



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA
AUTOMATIZADA PARA ENSAYOS JOMINY DE ACUERDO A LA
NORMATIVA ASTM A255 PARA LA DETERMINACIÓN DE
CURVAS DE TEMPLABILIDAD EN ACEROS”**

Trabajo de titulación

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO MECÁNICO

AUTORES: ERIKA ELIZABETH PILCO COLCHA

MARCELO ANDRES MERINO YANEZ

DIRECTOR: Ing. OTTO FERNANDO BALSECA SAMPEDRO

Riobamba – Ecuador

2021

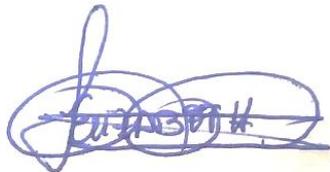
©2021, Erika Elizabeth Pilco Colcha; & Marcelo Andrés Merino Yáñez

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Nosotros, Erika Elizabeth Pilco Colcha y Marcelo Andrés Merino Yáñez, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 04 de marzo de 2021



Erika Elizabeth Pilco Colcha

060484968-7

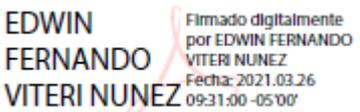
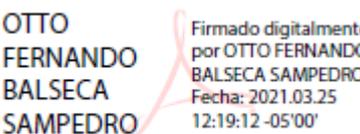
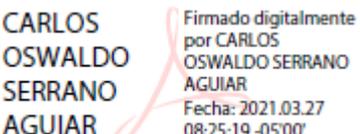


Marcelo Andrés Merino Yáñez

060489607-6

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: Proyecto Técnico, **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA AUTOMATIZADA PARA ENSAYOS JOMINY DE ACUERDO A LA NORMATIVA ASTM A255 PARA LA DETERMINACIÓN DE CURVAS DE TEMPLABILIDAD EN ACEROS”**, realizado por los señores: **ERIKA ELIZABETH PILCO COLCHA Y MARCELO ANDRES MERINO YANEZ**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

| | FIRMA | FECHA |
|---|---|-------------------|
| <p>Ing. Edwin Fernando Viteri Núñez PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</p> | <p>EDWIN FERNANDO VITERI NUNEZ  <small>Firmado digitalmente por EDWIN FERNANDO VITERI NUNEZ Fecha: 2021.03.26 09:31:00 -05'00'</small></p> | <p>2021-03-04</p> |
| <p>Ing. Otto Fernando Balseca Sampedro DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</p> | <p>OTTO FERNANDO BALSECA SAMPEDRO  <small>Firmado digitalmente por OTTO FERNANDO BALSECA SAMPEDRO Fecha: 2021.03.25 12:19:12 -05'00'</small></p> | <p>2021-03-04</p> |
| <p>Ing. Carlos Oswaldo Serrano Aguiar MIEMBRO DE TRIBUNAL</p> | <p>CARLOS OSWALDO SERRANO AGUIAR  <small>Firmado digitalmente por CARLOS OSWALDO SERRANO AGUIAR Fecha: 2021.03.27 08:25:19 -05'00'</small></p> | <p>2021-03-04</p> |

DEDICATORIA

El presente trabajo, lo dedico con todo mi amor y cariño a mis amados padres: Luis Pilco y Enma Colcha; quienes, con su bendición, dedicación y esfuerzo diario me brindaron la oportunidad de culminar mis estudios universitarios y nunca perdieron su confianza en mí a pesar de las adversidades. A mi hermana y amiga: Valeria Pilco, quien es un pilar fundamental en mi vida y siempre me impulsa a dar lo mejor de mí.

Todos mis logros cumplidos y por cumplir están dedicados a mi hermosa familia, son ustedes ejemplo de perseverancia constante y mi mayor motivación para continuar.

Erika

A Luis, Sara, Antonio y Luz María... autores del libro de mi vida, hoy ángeles en el cielo. A mis padres Franklin y Ximena ejemplo motor y motivo de mis logros y metas, a mis hermanos Dennis y Fabian me han guiado e inspirado cada día. Con mucho cariño para Adriana, el viento que no supe prever y que soplo con fuerza en mi vida.

Para todo el que se conoce hoy, pero no conoce lo que puede llegar a ser...

Marcelo

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por bendecirme la sabiduría y fortaleza necesaria para culminar mi formación profesional, además de brindarme la oportunidad de compartir este logro con mis seres queridos. A mis padres, quienes a diario se esforzaron y me brindaron la oportunidad de estudiar, así como también por sus palabras de aliento, consejos y buenos valores inculcados en mi persona, los mismos que me convertirán en una gran mujer y profesional.

A mi hermanita, quien siempre me alentó a salir de situaciones difíciles, me acompañó en mis desvelos y con grandes carcajadas alegraba mis rutinas de estudio. A todas aquellas personas que con un: ¡si se puede!, ¡no te rindas!, ¡falta poco!; me hicieron sentir su apoyo y me levantaron el ánimo.

A todos los docentes que conocí a lo largo de la carrera y me brindaron sus conocimientos, consejos y perspectivas del ámbito profesional que nos espera. ¡Gracias!

Erika

A Dios por acompañarme siempre en difíciles caminos, a mi familia por su constante motivación, a mis padres por su apoyo incondicional en la culminación de esta etapa de mi vida, me enseñaron a soñar muy alto, pero con los pies sobre la tierra ¡Soy y seré gracias a ustedes!

A mis amigos Jorge y Carlos por su apoyo en la realización de este trabajo. Siempre estaré agradecido a la gloriosa Escuela de Ingeniería Mecánica ESPOCH que contribuyó en la formación de mi perfil profesional y humano. A todas las personas que de alguna u otra forma contribuyeron a mi formación. ¡Gracias!

Marcelo

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----------|
| INDICE DE TABLAS | xii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | xiv |
| ÍNDICE DE GRÁFICOS..... | xvii |
| INDICE DE ANEXOS..... | xviii |
| RESUMEN..... | xxi |
| ABSTRACT..... | xxii |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| | |
| CAPÍTULO I | |
| 1. DIAGNOSTICO DEL PROBLEMA..... | 3 |
| 1.1. Antecedentes..... | 3 |
| 1.2. Objetivos..... | 4 |
| 1.2.1 <i>Objetivo general</i> | 4 |
| 1.2.2 <i>Objetivos específicos</i> | 5 |
| | |
| CAPITULO II | |
| 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS..... | 6 |
| 2.1 Aceros..... | 6 |
| 2.1.1 <i>Elementos aleantes presentes en el acero</i> | 6 |
| 2.1.2 <i>Aceros de baja aleación</i> | 7 |
| 2.1.3 <i>Aceros medios en carbono</i> | 7 |
| 2.1.4 <i>Acero AISI 4340</i> | 7 |
| 2.2 Diagrama de fases Hierro – Carbono | 8 |
| 2.2.1 <i>Austenita (γ)</i> | 8 |
| 2.3 Transformación de la fase Austenítica | 9 |
| 2.3.1 <i>Fase Perlítica</i> | 9 |
| 2.3.2 <i>Fase Bainítica</i> | 10 |
| 2.3.3 <i>Fase Martensítica</i> | 10 |
| 2.4 Templabilidad del acero..... | 11 |
| 2.4.1 <i>Tratamiento térmico de temple</i> | 11 |
| 2.4.1.1 <i>Fase 1: Calentamiento</i> | 12 |
| 2.4.1.2 <i>Fase 2: Enfriamiento</i> | 12 |
| 2.4.2 <i>Curvas de templabilidad</i> | 13 |

| | | |
|---------------------|---|----|
| 2.4.3 | <i>Factores que influyen en el temple del acero</i> | 14 |
| 2.5 | Martensita obtenida con el temple | 15 |
| 2.5.1 | <i>Morfología de la Martensita</i> | 16 |
| 2.6 | Diagramas de transformación TTT | 17 |
| 2.6.1 | <i>Curva de transformación por enfriamiento continuo (CCT)</i> | 18 |
| 2.7 | Dureza del material | 19 |
| 2.7.1 | <i>Dureza Rockwell</i> | 20 |
| 2.7.1.1 | <i>Etapas de la medición de dureza</i> | 20 |
| 2.8 | Ensayo de Templabilidad o Jominy | 21 |
| 2.9 | Norma ASTM A – 255 “Métodos de prueba estándar para determinar la Templabilidad del acero” | 22 |
| 2.9.1. | <i>Dispositivo de enfriamiento</i> | 22 |
| 2.9.1.1 | <i>Portaprobeta</i> | 22 |
| 2.9.2 | Probetas de Ensayo | 23 |
| 2.9.2.1 | <i>Muestras forjadas</i> | 23 |
| 2.9.3 | Procedimiento del ensayo Jominy | 23 |
| 2.9.3.1 | <i>Normalización de probetas</i> | 23 |
| 2.9.3.2 | <i>Calentamiento</i> | 24 |
| 2.9.3.3 | <i>Enfriamiento</i> | 24 |
| 2.9.4 | Medición de la dureza después del temple | 24 |
| 2.9.4.1 | <i>Preparación de Planos</i> | 24 |
| 2.9.4.2 | <i>Apoyo de la probeta</i> | 25 |
| 2.9.4.3 | <i>Indentador</i> | 25 |
| 2.9.4.4 | <i>Toma de lecturas</i> | 25 |
| 2.10 | Sistemas de Control | 26 |
| 2.10.1 | <i>Sistemas de control de lazo cerrado</i> | 26 |
| 2.10.2 | <i>Sistemas de control en lazo abierto</i> | 26 |
| 2.10.2.1 | <i>Señales de entrada y salida de un sistema de control</i> | 27 |
| 2.10.2.2 | <i>Controlador de un sistema</i> | 27 |
| 2.10.2.3 | <i>Actuadores de un sistema</i> | 27 |
| CAPITULO III | | |
| 3. | MARCO METODOLÓGICO | 28 |
| 3.1 | Introducción al diseño de la máquina Jominy | 28 |

| | | |
|-----------------|---|----|
| 3.2 | Parámetros de diseño según ASTM A255 | 28 |
| 3.3 | Desarrollo de la casa de la Calidad (QFD) | 28 |
| 3.3.1 | <i>Identificación de las necesidades del usuario</i> | 28 |
| 3.3.2 | <i>Evaluación de las necesidades del usuario</i> | 29 |
| 3.3.3 | <i>Evaluación de los requerimientos según su grado de importancia.</i> | 29 |
| 3.3.3.1 | <i>Evaluación de la propia empresa.</i> | 30 |
| 3.3.3.2 | <i>Evaluación de la competencia.</i> | 30 |
| 3.3.3.3 | <i>Evaluación de los usuarios.</i> | 30 |
| 3.3.4 | <i>Despliegue de la casa de la calidad</i> | 31 |
| 3.4 | Diseño conceptual de la máquina de ensayos Jominy | 31 |
| 3.4.1 | <i>Análisis funcional modular</i> | 31 |
| 3.4.1.1 | Nivel 0..... | 32 |
| 3.4.1.2 | Nivel I..... | 32 |
| 3.4.2 | <i>Desarrollo de la matriz morfológica</i> | 33 |
| 3.5 | Desarrollo de las alternativas de solución para cada módulo | 33 |
| 3.5.1 | <i>Evaluación de criterios técnicos.</i> | 35 |
| 3.5.2 | <i>Evaluación y selección de alternativa adecuada</i> | 37 |
| 3.6 | Diseño de la máquina Jominy | 38 |
| 3.6.1 | <i>Circuito de trabajo de la máquina Jominy</i> | 38 |
| 3.6.2 | <i>Diseño del Sistema Hidráulico</i> | 38 |
| 3.6.2.1 | <i>Cálculo de la velocidad de salida del fluido de enfriamiento</i> | 38 |
| 3.6.2.2 | <i>Cálculo del caudal del fluido de enfriamiento</i> | 39 |
| 3.6.2.3 | <i>Selección de la tubería</i> | 40 |
| 3.6.2.4 | <i>Diseño del Tanque Portaprobeta</i> | 42 |
| 3.6.2.5 | <i>Cálculo del volumen de fluido sobrante en el tanque portaprobeta</i> | 43 |
| 3.6.2.6 | <i>Diseño del Tanque de Almacenamiento</i> | 43 |
| 3.6.2.7 | <i>Selección del material de los tanques</i> | 45 |
| 3.6.2.8 | <i>Propiedades del fluido de enfriamiento</i> | 45 |
| 3.6.2.9 | <i>Cálculo de la sección transversal, caudal y velocidad de flujo en la línea de succión de la bomba.</i> | 45 |
| 3.6.2.10 | <i>Cálculo de numero de Reynolds, rugosidad relativa y factor de fricción en la línea de succión</i> | 47 |
| 3.6.2.11 | <i>Cálculo de pérdidas primarias en la succión de la bomba</i> | 49 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 3.6.2.12 | <i>Cálculo de pérdidas secundarias en la succión de la bomba</i> | 50 |
| 3.6.2.13 | <i>Cálculo de la sección transversal, velocidad de caudal y velocidad de flujo en la línea de descarga de la bomba</i> | 51 |
| 3.6.2.14 | <i>Cálculo del número de Reynolds, rugosidad relativa y factor de fricción para la línea de descarga</i> | 52 |
| 3.6.2.15 | <i>Cálculo de pérdidas primarias y secundarias en la descarga de la bomba</i> | 53 |
| 3.6.2.16 | <i>Cálculo de altura de bombeo</i> | 55 |
| 3.6.2.17 | <i>Cálculo de la carga de succión neta positiva NPSH</i> | 55 |
| 3.6.2.18 | <i>Cálculo de la cabeza de presión estática absoluta hsp</i> | 56 |
| 3.6.2.19 | <i>Cálculo de la diferencia de elevación desde el nivel fluido hacia la entrada de la bomba hs</i> | 57 |
| 3.6.2.20 | <i>Cálculo de la presión de vapor del líquido a temperatura de bombeo hyp</i> | 58 |
| 3.6.2.21 | <i>Cálculo de la Potencia de la Bomba</i> | 58 |
| 3.6.2.22 | <i>Diseño de la boquilla de enfriamiento</i> | 59 |
| 3.6.3 | <i>Portaprobeta</i> | 61 |
| 3.6.4 | <i>Diseño estructural de la máquina de ensayos Jominy</i> | 62 |
| 3.6.4.1 | <i>Geometría de la estructura</i> | 62 |
| 3.6.4.2 | <i>Selección del perfil estructural</i> | 63 |
| 3.6.4.3 | <i>Cargas de diseño</i> | 64 |
| 3.6.4.4 | <i>Análisis estático de la estructura</i> | 66 |
| 3.6.4.5 | <i>Diseño del piso de la estructura</i> | 70 |
| 3.6.4.6 | <i>Diseño de la carcasa de la estructura</i> | 71 |
| 3.6.5 | <i>Diseño del sistema electrónico</i> | 71 |
| 3.6.5.1 | <i>Parámetros de diseño</i> | 72 |
| 3.6.5.2 | <i>Modos de operación de la máquina Jominy</i> | 72 |
| 3.6.5.3 | <i>Tablero de control</i> | 73 |
| 3.6.5.4 | <i>Estructura del sistema automatizado</i> | 74 |
| 3.6.5.5 | <i>Selección de componentes electrónicos</i> | 74 |
| 3.6.5.6 | <i>Controlador del sistema electrónico</i> | 76 |
| 3.6.5.7 | <i>Programación del Controlador PLC XINJE XD3-16RT-E</i> | 77 |
| 3.6.5.8 | <i>Relación Caudal-Frecuencia</i> | 77 |
| 3.6.5.9 | <i>Caracterización de la señal para el sensor YF-S201</i> | 77 |
| 3.6.5.10 | <i>Modelado matemático del tiempo requerido para alcanzar el caudal deseado</i> | 78 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 3.6.5.11 | <i>Tolerancia de Medición Admisible</i> | 79 |
| 3.6.5.12 | <i>Valores porcentuales para ajuste fino de la válvula proporcional</i> | 79 |
| 3.6.5.13 | <i>Asignación de velocidad en la válvula proporcional</i> | 81 |
| 3.6.5.14 | <i>Caudales de seguridad</i> | 82 |
| 3.6.5.15 | <i>Comprobación de existencia de flujo</i> | 82 |
| 3.6.5.16 | <i>Acondicionamiento de señal del Sensor de Flujo YF-S201</i> | 83 |
| 3.6.5.17 | <i>Construcción del circuito acondicionador del sensor de flujo YF-S201</i> | 84 |
| 3.6.5.18 | <i>Acondicionamiento señales para el sentido de giro del motor NEMA 17</i> | 85 |
| 3.6.5.19 | <i>Construcción del circuito de acondicionamiento de señal del sentido de giro del motor</i> | 86 |
| 3.6.5.20 | <i>Acondicionamiento de señal de paso del motor</i> | 86 |
| 3.6.5.21 | <i>Construcción del circuito para el acondicionamiento de la señal de paso del motor</i> | 87 |
| 3.6.5.22 | <i>Proceso de secuencia en el modo automático</i> | 88 |
| 3.6.5.24 | <i>Diagrama de Conexiones Eléctricas</i> | 90 |
| 3.7 | Construcción de la máquina de ensayos Jominy | 90 |
| 3.7.1 | <i>Tanque Porta probeta y de Almacenamiento</i> | 90 |
| 3.7.2 | <i>Estructura de la máquina</i> | 91 |
| 3.7.3 | <i>Construcción del sistema hidráulico</i> | 92 |
| 3.7.4 | <i>Construcción de la carcasa</i> | 93 |
| 3.7.5 | <i>Ensamblaje del circuito electrónico</i> | 93 |
| 3.7.6 | <i>Ensamblaje de la válvula de control</i> | 94 |
| 3.7.7 | <i>Ensamblaje final de la máquina de ensayos Jominy</i> | 95 |
| 3.8 | Ficha técnica de la máquina de ensayos Jominy | 95 |
| 3.9 | Revisiones previas a la puesta en marcha de la máquina Jominy | 96 |
| 3.10 | Calibración de la máquina Jominy previo a su funcionamiento | 96 |
| 3.11 | Análisis de costos | 97 |
| 3.11.1 | <i>Costos directos</i> | 98 |
| 3.11.1.1 | <i>Costo de Materiales</i> | 98 |
| 3.11.1.2 | <i>Costo de Fabricación</i> | 99 |
| 3.11.1.3 | <i>Costo de Mano de Obra</i> | 99 |
| 3.11.1.4 | <i>Costo Directo Total</i> | 99 |
| 3.11.2 | <i>Costos indirectos</i> | 100 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 3.11.2.2 | <i>Costo Indirecto Total</i> | 100 |
| 3.11.3 | <i>Costo total de la máquina de ensayos Jominy</i> | 100 |

CAPITULO IV

| | | |
|-----------|---|-----|
| 4. | RESULTADOS | 101 |
| 4.1 | Características del acero a ensayar | 101 |
| 4.2 | Ensayo Jominy del acero AISI 4340 | 101 |
| 4.3 | Medición de dureza Rockwell según la norma ASTM E18-15 “Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials” | 102 |
| 4.3.1 | <i>Medición de dureza Rockwell en la probeta templada de AISI 4340</i> | 104 |
| 4.3.2 | <i>Dureza teórica de la martensita en función del contenido de carbono</i> | 105 |
| 4.4 | Curva de templabilidad experimental obtenida para el acero AISI 4340 | 107 |
| 4.5 | Curva de templabilidad teórica tomada como referencia | 107 |
| 4.6 | Contraste de las curvas de templabilidad | 108 |
| 4.7 | Caracterización del acero AISI 4340 frente a la templabilidad | 109 |
| 4.7.1 | <i>Estimación teórica del cambio microestructural en la probeta templada de AISI 4340</i> | 109 |
| 4.7.2 | <i>Preparación de las probetas de acero AISI 4340 para el análisis metalográfico</i> | 111 |
| 4.7.3 | <i>Interpretación de micrografías obtenidas en las probetas de acero AISI 4340</i> | 112 |
| 4.7 | Discusión de resultados | 117 |
| 5. | CONCLUSIONES | 121 |
| 6. | RECOMENDACIONES | 122 |

