama para selección de tamaño de tubería



Nota. Tomado de (Mott, 2006)

El caudal requerido para el equipo tiene un valor de 2.2412 gal/min, y debido a que en la gráfica de la Figura 24 el mínimo es de 10 gal/min, se escogió las siguientes tuberías:

- Línea de succión: 1"
- Línea de descarga 3/4"

Cálculo de la tobera de reducción

Dado que el diámetro de la tubería de descarga es de 3/4" se realizó una reducción con una tobera, la cual se diseñó en base a la altura del chorro, conicidad, fricción, etc. Para una tubería de 3/4" las dimensiones se especifican en la Figura 25.

Figura 25

Dimensiones tubería de acero AISI 304"

TUBO REDONDO INOXIDABLE 304 ACABADO N4 PULIDO 6 MTS				
DIMENSIONES			PROPIEDADES	
plg	mm	ESPESOR mm	PESO Kg/mt	PESO Kg/6mt
3/4"	19,1	1	0,45	2,71
3/4"	19,1	1,2	0,54	3,21
3/4"	19,1	1,5	0,66	3,95
3/4"	19,1	2	0,85	5,11

Nota. Tomado de www.ImportAceros.com

En este caso se seleccionó una tubería de 1 mm de espesor

- Diámetro exterior: 19.1 mm
- Diámetro interior: 18.1 mm

Los datos iniciales de cálculo son:

- Diámetro de entrada de la tobera (D_{tobera}): 18.1mm
- Diámetro de salida de la tobera (d_{tobera}): 12.7 mm (Norma ASTM A 255)

Conicidad de la tobera

Para el diseño de la tobera de reducción se analiza como un conducto de contracción suave, para lo cual el grado de conicidad se determina en las ecuaciones 7 y 8.

$$k = \frac{L}{(D_{tobera} - d_{tobera})} = \frac{1}{2 \cdot \text{tg}(\theta)} \quad (7)$$

Donde:

k : Grado de conicidad de la boquilla

θ : Abertura del cono.

L : Longitud de la boquilla (25.4mm)

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{D_{tobera} - d_{tobera}}{2L}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (8)$$

$$\theta = 6.068^\circ$$

Selección de Mangueras Hidráulicas

En base a los requerimientos del fabricante de la bomba periférica, en lo que respecta a línea de succión es necesario que la manguera sea del mismo diámetro que la bomba, por lo tanto, para esta línea se seleccionó manguera de 1" de diámetro.

Para la línea de descarga se seleccionó mangueras de ¾", debido a que con este diámetro se redujo el número de accesorios que se planteó en un inicio utilizar con mangueras de ½" seleccionadas en base a (Parker, 2018). Y a su vez se redujo la caída de presión en el sistema, provocado por el cambio de sección en la salida de la bomba de 1" de diámetro.

Selección Filtro

El empleo de un filtro de sedimentos para agua es necesario en el proyecto debido a las impurezas presentes en el agua, evitando así elementos extraños que puedan afectar la medición del caudalímetro.

Tabla 15

Matriz de decisión Filtro

Parámetro	Ponderación	Filtro Rotoplas	Filtro	Filtro Filtropur
		FES-01	Hydronix	
Disponibilidad en el mercado	5	5	4	4
Costo del equipo	5	5	3	4
Funcionalidad	5	4	5	4
Filtrado	5	4	5	4
Portabilidad	5	5	5	5
Desmontaje	5	5	4	5
Total	30	28	26	26

Después del análisis de la Tabla 15 se determinó que el filtro Rotoplas con cartucho de repuesto FES-01R es la mejor opción

Selección de Caudalímetro

Para el ensayo se requiere de un caudalímetro a la entrada de la tubería del tanque porta probetas para determinar el caudal de flujo que entra y golpea a la probeta.

Tabla 16*Matriz de decisión para el caudalímetro*

Parámetro	Ponderación	Caudalímetro	Caudalímetro	Caudalímetro
		FS 300A	Signet 38512	Fischer Rotor-X
Disponibilidad en el mercado	5	5	3	4
Costo del equipo	5	5	3	2
Funcionalidad	5	4	5	5
Programación	5	5	3	3
Precisión	5	3	5	5
Montaje	5	5	3	4
Total	30	27	22	23

Se determinó en la Tabla 16 que el mejor elemento para el equipo para medición de caudal en el Banco de pruebas para ensayo Jominy es el caudalímetro FS 300 A.

Diseño del sistema de adquisición de datos

Mediante la adquisición de datos podemos procesar fenómenos físicos como datos en tiempo real, ciertos fenómenos como: temperatura, presión, voltaje, caudal, etc. Todo proceso de adquisición de datos inicia con una señal de entrada, la cual es leída por un sensor y transformada mediante un transductor o microprocesador para ser procesada y mostrada en una interfaz gráfica, empleando cualquier HMI requerido.

Los factores más importantes para la selección de los componentes del sistema de adquisición de datos son: presupuesto, factibilidad, número de datos, variables o procesos a automatizar. Para esto

se consideraron algunas alternativas disponibles en el mercado y se realizó una matriz de decisión de la tarjeta de adquisición de datos en base a los siguientes parámetros:

- Mínimo 22 salidas digitales
- Alimentación de 5-24 V DC

Entre las alternativas que cumplen con estos requisitos se tiene:

- Microprocesador Arduino Mega2560
- DAQ NI USB-6009

Tabla 17

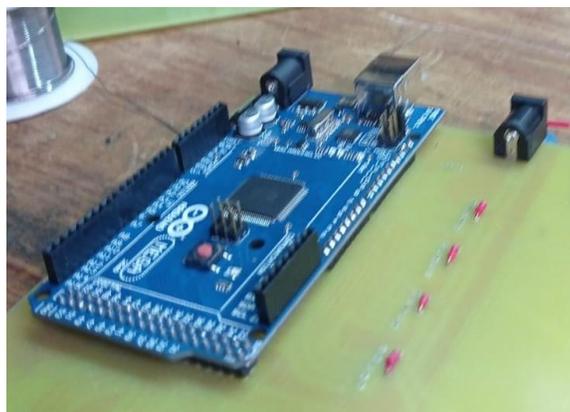
Matriz de decisión Tarjeta de adquisición de datos

Parámetro	Ponderación	Arduino Mega	DAQ NI USB-
		2560	6009
Disponibilidad en el mercado	5	5	4
Costo del equipo	5	5	3
Funcionalidad	5	5	5
Programación	5	5	3
Manejo de datos	5	4	5
Total	25	24	20

Una vez determinadas todas las variables y el análisis respectivo visto en la Tabla 17, la mejor opción por la facilidad de manejo de datos, costo y disponibilidad en el mercado es, el Arduino Mega2560, el cual se observa en la Figura 26.

Figura 26

Placa Arduino instalada en la placa



Nota. Fuente propia

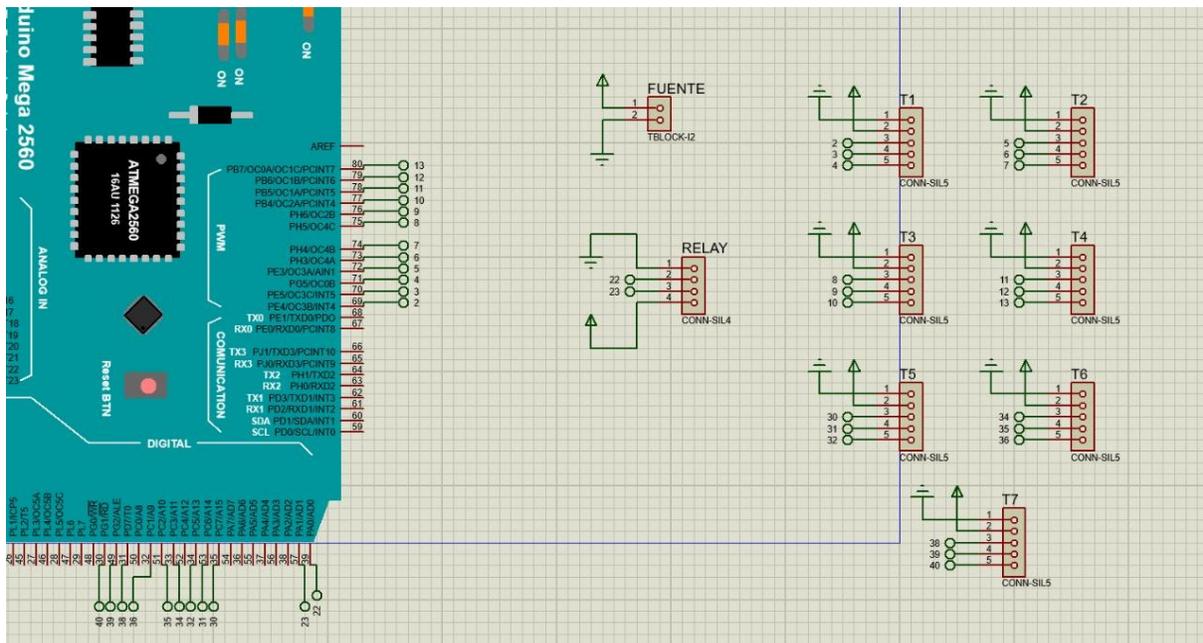
Diseño de placa

En la Figura 27 podemos encontrar el esquema de conexión de la placa del circuito, y en la Figura 28 se puede ver el resultado físico del circuito descrito, para una lectura más descriptiva se tiene en el Anexo C se tiene información tabulada acerca de las conexiones de cada termocupla y relay, Los elementos que componen la placa son:

1. Jack DC: utilizado para la alimentación individual de los componentes exceptuando el Arduino.
2. 7 módulos MAX 6675
3. Módulo Relay SSR 2 canales

Figura 27

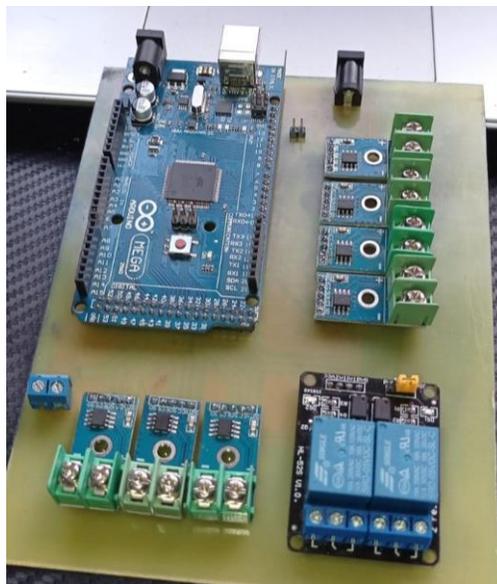
Diseño de placa en Proteus 8



Nota. Fuente propia

Figura 28

Instalación de componentes en la placa



Nota. Fuente propia

Diseño del sistema de control

Relés de control

Para la automatización y control de las 2 bombas periféricas fue necesario usar un módulo Relay SSR de 2 canales para controlar independientemente cada bomba, ya que directamente las salidas de Arduino no permiten controlar cargas de fuerza que consuman corriente excesiva para el controlador.

Se empleó un módulo marca SONGLE SSR 2 canales como se muestra en la Figura 29.

Figura 29

Módulo de Relay SSR 2 canales



Nota. El módulo de Relay se activa en LOW. Fuente propia

Contadores

Se utilizaron 2 contactores bifásicos de fuerza para poder proteger a las bombas y manejar de mejor manera la comunicación entre el circuito de control y el de fuerza.