GLOSARIO

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|--------------------|--|----|
| Tabla 1-3: | Evaluación de las necesidades del usuario..... | 29 |
| Tabla 2-3: | Contraste de marcas REMET-UNIVERSAL MOTION..... | 30 |
| Tabla 3-3: | Desarrollo de las necesidades del usuario..... | 33 |
| Tabla 4-3: | Escala de evaluación..... | 35 |
| Tabla 5-3: | Ponderaciones establecidas en el método ordinal de criterios ponderados..... | 35 |
| Tabla 6-3: | Evaluación de cada alternativa de solución..... | 36 |
| Tabla 7-3: | Evaluación del peso específico por cada criterio..... | 36 |
| Tabla 8-3: | Evaluación del peso específico del criterio “Eficiencia” | 36 |
| Tabla 9-3: | Evaluación del peso específico del criterio “Operabilidad” | 36 |
| Tabla 10-3: | Evaluación del peso específico del criterio “Durabilidad” | 37 |
| Tabla 11-3: | Evaluación del peso específico del criterio “Tamaño” | 37 |
| Tabla 12-3: | Tabla de conclusiones de la evaluación de cada alternativa..... | 37 |
| Tabla 13-3: | Resumen de selección de tuberías..... | 42 |
| Tabla 14-3: | Dimensiones del tanque portaprobeta..... | 43 |
| Tabla 15-3: | Dimensiones del tanque de almacenamiento..... | 44 |
| Tabla 16-3: | Propiedades del fluido de trabajo..... | 45 |
| Tabla 17-3: | Propiedades de la tubería de succión..... | 46 |
| Tabla 18-3: | Valores de longitud equivalente y coeficiente K de accesorios en succión..... | 51 |
| Tabla 19-3: | Propiedades de la tubería de descarga..... | 52 |
| Tabla 20-3: | Valores de longitud equivalente y coeficiente K de accesorios en descarga..... | 54 |
| Tabla 21-3: | Características de la bomba..... | 59 |
| Tabla 22-3: | Dimensiones de la Boquilla de Enfriamiento..... | 61 |
| Tabla 23-3: | Dimensiones y material de la portaprobeta..... | 61 |
| Tabla 24-3: | Dimensiones generales..... | 63 |
| Tabla 25-3: | Propiedades mecánicas del acero ASTM A-36..... | 63 |
| Tabla 26-3: | Perfiles seleccionados para la estructura..... | 63 |
| Tabla 27-3: | Peso de cada elemento montado sobre la estructura de la máquina Jominy..... | 64 |
| Tabla 28-3: | Dimensiones de la base..... | 70 |
| Tabla 29-3: | Elementos de entrada del sistema..... | 74 |
| Tabla 30-3: | Elementos actuadores del sistema..... | 74 |
| Tabla 31-3: | Elementos de protección del sistema..... | 75 |

| | | |
|--------------------|--|-----|
| Tabla 32-3: | Elementos de maniobra del sistema..... | 75 |
| Tabla 33-3: | Elementos auxiliares del sistema..... | 75 |
| Tabla 34-3: | Unidad de control del sistema..... | 76 |
| Tabla 35-3: | Ficha técnica de PLC XINJE XD3-16RT-E..... | 76 |
| Tabla 36-3: | Valores límite en la banda de tolerancia..... | 79 |
| Tabla 37-3: | Valores límites de ingreso a la zona de ajuste fino..... | 80 |
| Tabla 38-3: | Velocidades de trabajo de la válvula proporcional..... | 81 |
| Tabla 39-3: | Caudales de Seguridad..... | 82 |
| Tabla 40-3: | Rango de medición del sensor YF-S201..... | 82 |
| Tabla 41-3: | Entradas PLC XINJE..... | 89 |
| Tabla 42-3: | Salidas físicas PLC XINJE..... | 89 |
| Tabla 43-3: | Ficha técnica de la máquina de ensayos Jominy..... | 89 |
| Tabla 44-3: | Costo de Materiales..... | 98 |
| Tabla 45-3: | Costo de Fabricación..... | 99 |
| Tabla 46-3: | Costo de Mano de Obra..... | 99 |
| Tabla 47-3: | Costo Directo Total..... | 99 |
| Tabla 48-3: | Costo Indirecto Total..... | 100 |
| Tabla 49-3: | Costo Total..... | 100 |
| Tabla 1-4: | Composición química de la probeta de suministro..... | 101 |
| Tabla 2-4: | Procedimiento del ensayo Jominy realizado bajo la norma ASTM A-255..... | 101 |
| Tabla 3-4: | Procedimiento de medición de dureza Rockell definido por la ASTM E18-15..... | 103 |
| Tabla 4-4: | Parámetros empleados en la medición de dureza Rockwell C..... | 104 |
| Tabla 5-4: | Valores de dureza Rockwell C..... | 105 |
| Tabla 6-4: | Composición química del acero AISI 4340..... | 107 |
| Tabla 7-4 | Procedimiento de preparación de las probetas..... | 112 |
| Tabla 8-4: | Micrografía de la probeta de suministro acero AISI 4340..... | 113 |
| Tabla 9-4: | Microestructura tomada a 5 mm de su extremo templado..... | 113 |
| Tabla 10-4: | Microestructura tomada a 19 mm del extremo templado..... | 114 |
| Tabla 11-4: | Microestructura tomada a 38 mm del extremo templado..... | 114 |
| Tabla 12-4: | Microestructura tomada a 57 mm del extremo templado..... | 115 |
| Tabla 13-4: | Microestructura tomada a 76 mm del extremo templado..... | 115 |
| Tabla 14-4: | Microestructura tomada a 98 mm del extremo templado..... | 116 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|---------------------|---|----|
| Figura 1-2. | Acero medio en carbono SAE 1040. Muestra una matriz: ferrita (zonas blancas) y perlita (zonas oscuras). 300x..... | 7 |
| Figura 2-2. | Diagrama de fases Hierro – Carbono..... | 8 |
| Figura 3-2. | Matriz austenítica en forma de granos poliédricos (zonas claras). 500X..... | 9 |
| Figura 4-2. | Transformación de la Austenita..... | 9 |
| Figura 5-2. | Matriz perlítica formada por láminas de: ferrita (zonas oscuras) y cementita (zonas claras). 2500x..... | 10 |
| Figura 6-2. | Matriz formada por: bainita (bandas oscuras) y austenita (bandas blancas). 1000x..... | 10 |
| Figura 7-2. | Matriz 100% martensítica obtenida por temple. Presenta: a) Listones; b) Placas.500x..... | 11 |
| Figura 8-2. | Fases del temple en el acero..... | 12 |
| Figura 9-2. | Proceso de temple del acero..... | 13 |
| Figura 10-2. | Correlación entre la templabilidad y la transformación de fases..... | 13 |
| Figura 11-2. | Variación de las temperaturas Ms y Mf con respecto del contenido de carbon.16 | |
| Figura 12-2. | Procesos convencionales de temple y revenido..... | 16 |
| Figura 13-2. | Incidencia del contenido de carbono en la morfología de la martensita..... | 17 |
| Figura 14-2 | Evolución de la martensita en forma de: a) cintas, b) láminas..... | 17 |
| Figura 15-2 | Modificación de los elementos aleantes en las curvas TTT para el acero 4340. C-0.2%, Mn-0.78%, Ni-1.79%, Cr-0.8%, Mo-0.33%..... | 18 |
| Figura 16-2. | Curva de enfriamiento continuo (CCT) para un acero eutectoide..... | 19 |
| Figura 17-2. | Medición de la dureza Rockwell..... | 21 |
| Figura 18-2. | Esquema de la máquina Jominy..... | 21 |
| Figura 19-2. | Geometría del portaprobeta..... | 22 |
| Figura 20-2. | Temperaturas de Normalización y Austenización..... | 23 |
| Figura 21-2. | Esquema general de un sistema..... | 26 |
| Figura 22-2. | Sistema de lazo abierto..... | 26 |
| Figura 1-3. | Máquinas de Templabilidad. a) REMET, b) UNIVERSAL MOTION..... | 30 |
| Figura 2-3. | Despliegue de la casa de la calidad..... | 31 |
| Figura 3-3. | Nivel 0. | 32 |
| Figura 4-3. | Nivel 1..... | 32 |
| Figura 5-3. | Alternativa A..... | 34 |
| Figura 6-3. | Alternativa B..... | 34 |

| | | |
|---------------------|--|----|
| Figura 7-3. | Alternativa C..... | 34 |
| Figura 8-3. | Esquema de análisis..... | 38 |
| Figura 9-3. | Diámetros de tuberías recomendados en función del flujo volumétrico..... | 41 |
| Figura 10-3. | Tanque Porta Probeta..... | 42 |
| Figura 11-3. | Tanque de almacenamiento..... | 44 |
| Figura 12-3. | Características del Acero Inoxidable AISI 304..... | 45 |
| Figura 13-3. | Velocidades utilizadas para el flujo de agua en tuberías..... | 46 |
| Figura 14-3. | Referencias para el cálculo de altura de bombeo..... | 55 |
| Figura 15-3. | Boquilla de enfriamiento..... | 61 |
| Figura 16-3. | a) Portaprobeta, b) Geometría del portaprobeta..... | 62 |
| Figura 17-3. | Estructura de la máquina Jominy..... | 62 |
| Figura 18-3 | Dimensiones generales de estructura..... | 63 |
| Figura 19-3 | Asignación de material a la estructura..... | 66 |
| Figura 20-3 | Mallado de la estructura..... | 67 |
| Figura 21-3 | Aplicación de cargas sobre la estructura..... | 67 |
| Figura 22-3 | Esfuerzo máximo y mínimo que soporta la estructura..... | 68 |
| Figura 23-3. | Factor de seguridad obtenido para la estructura..... | 69 |
| Figura 24-3. | Deformación total en la estructura de la máquina Jominy..... | 70 |
| Figura 25-3. | Base de la estructura | 71 |
| Figura 26-3. | Cubiertas:a) Frontal, b) Superior, c) Posterior, d) Lateral Izquierda, e) Lateral Derecha..... | 71 |
| Figura 27-3. | Tablero de control de la máquina Jominy..... | 73 |
| Figura 28-3. | Diagrama de bloques control en lazo cerrado..... | 74 |
| Figura 29-3. | Señal de onda cuadrada..... | 77 |
| Figura 30-3. | Representacion general de período y tiempo de muestreo..... | 78 |
| Figura 31-3. | Banda de tolerancia y respuesta..... | 79 |
| Figura 32-3. | Zona de ajuste fino..... | 80 |
| Figura 33-3. | Velocidades de trabajo y zona de ajuste fino..... | 81 |
| Figura 34-3 | Circuito acondicionador sensor de flujo YF-S201..... | 84 |
| Figura 35-3. | Circuito acondicionador sentido de giro NEMA 17..... | 86 |
| Figura 36-3 | Circuito acondicionador de paso NEMA 17..... | 88 |
| Figura 37-3 | Graficet de la secuencia en modo automático..... | 89 |
| Figura 38-3 | Diagrama eléctrico de la máquina Jominy..... | 90 |
| Figura 39-3 | Construccion del tanque portaprobeta y de almacenamiento..... | 91 |

| | | |
|---------------------|--|-----|
| Figura 40-3 | Construcción del armazón de la estructura..... | 92 |
| Figura 41-3. | Construcción del sistema hidráulico..... | 92 |
| Figura 42-3. | Construcción de la carcasa..... | 93 |
| Figura 43-3. | Ensamblaje del circuito electrónico..... | 94 |
| Figura 44-3. | Válvula de Control..... | 94 |
| Figura 45-3. | Máquina de ensayos Jominy..... | 95 |
| Figura 46-3. | Comprobación de la calibración del flujo..... | 97 |
| Figura 1-4. | Parámetros de dureza Rockwell para diferentes escalas de medición..... | 103 |
| Figura 2-4. | Puntos de referencia..... | 105 |
| Figura 3-4 | Banda de templabilidad teórica - AISI 4340..... | 108 |
| Figura 4-4 | Variación de la dureza HRC en función del contenido de carbono..... | 109 |
| Figura 5-4 | Estimación de porcentaje de martensita obtenida luego del temple..... | 110 |
| Figura 6-4 . | Curvas de enfriamiento continuo (CCT) para el acero AISI 4340..... | 111 |
| Figura 7-4 | Zonas de análisis en la probeta templada..... | 116 |

ÍNDICE DE GRÁFICOS

| | | |
|---------------------|--|-----|
| Gráfico 1-4. | Curva experimental de templabilidad - AISI 4340..... | 107 |
| Gráfico 2-4. | Contraste de curvas de templabilidad: Experimental vs Teórica..... | 108 |

INDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** DIAGRAMA DE MOODY
- ANEXO B:** LONGITUD EQUIVALENTE EN DIAMETROS DE TUBERIA L_e/D
- ANEXO C:** FACTOR K VÁLVULA DE RETENCIÓN DE DISCO OSCILANTE
- ANEXO D:** FACTOR K SALIDAS DE TUBERÍA
- ANEXO E:** FACTOR K ESTRECHAMIENTO BRUSCO Y GRADUAL
- ANEXO F:** EXPANSIÓN Y CONTRACCIÓN REPENTINA
- ANEXO G:** TENSION DE VAPOR PARA DISTINTAS TEMPERATURAS
- ANEXO H:** DATA SHEET – SENSOR DE FLUJO YF-S201
- ANEXO I:** DATA SHEET – TRANSISTOR NPN
- ANEXO J:** MANUAL DE OPERACIÓN – MODO AUTOMATICO
- ANEXO K:** MANUAL DE OPERACIÓN – MODO MANUAL
- ANEXO L:** MANUAL DE OPERACIÓN– MODO REGULACION
- ANEXO M:** MANUAL DE MANTENIMIENTO – SISTEMA HIDRAÚLICO
- ANEXO O:** MANUAL DE SEGURIDAD
- ANEXO P:** GUIA DE LABORATORIO – PRÁCTICA JOMINY

SIMBOLOGIA

| | |
|-----------------|--|
| P | Presión del fluido. |
| γ | Peso específico del fluido agua |
| Z | Altura |
| g | Gravedad |
| V | Velocidad del fluido. |
| A | Área |
| D, d | Diámetro |
| Q | Caudal |
| R, r | Radio |
| Re | Número de Reynolds |
| Rr | Rugosidad Relativa |
| ξ | Rugosidad del material |
| f | Factor de Fricción |
| L | Longitud de tubería |
| h_{acc} | Pérdidas secundarias |
| Hl | Pérdidas primarias |
| $\frac{L_e}{D}$ | Relación Longitud efectiva – Diámetro |
| H_B | Altura de bombeo |
| h_{sp} | Cabeza de presión estática absoluta |
| h_s | Diferencia de elevación |
| h_f | Perdidas por fricción en la tubería |
| h_{vp} | Presión de vapor del líquido |
| P_H | Presión que ejerce el fluido sobre el recipiente |
| P_{abs} | Presión absoluta |
| η | Rendimiento total de la bomba |
| Pot | Potencia de la bomba |
| Q_d | Carga de diseño |
| W | Peso total |
| F | Frecuencia medida por el sensor |

LISTA DE ABREVIACIONES

| | |
|-------------|--|
| AISI | Instituto Americano del Hierro y el Acero |
| ASTM | Sociedad Americana de Ensayo de Materiales |
| BCC | Cubica Centrada en el Cuerpo |
| BCT | Tetragonal Centrada en el Cuerpo |
| CCT | Colling Continuous Transformation |
| HRC | Hardness Rockwell C |
| QFD | Despliegue de la función de calidad |
| TTT | Temperature, Time, Transformation |
| UNE | Una Norma Española |

RESUMEN

El objetivo del presente proyecto fue diseñar, construir y automatizar una máquina de ensayos Jominy de acuerdo a la norma ASTM A-255, para realizar ensayos de templabilidad en aceros. Inicialmente se realizó el despliegue del QFD, para conocer que los requerimientos experimentales establecidos en la norma ASTM A-255 son: obtener una columna de fluido de enfriamiento de 2,5 in de altura y mantenerla por 10 min. El diseño de la máquina se dividió en tres partes: hidráulico, estructural y electrónico. En la parte hidráulica se diseñó: los tanques, la boquilla de enfriamiento y un bypass de tuberías, que consta de: una línea de “enfriamiento” y una de “drenaje”. En la electrónica, se programó el algoritmo de control y se estableció como caudal de referencia 8,46 litros por minuto, valor que debe ser leído por el sensor de flujo instalado en la línea de enfriamiento para iniciar con el ensayo; caso contrario el PLC activa la válvula instalada en la línea de drenaje hasta alcanzar el caudal de referencia. La estructura fue diseñada lo más compacta posible y su resistencia comprobada con una simulación estática realizada en ANSYS. Para verificar la funcionalidad de la máquina una vez construida, se contrastó la curva de templabilidad teórica mostrada en (Callister, 1995, p.344) con la curva experimental obtenida para el acero AISI 4340; y se observó que sigue la misma tendencia que la teórica y los valores de dureza no varían significativamente; además se realizó un análisis micrográfico de la probeta templada en donde se comprobó que el extremo templado tiene una estructura 100% martensítica como se había predicho en los diagramas CCT. Analizando los resultados obtenidos, se concluyó que el diseño propuesto para la máquina Jominy cumple con los requerimientos experimentales establecidos en la norma ASTM A-255 y esta apta para usarla en el laboratorio.

Palabras clave: <ENSAYO JOMINY>, <TEMPLABILIDAD>, <ALTURA DE LA COLUMNA DE FLUIDO>, <ENFRIAMIENTO>, <ALGORITMO>, <DUREZA>, <MARTENSITA>.



05-04-2021

0936-DBRAI-UTP-2021

ABSTRACT

The objective of this project was to design, build and automate a Jominy testing machine according to the ASTM A-255 standard, to perform hardenability tests on steels. Initially, the QFD was deployed, to know that the experimental requirements established in the ASTM A-255 standard are to obtain a column of cooling fluid 2.5 in of eight and maintain it for 10 min. The design of the machine was divided into three parts: hydraulic, structural, and electronic. In the hydraulic part it was designed the tanks, the cooling nozzle and a pipe bypass, which consists of: a “cooling” line and a “drainage” line. In the electronics, the control algorithm was programmed and 8.46 liters per minute was established as the reference flow, a value that must be read by the flow sensor installed in the cooling line to start the test; otherwise, the PLC activates the valve installed in the drain line until reaching the reference flow. The structure was designed as compact as possible, and its resistance was verified with a static simulation carried out in ANSYS. To verify the functionality of the machine once built, the theoretical hardenability curve shown in (Callister, 1995, p.344) was contrasted with the experimental curve obtained for AISI 4340 steel; and it was observed that it follows the same trend as the theoretical one and the hardness values do not vary significantly. In addition, a micrographic analysis of the tempered specimen was carried out, where it was found that the tempered end has a 100% martensitic structure as predicted in the CCT diagrams. Analyzing the results obtained, it was concluded that the design proposed for the Jominy machine meets the experimental requirements established in the ASTM A-255 standard and is suitable for use in the laboratory.

Keywords: <JOMINY TEST>, <TEMPLABILITY>, <FLUID COLUMN HEIGHT>, <COOLING>, <ALGORITHM>, <HARDNESS>, <MARTENSITE>.

INTRODUCCIÓN

La cualidad de un acero para presentar endurecimiento en mayor o menor profundidad se denomina templabilidad. Autores definen la templabilidad como la capacidad relativa del acero para ser endurecido mediante temple (Shackelford, 2010, p.364). Otros la consideran como la propiedad que determina la profundidad y distribución de la dureza inducida mediante tratamiento térmico a partir de la condición austenítica (Smith, 1998, p.442). La templabilidad no debe confundirse con la dureza de un acero, que es su resistencia a la deformación plástica, generalmente por indentación o melladura. En los aceros la templabilidad está sujeta a la velocidad de enfriamiento y al cambio en los elementos de aleación, y estas variaciones están relacionadas a un cambio microestructural (Delatorre *et al.*, 2014, p.57).

En la industria siderúrgica el método más utilizado para caracterizar la templabilidad en aceros es la prueba de enfriamiento extremo (End-Quench), o ensayo Jominy, descrita por la American Society for Testing and Materials (ASTM), ó Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, en su normativa ASTM-A255 Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel (Métodos de Prueba Estándar para la Determinación de la Templabilidad en Acero). Este ensayo consiste en enfriar con agua un extremo de una probeta cilíndrica de 1.0 in. de diámetro y medir la respuesta de endurecimiento en función de la distancia desde el extremo enfriado (ASTM INTERNATIONAL, 2014, p.1). Los datos del ensayo de Jominy se pueden usar para determinar si un acero en particular se puede endurecer lo suficiente en diferentes medios de enfriamiento. En el trabajo “Revisión del Ensayo Jominy y Determinación del Efecto de Elementos Aleantes” (Chandra *et al.*, 2011, p.65) se discute la importancia de la templabilidad y el papel del ensayo Jominy en la determinación de esta propiedad en los aceros.

Para la correcta ejecución del ensayo Jominy se requiere de un dispositivo de enfriamiento por agua con una capacidad adecuada para proporcionar una corriente vertical de fluido que se puede controlar a una altura de 2.5 in. (63.5 mm), cuando pasa a través de un orificio de 0.5 in. (12.7 mm) de diámetro (ASTM INTERNATIONAL, 2014, p.1). Es así que la efectividad de los ensayos de templabilidad involucra variables importantes como: caudal de enfriamiento, el tiempo de permanencia en el chorro de fluido, la uniformidad en el baño de la probeta y una rápida transferencia de calor. Por esto, el diseño de las máquinas de ensayo Jominy han llegado a implementar mecanismos extras de enfriamiento, sistemas de control directo de variables e incluso hasta una base de datos de templabilidad para garantizar y corroborar resultados (Aweda;*et al.*,2017, p.5)

En Ecuador, el estudio de templabilidad es una práctica común en los centros de educación superior, pero relegado en la industria siderúrgica. Escuelas de Ingeniería desarrollan proyectos de investigación y construcción de equipos en donde se involucra los conocimientos sobre materiales, sus propiedades y tratamientos. Es el caso de equipos que permiten caracterizar los materiales respecto a su templabilidad conociendo el proceso y la incidencia que muestran las variables involucradas en el resultado final del ensayo.

El trabajo “Diseño de una máquina para caracterización de templabilidad en aceros” en la ciudad de Quito-Ecuador, en base a la normativa española UNE-EN ISO 642, presenta una propuesta que cumple con los requerimientos técnicos para un correcto desarrollo del ensayo Jominy (Casco y Sigcha, 2015, p.1). En el trabajo de investigación “Diseño y construcción de un banco de pruebas para ensayos Jominy” en Cuenca-Ecuador, se muestra el proceso y se hace énfasis en el ensayo de los aceros AISI 1040 y 4140, destacando las curvas de templabilidad y su aplicación a nivel industrial en el cambio y selección de aceros dependiendo de las propiedades deseadas (Rivera y Vega, 2009, p.1). El control manual de los procesos ejecutados en el equipo de templabilidad es el factor común presente en ambos trabajos de investigación

En la ciudad de Riobamba, el estudio de los materiales y sus propiedades no ha tenido mucho impacto ya que no se cuentan con documentos o investigaciones que respalden el estudio de la templabilidad en los aceros. Pero este no es el caso de las instituciones de educación superior ubicadas en la ciudad, donde cada vez se toma más interés por el tema. Como evidencia de ello se han estructurado proyectos acerca del uso y un correcto mantenimiento de los equipos, máquinas e instrumentos en laboratorios (Peñañiel, 2014, p.1). En particular, en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo la facultad de Mecánica actualmente cuenta con una máquina Jominy que se encuentra fuera de servicio debido a que presenta falencias en los parámetros de experimentación propuestos por la norma ASTM A255 y con ello afecta directamente el grado de templabilidad obtenido en las probetas.

En este trabajo, se propone el diseño y la construcción de una máquina automatizada para ensayos Jominy en base a la normativa ASTM A255 y el contraste de las curvas de templabilidad obtenidas experimentalmente con las curvas mostradas en bibliografía para el acero AISI 4340.

CAPÍTULO I

1. DIAGNOSTICO DEL PROBLEMA.

1.1. Antecedentes

En las Instituciones de Educación Superior (IES) del país a medida que pasa el tiempo se fomenta en los estudiantes la investigación de nuevos materiales y sus propiedades, ya que hoy en día la industria busca desarrollar elementos o sistemas mecánicos que tengan mayor durabilidad cuando estos trabajen bajo condiciones extremas. La mejora de las propiedades de los materiales se alcanza sometiendo al material a diferentes tratamientos térmicos entre los cuales están: revenido, recocido y temple; donde cada uno de ellos tienen principios diferentes.

La templabilidad del acero se caracteriza por la forma en cómo se distribuye la dureza en el interior del material y la profundidad que esta alcanza. La templabilidad modifica los valores de la dureza para los aceros en función a la geometría y composición química que estos presentan; como por ejemplo los aceros aleados con respecto de los aceros al carbono presentan mayores valores de dureza y una mejor distribución de esta después del tratamiento de temple. Con un ensayo de templabilidad se logra modificar las propiedades del material para una mayor aplicabilidad en la industria una vez procesados (Apraiz, 1949, p.175)

Los ensayos de templabilidad deben cumplir con diversos parámetros establecidos en normativas como por ejemplo la norma ASTM A 255 “Métodos de Prueba Estándar para la Determinación de la Templabilidad en Acero”; la cual describe los procedimientos de dos métodos: método cuantitativo o Prueba Jominy y el método de Grossman que determina la templabilidad del acero a partir de su composición química (ASTM INTERNATIONAL, 2014, p.1).

Algunas Universidades de educación superior del país han desarrollado trabajos de diseño y construcción de máquinas de ensayo Jominy para trabajar en la templabilidad del acero, tal es el caso del desarrollo de una máquina Jominy con fines didácticos bajo los parámetros establecidos en la norma ASTM A255 en la Universidad Técnica del Norte, mientras que otro trabajo propuesto en la Universidad Salesiana explica el desarrollo de una máquina bajo la normativa UNE-EN-ISO642 en donde el diseño de esta cumplió con los estándares establecidos para la altura de chorro de 70 mm (Mejia, 2016, p.1).

Ambos trabajos experimentaron con los aceros 4140 y 4340 que son de mayor comercialización en el país. Cabe recalcar que la operabilidad y el control de los elementos que integran estas máquinas fueron planificados a realizarse de forma manual.

En la ciudad de Riobamba la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo dispone de laboratorios técnicos en cada una de sus facultades, como en el caso de la Facultad de Mecánica que cuenta con un laboratorio destinado para el área de materiales el cual dispone de equipos que permiten a los estudiantes la realización de prácticas de: fundición, soldadura, tratamientos térmicos, etc. Actualmente algunos de estos equipos no se encuentran funcionando, como es el caso de la máquina de ensayos Jominy; lo que impide al estudiante realizar ensayos de templabilidad en materiales y no profundizar los conocimientos sobre sus propiedades.

La máquina utilizada para ensayos de templabilidad presente en el laboratorio de Materiales de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH está fuera de funcionamiento desde el año 2017 según la información recibida por parte del técnico docente encargado del laboratorio; quien supo manifestar que los últimos ensayos de templabilidad realizados en esta máquina no cumplían con los parámetros de experimentación establecidos en la norma ASTM A255, como por ejemplo el chorro de enfriamiento no alcanzaba la altura adecuada y el tiempo de permanencia era menor al establecido; variables que afectaban directamente a los resultados de templabilidad finales.

En vista de esto se propone el diseño y la construcción de una máquina automatizada de ensayos Jominy que cumpla con los parámetros de experimentación establecidos en la norma ASTM A-255 con el fin de garantizar la efectividad de los resultados obtenidos en los ensayos de templabilidad que en ella se realicen; además de que se incorpora un nuevo equipo al material técnico que dispone la facultad sirviendo como aporte al desarrollo de los estudiantes y la facultad en general.

1.2. Objetivos.

1.2.1 Objetivo general.

- Diseñar y construir una máquina automatizada para ensayos Jominy en base a la normativa ASTM A255 para la determinación de curvas de templabilidad en aceros

1.2.2 Objetivos específicos.

- Diseñar el sistema hidráulico y estructura de la máquina Jominy, en base a los parámetros requeridos en la normativa ASTM A255 para el ensayo de templabilidad en aceros.
- Construcción de la máquina Jominy e implementación del sistema automatizado de control de la altura de columna de agua y tiempo de duración para el ensayo de templabilidad según lo indicado en la Norma ASTM A255.
- Realizar el protocolo de pruebas, calibración y validación funcional para la máquina mediante el ensayo de templabilidad en el acero AISI 4340 y su contraste con valores bibliográficos.
- Caracterizar el acero AISI 4340 frente a la templabilidad mediante el ensayo Jominy, análisis microestructural y obtención de su curva de templabilidad
- Elaborar el manual de operación, mantenimiento y seguridad de la máquina de ensayos Jominy, así como su respectiva guía de práctica de laboratorio

CAPITULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Aceros

El acero es un material ampliamente usado en el campo ingenieril debido a sus excelentes propiedades mecánicas. Un acero resulta de combinar hierro, carbono y cantidades de elementos aleantes como: Cr, Ni, Mo o Mn; los mismos que proporcionan al acero propiedades especiales de acuerdo al contenido en que son agregados y que los clasifican en: Aceros de baja y alta aleación (Maldonado, 1996).

2.1.1 Elementos aleantes presentes en el acero

El objetivo esencial de añadir elementos de aleación a la composición del acero es principalmente mejorar las propiedades mecánicas como: dureza, resistencia mecánica, térmica y a la corrosión del material. A continuación, se describen los elementos aleantes más empleados:

Cromo: mejora la resistencia a la corrosión a elevadas temperaturas, la dureza y la templabilidad del material; por lo general se emplean en aceros inoxidable.

Níquel: mejora la dureza, tenacidad al impacto, resistencia mecánica y a la corrosión; por lo general se combinan con el cromo para aumentar la dureza.

Molibdeno: mejora la resistencia a la tracción, fluencia mecánica, deformación y templabilidad, debido al desplazamiento del grano cuando el acero está sometido a elevadas temperaturas.

Silicio: mejora la templabilidad del elemento y aumenta la resistencia en los aceros de bajo carbono, resistencia a la fatiga y eleva el límite elástico.

Manganeso: este elemento por lo general se lo combina con el azufre y el fósforo, para reducir la fragilidad, forjabilidad, capacidad de endurecimiento, resistencia al desgaste y a la tracción (BorTec).

2.1.2 Aceros de baja aleación

Los aceros de baja aleación, aparte de estar formados por hierro – carbono contienen elementos aleantes como: el níquel, cromo, vanadio, molibdeno, titanio, cobalto, etc.; en concentraciones inferiores al 5% en peso. Este tipo de aceros, son de mayor aplicación en la industria y se los clasifica según el contenido de carbono en bajos, medios y altos en carbono (Shackelford, 2010, p.393).

2.1.3 Aceros medios en carbono.

Este tipo de aceros tienen una concentración de (0,25 - 0,6) % C, lo cual permite que sean tratados térmicamente por temple, austenizado o revenido con el fin de formar microestructuras y mejorar la tenacidad, resistencia al desgaste y mecánica del material (Callister, 1995, p.365).



Figura 1-2. Acero medio en carbono SAE 1040. Muestra una matriz: ferrita (zonas blancas) y perlita (zonas oscuras). 300x

Fuente: (ASM INTERNATIONAL, 2002, p.4)

2.1.4 Acero AISI 4340

Es un acero medio en carbono y de baja aleación, cuya propiedad más sobresaliente es la elevada resistencia y tenacidad para secciones de gran tamaño. Sus elementos aleantes más importantes son: níquel, cromo y molibdeno; los cuales mejoran la resistencia a golpes, impactos, al desgaste y la abrasión del material. Por lo general, se suministra endurecido y revenido cuya resistencia a la tracción está entre 930 ~ 1080 MPa, mientras que los de estado preendurecido o templado mejoran la capacidad de endurecimiento de la superficie del material mediante llama. Los elementos mecánicos fabricados de acero AISI 4340 tienen la capacidad de soportar grandes cargas y esfuerzos además de que puede ser mecanizado por cualquier método habitual (OTAI).

2.2 Diagrama de fases Hierro – Carbono

El diagrama de fases hierro - carbono es la representación gráfica de las transformaciones que experimentan las aleaciones Fe-C cuando están sometidas a diferentes velocidades de enfriamiento, composiciones químicas y parámetros de experimentación en un tratamiento térmico (Smith, 1998, p.415).

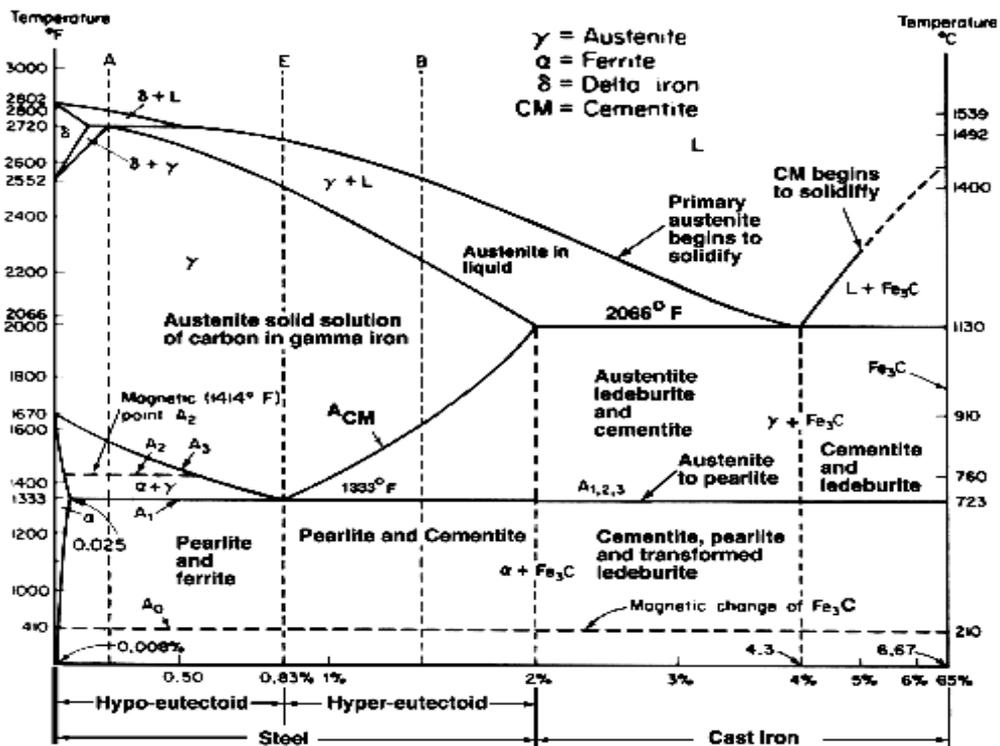


Figura 2-2. Diagrama de fases Hierro – Carbono.

Fuente: (Gonzales, 2008)

Hay que tomar en cuenta que si el diagrama Fe-C es estable, tendrá como alcance de estudio las fundiciones de silicio; mientras que si es metaestable estará enfocado netamente en aceros (Belzunce, 2001, p.7).

2.2.1 Austenita (γ)

Esta fase es una solución sólida intersticial del carbono en el hierro, tiene una estructura cristalina de tipo FCC que independientemente de la temperatura y velocidad de enfriamiento, brinda mayor ductilidad a la fase. La solubilidad de la austenita crece proporcionalmente con el contenido de carbono y el aumento de la temperatura. Esta fase tiene como característica una baja resistencia mientras que al ser trabajada en frío podría llegar a producir martensita inducida por tensión (ASM INTERNATIONAL, 1985, p.300)

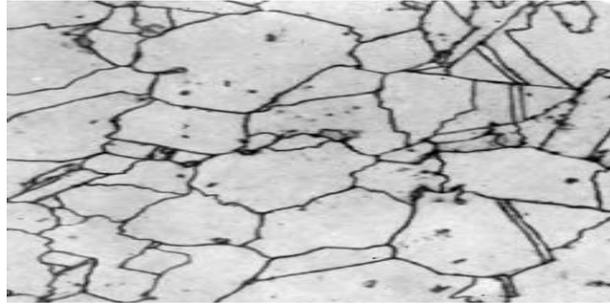


Figura 3-2. Matriz austenítica en forma de granos poliédricos (zonas claras). 500X

Fuente: (POZNAYKA, 2017)

2.3 Transformación de la fase Austenítica

La fase austenítica metaestable sufre la transformación total de su estructura principal al ser sometida a diferentes velocidades de enfriamiento. Las condiciones de inicio y fin de esta transformación están dadas en función del tipo de acero, su microestructura y composición. Para evidenciar la transformación de la austenita se hace uso de los diagramas TTT (temperatura, tiempo, transformación). A continuación, en la figura 4-2 se indican las estructuras obtenidas en el acero para diferentes velocidades de enfriamiento de la austenita.

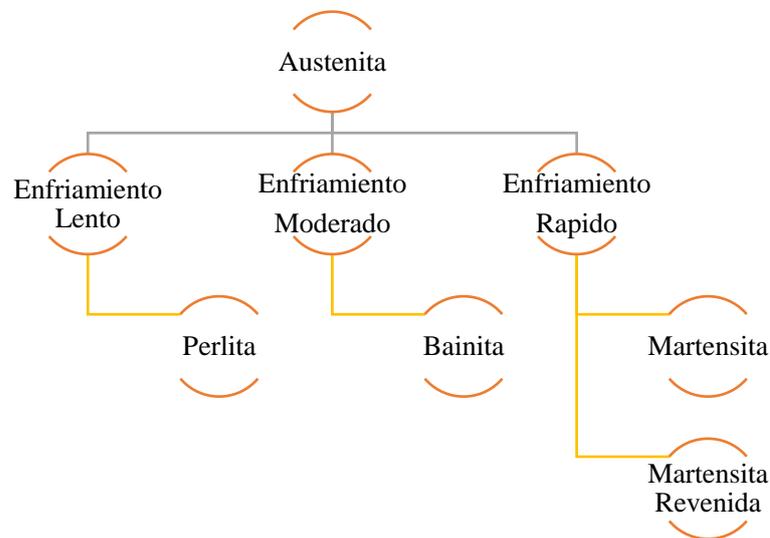


Figura 4-2. Transformación de la Austenita.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

2.3.1 Fase Perlítica

La fase perlítica es un constituyente importante en la microestructura del acero debido a que es el encargado de brindar resistencia mecánica al material, esta fase se origina a partir de la transformación isotérmica de la austenita y tiene como componentes las fases: ferrita y cementita,

cuyas microestructuras son de tipo laminar (García, 1999, p.7). Para los aceros eutectoides la perlita se clasifica en gruesa cuando tiene un enfriamiento lento y alcanza una temperatura cercana a los 272°C mientras que la perlita fina se forma a medida que la temperatura sigue disminuyendo haciendo que las láminas microestructurales se hagan más delgadas, estas microestructuras otorgan las propiedades de dureza, resistencia y ductilidad al acero (Diego, 2008).

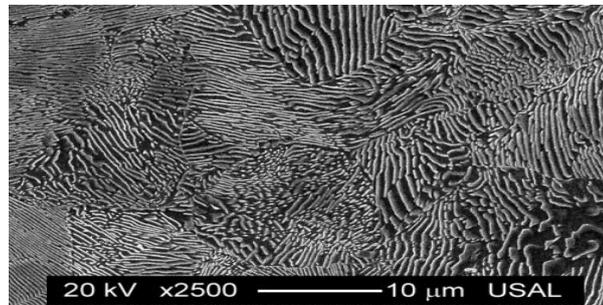


Figura 5-2. Matriz perlítica formada por láminas de: ferrita (zonas oscuras) y cementita (zonas claras). 2500x

Fuente: (Toribio *et al.*, 2016, p.3)

2.3.2 Fase Bainítica

La fase Bainítica resulta de la difusión imparcial del carbono contenido en la austenita como resultado de las bajas temperaturas de enfriamiento a la que es sometido el material, se habla de temperaturas inferiores a los 565°C. Estas estructuras brindan: mayor dureza, resistencia y ductilidad (Maldonado, 1996, p.22).

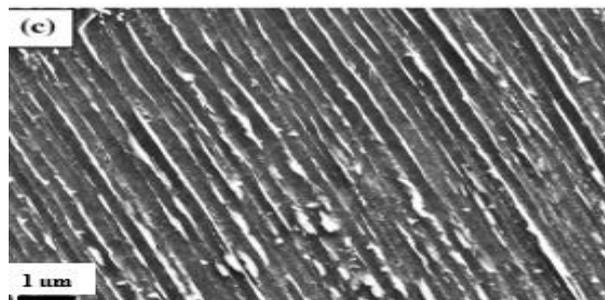


Figura 6-2. Matriz formada por: bainita (bandas oscuras) y austenita (bandas blancas). 1000x

Fuente: (YIN, *et al.*, 2016, p.1448)

2.3.3 Fase Martensítica

Se origina a temperaturas inferiores a los 275°C y se diferencia de otras estructuras, debido a que su formación es instantánea e inicia una vez que se alcanza una temperatura establecida y no tiene una formación gradual. La martensita se presenta principalmente en aceros templados con

porcentajes de carbono de hasta el 0,8% C lo que permite variar las propiedades como: dureza, resistencia y fragilidad del acero (Universidad Tecnológica Nacional, p.3).



Figura 7-2. Matriz 100% martensítica obtenida por temple. Presenta: a) Llistones; b) Placas.500x

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

2.4 Templabilidad del acero

La templabilidad es definida como la capacidad de endurecimiento que tiene un acero luego de ser sometido a un tratamiento térmico de temple y haber formado una microestructura martensítica. La templabilidad representa también la profundidad de endurecimiento que alcanza el material luego de ser enfriado a diferentes velocidades, está directamente relacionada con la composición química del acero debido a que para cada tipo de combinación se establecen velocidades críticas de enfriamiento que obligatoriamente deben ser alcanzadas para iniciar con la formación de micro constituyentes duros tales como la Martensita (Callister, 1995, p. 343).

2.4.1 Tratamiento térmico de temple

El proceso de templado de acero consiste en calentar una probeta con geometría definida hasta una temperatura de austenización ($815 \sim 870$) °C para luego ser rociada o sumergida rápidamente en un medio de temple (aceite, aire, soluciones poliméricas, sales fundidas) durante un tiempo específico hasta alcanzar la modificación de la microestructura interna mediante el aumento del tamaño de grano de las matrices presentes (ASM INTERNATIONAL, 1991, p.161).