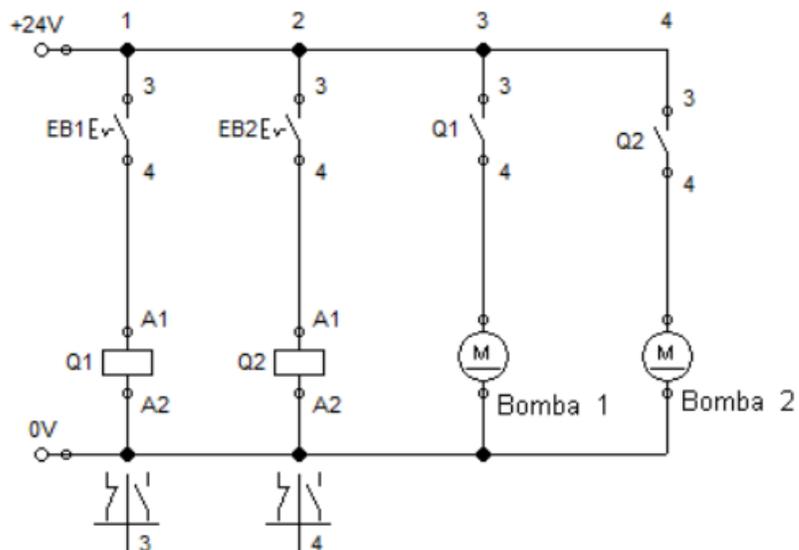
Se emplearon 2 contactores marca EBASEE modelo EBSK1, Figura 30. Para controlar individualmente cada bomba, en el cual cada uno posee su codificación descrita en la Tabla 18, para la conexión a su respectiva bomba. El esquema eléctrico realizado con los contactores se puede observar en la Figura 31.

Figura 30*Disposición contactores en el tablero**Nota.* Fuente propia**Tabla 18***Identificación de contactores*

Símbolo	Especificación
Q1	Contactador de la Bomba 1
Q2	Contactador de la Bomba 2

Figura 31

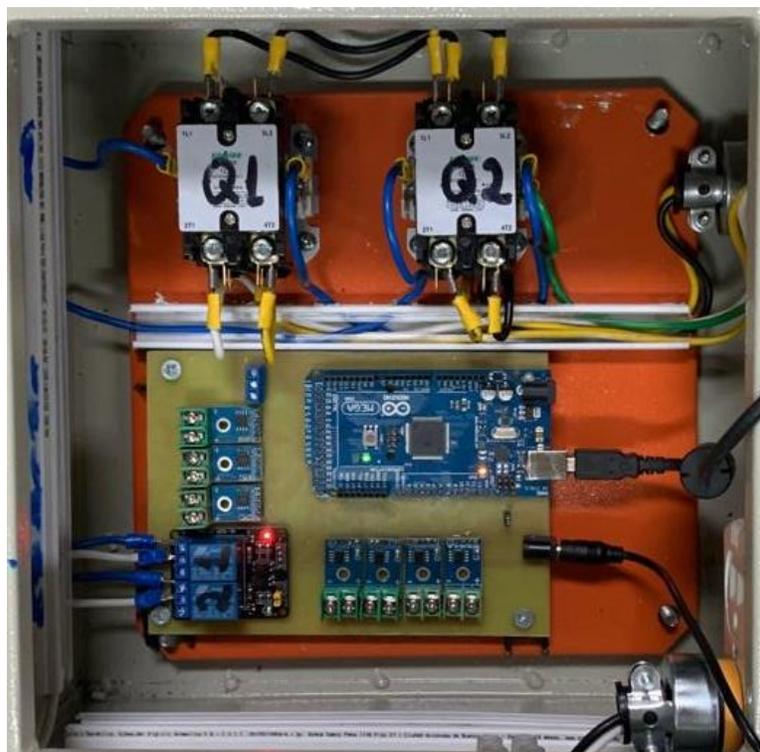
Diagrama del circuito eléctrico



Nota. Fuente propia

Diseño Armario eléctrico

En base a los elementos necesarios ya seleccionados y adquiridos se realizó un dimensionamiento en el cual se escogió un armario eléctrico de dimensiones: 30 x 30 x 20 cm. En donde como se observa en la Figura 32 entraron los componentes necesarios para controlar todo el equipo del ensayo, además en la Tabla 19 se tiene una codificación de cada elemento eléctrico.

Figura 32*Tablero eléctrico final**Nota.* Fuente propia**Tabla 19***Listado de elementos en el tablero eléctrico*

Símbolo	Componente
Q1	Contactor de la Bomba 1
Q2	Contactor de la Bomba 2
1	Relé de activación bomba 1
2	Relé de activación bomba
T1	Módulo de termocupla 1
T2	Módulo de termocupla 2

T3	Módulo de termocupla 3
T4	Módulo de termocupla 4
T5	Módulo de termocupla 5
T6	Módulo de termocupla 6
T7	Módulo de termocupla 7
FV1	Fuente de voltaje 5V
FV2	Fuente de voltaje 110V
A1	Arduino Mega 2560

Instrumentación

Sensores de temperatura – Termocuplas tipo K

Para las condiciones presentadas en el proyecto se emplearon termocuplas tipo K como se ve en la Figura 33, las cuales cumplían con los requisitos de temperatura máxima de trabajo, apreciación y costo q se describen en la Tabla 20

Figura 33

Termocupla tipo K



Nota. Fuente propia

Tabla 20*Características Termocupla tipo K*

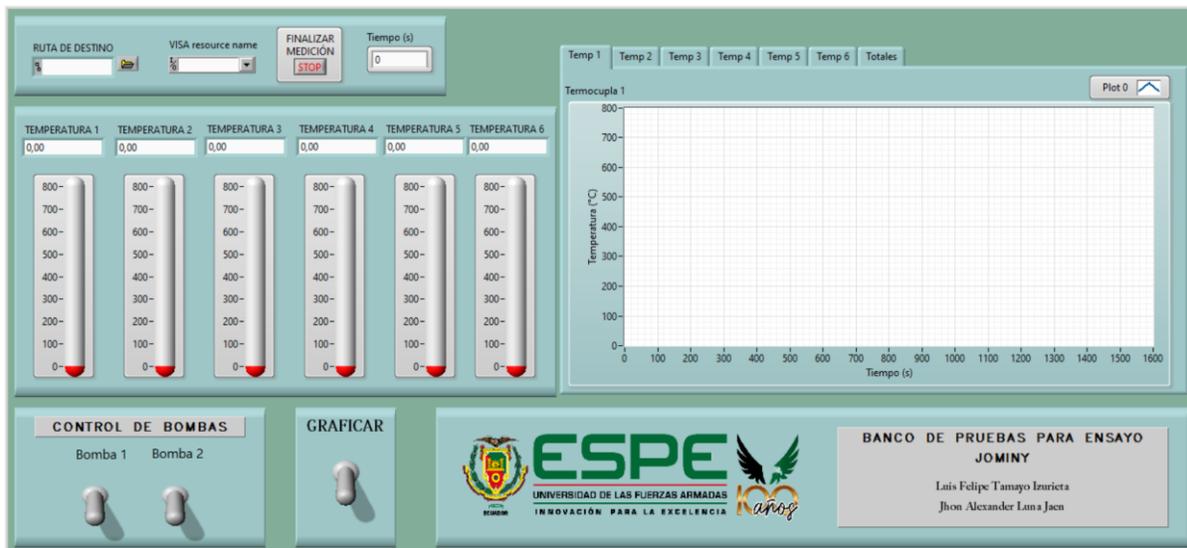
Características	Descripción
Marca	LZONE – CGQ01
Color	Plateado
Material	Inconel 600
Tamaño	0.6 x 7.5 mm
Largo total	2000 mm
Adaptador	1/8 NPT
Temperatura máxima de trabajo	1000 °C
Apreciación	0.25 °C

Interfaz gráfica

Para la obtención de los datos se empleó la interfaz gráfica LabVIEW, en la cual se diseñó el HMI con todos los parámetros de cálculo y control necesarios para el desarrollo del proyecto, en la Figura 34 se observa la interfaz gráfica utilizada, cuyo funcionamiento completo se puede revisar en el Anexo B de manual de usuario.

Figura 34

Menú HMI



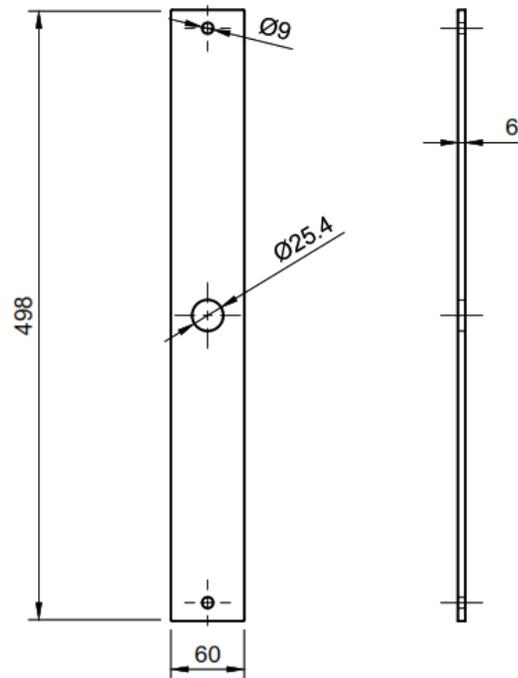
Nota. Fuente propia

Diseño del portatermocuplas

Para el dimensionamiento y ubicación del cajón porta termocuplas se consideró la geometría de la termocupla y la probeta del ensayo, además de la guía en donde esta fue ubicada, que estará sujeta al tanque mediante dos espárragos guías, con las dimensiones que se especifican a continuación en la Figura 35.

Figura 35

Dimensiones de la porta probetas

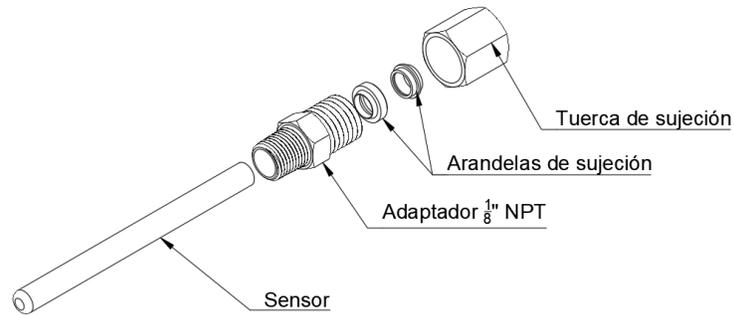


Nota. Fuente propia

El dimensionamiento de la porta probetas se desarrolló con respecto a la recomendación de la norma ASTM A255-10 donde se especifica el diámetro de 25.4 mm para colocar la probeta después de que esta haya sido calentada hasta la temperatura de austenización. Este componente servirá como carril guía para la porta termocuplas. La caja porta termocuplas está dividida en los elementos descritos en las Figuras 36 y 37.