Con la modificación de la microestructura de un acero templado el material se vuelve más versátil para mejorar sus propiedades mecánicas como: la dureza, resistencia o tenacidad; y con ello ampliar sus aplicaciones en el campo ingenieril. Es por esto que a nivel industrial para determinar la templabilidad del acero se emplean procedimientos estándar establecidos en normas internacionales como la ASTM A255 – 10 “*Standard Test Methods for Determining*

Hardenability of Steel” o UNE - EN ISO 642 “Acero - Ensayo de templabilidad por templado final (ensayo Jominy)”.

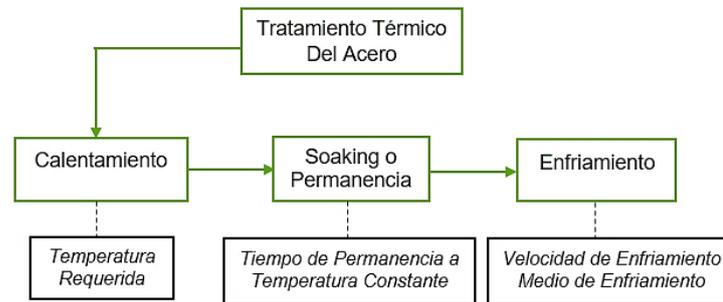


Figura 8-2. Fases del temple en el acero.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

2.4.1.1 Fase 1: Calentamiento

La temperatura de austenización deberá garantizar que todos los carburos puedan disolverse. De esta manera el carbono en solución sólida intersticial dentro de la austenita se podrá aprovechar para poder tener el efecto de endurecimiento. Temperaturas de austenización y tiempos de calentamiento elevados producen un crecimiento pronunciado del grano, así como también una baja disolución de carburo. Es importante tener presente que para todo tratamiento térmico la seguridad en la práctica se basa en un calentamiento relativamente lento y uniforme hasta la temperatura de austenización. Las temperaturas de austenización para la mayoría de los aceros al carbono y aleaciones ventajosamente ya están tabuladas.

(Díaz y Reyes, 2012, p.106-107).

El calentamiento o enfriamiento del material está en función de los siguientes factores:

- Masa del material a calentar
- Velocidad a la que el material puede absorber el calor
- Temperatura a la que se desea calentar
- Temperatura y transferencia de calor características del medio de calentamiento

2.4.1.2 Fase 2: Enfriamiento

Los resultados del temple varían en función de la composición del acero, la agitación y el poder de enfriamiento del medio del temple, cuya selección depende de los siguientes (Díaz y Reyes, 2012, p.109).

- El calor específico y el poder de conducción de calor del acero
- La masa, forma y estado superficial de la pieza
- El llamado “poder de enfriamiento” del medio del temple
- Temperatura del medio de temple

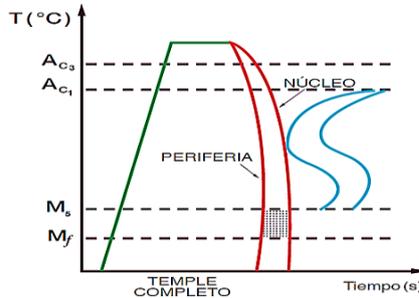


Figura 9-2. Proceso de temple del acero.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

2.4.2 Curvas de templabilidad

Las curvas de templabilidad son representaciones gráficas de dureza Rockwell (HRC) vs la distancia del extremo templado de una probeta como se observa en la figura 9 -2, estos diagramas muestran como la velocidad de enfriamiento y la dureza disminuyen a medida que aumenta la distancia al extremo templado. En lo que son aceros de alta templabilidad se evidencia que para largas distancias la dureza es elevada cosa que no sucede con los aceros de baja templabilidad (Callister, 1995, p.342).

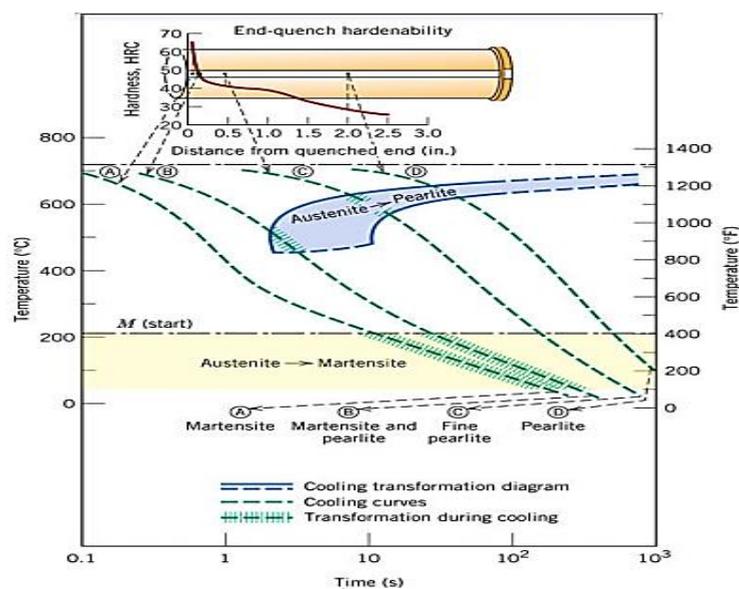


Figura 10-2. Correlación entre la templabilidad y la transformación de fases.

Fuente: (Materials Science Apps Lab, p.9)

2.4.3 Factores que influyen en el temple del acero

- Composición y elementos aleantes.

La composición química y los elementos aleantes añadidos al acero tienen como función mejorar su templabilidad, amplían el periodo de incubación de la austenita previo a su transformación y con ello agilitan la formación de diferentes microestructuras. Por ejemplo, si bajo las mismas condiciones se enfría un acero al carbono y un acero aleado, del primero se obtiene ferrita y perlita, mientras que del segundo se obtiene bainita, martensita y pequeñas cantidades de ferrita o perlita. Los elementos aleantes además influyen también en la dureza del material, debido a que si se compara la dureza superficial del acero al carbono con respecto del aleado se evidencia que es mayor con respecto del núcleo mientras que en el acero aleado esta permanece constante a lo largo de la sección (Totten, 2007, p.544).

- Contenido de carbono.

El contenido de carbono disuelto en austenita antes del enfriamiento aumenta la dureza del acero por la elevada densidad de dislocación y distorsión de la red cristalina de martensita; pero en aceros cuyos contenidos de carbono sean mayores a un 0,5 el enfriamiento produce un ligero aumento de la dureza y a su vez una reducción en la tenacidad de la martensita debido a la sobresaturación del contenido de carbono lo que produce altas tensiones en el material. Con un proceso de temple se produce una reducción en la dislocación y sobresaturación de carbono por precipitación para disminuir el volumen de austenita retenida y lograr la liberación de tensiones en la martensita (Totten, 2007, p.544).

- Geometría de la probeta

La geometría y dimensiones de las probetas influyen en la velocidad de enfriamiento y la dureza del material, debido a que varían en función de las posiciones distribuidas a lo largo de su sección transversal o longitudinal. Para evidenciar estos cambios, se hace uso de las curvas de templabilidad (Callister, 1995, p.346).

- Tamaño de grano efectivo

Este factor indica que mientras más fino sea el tamaño de grano, existe menor grado de templabilidad debido a que la transformación a perlita fina es mucho más rápida. Es por esto que la temperatura a la cual se realice el proceso del temple y la cantidad de partículas como alúmina,

vanadio o silicatos existentes en la microestructura, afectarán directamente al crecimiento de grano (Collins, 1979, p.57).

- Medio de temple

Este factor influye directamente en la velocidad de enfriamiento y la microestructura final del material, debido a sus características físico – químicas que agilitan la tasa de transferencia de calor en la superficie del material y con ello garantiza la severidad del temple. En la industria, se recomienda templar aceros aleados con aceite y los aceros altos en carbono con aire o aceite para evitar su agrietamiento (Callister, 1995, p.346).

2.5 Martensita obtenida con el temple

El enfriamiento rápido de una matriz austenítica ocasiona una transformación adifusional haciendo que los átomos de carbono no se distribuyan por completo en las matrices de cementita y ferrita, sino que estos queden atrapados en estructuras de hierro FCC dando paso a una nueva red de tipo tetragonal centrada en el cuerpo (BCT) conocida como Martensita (Smith,1998, p.432). El proceso de transformación toma en cuenta dos tipos de temperaturas, las mismas que se describen a continuación:

- Temperatura de inicio de martensita (M_s):

La temperatura M_s refleja la fuerza requerida para originar la transformación de la fase austenítica en martensítica; esta temperatura varía en función del contenido de carbono presente en el acero debido a que a medida que este aumenta la temperatura M_s va disminuyendo drásticamente.

- Temperatura de fin de martensita (M_f):

La temperatura M_f corresponde a la temperatura donde se alcanza la transformación completa de austenita en Martensita; y si fuera el caso de que el enfriamiento cese antes de alcanzar esta temperatura se requiere de un post enfriamiento para llegar a la transformación total. La temperatura M_f varía también en función del contenido de carbono al igual que la temperatura M_s (Bibby y Parr, 1964, p.3).

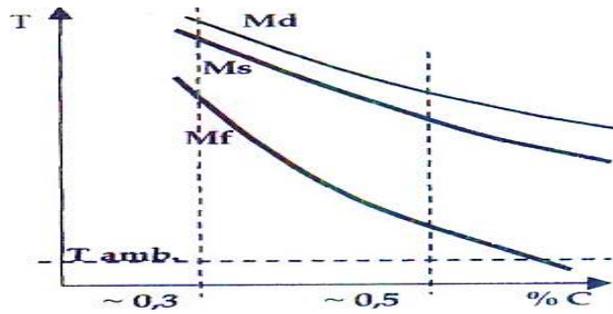


Figura 11-2. Variación de las temperaturas Ms y Mf con respecto del contenido de carbono

Fuente: (Universidad Tecnológica Nacional, p.4)

La estructura martensítica obtenida con el temple rápido es totalmente frágil por lo que aplicarlo directamente en la industria no resulta funcional; es por esto que para disminuir la fragilidad del acero se realiza un tratamiento térmico de revenido. Aquí, se calienta el material hasta una temperatura aproximada de (250~650) °C para conseguir: ferrita (α) y cementita (Fe_3C); con lo cual se obtiene mayor resistencia a la fatiga y menor ductilidad. A esta nueva fase se la conoce como martensita revenida (Shackelford, 2010, p.358).

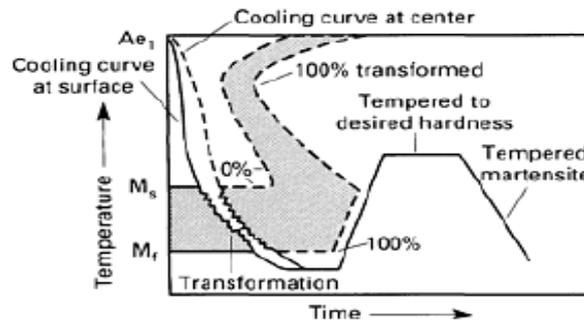


Figura 12-2. Procesos convencionales de temple y revenido.

Fuente: (Naranjo, 2017, p.34)

2.5.1 Morfología de la Martensita.

La martensita presenta diversas morfologías dependiendo del contenido de carbono presente en el acero. Cuando el contenido de carbono es menor a un 0,6% la martensita se presenta en forma de cintas con diversas orientaciones, mientras que si el contenido de carbono supera ese porcentaje la martensita forma láminas paralelas. Se considera también que si el contenido de carbono está entre (0,6~1) %C se tendrán maclas de martensita en forma de cintas, láminas o una combinación de ambas (Smith, 1998, p.423).

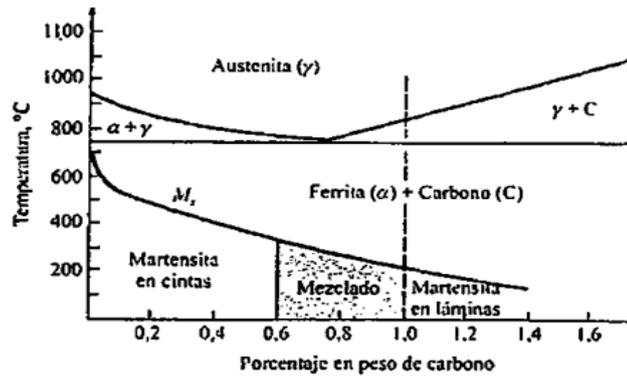


Figura 13-2. Incidencia del contenido de carbono en la morfología de la martensita.

Fuente: (Smith, 1998, p.424)

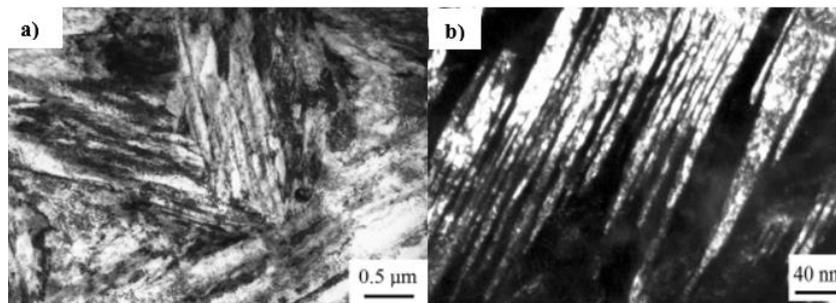


Figura 14-2 Evolución de la martensita en forma de: a) cintas, b) láminas.

Fuente: (Quanshun, 2016, p.2172)

2.6 Diagramas de transformación TTT

Los diagramas TTT representan la transformación de la austenita de manera cuantitativa (% de transformación) y cualitativa (componentes) en función del tiempo y la temperatura. Estos se clasifican en diagramas de: transformación isotérmica (IT) que indica las etapas de transformación de la austenita a temperatura constante y el diagrama de enfriamiento continuo (CT) que indica las fases en las que se descompone la austenita a diferentes velocidades de enfriamiento y a medida que disminuye la temperatura. Los elementos de aleación presentes en el acero modifican las curvas TTT debido a que aumentan su templabilidad y retardan la transformación en las regiones de bainita y perlita para obtener martensita a bajas velocidades de enfriamiento (Gomez, p.17). Estos diagramas son diferentes para cada composición de acero debido a que sus temperaturas de inicio de transformación de martensita son únicas (Guemes y Martin, 2012, p.288)

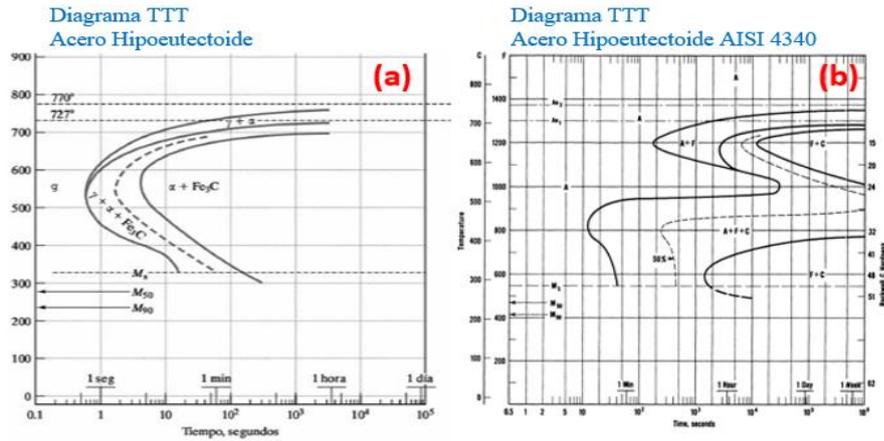


Figura 15-2 Modificación de los elementos aleantes en las curvas TTT para el acero 4340. C-0.2%, Mn-0.78%, Ni-1.79%, Cr-0.8%, Mo-0.33%

Fuente: (Shackelford, 2010, p.357), (INCO, p.7)

A nivel industrial, en vista de que el enfriamiento durante un tratamiento térmico se lo realiza de forma continua y por etapas, la transformación de la austenita no es isotérmicamente; razón por la cual para el estudio de las fases desarrolladas durante un enfriamiento continuo en medios como: aire, aceite o agua se emplean las curvas CCT (Transformación por enfriamiento continuo) (Fosca, 2005, pp.65-66).

2.6.1 Curva de transformación por enfriamiento continuo (CCT)

Durante el tratamiento térmico de temple, se evidencia que existe una variación de la temperatura conforme el material se enfría; razón por la cual para el temple se emplean las curvas CCT. Estos diagramas, se difieren de las curvas TTT debido a que muestran las transformaciones a mayores tiempos y temperaturas más bajas; además de que permiten determinar la microestructura y dureza del acero en cuestión (Tarin, 1973, p.36). Las curvas CCT son de mayor aplicación en el campo ingenieril, debido a que el material se enfría desde su temperatura de procesamiento, con lo cual se reducen los costos de producción; cabe recalcar que la obtención de estas curvas es un proceso complejo, razón por la cual su disponibilidad es limitada.

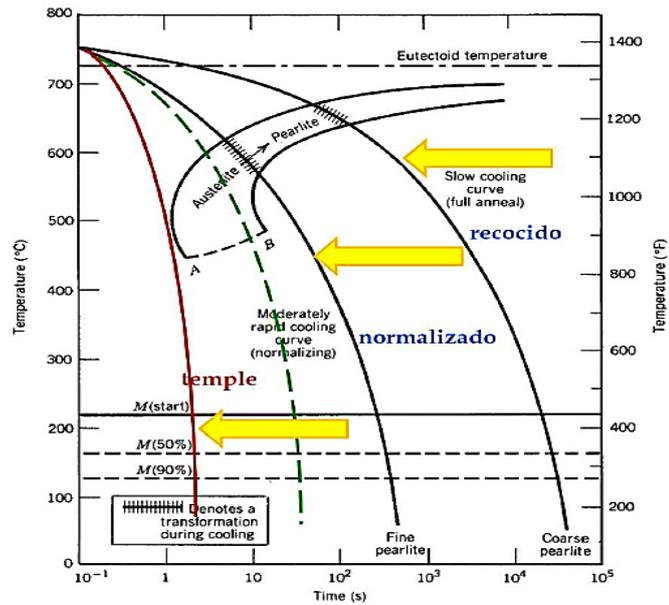


Figura 16-2. Curva de enfriamiento continuo (CCT) para un acero eutectoide.

Fuente: (Universidad Tecnica Federica Santa Maria, p.16)

2.7 Dureza del material

La dureza es una propiedad mecánica que mide la resistencia que presenta la superficie de un material a una deformación plástica localizada. Para la medición de la dureza se inicia aplicando lentamente una carga conocida sobre un indentador, este a su vez penetra en la superficie del material de ensayo y al ser retirado deja una huella cuyo valor de área o profundidad indica el valor de la dureza obtenida en ese punto. La forma del indentador puede ser: pirámide, cono o de bola y está hecho de un material mucho más duro que el de la superficie a penetrar; por lo general son hechos de acero endurecido, carburo de tungsteno o diamante (Smith, 1998, p.217). Los valores de dureza en el acero varían en función del contenido de carbono y de los elementos aleantes mientras que en una probeta ya endurecida varía en función de la distancia al extremo templado.

Cabe recalcar que la dureza y templabilidad de un acero son cosas muy diferentes debido a que, la dureza mide el grado de resistencia que presenta el material frente a una deformación plástica localizada mientras que la templabilidad mide cualitativamente la velocidad con la que se distribuye la dureza a lo largo del material templado (Callister, 1995, p.343). Para endurecer un acero se ha establecido un método universal conocido como la prueba de templado final o Jominy, el cual tiene como objetivo impactar un flujo de agua controlado sobre el extremo final de una probeta con geometría definida durante un intervalo de tiempo, más adelante se explica detalladamente el procedimiento de un ensayo Jominy bajo la norma ASTM A-255 (Maldonado, 1996, p.40).

2.7.1 Dureza Rockwell

Este método emplea cargas de penetración bajas e indentadores pequeños en forma de bola o cono hechos de acero duro o diamante, con el objetivo de dejar huellas más pequeñas y menos profundas sobre el material a ensayar. Los valores de dureza Rockwell no requieren ser calculados sino que sus valores son plasmados directamente en la pantalla de un durómetro, ya que previo al ensayo se calibran los valores de carga a emplear y los puntos sobre los cuales se medirá la dureza (Universidad Nacional de La Pampa, p.10).

Existen dos métodos de medición de la dureza Rockwell, los mismos que son: Prueba de dureza Rockwell y prueba de dureza superficial Rockwell. La diferencia radica en el valor de la fuerza preliminar que se aplica sobre la superficie; para el cálculo de dureza Rockwell se toma una fuerza preliminar de 10 kgf mientras que para dureza superficial Rockwell se toma un valor de 60 kgf (ASTM INTERNATIONAL, 2016, p.3).