Figura 36

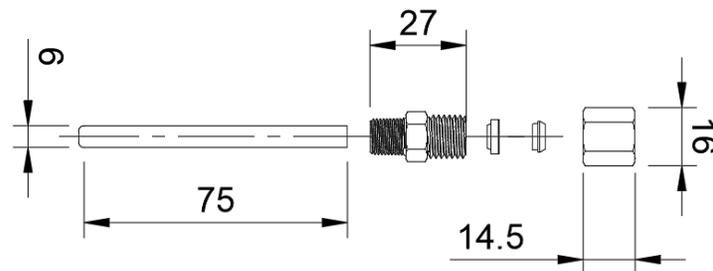
Partes de la Termocupla Tipo K 1/8" NPT



Nota. El esquema de la termocupla fue realizado en FUSION 360. Fuente propia

Figura 37

Dimensiones de los elementos de la termocupla

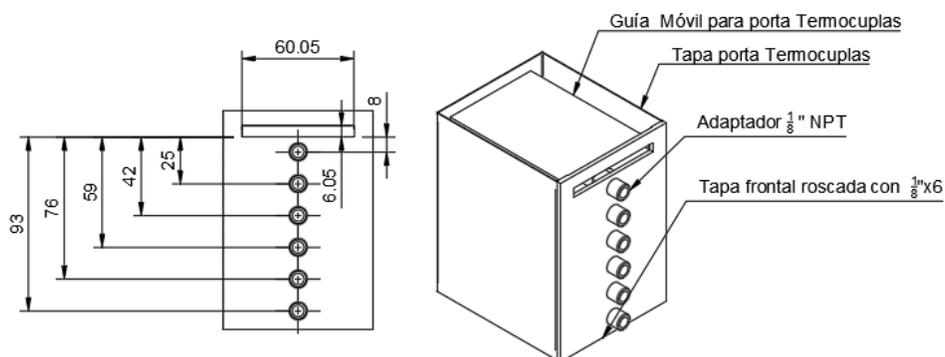


Nota. Fuente propia

Las dimensiones y la geometría de las termocuplas determinaron que para el ensayo se puede instalar 6 sensores en contacto directo con la probeta como se muestra en la Figura 38, además se detallan los elementos que interfieren en el contacto de las termocuplas con la probeta.

Figura 38

Partes y dimensiones de la Porta Termocuplas

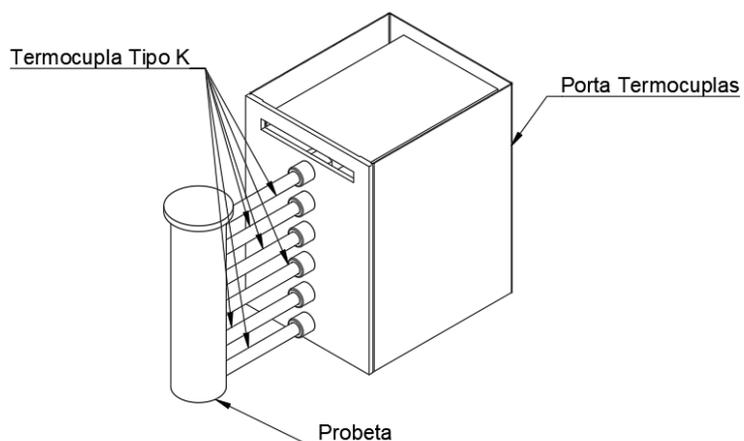


Nota. Fuente propia

El ensamble del portatermocuplas se diseñó para tener contacto seguro con la probeta, este se da a partir de la sujeción de la termocupla con el sistema de adaptador de 1/8" NPT y la rosca de sujeción hacia la tapa frontal conjuntamente con las termocuplas, haciendo contacto con la probeta mediante la guía móvil que recorre longitudinalmente el portaprobetas como se observa en la Figura 39.

Figura 39

Detalle de Sistema de contacto Termocuplas-Probeta



Nota. Fuente propia

Metodología

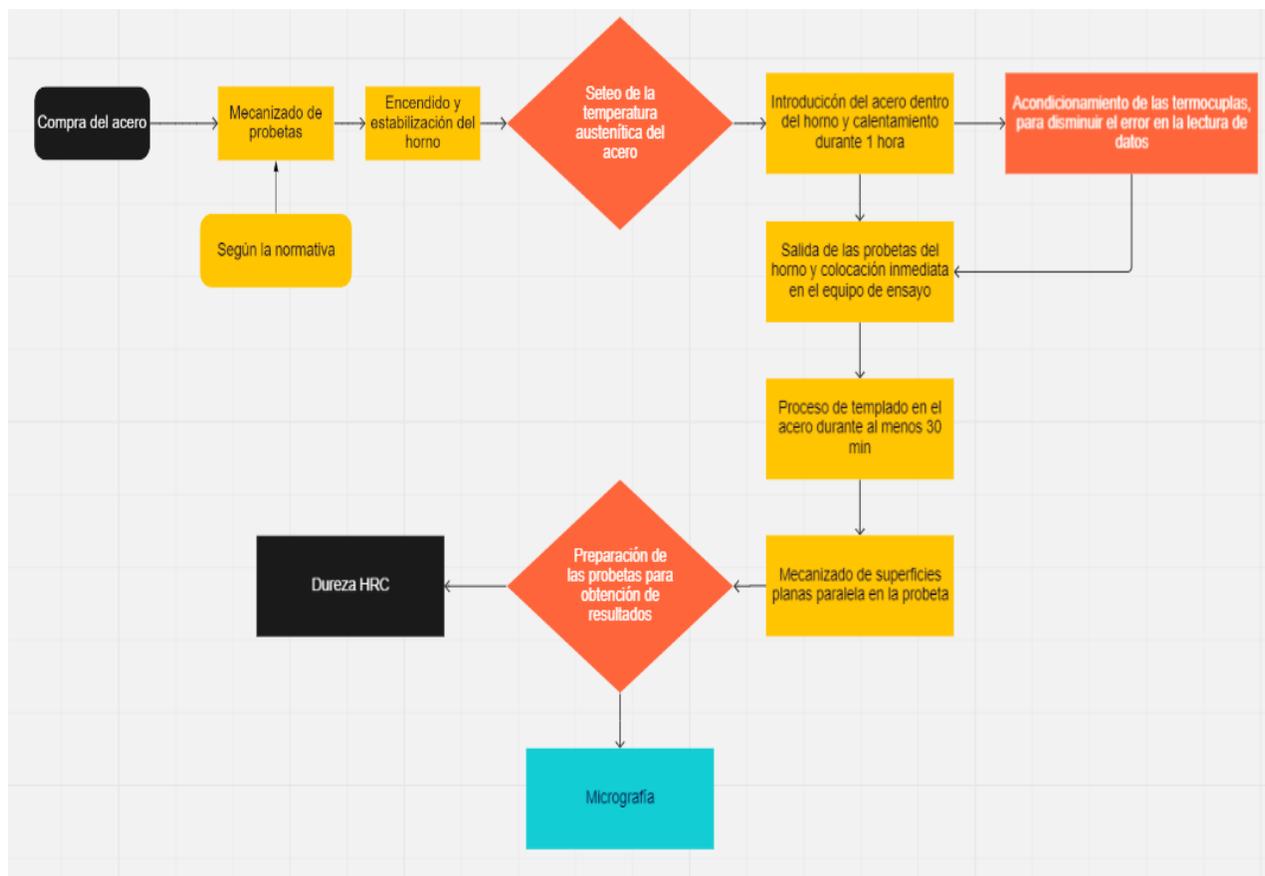
Ensayo Jominy de los aceros AISI 4340, AISI 1045

El procedimiento para el ensayo Jominy es el mismo independientemente del acero a ensayar, en la Figura 40 se observa un flujograma del proceso del ensayo, además se detallan las etapas del proceso:

- Se mecanizaron los ejes en base a las dimensiones normalizadas establecidas.
- Se calentó las probetas en la mufla hasta la temperatura de austenización, para el Acero 4340 se lo llevó a una temperatura de 870 °C y al acero 1045 a 925 °C, durante 1 hora y media aproximadamente.
- Se acondicionaron las termocuplas y una vez a una temperatura estable se procedió a ubicar el portatermocuplas y la probeta para iniciar el temple.
- Una vez templada la probeta se rectificaron dos caras separadas 180° a una profundidad de 0.45mm, luego de esto se procedió a lijar la zona para lograr una superficie completamente plana para el ensayo de dureza.
- Se tomaron mediciones de dureza a lo largo de la probeta y sus respectivas lecturas en base a la norma.

Figura 40

Proceso del ensayo Jominy



Nota. Fuente propia

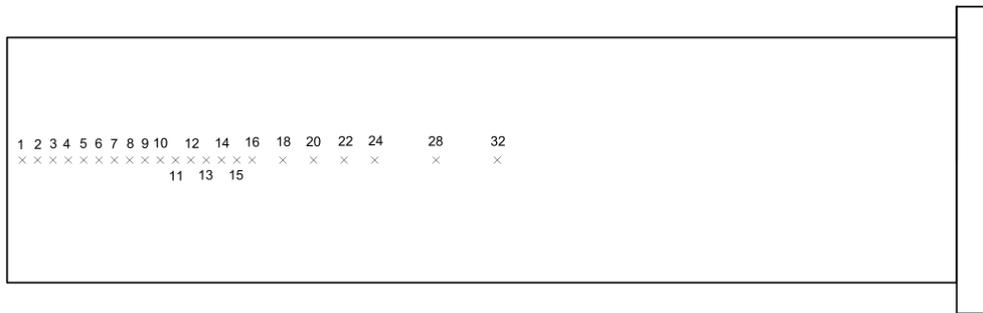
Medición de dureza Rockwell en base a la Norma ASTM E18-15

Esta norma describe los métodos de prueba estándar para dureza Rockwell de materiales metálicos. En base a los parámetros de la norma, al tratarse de 2 aceros templados se procedió a utilizar la escala de dureza Rockwell “C”. (ASTM International, 2016) y se tomaron los datos en base al procedimiento explicado en la norma adjuntada en anexos.

Se tomaron mediciones de dureza como explica la norma ASTM A 255-10, cada 1/16 de pulgada como se observa en la Figura 41, a lo largo de la primera pulgada y después a los 18,20,22,24,28, y 32 dieciseisavos de pulgada.

Figura 41

Medidas de dureza en la probeta Jominy



Nota. Fuente propia

Capítulo 4 Análisis de Resultados

Una vez concluidas las fases de construcción y diseño del banco de pruebas para ensayo Jominy, se procedió a realizar las respectivas pruebas de funcionamiento para comprobar los parámetros escogidos en el capítulo 3. Se realizaron pruebas con 3 probetas de cada acero escogido, los cuales fueron: SAE 1045 y 4340. En las cuales se realizaron comparativas de curvas de enfriamiento, templabilidad experimental y teórica.

Acero AISI 4340

Dureza experimental

Los valores de dureza obtenidos en la probeta AISI 4340 se describen en la Tabla 21.

Tabla 21

Datos de dureza experimental acero AISI 4340

Punto	Distancia (in)	Dureza Rockwell (HRC)			
		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
1	1/16	54	56	56	55.33
2	2/16	53	55	56	54.67
3	3/16	52	55	54	53.67
4	4/16	52	54	53	53
5	5/16	52	54	52	52.67
6	6/16	51	54	53	52.67
7	7/16	50	53	53	52
8	8/16	50	53	53	52
9	9/16	49	52	52	51
10	10/16	49	52	51	50.67

11	11/16	48	51	51	50
12	12/16	48	50	50	49.33
13	13/16	46	49	50	48.33
14	14/16	44	48	49	47
15	15/16	44	46	49	46.33
16	16/16	43	45	49	45.67
17	18/16	42	43	48	44.33
18	20/16	41	40	48	43
19	22/16	38	39	47	41.33
20	24/16	35	37	46	39.33
21	28/16	32	33	43	36
22	32/16	32	32	36	33.33

Dureza teórica

Se puede obtener el valor de dureza de la martensita ya que se encuentra directamente relacionado con el contenido de carbono presente en el acero. Con la finalidad de comparar la dureza teórica de la martensita con la práctica se procedió a realizar los cálculos respectivos para la probeta de acero AISI 4340.

Con la ecuación 9 se puede obtener la dureza de la martensita para aceros con contenido de carbono menor a 0.6%. (Fosca, 2007)

$$HRC = 60 * \sqrt{\%C} + 20 \quad (9)$$

Donde:

HRC: Dureza Rockwell escala "C"

%C: Porcentaje de carbono presente en el acero

Reemplazando datos, se tiene:

$$\%C = 0.38 - 0.43 = 0.405\%$$

$$HRC = 60 * \sqrt{0.405} + 20$$

$$HRC = 58 \text{ HRC}$$

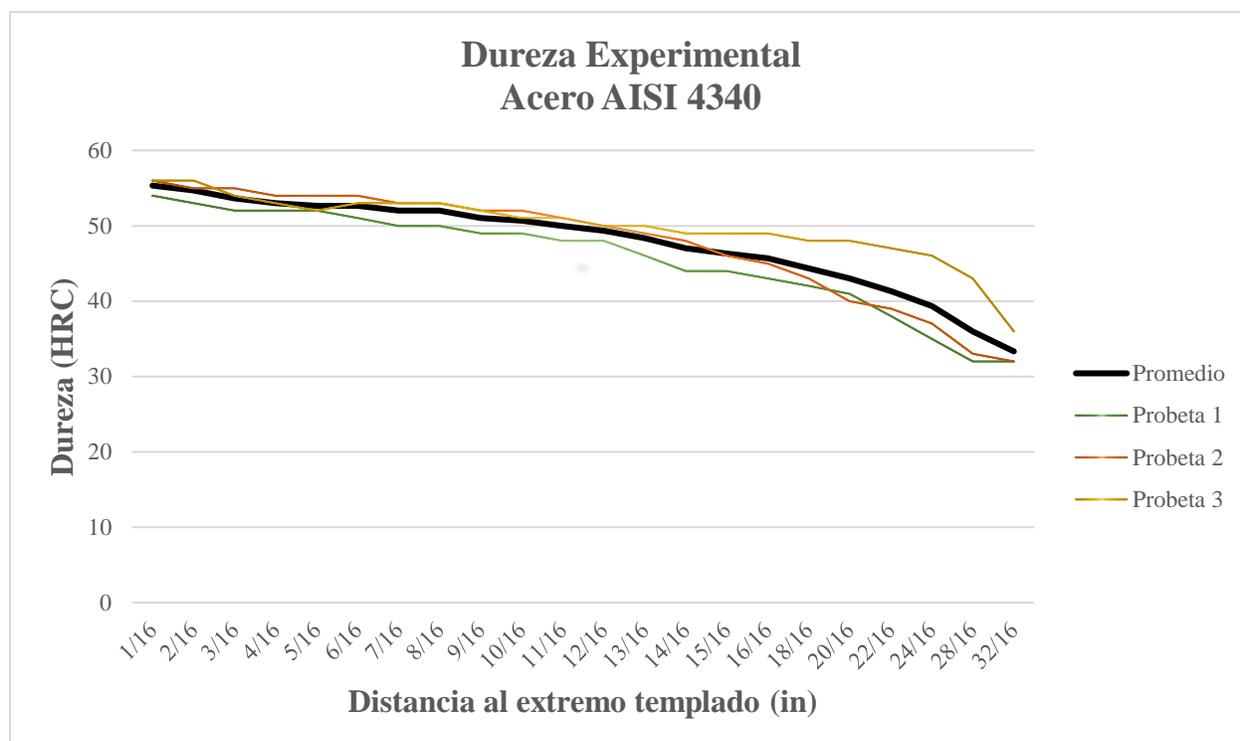
En comparativa la dureza teórica se encuentra muy próxima a la dureza práctica con una diferencia de 2.7 HRC.

Curvas de templabilidad acero AISI 4340

Al graficar el promedio de los puntos obtenidos en las 3 probetas se tiene la Figura 42 en donde se observa la curva promedio de dureza en color negro.

Figura 42

Gráfica comparativa templabilidad acero AISI 4340



Nota. Fuente propia

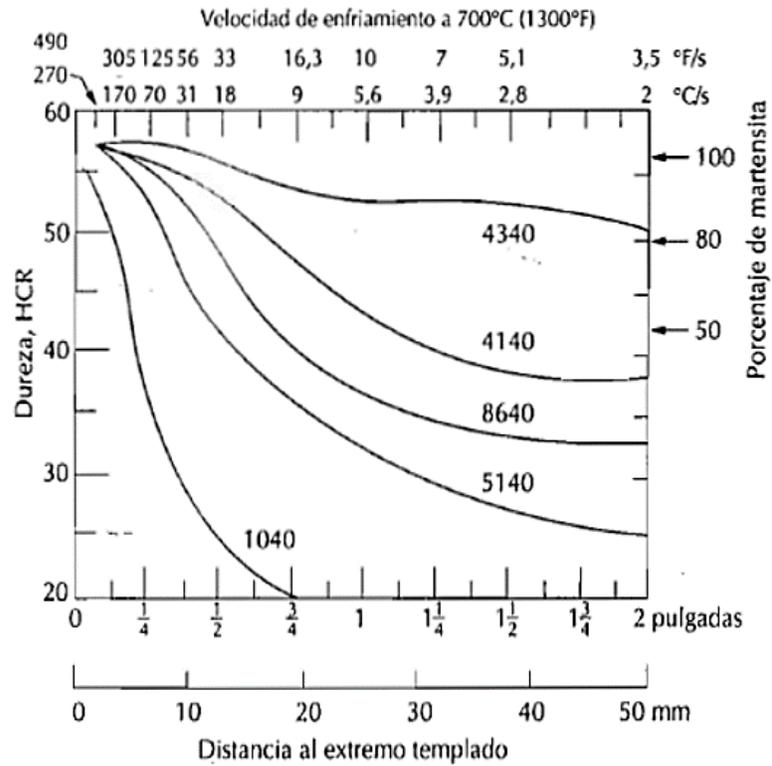
En la Figura 42, se puede observar que para la probeta de acero AISI 4340, el valor máximo promedio de dureza es 55 HRC y el mínimo 33 HRC. Durante la primera pulgada se tiene una tendencia constante, mientras que en los últimos valores se tiene saltos más significativos.

Comparación de curvas de templabilidad teórica y experimental

En referente a lo que dice (Callister, 2020), cada acero posee una variación en sus curvas de templabilidad debido a los procesos de producción. Por ende, se presenta una curva estimada en base al acero AISI 4340 y su porcentaje aproximado obtenido de martensita después del temple.

Figura 43

Curva de templabilidad teórica acero AISI 4340

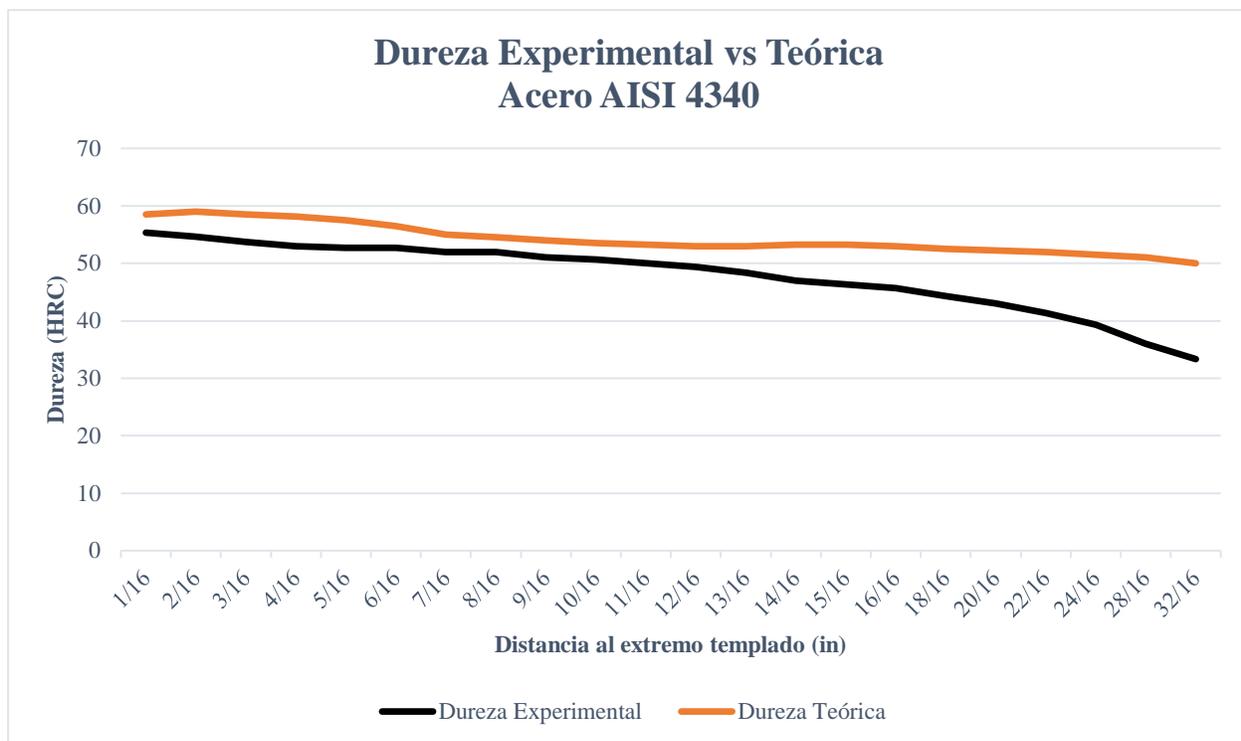


Nota. Tomado de (Callister, 2020)

Para poder constatar la funcionalidad del equipo banco de pruebas para ensayo Jominy, se debe proceder a realizar la comparación entre la curva experimental obtenida y la curva teórica del acero AISI 4340 de la Figura 43 y verificar que ambas se ajusten sin mayor diferencia.

Figura 44

Comparación de curvas experimental vs teórica - AISI 4340



Nota. Fuente propia

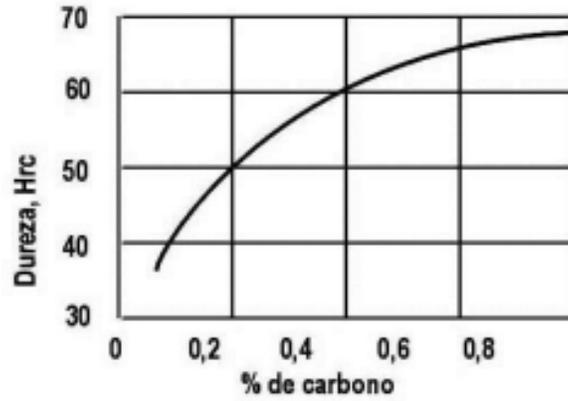
Análisis

Como primer punto de análisis en la Figura 44 se observa que la curva experimental obtenida en base a los parámetros establecidos en la norma ASTM A 255-10, se ajusta y sigue la misma tendencia que la curva teórica.

Como segundo punto de análisis, se puede observar que los valores obtenidos son menores a los teóricos, en el primer punto en la probeta ensayada el valor de dureza es de 55 HRC, mientras que el teórico es de aproximadamente 58 HRC. Esto se debe a las condiciones del ensayo, entre las cuales se vio afectada la temperatura de inicio del temple, el espacio para el ensayo no es completamente cerrado y por último la composición química de la probeta, al no poder constatar exactamente el valor de contenido de carbono, es muy probable que la probeta ensayada posea menor contenido de carbono que el valor expuesto en la bibliografía (0.4%), por lo tanto como se expone en la Figura 45, a mayor contenido de carbono mayor será el valor de dureza.