2.7.1.1 Etapas de la medición de dureza.

La medición de la dureza en el material sigue tres etapas, las mismas que van desde el momento en donde se aplica la fuerza hasta el momento en que se la retira. A continuación, se explican dichas fases:

- Fase I: El indentador se ubica en contacto con la cara de análisis de la probeta, luego sobre este se aplica una precarga F_0 y se la mantiene durante un intervalo de tiempo específico para medir la profundidad de la hendidura tomada de la línea base.
- Fase II: Sobre el indentador se aplica una fuerza de prueba adicional F_1 que va creciendo gradualmente y cuya velocidad de aplicación es controlada por la precarga inicial hasta alcanzar una fuerza total F . Así mismo, se mantiene esta fuerza durante un tiempo de permanencia especificado.
- Fase III: Aquí, se retira la fuerza de prueba adicional y se mantiene el valor de la precarga por un intervalo de tiempo específico y es aquí en donde se mide la profundidad de la huella dejada por el indentador.

Finalmente, el valor de la dureza está dado por la diferencia de profundidades resultantes de la línea base con respecto de la profundidad de la indentación final cuando se encuentra bajo acción de la fuerza preliminar (ASTM INTERNATIONAL, 2016, p.3).

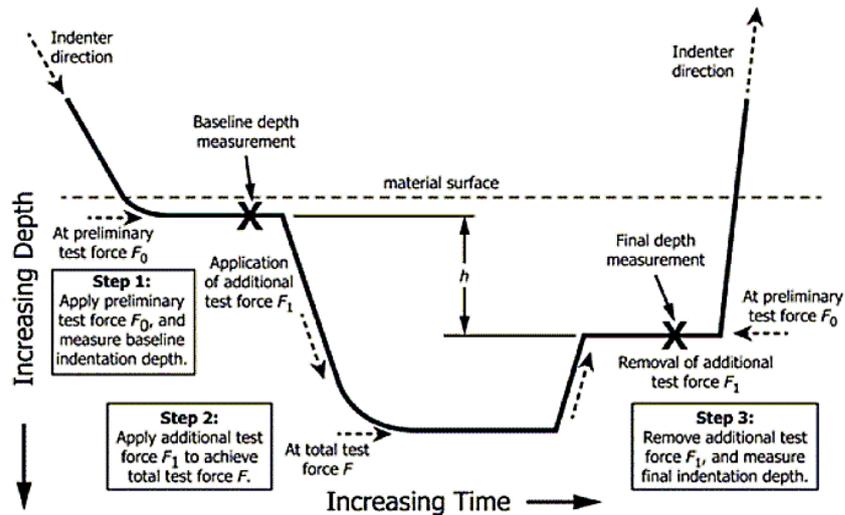


Figura 17-2. Medición de la dureza Rockwell.

Fuente: (ASTM INTERNATIONAL, 2016, p.3)

2.8 Ensayo de Templabilidad o Jominy

Hoy en día se ha normalizado a nivel industrial un ensayo sencillo que permite una comparación de la capacidad relativa de un acero para ser endurecido mediante temple. El ensayo de templabilidad Jominy se representa en la figura 17-2. En este ensayo, una barra de acero de dimensiones normalizadas se calienta hasta la temperatura de austenización, para luego incidir un chorro de agua sobre uno de sus extremos. Para aceros al carbono y aceros de baja aleación este procedimiento normalizado de temple genera un gradiente de velocidades de enfriamiento a lo largo de la barra Jominy, ya que las propiedades térmicas (como la conductividad) son prácticamente idénticas para dichas aleaciones. Los aceros al carbono y los aceros de baja aleación son los más empleados para endurecimiento por temple, para lo cual el ensayo Jominy resulta muy útil (Shackelford, 2010, p.365).

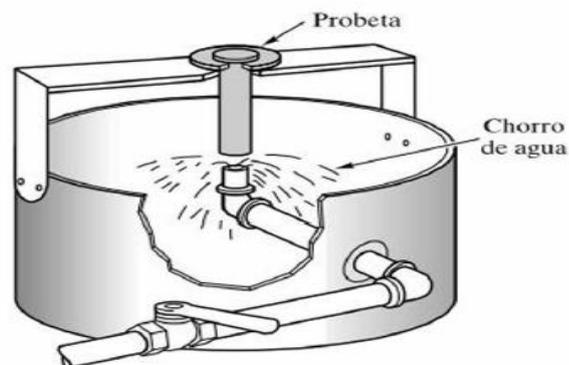


Figura 18-2. Esquema de la máquina Jominy.

Fuente: (Shackelford, 2010, p.365).

2.9 Norma ASTM A – 255 “Métodos de prueba estándar para determinar la Templabilidad del acero”.

Esta norma define dos métodos estándar para determinar la templabilidad del acero, los mismos que son: el ensayo Jominy y el cálculo de la dureza mediante el método de Grossman. La norma indica los parámetros de diseño la máquina, las etapas del proceso de templado, la geometría de la probeta y el proceso de medición de la dureza.

2.9.1. Dispositivo de enfriamiento

Este dispositivo está formado por: una boquilla de enfriamiento cuyo orificio de salida es de 0,5 in (12,7 mm) de diámetro, una línea de suministro de fluido provista de una válvula de apertura rápida y un tanque cuyas dimensiones mantengan al fluido bajo una temperatura adecuada de 40 a 85 ° F (5 a 30 ° C). Además, el diseño de este dispositivo debe garantizar una corriente vertical de fluido de enfriamiento de 2.5 in. (63.5 mm) de altura (ASTM INTERNATIONAL, 2014, p.2).

2.9.1.1 Portaprobeta

Este accesorio permite la sujeción vertical de la probeta durante el ensayo, cuya ubicación en el tanque de enfriamiento debe garantizar una distancia de 0,5 in (12,7 mm) entre el extremo inferior de la probeta con respecto del orificio de salida en la boquilla de enfriamiento. La figura 19-2 presenta la geometría de un soporte estándar para probetas normalizadas (ASTM INTERNATIONAL, 2014, p.3).

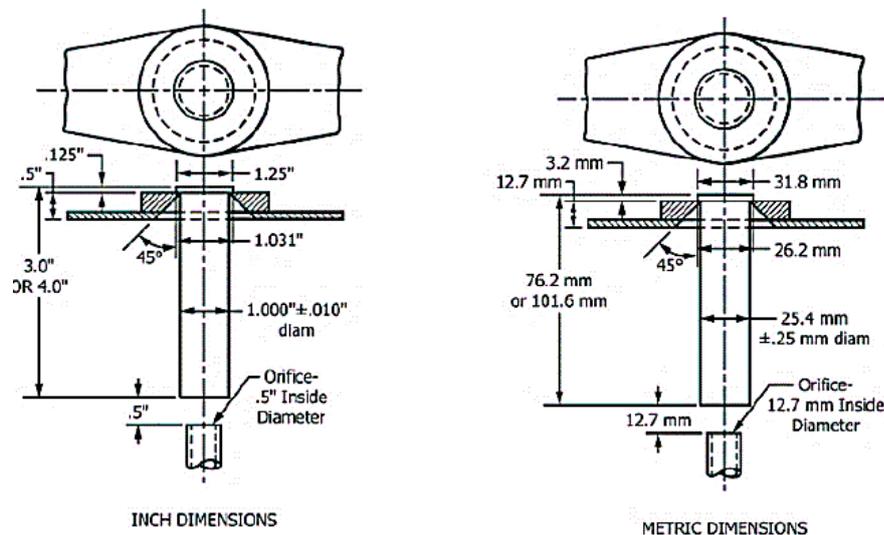


Figura 19-2. Geometría del portaprobeta.

Fuente: (ASTM INTERNATIONAL, 2014, p.3)

2.9.2 Probetas de Ensayo

Las muestras de ensayo pueden ser obtenidas en procesos de forja o fundición de acuerdo con las siguientes consideraciones:

2.9.2.1 Muestras forjadas

Estas muestras deben prepararse a partir de material laminado o forjado y deben representar la sección transversal completa del producto. De acuerdo con los requerimientos del proveedor y consumidor del material, la muestra puede obtenerse a partir de una ubicación determinada en un producto forjado o laminado o a partir de una palanquilla de colada continua (ASTM INTERNATIONAL, 2014, p.3).

La muestra deberá ser maquinada a partir de una barra previamente normalizada de acuerdo con lo establecido en el procedimiento del ensayo. El tamaño de la barra debe permitir la eliminación de toda la descarbonación en mecanizado a 1.0 in alrededor. El extremo de la probeta a enfriar con agua deberá tener un acabado razonablemente suave, preferiblemente producido por lijado. Se puede omitir la normalización mediante acuerdo entre el proveedor y el usuario (ASTM INTERNATIONAL, 2014,p.2).

2.9.3 Procedimiento del ensayo Jominy

2.9.3.1 Normalización de probetas

La probeta elegida para el ensayo debe normalizarse para garantizar las características adecuadas de endurecimiento. Por ende, la muestra se mantendrá a una temperatura de austenización durante 1 hora y luego se enfriará al aire (ASTM INTERNATIONAL, 2014, p.2).

TABLE 1 Normalizing and Austenitizing Temperatures^A

| Steel Series | Ordered Carbon Content, max, % | Normalizing Temperature, °F (°C) | Austenitizing Temperature, °F (°C) |
|---|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| 1000, 1300, 1500, 3100, 4000, 4100 | 0.25 and under | 1700 (925) | 1700 (925) |
| 4300, 4400, 4500, 4600, 4700, 5000, 5100, 6100, ^B 8100, 8600, 8700, 8800, 9400, 9700, 9800 | 0.26 to 0.36, incl | 1650 (900) | 1600 (870) |
| 2300, 2500, 3300, 4800, 9300 | 0.37 and over | 1600 (870) | 1550 (845) |
| | 0.25 and under | 1700 (925) | 1550 (845) |
| | 0.26 to 0.36, incl | 1650 (900) | 1500 (815) |
| | 0.37 and over | 1600 (870) | 1475 (800) |
| 9200 | 0.50 and over | 1650 (900) | 1600 (870) |

^A A variation of $\pm 10^{\circ}\text{F}$ (6°C) from the temperatures in this table is permissible.

^B Normalizing and austenitizing temperatures are 50°F (30°C) higher for the 6100 series.

Figura 20-2. Temperaturas de Normalización y Austenización.

Fuente: (ASTM INTERNATIONAL, 2014, p.2).

2.9.3.2 Calentamiento

La muestra se colocará en un horno a la temperatura de austenización especificada en la figura 20-2 y se mantendrá ahí durante 60 min. Es importante calentar la muestra en una atmósfera que evite la descamación y produzca un mínimo de descarburación. Esto puede lograrse calentando la muestra en posición vertical en el interior de un recipiente que contenga una capa de virutas de hierro fundido y en donde la cara inferior se apoye en las mismas. También se puede colocar la probeta en una cavidad de dimensiones adecuadas hecha sobre un bloque de grafito o en un tubo vertical unido a una base plana, ambos de metal resistente al calor, con proyección para una sujeción de pinzas. Se colocará un disco de grafito, carbono, o una capa de carbón, en la parte inferior del tubo para evitar que se formen escamas (ASTM INTERNATIONAL, 2014, p.2).

2.9.3.3 Enfriamiento

Se debe ajustar el dispositivo de enfriamiento para que el chorro de agua tenga una altura libre de 2.5 in. (63.5 mm) por encima del orificio de la boquilla de enfriamiento, sin la muestra en posición. Previo a la experimentación se debe tener en cuenta que el soporte portaprobeta debe estar completamente seco debido a que ahí se colocará la muestra una vez calentada y siempre tomando en cuenta que su extremo inferior esté a 0,5 in por encima del orificio, ya ubicada la muestra se permite el paso del agua mediante la apertura rápida de la válvula instalada en la línea de enfriamiento. La norma ASTM A-255 indica que el tiempo que transcurre entre la extracción de la muestra del horno y el inicio del enfriamiento no debe ser mayor a cinco segundos; y que el tiempo de permanencia de la muestra en el chorro de enfriamiento no debe ser menos de 10 min. Durante el enfriamiento no se debe tener una corriente turbulenta de aire alrededor de la muestra y si la muestra no está completamente enfriada luego de ser retirada del accesorio se la apagará inmediatamente con agua (ASTM INTERNATIONAL, 2014, p.2)

2.9.4 Medición de la dureza después del temple

2.9.4.1 Preparación de Planos

En la probeta de ensayo se debe mecanizar dos caras separadas 180 °, las mismas que deben ser rectificadas a una profundidad mínima de 0.015 in (0.38 mm) a lo largo de toda la barra para la toma de medidas de dureza Rockwell C. El proceso de rectificado debe realizarse de tal manera que no produzca ningún cambio en la estructura interna del material, por lo que se recomiendan cortes muy ligeros con enfriamiento por agua, empleando una muela gruesa y suave para evitar el calentamiento de la muestra. Las indentaciones más bajas a la base pueden afectar la reproducibilidad de los resultados y la correlación con las velocidades de enfriamiento en barras enfriadas; por lo que la preparación de las caras debe llevarse a cabo con considerable cuidado (ASTM INTERNATIONAL, 2014, p.2).

Para detectar el cambio estructural producido por el temple, luego de ser lijada la probeta se debe grabar el plano con las siguientes soluciones:

Sol 1: 5% de ácido nítrico (concentrado) y 95% de agua por volumen.

Sol 2: 50% de ácido clorhídrico (concentrado) y 50% de agua por volumen.

Previo al grabado de las soluciones se debe lavar la muestra en agua caliente, luego debe ser sumergida en la solución No. 1 hasta que quede negra, la lavamos y la sumergimos otra vez en la solución No. 2 durante 3 segundos para finalmente enjuagarla con agua caliente y ponerla a secar bajo una corriente de aire. La presencia de áreas más claras u oscuras indica que la dureza y la estructura se han alterado en el esmerilado, de ser así se pueden preparar caras nuevas.

2.9.4.2 Apoyo de la probeta

Cuando se realizan pruebas de dureza, la muestra de prueba descansará sobre uno de sus planos en un yunque firmemente sujeto a la máquina de dureza. El yunque debe estar construido para mover la muestra de prueba más allá del penetrador en pasos precisos de 1/16 pulg. (1,5 mm). No está permitido reposar la muestra en un bloque en V ni generar un movimiento vertical cuando se aplica la carga principal (ASTM INTERNATIONAL, 2014, p.2).

2.9.4.3 Indentador

El Indentador Rockwell debe verificarse periódicamente contra los bloques de prueba estándar. Para especificaciones generales sobre el uso de bloques de prueba y condiciones de superficie, se debe hacer referencia a 4.7 y 5.2, respectivamente, de los Métodos de prueba expuestos en la normativa ASTM E 18 (Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials). Es importante tener precaución al registrar las indentaciones más cercanas al extremo templado de la muestra, así como también al realizar un espaciamiento preciso entre indentaciones. El posicionamiento del indentador debe verificarse con la frecuencia suficiente para garantizar que se cumplen los requisitos de precisión (ASTM INTERNATIONAL, 2014, p.4).

2.9.4.4 Toma de lecturas

Se tomarán lecturas en pasos de 1/16 pulg. (1,6 mm) durante la primera pulgada (25,4 mm), luego serán de 18, 20, 22, 24, 28 y 32 dieciseisavos de pulgada. Los valores inferiores a 20 HRC no se registran porque dichos valores no son precisos. Las lecturas de dureza deben realizarse preferiblemente en dos planos separados 180°. Las pruebas en dos planos ayudarán a la detección de errores en la preparación de la muestra y la medición de la dureza. Si las dos sondas en los lados opuestos difieren en más de 4 puntos HRC en cualquier posición, la prueba debe repetirse en caras nuevos, a 90° de los primeros dos planos. Si la nueva prueba también tiene una extensión

de más de 4 puntos HRC, se debe analizar una nueva muestra. Para fines de informes, las lecturas de dureza deben registrarse al entero más cercano, con valores de 0.5 HRC redondeados al siguiente entero más alto (ASTM INTERNATIONAL, 2014, p.4).

2.10 Sistemas de Control

Un sistema de control automático es una interconexión de elementos que actúan juntos para cumplir un objetivo determinado, de tal manera que el arreglo resultante es capaz de controlarse por sí mismo (Hernandez, 2010, p.2). El control de un sistema corresponde a medir el valor de entrada y aplicar un mecanismo que corrija o limite la desviación producida (Ogata, 2010, p.3).

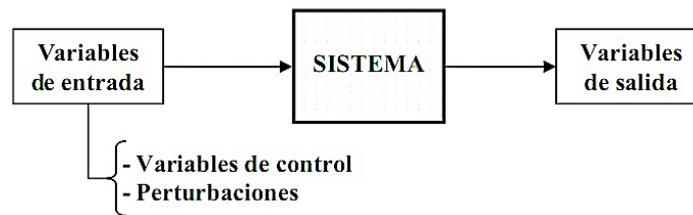


Figura 21-2. Esquema general de un sistema.

Fuente: (Sites.google)

2.10.1 Sistemas de control de lazo cerrado

Es un sistema que mantiene una relación determinada entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control. Este sistema cuenta con un sensor de regulación acoplado al mecanismo de control en función de la respuesta que otorga el sistema; por lo general este tipo de sistema de control se recomienda usarlo cuando existen muchas variables influyentes sobre él (Bessemer, 2013, p.181).

2.10.2 Sistemas de control en lazo abierto

Es un sistema de control en el que no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada, aquí la salida no tiene efecto sobre la acción de control. Por ende, al no compararse la salida con la entrada de referencia, a cada entrada le corresponde una condición de operación fija; como resultado de ello, la precisión del sistema depende de la calibración. En la práctica, el control en lazo abierto solo se usa si se conoce la relación entre la entrada y la salida y si no hay perturbaciones internas ni externas (Ogata, 2010, p.8).

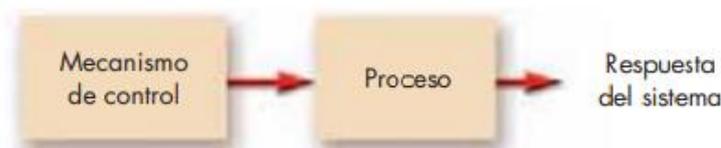


Figura 22-2. Sistema de lazo abierto.

Fuente: (Bessemer, 2013, p.180)

2.10.2.1 Señales de entrada y salida de un sistema de control

Señales de entrada.- Representan las variables del sistema que pueden ser manipuladas para el alcance de los objetivos previstos de dicho sistema (Pérez et al., 2007, p7).

Señales de salida.- Las señales de salida de un proceso son variables dependientes cuyo valor final, corresponde a la medición que se desea obtener del sistema (Morales y Ramirez, 2013, p.16).

2.10.2.2 Controlador de un sistema

Es un dispositivo que se encarga de la amplificación y modificación de una señal receptada por un sensor o elemento externo, para luego procesarla y emitir acciones de control, tomando en cuenta la estabilidad, tiempo de respuesta y sobre oscilaciones (OPOSINET).

2.10.2.3 Actuadores de un sistema

Son dispositivos que tienen incorporados en su estructura mecanismos que permitan el accionamiento de un componente que ejecute una acción de control. En los actuadores de un sistema se almacenan datos de las variables medidas durante el proceso y cuyo accionamiento es responsabilidad del dispositivo controlador quien lo conecta o no (Rubio, 2019).

CAPITULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Introducción al diseño de la máquina Jominy

De forma general, el aparato de enfriamiento descrito en la normativa ASTM A255 suministra de manera continua un fluido de enfriamiento sobre la probeta, cuyas características deben cumplir condiciones de caudal y tiempo de enfriamiento para alcanzar la efectividad del ensayo y el cumplimiento de los parámetros establecidos en la norma.

3.2 Parámetros de diseño según ASTM A255

La normativa ASTM A255 determina que las principales características de la máquina Jominy son:

- La corriente vertical de fluido debe salir a través de un orificio de 0.5 in (12.7 mm) de diámetro.
- La distancia entre el extremo a templar de la probeta y el orificio de salida del fluido debe ser de 0.5 in.
- El flujo debe alcanzar una altura libre de 2.5 in. (63.5 mm).
- Esa necesaria la recirculación del fluido durante el tiempo del ensayo.

3.3 Desarrollo de la casa de la Calidad (QFD)

Para establecer el diseño óptimo de la máquina Jominy, inicialmente se conocen los requerimientos técnicos y funcionales establecidos por los docentes y estudiantes usuarios de la máquina Jominy mediante el despliegue de la casa de la calidad (QFD).

3.3.1 Identificación de las necesidades del usuario

El diseño y la construcción de la máquina de ensayos Jominy surge como respuesta a una necesidad académica presente en el laboratorio de materiales de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH, debido a que actualmente la máquina existente está fuera de servicio y limita a los estudiantes la realización de ensayos de templabilidad normalizados. A continuación, se mencionan los requerimientos del usuario:

- Máquina compacta.
- Cumplimiento de los parámetros del ensayo Jominy establecido por la norma ASTM A-255
- Operabilidad fácil y segura de la máquina.
- Proceso de enfriamiento automatizado.
- Mantenimiento fácil y seguro de la máquina.
- Durabilidad de los materiales de la máquina y accesorios.
- Confiabilidad de los resultados obtenidos de los ensayos de templabilidad.
- Diseño didáctico.
- Estabilidad estructural.