Figura 45

Variación de la dureza HRC en base al contenido de carbono

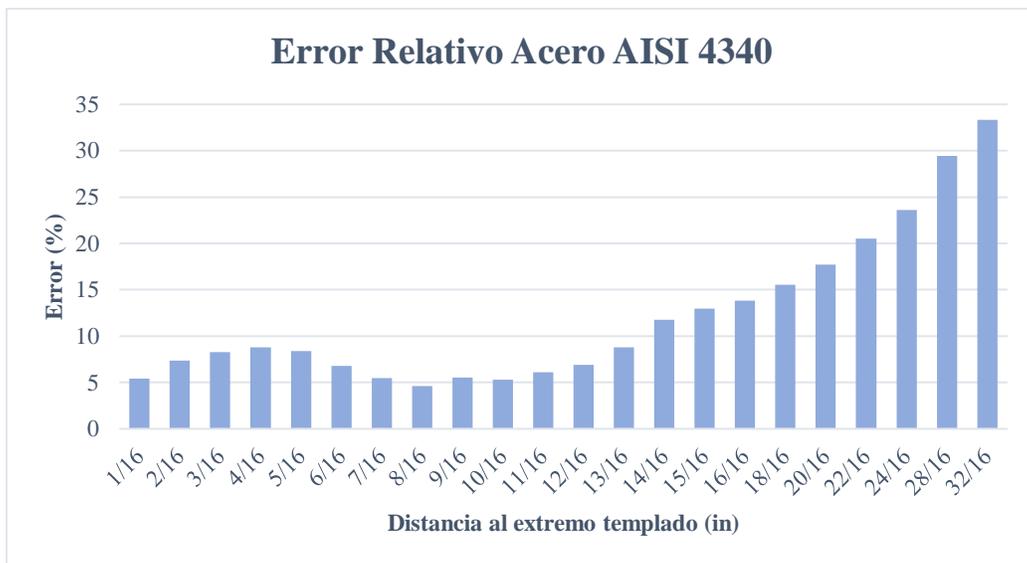


Nota. Extraído de (Lefevre, 2020)

Teoría de errores

Figura 46

Error porcentual de la dureza en el Acero AISI 4340



Nota. Fuente propia

En la Figura 46, durante los primeros 13/16 de pulgada el error al no superar el 10% no representa un error significativo. A partir de los 14/16 de pulgada se tiene error que superan el 10% y

van hasta el 33%, esto se debe a la condición de enfriamiento de la probeta, ya que en el ensayo, el fluido para el temple estaba en la condición superior de temperatura y esto se vio reflejado en el tiempo de enfriamiento que fue incluso de 30 min para que llegue a condiciones de estabilidad.

Acero AISI 1045

Dureza experimental

Los valores de dureza obtenidos para el acero AISI 1045 se ven en la Tabla 22.

Tabla 22

Datos de dureza experimental acero AISI 1045

Punto	Distancia (in)	Dureza Rockwell (HRC)			
		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
		1	1/16	59	58
2	2/16	53	54	54	53.7
3	3/16	49	47	44	46.7
4	4/16	47	46	43	45.3
5	5/16	43	45	40	42.7
6	6/16	41	45	37	41
7	7/16	40	38	31	36.3
8	8/16	39	34	29	34
9	9/16	39	32	28	33
10	10/16	36	27	24	29
11	11/16	33	25	23	27
12	12/16	26	22	21	23

13	13/16	24	19	22	21.7
14	14/16	23	20	21	21.3
15	15/16	22	19	20	20.3
16	16/16	18	20	18	18.7
17	18/16	17	19	17	17.7
18	20/16	17	18	16	17
19	22/16	16	19	18	17.7
20	24/16	15	18	18	17
21	28/16	17	17	17	17.3
22	32/16	18	17	19	18

Dureza teórica

$$HRC = 60 * \sqrt{\%C} + 20$$

$$\%C = 0.43 - 0.5 = 0.465\%$$

$$HRC = 60 * \sqrt{0.465} + 20$$

$$HRC = 60.91 \text{ HRC} \approx 61 \text{ HRC}$$

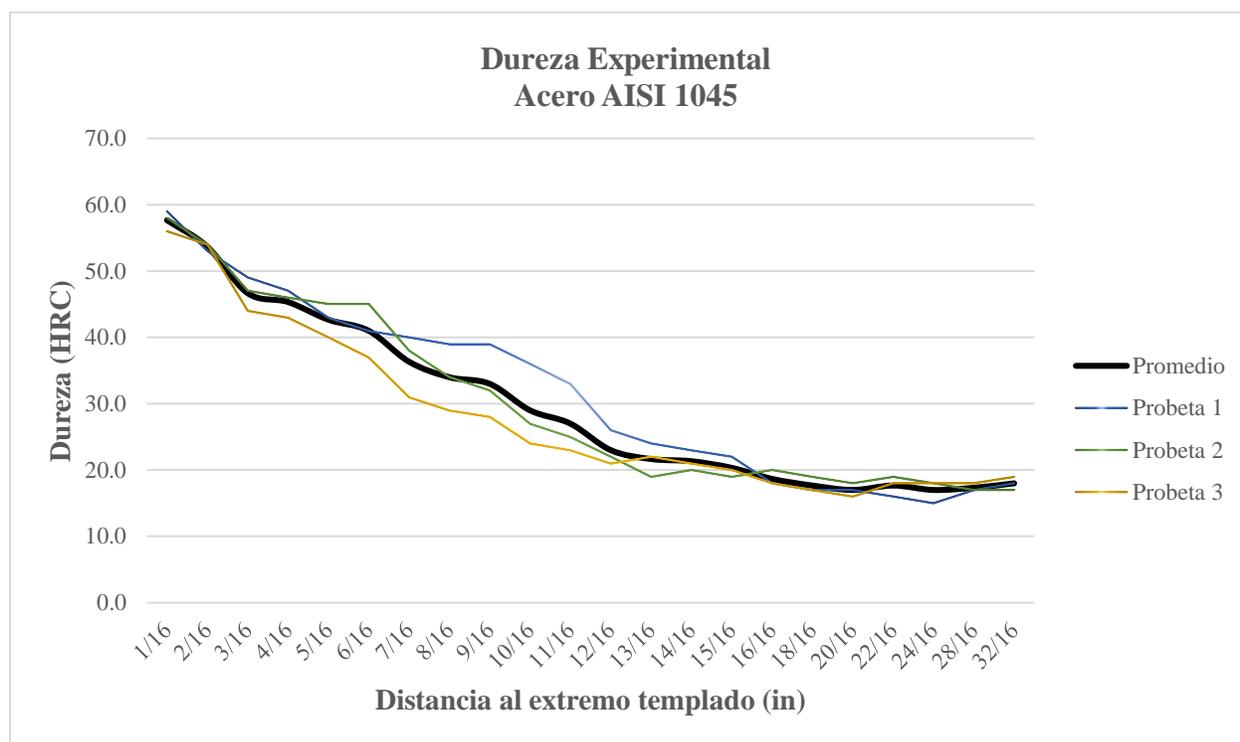
En comparativa la dureza teórica se encuentra muy próxima a la dureza práctica con una diferencia de 3.3 HRC.

Curvas de templabilidad acero AISI 1045

Al graficar el promedio de los puntos obtenidos en las 3 probetas se tiene la Figura 47 en donde la curva promedio de dureza se observa en color negro.

Figura 47

Gráfica comparativa templabilidad acero AISI 1045



Nota. Fuente propia

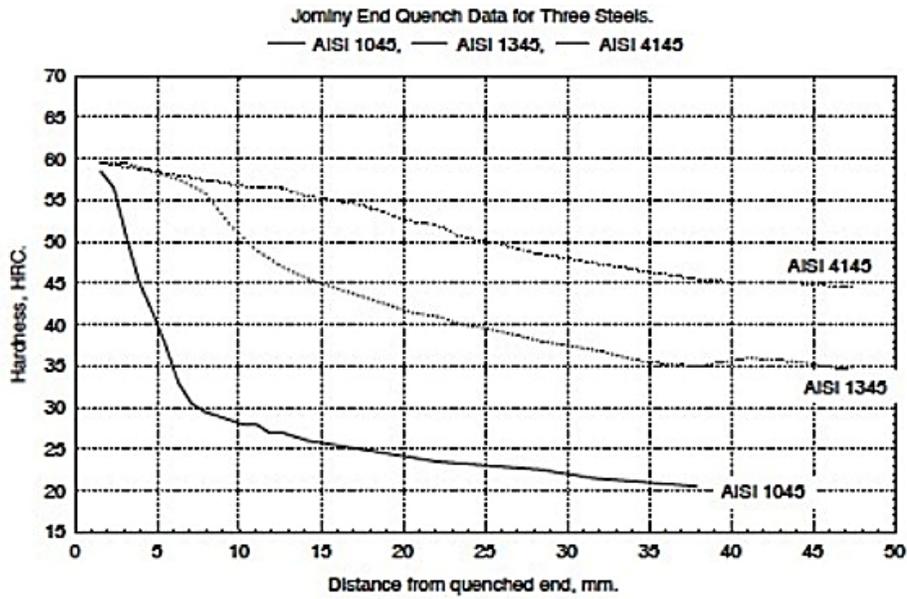
En la Figura 47, se puede observar que para la probeta de acero AISI 1045, el valor máximo promedio de dureza es 57.7 HRC y el mínimo 17 HRC. Durante la primera pulgada se tiene una tendencia decreciente, mientras que en los últimos valores prácticamente se mantiene estable.

Comparación de curvas de templabilidad teórica y experimental

En referente a lo que dice (Callister, 2020), cada acero posee una variación en sus curvas de templabilidad debido a los procesos de producción. Por ende, la Figura 48 presenta una curva estimada en base al acero AISI 1045 y su porcentaje aproximado obtenido de martensita después del temple.

Figura 48

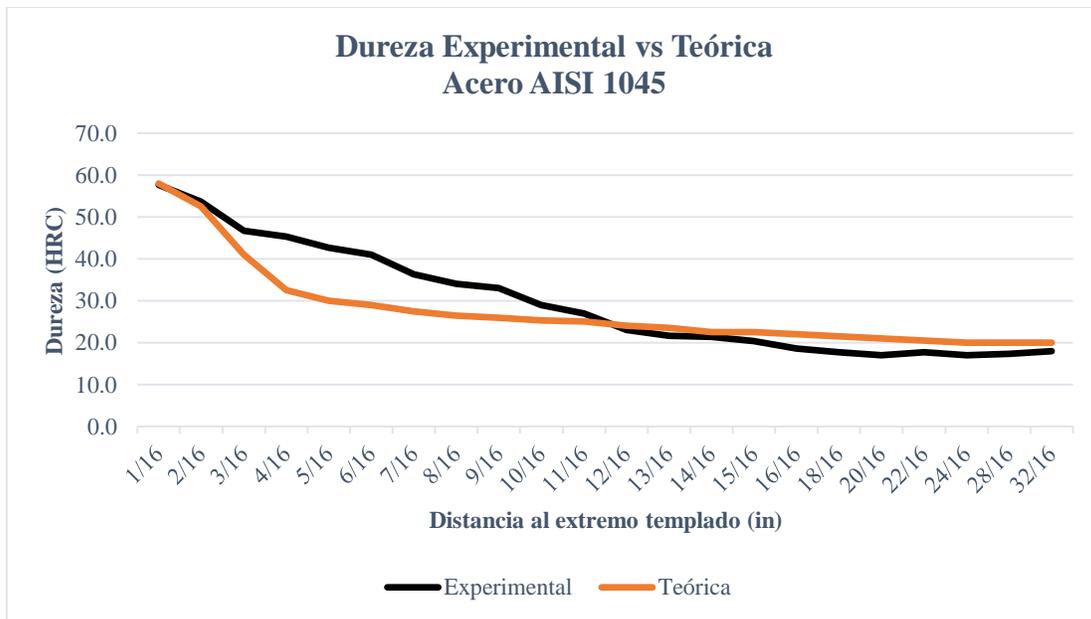
Curva de templabilidad teórica acero AISI 1045



Nota. Tomado de (Callister, 2020)

Figura 49

Comparación de curvas experimental vs teórica - AISI 1045



Nota. Fuente propia

Análisis

En base a la Figura 49 se puede observar que la curva experimental de templabilidad posee la misma tendencia decreciente que la teórica, razón por la cual la curva se ajusta y se comprueba la funcionalidad del equipo.

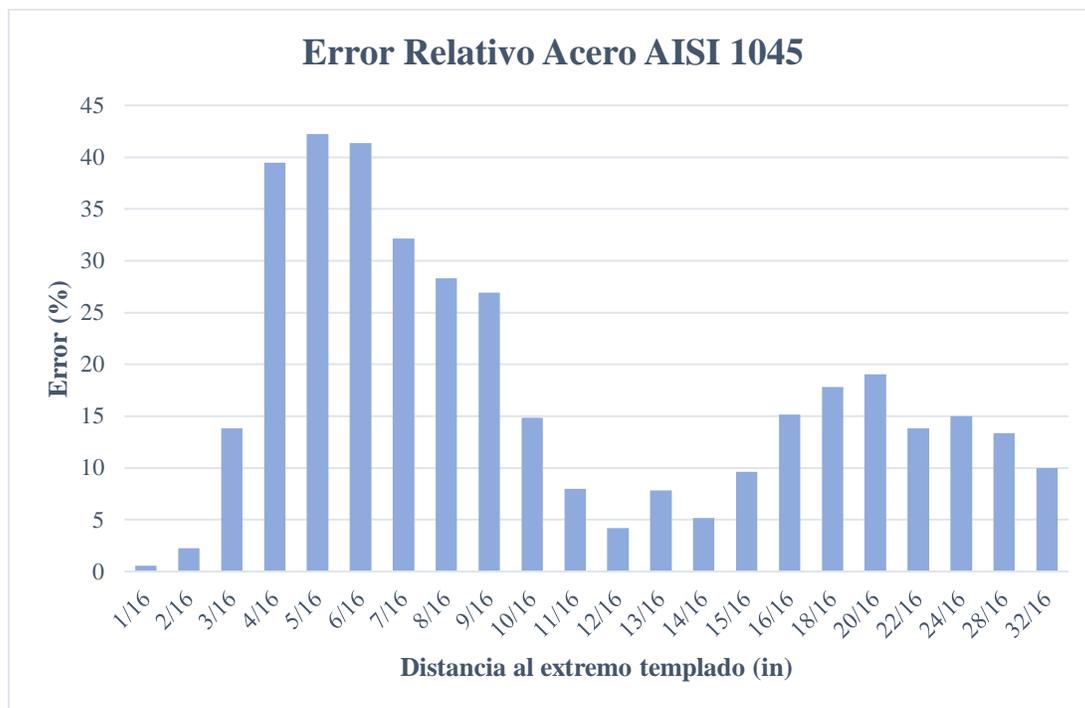
Se puede observar que los valores obtenidos son mayores a los teóricos durante casi toda la primera pulgada de distancia, en el primer punto en la probeta ensayada el valor de dureza es de 57.7 HRC, mientras que el teórico es de aproximadamente 58 HRC. Con lo cual se comprueba que el temple se cumplió de manera correcta. Pero durante los siguientes puntos de la primera pulgada de largo, los valores se mantienen mayores y un poco alejados de los teóricos y al final caen mínimamente por debajo de los valores teóricos.

Esto se puede deber a la composición química del acero y las condiciones de temperatura en las que fue realizado el ensayo. De igual manera los valores medidos menores de 20 deberían despreciarse y se debería cambiar de escala de medición para obtener datos más precisos.

Teoría de errores

Figura 50

Error porcentual de la dureza en el Acero AISI 1045



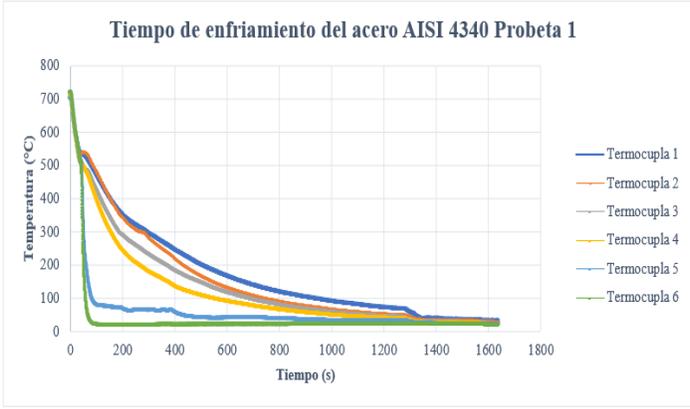
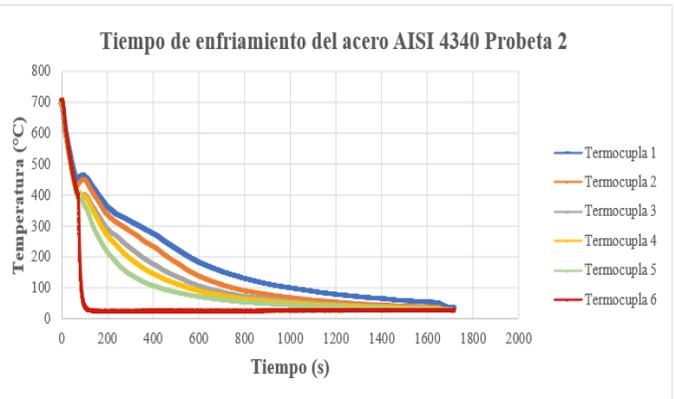
Nota. Fuente propia

En la Figura 50, las medidas donde el error es significativo son entre 3/16 a 10/16 y de 16/16 a 28/16. Las primeras medidas con error se pueden deber a un enfriamiento brusco en la probeta o un contenido de carbono excesivo lo cual provocó una dureza elevada.

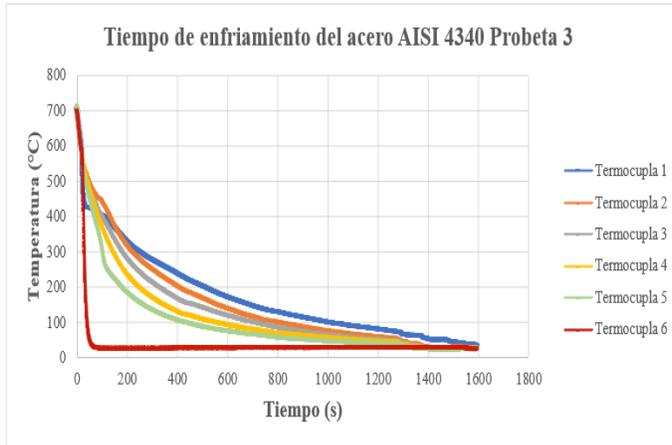
Curvas de enfriamiento Acero AISI 4340

Tabla 23

Gráficas de enfriamiento para las 3 probetas de Acero AISI 4340

Probeta	Gráfica de enfriamiento	Nota
<p>Probeta 1</p>		<p>La termocupla 5 posee una gráfica errónea debido a un enfriamiento brusco de la termocupla en contacto con el agua.</p> <p>Fuente propia</p>
<p>Probeta 2</p>		<p>Las curvas de enfriamiento experimentales se ajustan a las teóricas.</p> <p>Fuente propia</p>

Probeta 3

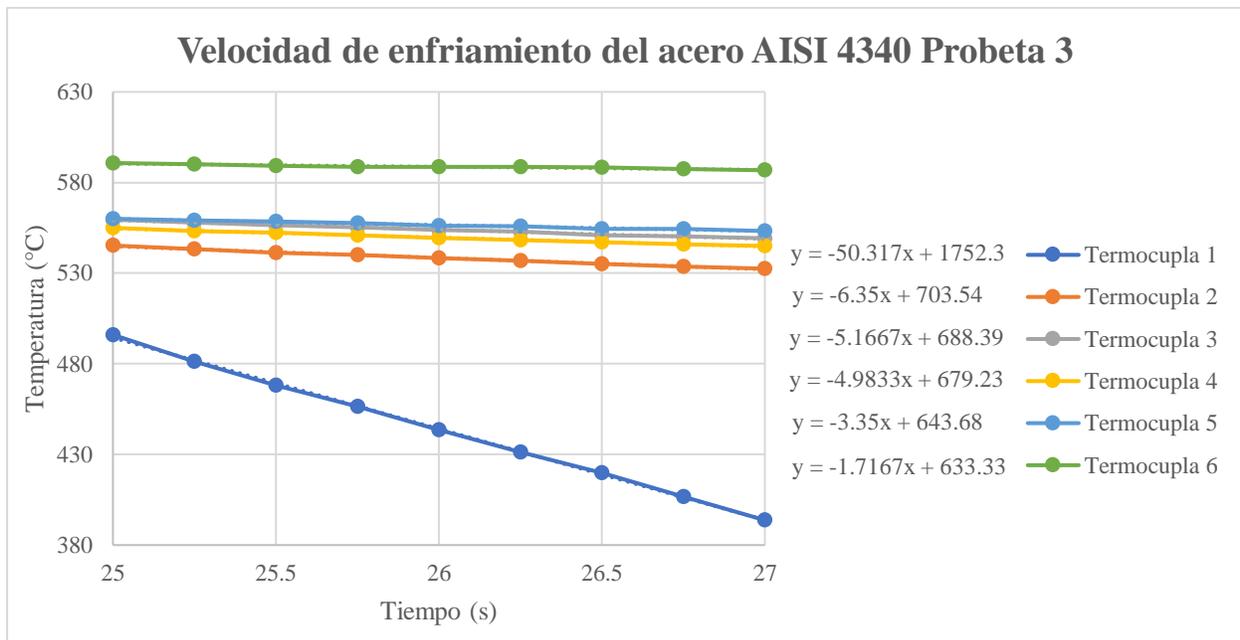


Las curvas de enfriamiento experimentales se ajustan a las teóricas.
Fuente propia

Curvas experimentales de velocidad de enfriamiento Acero AISI 4340

Figura 51

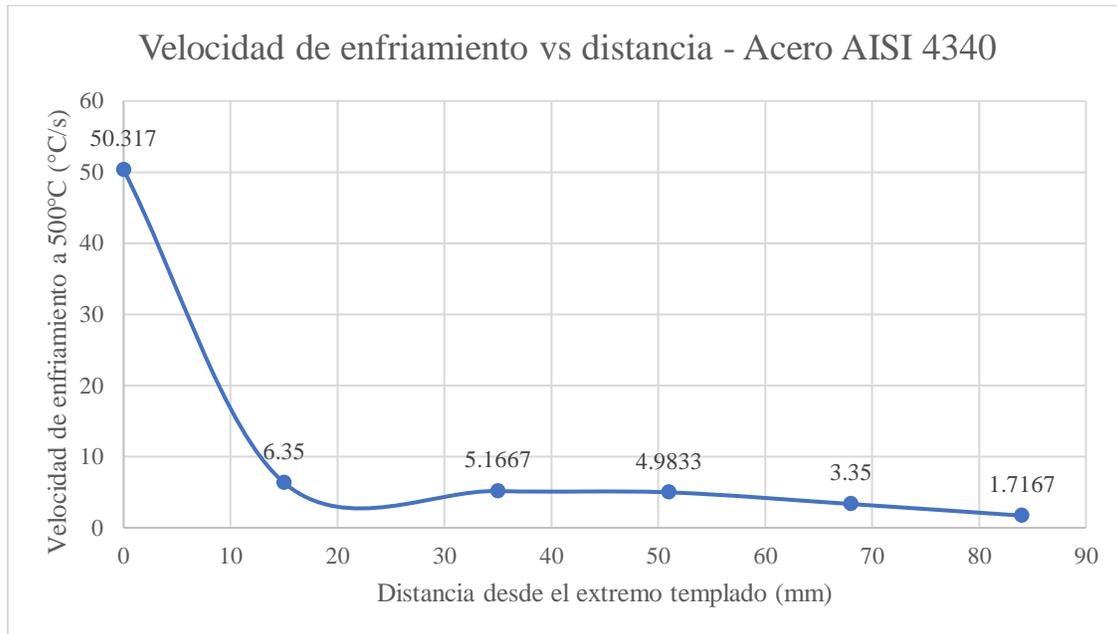
Curvas de velocidad de enfriamiento Acero AISI 4340



Para obtener las velocidades de enfriamiento de cada tramo, se emplearon las ecuaciones de posición de cada curva y mediante su derivación se obtuvo el valor real de velocidad de enfriamiento para cada termocupla.