3.3.2 Evaluación de las necesidades del usuario

Las necesidades del usuario se clasifican en:

Básica (B): características y requerimientos considerados obvios en el producto.

Unidireccional (O): características o requerimientos que llaman la atención del cliente.

Estimulante (E): características o requerimientos únicos que los diferencian de la competencia.

En la tabla 1-3 se muestra la evaluación de cada necesidad del usuario:

Tabla 1-3: Evaluación de las necesidades del usuario.

| | | |
|-----------------------|---|---|
| Desempeño | Cumplimiento de los parámetros establecido por la norma ASTM A-255 | B |
| | Confiabilidad en los resultados obtenidos de los ensayos de templabilidad | B |
| | Proceso de enfriamiento automatizado | U |
| Usabilidad | Operabilidad fácil y segura de la máquina | B |
| | Durabilidad de los materiales de la máquina y accesorios | B |
| Diseño | Máquina compacta | U |
| | Diseño didáctico | E |
| | Estabilidad estructural | B |
| Mantenibilidad | Mantenimiento fácil y seguro de la máquina | B |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.3.3 Evaluación de los requerimientos según su grado de importancia.

A continuación, se muestra la evaluación de cada requerimiento según su grado de importancia, bajo el criterio de la propia empresa, competencia y el usuario.

3.3.3.1 Evaluación de la propia empresa.

Al no contar aún con un prototipo de la máquina de ensayos Jominy, la puntuación asignada por la propia empresa es de 1.

3.3.3.2 Evaluación de la competencia.

A continuación, en la tabla 2-3 se realiza el contraste de las características funcionales de las máquinas de templabilidad: REMET y UNIVERSAL MOTION.



Figura 6-3. Máquinas de Templabilidad. a) REMET, b) UNIVERSAL MOTION.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Tabla 2-3: Contraste de marcas REMET-UNIVERSAL MOTION

| MODELO D28715 – FABRICANTE REMET | FABRICANTE UNIVERSAL MOTION |
|---|--|
| Características | Características |
| <ul style="list-style-type: none">• Horno mufla con dispositivo eléctrico de regulación de temperatura• Sensor de presión y caudal• Tanque y porta probetas de acero inoxidable y estructura metálica• Control automatizado por PLC y botonera integrada | <ul style="list-style-type: none">• Porta probetas geoméricamente diseñado con bisel de 45°• Tanque de almacenamiento y de prueba de acero inoxidable• Circuito motorizado de circulación de agua Control Manual |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.3.3.3 Evaluación de los usuarios

Debido a que el proyecto está enfocado en cubrir una necesidad académica los usuarios de la máquina de ensayos Jominy por tanto son: estudiantes de la asignatura de Laboratorio de

Materiales y técnico docente encargado del laboratorio de materiales de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH.

3.3.4 Despliegue de la casa de la calidad

Para garantizar la efectividad del ensayo de Templabilidad en el acero bajo la norma ASTM A-255, se debe cumplir con el tiempo de enfriamiento y la altura de flujo especificados en la norma. A continuación, en la figura 2-3 se muestra el despliegue de la casa de la calidad para la máquina de ensayos Jominy

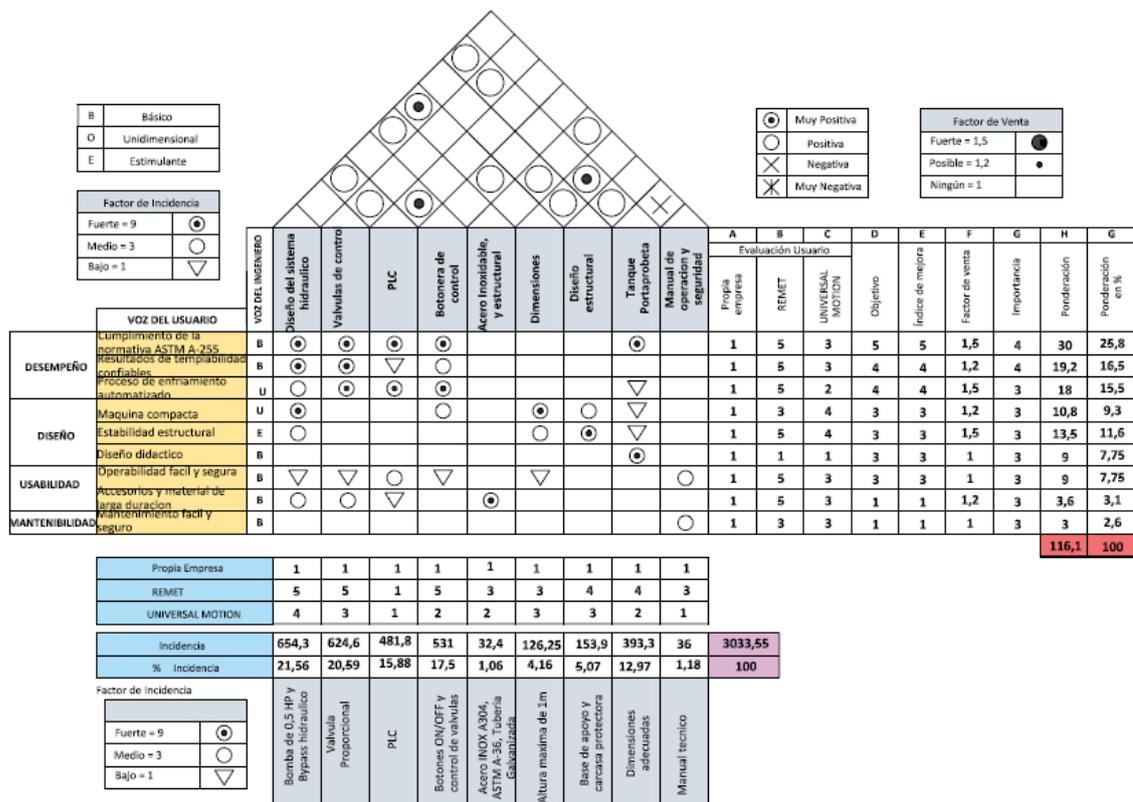


Figura 2-3. Despliegue de la casa de la calidad

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.4 Diseño conceptual de la máquina de ensayos Jominy

El diseño conceptual de un producto tiene como objetivo llegar a la solución de los requerimientos establecidos por los usuarios del mismo, mediante la creación de módulos funcionales que permitan llegar a una evaluación de diversas alternativas de solución (sites google).

3.4.1 Análisis funcional modular

Para el análisis funcional se identifican las variables y operaciones que ejecuta la máquina de ensayos Jominy, y se las agrupa en módulos ordenados por niveles. A continuación, se muestra el análisis funcional de la máquina Jominy.

3.4.1.1 Nivel 0

El nivel cero define la función principal de la máquina Jominy que es templar una probeta de acero mediante el impacto de un chorro de fluido frío.



Figura 3-3. Nivel 0.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.4.1.2 Nivel I

El nivel I detalla cada etapa de funcionamiento de la máquina Jominy y los clasifica según módulos. Los módulos definidos son:

- Módulo I: Encendido del sistema.
- Módulo II: Montaje y desmontaje de la probeta.
- Módulo III: Control de válvulas.

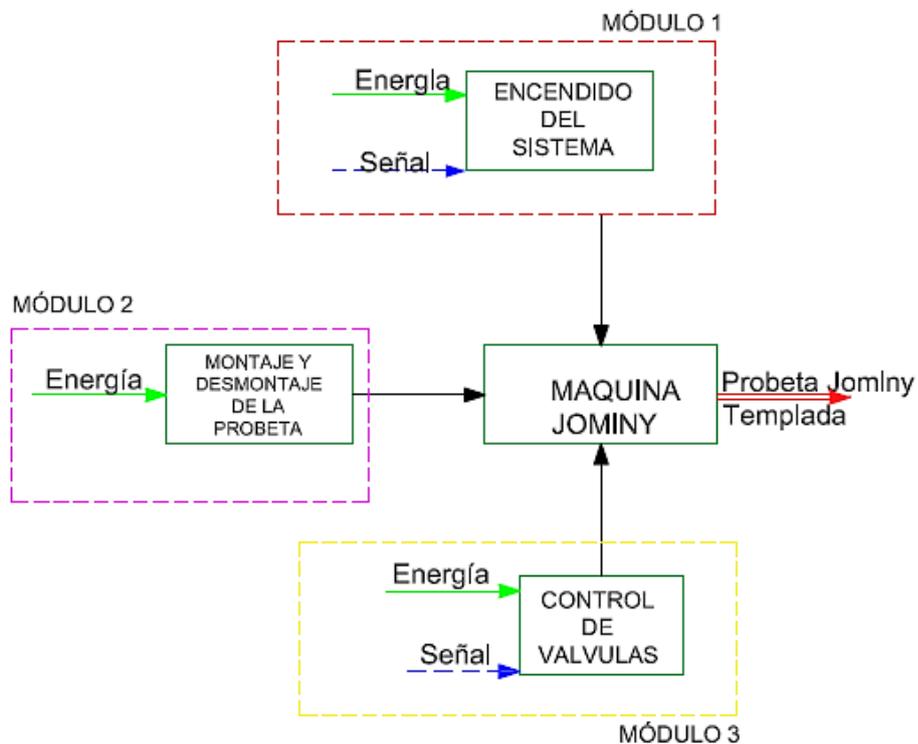


Figura 4-3. Nivel 1.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.4.2 Desarrollo de la matriz morfológica

La matriz morfológica desarrolla bajo criterios técnicos cada alternativa de solución expuesta para la máquina Jominy. A continuación, se muestra su desarrollo:

Tabla 3-3: Desarrollo de las necesidades del usuario.

| Función | Componente | | |
|----------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Encendido del sistema | | | |
| Estabilización del sistema | | | |
| Montaje de la probeta | | | |
| Control de válvulas | | | |
| Desmontaje de la probeta | | | |
| Alternativas de Solución | Alternativa A | Alternativa B | Alternativa C |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.5 Desarrollo de las alternativas de solución para cada módulo

Las funciones críticas de la máquina de ensayos Jominy son:

- La obtención de la altura libre del flujo de enfriamiento (63.5 mm).
- La automatización del proceso de enfriamiento mediante el control del tiempo de enfriamiento y el grado de apertura de la válvula. A continuación, se muestran varias alternativas de diseño.

Alternativa A: Máquina de ensayos Jominy con accionamiento manual de válvulas y caudal requerido obtenido mediante diferencial de alturas.



Figura 5-3. Alternativa A

Fuente: (ESPOCH, 2020)

Alternativa B: Máquina de ensayos Jominy con accionamiento manual de válvulas y control automático de caudal.



Figura 6-3. Alternativa B.

Fuente: (Muhammad *et al.*, 2018, p.19)

Alternativa C: Máquina de ensayos Jominy con accionamiento automático de válvulas y control de caudal automático.

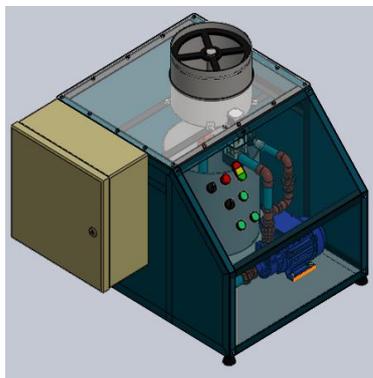


Figura 7-3. Alternativa C.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.5.1 Evaluación de criterios técnicos.

A continuación, se evalúan las alternativas de diseño de la máquina Jominy en función de criterios técnicos, asignándoles una ponderación según su grado de importancia, así como se muestra en la tabla 4-3.

Tabla 4-3: Escala de evaluación.

| Criterio | Ponderación |
|--------------------------|--------------------|
| Muy Importante | 5 |
| Importante | 4 |
| Relativamente Importante | 3 |
| Poco Importante | 2 |
| Nada Importante | 1 |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Los criterios de evaluación son:

- Eficiencia: establecer un mecanismo que garantice la obtención de la altura del fluido de enfriamiento establecido por la norma ATM A255.
- Operabilidad: facilidad de control en la apertura de la válvula y el tiempo de duración del proceso de enfriamiento.
- Durabilidad: material de larga vida y resistente a la corrosión para los tanques, tuberías y accesorios hidráulicos.
- Tamaño: este criterio es importante porque la máquina Jominy a ser construida debe ser lo más compacta posible para ser ubicada junto a los hornos de mufla.

La evaluación se realiza aplicando el método ordinal de criterios ponderados, cuya escala de evaluación se muestra en la tabla 5-3:

Tabla 5-3: Ponderaciones establecidas en el método ordinal de criterios ponderados.

| Ponderación | Consideración |
|--------------------|---|
| 1 | Cuando el criterio de la fila es superior al de la columna |
| 0,5 | Cuando el criterio de la fila es igual que al de la columna |
| 0 | Cuando el criterio de la columna es mayor que al de la fila |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

A continuación, se muestra la evaluación cuantitativa de cada alternativa de diseño y el peso específico por criterio.

Tabla 6-3: Evaluación de cada alternativa de solución.

| Solución | Eficiencia | Operabilidad | Durabilidad | Tamaño |
|---------------|------------|--------------|-------------|--------|
| Alternativa A | 5 | 5 | 5 | 4 |
| Alternativa B | 4 | 2 | 3 | 3 |
| Alternativa C | 5 | 5 | 5 | 5 |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Tabla 7-3: Evaluación del peso específico por cada criterio

| Criterio | Eficiencia | Operabilidad | Durabilidad | Tamaño | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|--------------|------------|--------------|-------------|--------|------------|-------------|
| Eficiencia | - | 0,5 | 0 | 0 | 1,5 | 0,15 |
| Operabilidad | 0,5 | - | 0 | 0 | 1,5 | 0,15 |
| Durabilidad | 1 | 1 | - | 0 | 3 | 0, |
| Tamaño | 1 | 1 | 1 | - | 4 | 0,4 |
| Total | | | | | 10 | 1 |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

- **Eficiencia**

Alternativa C > Alternativa A > Alternativa B

Tabla 8-3: Evaluación del peso específico del criterio “Eficiencia”

| Eficiencia | A | B | C | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|------------|---|---|---|------------|-------------|
| A | - | 0 | 1 | 2 | 0,333333333 |
| B | 1 | - | 1 | 3 | 0,5 |
| C | 0 | 0 | - | 1 | 0,166666667 |
| | | | | 6 | 1 |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

- **Operabilidad**

Alternativa C > Alternativa A > Alternativa B

Tabla 9-3: Evaluación del peso específico del criterio “Operabilidad”

| Operabilidad | A | B | C | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|--------------|---|---|---|------------|-------------|
| A | - | 1 | 1 | 3 | 0,5 |
| B | 0 | - | 1 | 2 | 0,333333333 |
| C | 0 | 0 | - | 1 | 0,166666667 |
| | | | | 6 | 1 |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

- **Durabilidad**

Alternativa C > Alternativa A > Alternativa B

Tabla 10-3: Evaluación del peso específico del criterio “Durabilidad”

| Durabilidad | A | B | C | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|-------------|-----|-----|---|------------|-------------|
| A | - | 0,5 | 1 | 2,5 | 0,416666667 |
| B | 0,5 | - | 1 | 2,5 | 0,416666667 |
| C | 0 | 0 | - | 1 | 0,166666667 |
| | | | | 6 | 1 |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

- **Tamaño**

Alternativa C > Alternativa A > Alternativa B

Tabla 11-3: Evaluación del peso específico del criterio “Tamaño”

| Tamaño | A | B | C | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|--------|-----|-----|---|------------|-------------|
| A | - | 0,5 | 1 | 2,5 | 0,416666667 |
| B | 0,5 | - | 1 | 2,5 | 0,416666667 |
| C | 0 | 0 | - | 1 | 0,166666667 |
| | | | | 6 | 1 |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.5.2 Evaluación y selección de alternativa adecuada.

La evaluación final se obtiene en función de prioridades, en la tabla 12-3 se muestran los resultados:

Tabla 12-3: Tabla de conclusiones de la evaluación de cada alternativa.

| | Eficiencia | Operabilidad | Durabilidad | Tamaño | Σ | Prioridad |
|----------|------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| A | 0,05 | 0,075 | 0,125 | 0,166666667 | 0,416666667 | 2 |
| B | 0,075 | 0,05 | 0,125 | 0,166666667 | 0,416666667 | 2 |
| C | 0,025 | 0,025 | 0,466666667 | 0,066666667 | 0,583333333 | 1 |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Con el análisis cuantitativo realizado se llega a la conclusión que la opción óptima de diseño es la alternativa C, debido a que tiene características físicas y técnicas que garantizan el cumplimiento de los parámetros críticos definidos por la norma ASTM A-255 para la máquina de ensayos Jominy.

3.6 Diseño de la máquina Jominy

3.6.1 Circuito de trabajo de la máquina Jominy

La alternativa de diseño seleccionada propone que el fluido de enfriamiento sea impulsado por una bomba desde el tanque de almacenamiento hasta un bypass en donde se bifurcan dos líneas; una línea principal que conduce directamente el flujo requerido para el enfriamiento al tanque portaprobeta y una línea secundaria que drena el fluido en exceso de la línea principal, con el fin de garantizar la altura libre de flujo establecido en la norma ASTM A255 para el enfriamiento. La calibración de la altura de flujo libre se obtendrá mediante un lazo cerrado de control electrónico, que se encarga de regular la apertura de la válvula instalada a la salida de la línea secundaria en función del caudal medido que atraviesa la línea principal y se conecta con el tanque portaprobeta. En vista de esto, la máquina de enfriamiento Jominy constará de:

- Sistema hidráulico.
- Sistema electrónico.
- Estructura de la máquina.

3.6.2 Diseño del Sistema Hidráulico

3.6.2.1 Cálculo de la velocidad de salida del fluido de enfriamiento.

La velocidad de salida del fluido de enfriamiento a través de la boquilla se calcula aplicando la ecuación de Bernoulli entre dos puntos A y B, debido a que se trata de un flujo vertical (Mott, 2006, p.198). Los puntos de análisis se muestran en la figura 8-3.

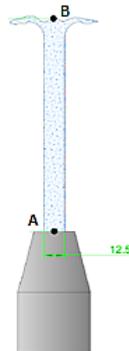


Figura 8-3. Esquema de analisis.

Fuente: (Casco y Sigcha, 2015, p.38)

La ecuación de Bernoulli es:

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

Donde:

P_A, P_B : Presión en el punto A y B. [MPa]

γ : Peso específico del fluido agua. [N/m³]

Z_A, Z_B : Altura del punto A y B desde un punto referencial [m].

g : Gravedad [m/s²].

V_A, V_B : Velocidad del fluido en el punto A y B [m/s].

Las consideraciones por aplicar en la ecuación de Bernoulli son:

- Los puntos A y B están abiertos a la atmósfera y tienen la misma presión, por lo tanto:

$$P_A = P_B$$

- En el punto "B" el fluido alcanza el punto máximo y cambia su dirección de movimiento, por lo tanto:

$$V_B = 0.$$

Entonces la ecuación (1) se reduce a:

$$V_A = \sqrt{(Z_B - Z_A) * 2g} \quad (2)$$

Reemplazando datos, se obtiene:

$$Z_B = 0,0635 \text{ m}$$

$$Z_A = 0 \text{ m}$$

$$g = 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$V_A = \sqrt{(0.0635 \text{ m}) * 2 * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

$$V_A = 1.12 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

3.6.2.2 Cálculo del caudal del fluido de enfriamiento.

Inicialmente se determina el área de la sección transversal del orificio de salida de la boquilla de enfriamiento, aplicando la siguiente ecuación:

$$A = \pi * \frac{d^2}{4} \quad (3)$$

Donde:

A: Área [m^2]

d: Diámetro del orificio de salida [m]

Reemplazando datos, se obtiene:

$d = 12,7mm$ (Valor normalizado por la ASTM A255)

$$A = \pi * \frac{(0.0127m)^2}{4}$$

$$A = 0.000126 m^2$$

Calculamos el caudal circulante que atraviesa la línea principal tomando en cuenta que es constante (Mott, 2006, p.198). Para esto, se aplica:

$$Q = V_A * A \quad (4)$$

Donde:

Q: Caudal [$\frac{m^3}{s}$]

V_A : Velocidad de salida del fluido [$\frac{m}{s}$]

A: Área [m^2]

Reemplazando datos, se obtiene:

$$V_A = 1,12 \frac{m}{s}$$

$$A = 0.000126 m^2$$

$$Q = (1.12 \frac{m}{s})(0.000126 m^2)$$

$$Q = 0.000141 \frac{m^3}{s} = 0.141 \frac{lt}{s} = 0.037 \frac{Gal}{s}$$

$$Q = 8.46 \frac{lt}{min} = 2.22 \frac{Gal}{min}$$

3.6.2.3 Selección de la tubería

El diámetro de las tuberías en sistemas comunes de distribución de fluidos alimentados por bombas es seleccionado en función del flujo volumétrico y su velocidad en la línea de succión de la bomba; tomando en cuenta que en este punto la velocidad debe ser baja para garantizar el llenado óptimo de la bomba y con ello mantener relativamente elevada la presión para evitar la cavitación en su interior (Mott, 2006, p.162). Además, Mott menciona que se incrementa la velocidad del flujo conforme se disminuye el área de su trayectoria y esta a su vez es proporcional al

diámetro de la tubería, por lo que se recomienda que el diámetro en succión sea mayor al de descarga.

El sistema hidráulico propuesto para la máquina de ensayos Jominy consta de tres líneas de tuberías, dos de las cuales pertenecen a la succión y descarga de la bomba y la línea restante transporta el fluido de enfriamiento al tanque portaprobeta. A continuación, se designan los diámetros de tubería:

- Mediante la figura 9-3 determinamos que para el caudal calculado de $2.22 \frac{Gal}{min}$ el valor de caudal tabulado más cercano es de $10 \frac{Gal}{min}$, para el cual se recomienda los siguientes diámetros de tubería:
 - Diámetro de Línea de succión: 1 in
 - Diámetro de Línea de descarga: $\frac{3}{4}$ in

| Flujo Volumétrico | | Línea de Succión | | | Línea de Descarga | | |
|-------------------|-------------------|-----------------------|-----------|-----|-----------------------|-----------|-----|
| | | Tamaño de tub. (pulg) | Velocidad | | Tamaño de tub. (pulg) | Velocidad | |
| gal/min | m ³ /h | | pie/s | m/s | | pie/s | m/s |
| 10 | 2.3 | 1 | 3.7 | 1.1 | $\frac{3}{4}$ | 6.0 | 1.8 |
| 100 | 22.7 | $2\frac{1}{2}$ | 6.7 | 2.0 | 2 | 9.6 | 2.9 |
| 500 | 114 | 5 | 8.0 | 2.4 | $3\frac{1}{2}$ | 16.2 | 4.9 |
| 2000 | 454 | 8 | 12.8 | 3.9 | 6 | 22.2 | 6.8 |

Figura 9-3. Diámetros de tuberías recomendados en función del flujo volumétrico.

Fuente: (Mott, 2006, p.162)

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

- El diámetro de la línea que ingresa al tanque portaprobeta es seleccionado en función del diámetro de salida de la boquilla de enfriamiento cuyo valor dado por la norma ASTM A-255 es de 12,7 mm, por lo que el diámetro comercial más cercano es de $\frac{1}{2}$ in.

Finalmente, factores como: limpieza de fluido, resistencia a la corrosión, bajo factor de fricción y lugar de trabajo de la máquina Jominy, definen el material adecuado de la tubería a emplear para garantizar y prolongar su vida útil. Por ende, debido a que la máquina trabajará con agua a temperatura ambiente y será ubicada en el interior del laboratorio que no representa un ambiente agresivo el material más idóneo para la tubería es el Polipropileno debido a su elevada resistencia a la corrosión.

Tabla 13-3: Resumen de selección de tuberías.

| TUBERIA | DIMENSION | UNIDAD |
|-------------------|--------------------|--------|
| Succión de bomba | 1 | in |
| Descarga de bomba | 3/4 | in |
| De enfriamiento | 1/2 | in |
| Material | Polipropileno (PP) | - |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.6.2.4 Diseño del Tanque Portaprobeta

Las dimensiones del tanque portaprobeta están dadas en función de las siguientes consideraciones:

- La altura de la probeta tiene un valor normalizado de 4 in (101,6 mm).
- El espesor del portaprobeta es de 8mm.
- La altura del tanque portaprobeta debe garantizar una distancia de 0,5 in entre el extremo inferior de la probeta y el orificio de salida de la boquilla de enfriamiento, una vez que la probeta sea ubicada en el portaprobeta.
- El diámetro del tanque porta probeta debe ser lo suficientemente amplio para albergar la película de fluido en forma de hongo producida en el momento del enfriamiento y evitar el choque con sus paredes. Experimentalmente (Mejia e Iglesias, 2013, p.41) establece que el diámetro que alcanza el hongo de fluido es de aproximadamente 20 cm y mediante pruebas para este proyecto se obtuvo un diámetro de 18 cm.
- En la base del tanque portaprobeta se requiere de dos orificios, uno de 1/2 in para el acople de la boquilla de enfriamiento y otro de 3/4 in para drenar el fluido empleado durante el ensayo.

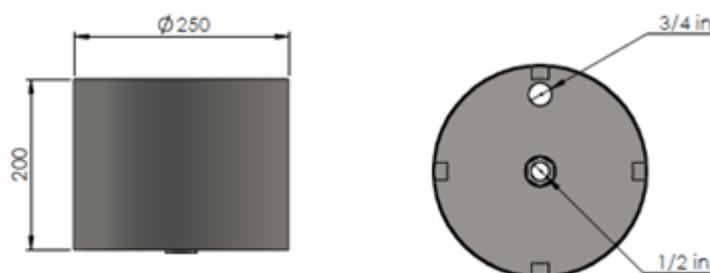


Figura 10-3. Tanque Porta Probeta.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

A continuación, se definen las siguientes dimensiones para el tanque portaprobeta:

Tabla 14-3: Dimensiones del tanque portaprobeta.

| PARAMETRO | DIMENSION | UNIDAD |
|---------------------------------|-----------|--------|
| Diámetro | 250 | mm |
| Altura | 250 | mm |
| Diámetro - Orificio de boquilla | 12,7 | mm |
| Diámetro- Orificio de drenaje | 19,05 | mm |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.6.2.5 Cálculo del volumen de fluido sobrante en el tanque portaprobeta

Para el cálculo del volumen sobrante de fluido en el tanque portaprobeta luego del ensayo, se tomó en cuenta las siguientes consideraciones:

- El volumen de fluido de enfriamiento sobrante es constante debido a su recirculación durante el ensayo.
- Después del ensayo se requiere una evacuación rápida del fluido de enfriamiento sobrante para evitar que se acumule por más de 2 cm de altura.

Entonces, el volumen de líquido sobrante se calcula mediante:

$$V = \pi * r^2 * h \quad (5)$$

Donde:

V: Volumen de líquido contenido [m³].

r: Radio interno del tanque porta probeta [m].

h: altura del nivel de agua [m].

Reemplazando datos, se obtiene:

$$r = 0,125 \text{ m}$$

$$h = 0,02 \text{ m}$$

$$V = \pi * (0,125\text{m})^2 * 0,02\text{m}$$

$$V = 0,00098\text{m}^3$$

$$V = 0,98 \text{ l}$$

3.6.2.6 Diseño del Tanque de Almacenamiento

El tanque de almacenamiento está dimensionado en función de las siguientes condiciones:

- Para seguridad y estabilidad de la máquina Jominy se propone que el tanque de almacenamiento permanezca lleno $\frac{3}{4}$ de su capacidad total.
- Las dimensiones del tanque de almacenamiento deben estar acordes a las del tanque portaprobeta para facilitar su ubicación y montaje.
- La línea de succión de la bomba parte del tanque de almacenamiento, por lo que se requiere la perforación de un agujero para tubería de 1 in.
- Para el mantenimiento del tanque de almacenamiento se debe contar con un orificio de purga de $\frac{1}{2}$ in.

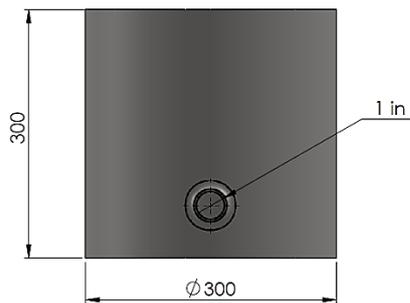


Figura 11-3. Tanque de almacenamiento.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

A continuación, se definen las siguientes dimensiones para el tanque de almacenamiento:

Tabla 15-3: Dimensiones del tanque de almacenamiento.

| PARAMETRO | DIMENSION | UNIDAD |
|--------------------|-----------|--------|
| Diámetro | 300 | mm |
| Altura | 300 | mm |
| Diámetro – succión | 25,4 | mm |
| Diámetro – drenaje | 12,7 | mm |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

En vista de que se requiere mantener el fluido en constante circulación mientras dura el ensayo Jominy, se determinó que el tanque permanecerá lleno los $\frac{3}{4}$ de su capacidad, por lo que aplicando la ecuación (5) el volumen de líquido contenido es:

$$V = \pi * (0,15m)^2 * 0,3m$$

$$V = 0,02120575 m^3$$

$$V = 21,2 \text{ litros}$$

3.6.2.7 Selección del material de los tanques.

Debido a que los tanques de la máquina Jominy están en contacto continuo con el fluido de enfriamiento requieren ser construidos de un material altamente resistente a la corrosión para garantizar su vida útil y funcionalidad; razón por la cual el material adecuado para construir los tanques es el Acero Inoxidable AISI 304 acabado mate de 2mm de espesor para facilitar su conformado. En la figura 12-3 se muestran sus propiedades.

Norma: AISI 304
Especificaciones Generales:

Descripción: Acero inoxidable aleado al cromo y níquel, muy resistente a la corrosión intergranular y a los ataques químicos del medio ambiente. Posee una buena resistencia a la corrosión del agua, ácidos y soluciones alcalinas si se emplea con superficie pulida a espejo. Se la puede encontrar con acabado ASTM 2B y 1.

| COMPOSICIÓN QUÍMICA (%) | | | | | | | | |
|-------------------------|--------|----|-------|-------|----------|---------|----|-------|
| C Max | Si Max | Mn | P Max | S Max | Ni | Cr | Mo | Otros |
| 0,08 | 1 | 2 | 0,04 | 0,03 | 8 - 10,5 | 18 - 20 | XX | XX |

| PROPIEDADES MECÁNICAS | | | | | | |
|-----------------------|-------|--------------------|-------|----------------------|-------------------------|---------|
| RESISTENCIA MECÁNICA | | PUNTO DE FLUENCIA | | Elongación % Min. | PRUEBAS DE DUREZA (MAX) | |
| Kg/mm ² | Psi | Kg/mm ² | Psi | | ROCKWELL B | VICKERS |
| 49 | 69500 | 18 | 25500 | 40 | 81,7 | 160 |

Figura 12-3. Características del Acero Inoxidable AISI 304.

Fuente: (DIPAC, 2016)

3.6.2.8 Propiedades del fluido de enfriamiento

El fluido de trabajo a emplear en la máquina Jominy, según lo indicado en la norma ASTM A-255 es agua. A continuación, se detallan sus propiedades

Tabla 16-3 Propiedades del fluido de trabajo

| PROPIEDAD | DIMENSIÓN | UNIDAD |
|---------------------------|------------|-------------------|
| Temperatura (°C) | 15 | °C |
| Peso Específico (γ) | 9,81 | kN/m ³ |
| Densidad (ρ) | 1000 | kg/m ³ |
| Viscosidad Dinámica (η) | 0,00115 | Pa*s |
| Viscosidad Cinemática (ν) | 0,00000115 | m ² /s |

Fuente: (Mott, 2006, p.589)

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.6.2.9 Cálculo de la sección transversal, caudal y velocidad de flujo en la línea de succión de la bomba.

Para el cálculo de la sección transversal de la línea de succión, se ha tomado en cuenta las dimensiones brindadas por el fabricante PLASTIGAMA, tal como se muestra en la tabla 17-3.

Tabla 17-3 Propiedades de la tubería de succión.

| PROPIEDAD | DIMENSIÓN | UNIDAD |
|------------------|-----------|--------|
| DN | 1 | in |
| Espesor | 4,9 | mm |
| Diámetro Externo | 33,4 | mm |
| Diámetro Interno | 24.3 | mm |

Fuente: (PLASTIGAMA, 2020)

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

La sección transversal de la tubería de succión se calcula mediante:

$$A_s = \pi \frac{D_s^2}{4} \tag{6}$$

Donde:

A_s . Área de la sección transversal en succión [m²]

D_s : Diámetro interno [m]

Reemplazando datos, se obtiene:

$$D_s = 0,0243 \text{ m}$$

$$A_s = \pi \frac{(0,0243\text{m})^2}{4}$$

$$A_s = 0,00046 \text{ m}^2$$

Para determinar el valor de caudal circulante por la línea de succión, se asume una velocidad de flujo en función del diámetro nominal de su tubería y el flujo volumétrico que circula por la misma. En la figura 13-3 se muestran los valores recomendados para los siguientes datos:

Diametro nominal en succion = 1 in

Flujo Volumétrico = 8,46 gal/min

| Servicio | Velocidad |
|---|------------------------------|
| Alimentación de calderas | 2.4 a 4.6 m/s (8 a 15 pie/s) |
| Succión de bombas y líneas de descarga..... | 1.2 a 2.1 m/s (4 a 7 pie/s) |
| Servicios generales..... | 1.2 a 3.0 m/s (4 a 10 pie/s) |
| Distribución de agua potable..... | hasta 2.1 m/s (7 pie/s) |

Figura 13-3. Velocidades utilizadas para el flujo de agua en tuberías.

Fuente: (CRANE, 1987, p.3-10)

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Entonces, se asume que la velocidad del flujo en la línea de succión corresponderá a 1,2 m/s y por lo tanto el caudal se calcula aplicando la ecuación (4) pero con respecto a la succión de la bomba. Reemplazando datos, se obtiene:

$$Q_s = V_s \cdot A_s$$

$$Q_s = (1.2 \frac{m}{s})(0,00046 m^2)$$

$$Q_s = 0,00056 \frac{m^3}{s} \approx 33.4 \frac{lt}{min}$$

3.6.2.10 Cálculo de número de Reynolds, rugosidad relativa y factor de fricción en la línea de succión

El número de Reynolds se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{v \cdot D_s}{\nu} \quad (7)$$

Donde:

Re: Número de Reynolds [adimensional]

V_s : Velocidad de Flujo [m/s]

D_s : Diámetro interno de la tubería [m]

ν : Viscosidad Cinemática [m²/s]

Reemplazando los valores, se obtiene:

$$V_s = 1.2 \frac{m}{s}$$

$$D_s = 0.0243 m$$

$$\nu = 0,00000115 \frac{m^2}{s}$$

$$Re_s = \frac{V_s \cdot D_s}{\nu}$$

$$Re_s = \frac{1.2 \frac{m}{s} * 0.0243m}{0,00000115 \frac{m^2}{s}}$$

$$Re_s = 25356,52$$

Para el cálculo de la rugosidad relativa se debe conocer el valor de rugosidad del material de la tubería de succión, según (Mott, 2006, p.235) para tuberías de plástico corresponde a 3E-07 m. Se aplica:

$$Rr = \frac{D_s}{\xi} \quad (8)$$

Donde:

Rr: Rugosidad Relativa [adimensional]

D_s : Diámetro interno de la tubería [m]

ξ : Rugosidad del material [m]

Reemplazando datos, obtenemos:

$$D_s = 0.0243m$$

$$\xi_s = 3E - 07m$$

$$Rr_s = \frac{D_s}{\xi_s}$$

$$Rr_s = \frac{0.0243m}{3E - 07 m}$$

$$Rr_s = 81000$$

Finalmente, el factor de fricción de la tubería de succión se calcula mediante la aplicación de la ecuación de Swanne:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{\xi}{3.7 D_s} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right) \right]^2} \quad (9)$$

Donde:

f : Factor de Fricción

Re : Número de Reynolds [adimensional]

D_s : Diámetro interno de la tubería [m]

ξ : Rugosidad del material [m]

Reemplazando datos, se obtiene un factor de fricción de:

$$\xi_s = 3E^{-07} m$$

$$D_s = 0.0243m$$

$$Re_s = 25356,52$$

$$f_s = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\xi_s}{3.7 D_s} + \frac{5.74}{Re_s^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$f_s = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{3E^{-07} \text{ m}}{3.7 * 0.0243\text{m}} + \frac{5.74}{25356,52^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$f_s = 0,024$$

3.6.2.11 Cálculo de pérdidas primarias en la succión de la bomba

Las pérdidas principales en el sistema están dadas en función de la longitud de tubería seleccionada. Se calcula aplicando la siguiente ecuación:

$$Hl_s = \frac{f_s * 8 * L_s * Q_s^2}{\pi^2 * g * D_s^5} \quad (10)$$

Donde:

f : Factor de Fricción

L_s : Longitud de tubería en succión [m]

D_s : Diámetro interno de la tubería de succión [m]

Q_s : Caudal que atraviesa la línea de succión [m³/s]

V : Velocidad de flujo en la tubería [m/s]

g : Gravedad [m/s²]

Reemplazando datos, se obtiene:

$$f_s = 0,024$$

$$L_s = 0.3\text{m}$$

$$Q_s = 0,00056 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$D_s = 0,0243 \text{ m}$$

$$Hl_s = \frac{f_s * 8 * L_s * Q_s^2}{\pi^2 * g * D_s^5}$$

$$Hl_s = \frac{0,024 * 8 * 0,3m * \left(0,00056 \frac{m^3}{s}\right)^2}{\pi^2 * 9,81 \frac{m}{s^2} * (0,0243m)^5}$$

$$Hl_s = 0,022 m$$

3.6.2.12 Cálculo de pérdidas secundarias en la succión de la bomba

Las pérdidas de energía secundarias se calculan mediante la ecuación:

$$h_{acc} = K \left(\frac{v_p^2}{2g} \right) \quad (11)$$

Donde:

v_p : Velocidad en la tubería [m/s]

g : Gravedad [m/s²]

K : coeficiente de resistencia.

Para calcular el coeficiente de resistencia, según la línea de análisis sea de succión o descarga se deben conocer los accesorios hidráulicos instalados a lo largo de las mismas. El Coeficiente de resistencia K se calcula mediante la ecuación:

$$K = \left(\frac{L_e}{D} \right) f_T \quad (12)$$

Donde:

$\frac{L_e}{D}$: Relación Longitud efectiva – Diámetro [adimensional]

f_T : Factor de fricción total.

El factor de fricción total f de una tubería en zonas turbulentas se determina con la ayuda del diagrama de Moody mostrado en el ANEXO A, inicialmente se calcula la siguiente relación:

$$\frac{\xi}{D} \quad (13)$$

Donde:

ξ : rugosidad del material [m]

D : diámetro de la línea de succión [m]

Remplazando valores tenemos

$$\frac{3E^{-07} \text{ m}}{0.0243\text{m}} = 0.0000123$$

En el diagrama de Moody se observa que el cruce entre la curva $(\frac{\xi}{D})$ y la curva de turbulencia completa se encuentra por debajo de un factor de fricción de 0.008, por lo que se asume un factor de fricción de:

$$f_T = 0,008$$

Para el cálculo final del coeficiente K se determina el tipo y la cantidad de accesorios hidráulicos presentes en la línea de succión y se toma el valor de $\frac{L_e}{D}$ para cada uno de ellos según los valores mostrados en el ANEXO B. De acuerdo con algunos autores las pérdidas en accesorios como uniones universales no se toman en cuenta, sin embargo de manera conservadora se asumen valores de K igual a 1 para uniones universales y 0.5 para uniones roscadas, mientras que los valores para la válvula check y salida del depósito están tomados del ANEXO C y ANEXO D respectivamente. Aplicando la ecuación 12, se obtiene el valor total de K:

Tabla 18-3 Valores de longitud equivalente y coeficiente K de accesorios en succión

| Accesorio | DN [in] | Cantidad | Le / D | f_T | K individual | K total |
|--------------------|---------|----------|--------|-------|--------------|---------|
| Codo 90 roscado | 1 | 2 | 50 | 0,008 | 0,4 | 08 |
| Unión Universal | 1 | 2 | - | - | 1 | 2 |
| Válvula Check | 1 | 1 | - | 0,008 | - | 0.8 |
| Neplo Corrido | 1 | 3 | - | - | 0,5 | 1,2 |
| Salida de Depósito | 1 | 1 | - | - | - | 1 |
| | | | | | K | 5.8 |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Finalmente, remplazando el valor de K en la ecuación 11 se obtiene las pérdidas secundarias en succión

$$h_{acc} = 5.8 \left(\frac{1.2^2}{2g} \right)$$

$$h_{acc_s} = 0.426$$

3.6.2.13 Cálculo de la sección transversal, velocidad de caudal y velocidad de flujo en la línea de descarga de la bomba

Para el cálculo de la sección transversal en la línea de descarga, se toma en cuenta las dimensiones brindadas por el fabricante PLASTIGAMA.

Tabla 19-3 Propiedades de la tubería de descarga.

| PROPIEDAD | DIMENSIÓN | UNIDAD |
|------------------|-----------|--------|
| DN | 1/2 | in |
| Espesor | 3.73 | mm |
| Diámetro Externo | 21.34 | mm |
| Diámetro Interno | 13.88 | mm |

Fuente: (PLASTIGAMA, 2020)

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Para el cálculo de la sección transversal, caudal y velocidad de flujo en la línea de descarga, aplicamos las ecuaciones 4, 6 y las figuras 13-3 y 13-4; en donde reemplazando los datos de descarga se obtiene:

$$D_d = 0,0138 \text{ m}$$

- Área de sección transversal:

$$A_s = \pi \frac{(0,0138\text{m})^2}{4}$$

$$A_s = 0,00015 \text{ m}^2$$

- Velocidad de flujo:

Según las recomendaciones especificadas en las figuras 13-3 y 14-3, se asume un valor de velocidad de 1,12 m/s.