Figura 52

Velocidad de enfriamiento vs distancia - Acero AISI 4340

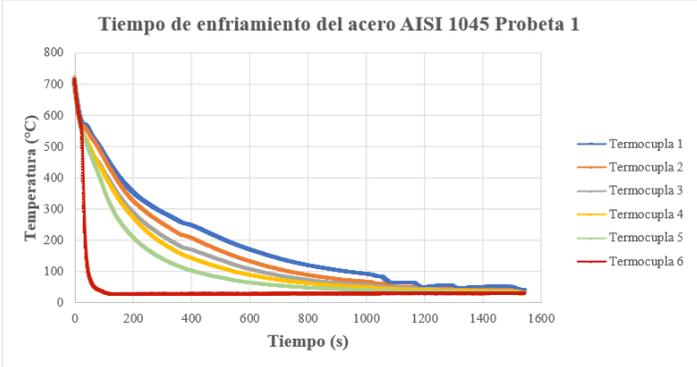
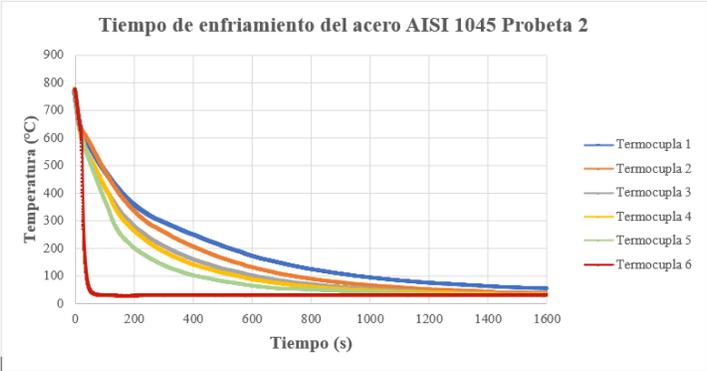
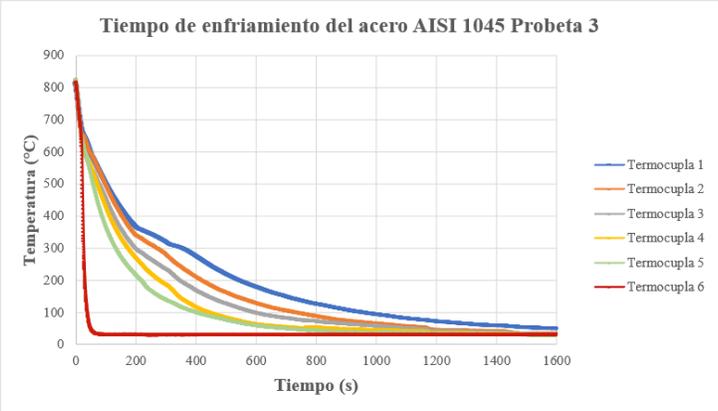


Nota. Fuente propia

La variación en los datos experimentales con respecto a los teóricos mostrados en la Figura 52, se debe:

1. La temperatura de inicio de temple experimental fue de 580-400 °C, mientras que en la bibliografía se tiene un inicio de 700 °C
2. La velocidad de respuesta de los sensores.
3. La ubicación de los sensores al no estar precisamente en el punto de enfriamiento.

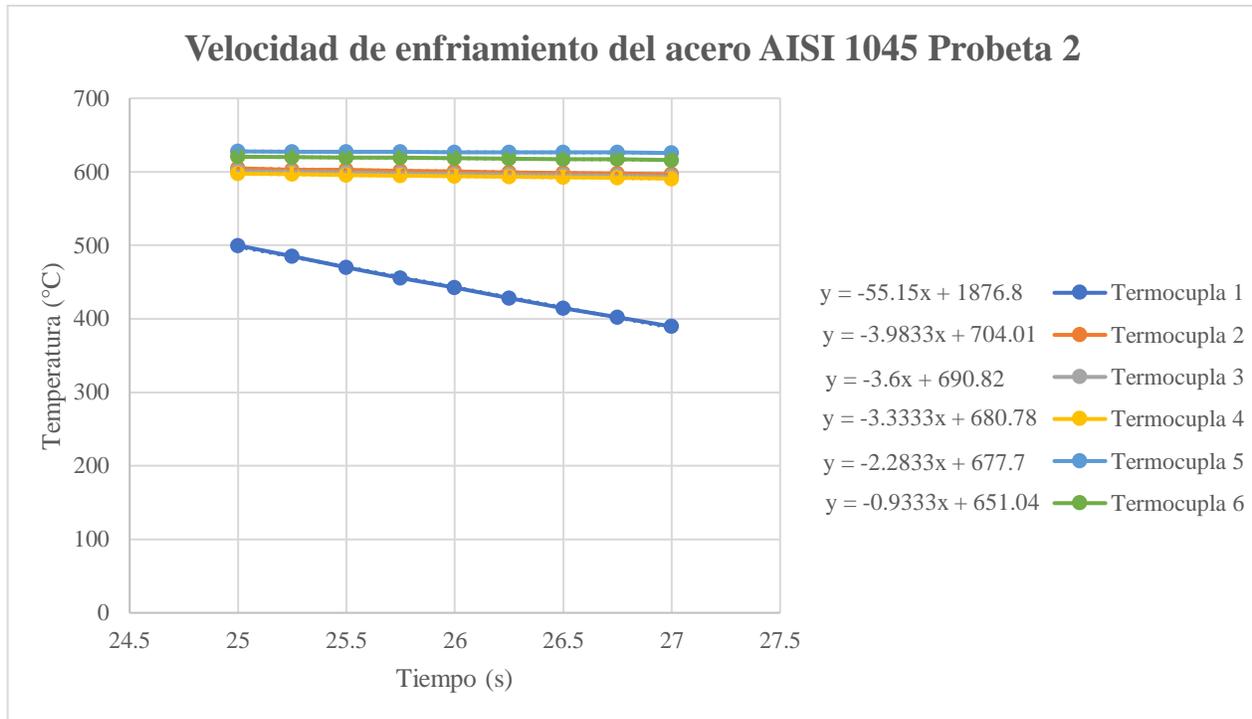
Curvas de enfriamiento Acero AISI 1045

Probeta	Gráfica de enfriamiento	Nota
<p>Probeta 1</p>		<p>Las curvas de enfriamiento experimentales se ajustan a las teóricas.</p> <p>Fuente propia</p>
<p>Probeta 2</p>		<p>Las curvas de enfriamiento experimentales se ajustan a las teóricas.</p> <p>Fuente propia</p>
<p>Probeta 3</p>		<p>Las curvas de enfriamiento experimentales se ajustan a las teóricas.</p> <p>Fuente propia</p>

Curvas experimentales de velocidad de enfriamiento Acero AISI 1045

Figura 53

Curvas de velocidad de enfriamiento Acero AISI 1045

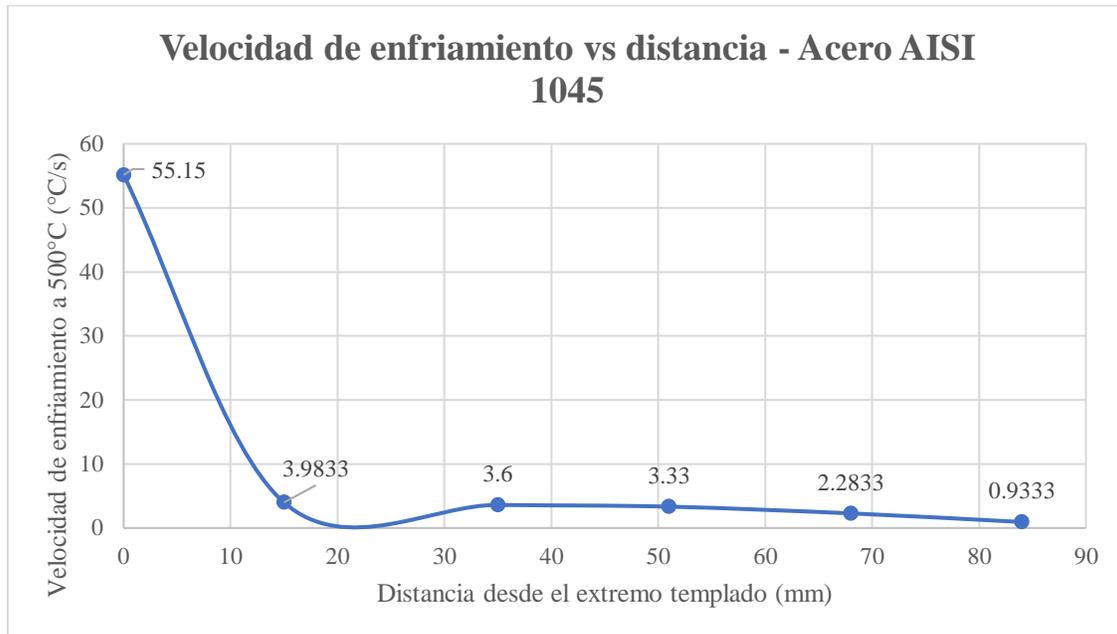


Nota. Fuente propia

Para obtener las velocidades de enfriamiento de cada tramo, se emplearon las ecuaciones de posición de cada curva y mediante su derivación se obtuvo el valor real de velocidad de enfriamiento para cada termocupla.

Figura 54

Velocidad de enfriamiento vs distancia - Acero AISI 1045



Nota. Fuente propia

La variación en los datos experimentales con respecto a los teóricos mostrados en la Figura 54, se debe:

1. La temperatura de inicio de temple experimental es de 600-500 °C, mientras que en la bibliografía se tiene un inicio de temperatura de temple de 700 °C
2. La velocidad de respuesta de los sensores.
3. La ubicación de los sensores al no estar precisamente en el punto de enfriamiento

Microestructura de los Aceros AISI 4340 y 1045

Se presenta la microestructura de cada uno de los aceros en el Anexo G.

Capítulo 5 Análisis Financiera

Con el fin de determinar la inversión realizada por los autores del proyecto, se elaboró un análisis económico desglosando los costos directos e indirectos de la construcción y montaje del equipo.

Costos directos

En la Tabla 24 se detallan los costos directos en cuanto a materia prima y los componentes que constituyen al equipo para el ensayo.

Tabla 24

Costos directos para la fabricación y montaje del equipo

Descripción	Cantidad	Costo Unitario [USD]	Costo Total [USD]
Materia prima y operaciones de tanque reservorio y porta probetas			
Plancha de Acero AISI 304 2B -2mm	3	78,50	235,5
Platina de acero inoxidable	1	9,80	9,80
Tobera Reductora Inox	1	5,00	5,00
Pernos M6	32	0,39	12,60
Estructura Base Bombas	1	18,00	18,00
Soporte Filtro	1	7,00	7,00
Materia prima de estructuras reservorio			

Descripción	Cantidad	Costo Unitario [USD]	Costo Total [USD]
Perfil L 40x40x5	8	8,50	68,00
Perfil cuadrado 38x38x3	4	13,25	53,00
Perfil L 25.4x25.4x3.2	2	5,80	11,60
Anillo Base Corte Plasma	1	24,00	24,00
Rueda Garrucha 2" 50Kg	8	3,05	24,40
Placa Base ruedas	8	1,00	8,00
Elementos eléctricos y electrónicos			
Medidor de caudal 3/4	1	13,00	13,00
Termocupla Tipo K 1/8" NPT	6	30,00	180,00
Módulo MAX 6675	6	8,33	50,00
Contactador 2P 110V EBASEE	2	20,00	40,00
Arduino Mega 2650	1	26,50	26,50
Módulo de 2 relés	1	5,95	5,95
Cable Calibre 16	8	0,85	6,80

Descripción	Cantidad	Costo Unitario [USD]	Costo Total [USD]
Gabinete Metálico	1	30,00	30,00
Terminales conexión	24	0,10	2,40
Arduino Nano	1	13,80	13,80
Impresión Placa Circuito	1	30,00	30,00
Batería 9V	1	1,50	1,50
Caja Caudalímetro 3D	1	17,00	17,00
Pantalla Oled	1	13,00	13,00
Cable 2x16	3	1,04	3,12
Canaleta 15x10x2	3	1,33	3,99
Cable Gemelo 16	6	0,64	3,84
Enchufe Blindado 3 Patas	2	0,75	1,50
Tomacorriente D/Sobrepuesto	1	1,39	1,39
Componentes del sistema hidráulico			
Bomba Pedrollo ½ HP	2	93,58	187,16

Descripción	Cantidad	Costo Unitario [USD]	Costo Total [USD]
Manguera no toxica tejida de 1"	1.5	7,66	11,49
Manguera no toxica tejida de 3/4"	2.5	5,76	14,39
Férula 1" Latón	4	4,79	19,15
Férula 3/4" Latón	6	4,10	24,60
Prensado de manguera	5	3,72	18,62
Espiga 3/4" NPT	2	4,23	8,47
Filtro Rotoplas	1	27,52	27,52
Acople 100 C	4	4,77	19,07
Acople 100 F	4	2,82	11,28
Acople 75 C	4	4,20	16,81
Acople 75 F	4	2,60	10,38
Válvula esférica 1" Genebre	2	15,92	31,83
Válvula esférica 3/4" Genebre	1	8,09	8,09

Descripción	Cantidad	Costo Unitario [USD]	Costo Total [USD]
Codo 1"x90° Inox Roscable	2	3,75	7,49
Codo 3/4"x90° Inox Roscable	1	2,61	2,61
Codo 3/4"x90° Inox C/40 S	1	3,19	3,19
Codo 3/4" Polimex	2	1,62	3,23
Bushing 1x3/4 Inox	3	1,96	5,88
Neplo Hexagonal 150 NPT 304	2	2,24	4,48
Aceros para Ensayo Jominy			
Eje Acero AISI 1045	3	3,14	9,42
Eje Acero AISI 4340	3	4,26	12,78
Total			1143.13

Costos indirectos

Los costos indirectos se refieren a la mano de obra, servicios básicos, alimentación, uso de maquinaria en laboratorios de la universidad y talleres privados. En la Tabla 24 se detallan los costos

indirectos por construcción del equipo, por horas de trabajo y costo por hora en cada operación de manufactura realizada.

Tabla 25

Costos de fabricación y mano de obra del equipo

Descripción	N° de horas	Costo por hora [USD]	Costo Total [USD]
Manufactura tanques reservorio y porta probetas			
Corte Plasma CNC	3	8,50	25,50
Barolado plancha	2	15,00	30,00
Soldadura TIG	6	12,00	72,00
Mecanizado Tanques	2	5,00	10,00
Manufactura Estructuras Soporte			
Corte Perfiles	2	6,00	12,00
Soldadura Perfiles	8	10,00	80,00
Corte Anillo soporte	1	8,50	8,50
Doblado soporte Bombas	1	5,00	5,00
Perforado y roscado	2	4,00	8,00
Soldadura Garruchas	3	6,00	18,00
Manufactura Probetas			
Torneado Aceros	12	10,00	120,00
Fresado Aceros	6	5,00	30,00
Total			419,00

Tabla 26

Costos indirectos

Descripción	Costo [USD]
Costos de fabricación y mano de obra del equipo	419,00
Alimentación	275,00
Transporte	137,50
Gasolina	66,00
Servicios básicos	250,00
Honorarios asesorías docentes	600,00
Honorarios de trabajo estudiantes	2400,00
Total	4147,50

Costo Total

Para determinar el costo total se realizará la suma de los costos directos más los indirectos, obteniendo un valor total de 5290,63 USD.

Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Se diseñó un banco de pruebas para el ensayo Jominy según la norma ASTM A255-10, mediante el dimensionamiento, cálculo y análisis mecánico de los recipientes del experimento, selección de materiales y componentes del sistema hidráulico, a partir de las especificaciones técnicas establecidas para el uso en el Laboratorio de Ciencia de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.
- Se realizó 6 ensayos en el banco de pruebas con 2 tipos de acero, el AISI 1045 y el AISI 4340. De los ensayos se obtuvo las gráficas de dureza y velocidad de enfriamiento, en las cuales las curvas experimentales se ajustaron a las teóricas y los valores no presentan un error significativo. Razón por la cual el equipo no presenta problemas en los resultados arrojados y es apto para su uso en posteriores ensayos.
- En el acero AISI 4340 el primer valor de dureza fue de 57.7 HRC y en el acero AISI 1045 fue de 55.5HRC, mientras que el teórico es de aproximadamente 58 HRC. Como no presenta un error significativo. El temple se cumplió de manera correcta.
- Se elaboró un manual de operación del banco de pruebas donde se detalla el procedimiento de encendido y control del equipo, procedimiento del ensayo Jominy, las partes del equipo, las restricciones de uso, normas de seguridad y mantenimiento.
- Se realizó una guía de laboratorio, en donde se estableció un procedimiento adecuado para realizar el ensayo Jominy dentro del Laboratorio de Ciencias de Materiales con el fin de informar el procedimiento y uso correcto del equipo a los estudiantes y docentes.

Recomendaciones

- Utilizar únicamente aceros templables, para todo el procedimiento de ensayo.
- Previo a realizar el ensayo se recomienda leer la Norma ASTM A255-10 y ASTM E18, para entender y comprender todos los parámetros necesarios del ensayo.
- Al estar expuesto a condiciones de trabajo con altas temperaturas es necesario leer el manual de usuario para evitar daños en el equipo o accidentes en el área de trabajo.

Referencias

- Amat, J. (enero de 2016). *Cienciadedatos.com*. Obtenido de ANOVA análisis de varianza para comparar múltiples medias: https://www.cienciadedatos.net/documentos/19_anova
- Ambato, P. X., & Bravo, J. F. (2021). *Recuperación energética, puesta a punto, automatización y adquisición de datos del equipo "Túnel de Aire Multipropósito"*. Sangolquí.
- Apraiz, J. (2003). *Tratamientos térmicos de los aceros*. Madrid: CIE Dossat.
- Arduino. (2010). *¿Qué es Arduino?* Obtenido de <https://arduino.cl/que-es-arduino/>
- Askeland, D. (2011). *Ciencia e Ingeniería de los materiales*. México: Cengage.
- ASTM International. (2014). *Norma ASTM A – 255 "Métodos de prueba estándar para determinar la Templabilidad del acero"*.
- ASTM International. (2016). *Métodos de prueba estándar para la dureza de Rockwell de materiales metálicos*.
- Ávila, K. S., & Chaves, J. F. (2017). *Caracterización microestructural de un acero SAE 1045 con un tratamiento termomecánico*. Bogota.
- Beer, F. P., & Johnston, E. R. (2009). *Mecánica de Materiales*. México: McGrawHill.
- Callister, W. (2020). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Barcelona: Reverté.
- Cia. General de Aceros. (2022). *Aceros Ingeniería*. Obtenido de <https://www.cga.com.co/producto>
- Creus, A. (2010). *Instrumentación Industrial*. México D.F: Alfa y Omega.
- Curiosoando. (25 de julio de 2018). *Curiosoando.com*. Obtenido de ¿Qué es un aceite mineral?: <https://curiosoando.com/que-es-un-aceite-mineral>

Fosca, C. (2007). *Introducción a la Metalurgia de la soldadura*. Lima: Imprenta PUCP.

Frecuento. (2021). *Filtro Antisedim Rotoplas Standard*. Quito.

Güemes, A., & Martín, N. (2012). *Ciencia de materiales para ingenieros*. Madrid: Pearson Educacion S.A.

Infinitia. (28 de julio de 2020). *Infinitiaresearch.com*. Obtenido de Ensayos de corrosión. ¿Qué son y cuándo realizarlos?: <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/ensayos-de-corrosion-que-son-y-cuando-realizarlos/>

IQR. (19 de febrero de 2021). *Ingenieriaquimicareviews.com*. Obtenido de ¿Qué es el pavonado?: <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2021/02/pavonado-que-es.html>

Lefevre, R. (2020). *Tratamientos Térmicos*. Rosario.

Levinson. (Febrero de 2020). *Levinson.com*. Obtenido de Influencia del Grano en el Acero: <https://www.aceroslevinson.com/2020/02/influencia-del-grano-en-el-acero/>

Ma San, J. F. (2013). *Diseño de elementos de Máquinas I*. Piura: Fundación Universitaria Andalu.

Megyesy, E. F. (2008). *Pressure Vessel Handbook*. Oklahoma: PV Publishing.

Molera, P. (1991). *Tratamientos Térmicos de los metales*. Barcelona: Marcombo.

Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos*. Mexico : Pearson.

Noria. (21 de noviembre de 2021). *Noria.mx*. Obtenido de Etendiendo los grados de viscosidad SAE para lubricantes del motor: <https://noria.mx/lublearn/entendiendo-los-grados-de-viscosidad-sae-para-lubricantes-de-motor/>

NRAFAMILY. (11 de febrero de 2020). *nrafamily.org*. Obtenido de Fabricación de armas: Browning vs Bluing: <https://www.nrafamily.org/articles/2020/2/11/gun-manufacturing-browning-vs-bluing>

Parker. (2018). *Catálogo 4400/ES Mangueras, Terminales y equipos*.

Pedrollo. (2020). *Hoja Técnica de Bomba Pedrollo 1/2 HP 60 Hz*. San Bonifacio: Pedrollo.

Ramadar, N., & Boghdadi, A. (2020). Parametric Optimization of TIG Welding Influence On Tensile Strength of Dissimilar Metals SS-304 And Low Carbon Steel by Using Taguchi Approach. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 7-14.

Rockford. (1982). *Owner's Manual Models 10 AR & 10 AS*. Brampton: Rams Rockford Products.

Shackelford, J. (2010). *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. Madrid.

Tamayo Izurieta, L. F., & Luna Jaen, J. A. (2022). *Diseño y construcción de un banco de pruebas para el ensayo Jominy*. Sangolquí.

Van Vlack, L. (1989). *Elements of Materials Science and Engineering (6th Edition)*.

Apéndices