- Caudal:

$$Q_d = V_d \cdot A_d$$

$$Q_d = \left(1,12 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) (0,00015 \text{ m}^2)$$

$$Q_d = 0,00017 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \approx 10,17 \frac{\text{lt}}{\text{min}}$$

3.6.2.14 Cálculo del número de Reynolds, rugosidad relativa y factor de fricción para la línea de descarga

De igual forma para el cálculo de estos parámetros empleamos las ecuaciones 7, 8 y 9 mencionadas anteriormente; en donde reemplazando los valores referentes a la línea de descarga se obtiene:

- Número de Reynolds:

$$Re_d = \frac{V_d \cdot D_d}{\nu}$$

$$Re_d = \frac{1.12 \frac{m}{s} * 0.0138m}{0,00000115 \frac{m^2}{s}}$$

$$Re_d = 13517,913$$

- Rugosidad Relativa:

$$Rr_d = \frac{0.0138m}{3E - 07 m}$$

$$Rr_d = 46266,67$$

- Factor de fricción:

$$f_d = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\xi_s}{3.7 D_d} + \frac{5.74}{Re_d^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$f_d = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{3E^{-07} m}{3.7 * 0.0138m} + \frac{5.74}{13517.913^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$f_d = 0,028$$

3.6.2.15 Cálculo de pérdidas primarias y secundarias en la descarga de la bomba

Para el cálculo de pérdidas primarias en la descarga aplicamos la ecuación 10, pero ahora tomando en cuenta los datos referentes a la línea de descarga. Reemplazando los siguientes valores, se obtiene:

$$L_d = 0,30 m$$

$$Q_d = 0,00017 \frac{m^3}{s}$$

$$D_d = 0,0138 m$$

$$f_d = 0,028$$

$$Hl_d = \frac{f_d * 8 * L_d * Q_d^2}{\pi^2 * g * D_d^5}$$

$$Hl_d = \frac{0,028 * 8 * 0.3m * \left(0,00017 \frac{m^3}{s}\right)^2}{\pi^2 * 9.81 \frac{m}{s^2} * (0,0138m)^5}$$

$$Hl_d = 0,039 m$$

El procedimiento de cálculo de las pérdidas secundarias en la línea de descarga de la bomba es el mismo que se utiliza para la línea de succión. A continuación, se mencionan los datos obtenidos para la línea de descarga:

- Relación $\frac{\xi}{D}$

$$\frac{\xi}{D} = \frac{3E^{-07} m}{0.0138m} = 0.0000216$$

- Factor de Fricción.

$$f_T = 0,009$$

- Accesorios Hidráulicos y coeficiente de resistencia K para la línea de descarga.

Los valores de K para la reducción y boquilla estan calculados en funcion del ANEXO E y ANEXO F respectivamente.

Tabla 20-3 Valores de longitud equivalente y coeficiente K de accesorios en descarga

| Accesorio | DN [in] | Cantidad | Le / D | f_T | K individual | K total |
|----------------------|-----------|----------|--------|-------|--------------|---------|
| Codo 90 roscado | 1/2 | 3 | 50 | 0,009 | 0,45 | 1,35 |
| Te (flujo en ramal) | 3/4 a 1/2 | 1 | 60 | 0,009 | 0,54 | 0,54 |
| Neplo Corrido | 3/4 | 2 | - | - | 0,5 | 1 |
| Neplo Corrido | 1/2 | 3 | - | - | 0,5 | 1,5 |
| Reducción | 1 a 3/4 | 1 | - | - | 0,22 | 0,22 |
| Unión Universal | 3/4 | 1 | - | - | 1 | 1 |
| Caudalímetro YF-S201 | 1/2 | 1 | - | - | 1 | 1 |
| Unión Universal | 1/2 | 1 | - | - | 1 | 1 |
| Unión Roscada | 1/2 | 2 | - | - | 0,5 | 1 |
| Boquilla | 1/2 | 1 | - | - | 0,012 | 0,012 |
| | | | | | K | 8,622 |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

- Pérdidas secundarias en la línea de descarga de la bomba.

$$hacc = 8.62 \left(\frac{1.12^2}{2g} \right)$$

$$hacc_d = 0.551$$

3.6.2.16 Cálculo de altura de bombeo

Aplicando la ecuación de Bernoulli, la altura de bombeo se determina mediante:

$$H_B = (Z_B - Z_A) + H_l + H_{acc} \quad (14)$$

Donde:

$(Z_B - Z_A)$: Diferencia de alturas tomado desde el nivel de referencia NRF hasta el nivel de fluido [m]

H_l : Pérdida primaria total del sistema ($H_{l_s} + H_{l_d}$) [m]

H_{acc} : Pérdida secundaria total del sistema ($h_{acc_s} + h_{acc_d}$) [m]

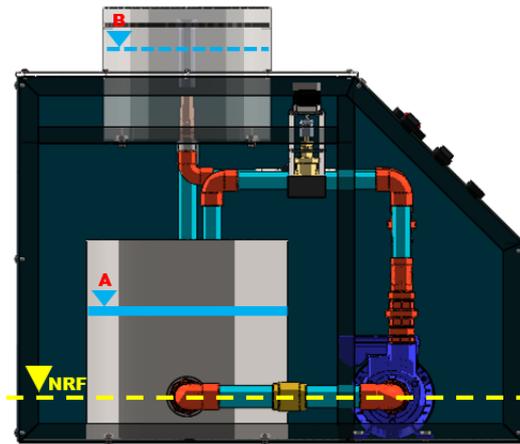


Figura 14-3. Referencias para el cálculo de altura de bombeo

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Remplazando los datos de pérdidas en la ecuación 14, se obtiene una altura de bombeo de:

$$H_B = (Z_B - Z_A) + H_l + H_{acc}$$

$$H_B = (0.3635 - 0.16) + 0.022 + 0.039 + 0.426 + 0.551$$

$$H_B = 1.24 \text{ m}$$

3.6.2.17 Cálculo de la carga de succión neta positiva NPSH

El NPSH disponible en una bomba se define como la diferencia entre la carga de presión de estancamiento en la entrada de la bomba y la carga de la presión de vapor y está en función de: la dimensión de tubería en succión, la ubicación del depósito del fluido, la naturaleza del fluido bombeado, y la presión aplicada al fluido en el depósito (Mott, 2006, p.415). Se calcula mediante la siguiente ecuación

$$NPSH = h_{sp} \pm h_s - h_f - h_{vp} \quad (15)$$

Donde:

h_{sp} : Cabeza de presión estática absoluta [mca]

h_s : Diferencia de elevación desde el nivel fluido hacia la entrada de la bomba [m]

h_f : Perdidas por fricción en la tubería de succión [m]

h_{vp} : Presión de vapor del líquido a temperatura de bombeo [m]

3.6.2.18 Cálculo de la cabeza de presión estática absoluta h_{sp} .

Para este cálculo, se debe conocer el valor de la presión atmosférica de la ciudad donde se instalará la máquina, la presión hidrostática y absoluta. A continuación, se muestran sus valores:

- La presión atmosférica en la ciudad de Riobamba-Ecuador es de 75 KPa (AccuWeather, 2020).
- La presión hidrostática corresponde a la presión que ejerce el fluido sobre el recipiente, y se calcula mediante:

$$P_H = \rho g h \quad (16)$$

Donde:

P_H : Presión que ejerce el fluido sobre el recipiente [kPa]

ρ : Densidad del fluido [kg/m^3]

g : Gravedad [m]

h : Altura del fluido [m]

Reemplazando datos, se obtiene:

$$\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$g = 9.81 \text{ m}/\text{s}^2$$

$$h = 0.225 \text{ m}$$

$$P_H = \rho g h$$

$$P_H = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 9.81 \text{ m}/\text{s}^2 \cdot 0.225 \text{ m}$$

$$P_H = 2.205 \text{ KPa}$$

La presión absoluta se determina mediante la siguiente expresión:

$$P_{abs} = P_{atm} + P_H \quad (17)$$

Remplazando valores, se obtiene:

$$P_{atm} = 75 \text{ kPa}$$

$$P_H = 2.205 \text{ kPa}$$

$$P_{abs} = (75 + 2.205) \text{ kPa}$$

$$P_{abs} = 77.205 \text{ kPa}$$

La cabeza de presión estática absoluta se determina mediante:

$$h_{sp} = \frac{P_{abs}}{\gamma} \quad (18)$$

Donde

h_{sp} : Cabeza de presión estática absoluta [mca]

P_{abs} : Presión absoluta que ejerce el fluido sobre el recipiente [Pa]

γ : Peso Específico del fluido [N/m^3]

Reemplazando los datos, obtenemos:

$$P_{abs} = 77.205 \text{ Pa}$$

$$\gamma = 9810 \text{ N/m}^3$$

$$h_{sp} = \frac{77.205 \times 10^3 \text{ Pa}}{9810 \text{ N/m}^3}$$

$$h_{sp} = 7.87 \text{ m}$$

3.6.2.19 Cálculo de la diferencia de elevación desde el nivel fluido hacia la entrada de la bomba h_s .

El sistema planteado en este proyecto tiene una diferencia de elevación desde el nivel fluido hacia la entrada de la bomba $h_s = 0.16 \text{ m}$ y al estar sobre el eje de bomba tiene un valor negativo

3.6.2.20 Cálculo de la presión de vapor del líquido a temperatura de bombeo h_{vp} .

La presión de vapor del líquido se halla mediante el ANEXO G, en donde la presión de vapor del líquido para una $T=15^{\circ}\text{C}$ es:

$$h_{vp_{T=15^{\circ}\text{C}}} = 0.238 \text{ mca}$$

Reemplazando los datos obtenidos en la ecuación (15) tenemos:

$$NPSH = h_{sp} \pm h_s - h_f - h_{vp}$$

$$NPSH = 7.87 - 0.16 - 0.447\text{m} - 0.238$$

$$NPSH = 7.025 \text{ m}$$

$$h_f = 0.447\text{m}$$

En conclusión, la bomba a utilizar en la máquina Jominy debe tener un NPSH requerido (adicionado un factor de seguridad) menor a 7.025 m para evitar el fenómeno de cavitación.

3.6.2.21 Cálculo de la Potencia de la Bomba

La potencia necesaria en el sistema hidráulico está dada por la siguiente ecuación (Cengel y Cimbala, 2015, p.350):

$$P = \frac{Q \gamma H_B}{\eta} \quad (19)$$

Donde:

Q : Caudal [m^3/s]

γ : Peso Específico [N/m^3]

H_B : Altura de la bomba [m]

η : Rendimiento total de la bomba

Para bombas de potencias demasiado bajas, no existen curvas de funcionamiento que caractericen su rendimiento. Por ende, de manera conservadora se asume un rendimiento de la bomba del 75%, reemplazando, se obtiene:

$$Q = 0.000141 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\gamma = 9810 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

$$H_B = 1.24 \text{ m}$$

$$\eta = 0.75$$

$$Pot = \frac{Q \gamma H_B}{\eta}$$

$$Pot = \frac{0.000141 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 9810 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} \cdot 1.24 \text{m}}{0.75}$$

$$Pot = 2.29 \text{ W} = 0.003 \text{ HP}$$

Se puede observar que la potencia requerida por el sistema es muy pequeña en comparación con la bomba de menor capacidad disponible en el mercado, por lo que se ha seleccionado una bomba de potencia mínima según el catálogo de bombas PAOLO. A continuación, se describen sus características:

Tabla 21-3 Características de la bomba.

| CARACTERISTICAS | DIMENSIÓN | UNIDAD |
|-------------------------|-----------|--------|
| Potencia | 1/2 | HP |
| Tensión | 115 | V |
| Caudal | 5-40 | l/min |
| Altura máxima de bombeo | 40 | m |

Fuente: (Promesa)

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.6.2.22 Diseño de la boquilla de enfriamiento

El diseño adecuado de la boquilla de enfriamiento tiene como objetivo suministrar un flujo de enfriamiento uniforme mientras dura el ensayo Jominy, esto básicamente depende del grado de conicidad que tenga la boquilla; es por esto que para su dimensionamiento se tomó en cuenta las recomendaciones establecidas en la norma ASTM A255:

- El diámetro del orificio de salida en la boquilla de enfriamiento es de 0,5 in.
- La distancia entre el orificio de salida con el extremo inferior de la boquilla es de 0,5 in.

Para conocer el grado de inclinación de la boquilla de enfriamiento, inicialmente se calcula su grado de apertura mediante la siguiente ecuación:

$$K = \frac{D-d}{2L} = \frac{Tg\theta}{2} \quad (20)$$

Donde:

K: Inclinación de la boquilla.

C: Conicidad de la boquilla.

θ : Ángulo de abertura del cono [°]

D: Diámetro mayor del cono [mm]

d: Diámetro menor del cono [mm]

L: Longitud del cono [mm]

Reemplazando los datos, se obtiene:

$$L=60 \text{ mm}$$

$$D= 18 \text{ mm}$$

$$d= 12,7 \text{ mm}$$

$$\tan \theta = \frac{D - d}{L}$$

$$\tan \theta = \frac{18 - 12,7}{(60)}$$

$$\theta = 5,04^\circ$$

A continuación, se calcula la inclinación y conicidad del cono

$$K = \frac{Tg\theta}{2}$$

$$K = \frac{Tg(5,04)}{2}$$

$$K = 0,044$$

Conicidad:

$$C = \frac{D - d}{L}$$

$$C = \frac{18 - 12,7}{60}$$

$$C = 0,088$$

Finalmente, debido a que la boquilla de enfriamiento permanecerá en contacto directo con el agua será fabricada en latón para prolongar su vida útil y con ello evitar la corrosión.

Tabla 22-3: Dimensiones de la Boquilla de Enfriamiento.

| PARAMETRO | DIMENSION | UNIDAD |
|-----------------------------|-----------|--------|
| Diámetro Orificio de salida | 12,70 | mm |
| Angulo de apertura de cono | 5,04 | ° |
| Altura | 113 | mm |
| Material | Latón | - |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

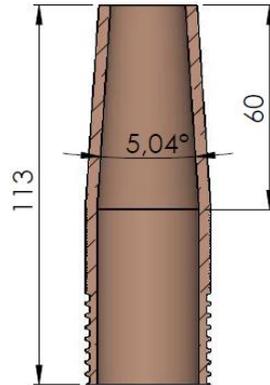


Figura 15-3. Boquilla de enfriamiento.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.6.3 Portaprobeta

En el presente trabajo se omite el diseño del portaprobeta debido a que en el laboratorio de materiales de la Facultad de Mecánica se dispone de un portaprobeta perteneciente a la máquina Jominy anterior, cuya geometría fue dimensionada en función de los parámetros establecidos en la norma ASTM A-255.

Tabla 23-3: Dimensiones y material de la portaprobeta

| PARÁMETRO | DIMENSIÓN | UNIDAD |
|--------------------------|-----------|--------|
| Diámetro Externo | 246 | mm |
| Diámetro Interno | 206 | mm |
| Espesor | 8 | mm |
| Diámetro Agujero Interno | 26 | mm |
| Conicidad (°) | 90 | mm |
| Material | A36 | - |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

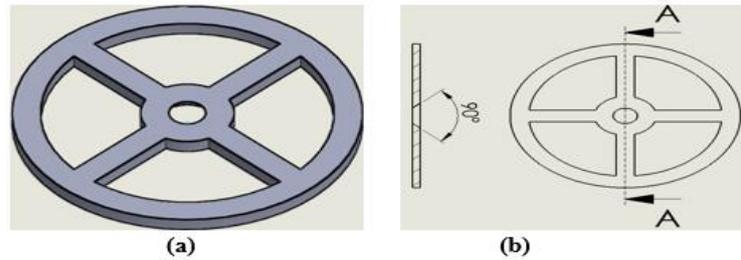


Figura 16-3. a) Portaprobeta, b) Geometría del portaprobeta

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.6.4 Diseño estructural de la máquina de ensayos Jominy.

Para el diseño estructural de la máquina de ensayos Jominy se tomó en cuenta los requerimientos establecidos en el despliegue de la casa de la calidad:

- Estructura compacta para aprovechar el espacio disponible en el laboratorio de materiales.
- Estructura resistente a las cargas y esfuerzos actuantes sobre la misma.
- Estructura estable para evitar accidentes durante la experimentación.

3.6.4.1 Geometría de la estructura

En vista que la estructura de la máquina Jominy requiere ser compacta, sus dimensiones finales están dadas en función de: la geometría y dimensiones de los elementos hidráulicos diseñados y seleccionados previamente.

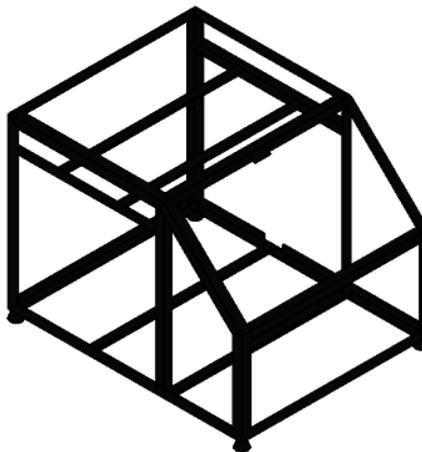


Figura 17-3. Estructura de la máquina Jominy.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

A continuación, en la tabla 24-3 se describen las dimensiones generales de la estructura.

Tabla 24-3: Dimensiones generales.

| PARÁMETRO | DIMENSIÓN | UNIDAD |
|-----------|-----------|--------|
| Altura | 550 | mm |
| Largo | 750 | mm |
| Ancho | 600 | mm |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

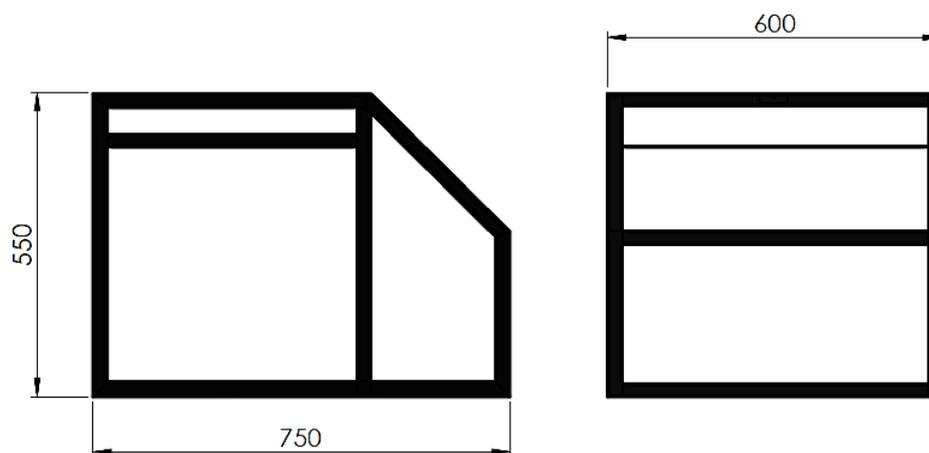


Figura 18-3 Dimensiones generales de estructura.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.6.4.2 Selección del perfil estructural

Otro criterio de diseño a tomar en cuenta es la resistencia que debe mostrar la estructura frente a las cargas y esfuerzos que actúan sobre ella; razón por la cual el material seleccionado para los perfiles es acero ASTM A-36 debido a que presenta excelentes propiedades mecánicas y su coste de adquisición no es elevado. A continuación, se mencionan sus propiedades principales:

Tabla 25-3. Propiedades mecánicas del acero ASTM A-36

| PROPIEDADES | DIMENSION | UNIDAD |
|------------------------|-----------|-------------------|
| Esfuerzo a la fluencia | 250 | MPa |
| Módulo de elasticidad | 200 | GPa |
| Densidad | 7,85 | g/cm ³ |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Fuente: (AAMSA)

Por lo cual, se han seleccionado los siguientes perfiles para el armazón de la máquina

Tabla 26-3. Perfiles seleccionados para la estructura

| PERFILES | DIMENSION | UNIDAD |
|----------|-----------|--------|
| Ángulo | 25x25x3 | mm |
| Platina | 25x4 | mm |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.6.4.3 Cargas de diseño

Previo al cálculo de las cargas de diseño, se determinó el peso de cada elemento que descansa sobre la estructura multiplicando sus valores de masa dados en “Propiedades Físicas” del programa SOLIDWORKS” por el valor de la gravedad ($9,8 \frac{m}{s^2}$). Los pesos calculados son:

Tabla 27-3: Peso de cada elemento montado sobre la estructura de la máquina Jominy.

| PESO | DIMENSION | UNIDAD |
|--|-----------|--------|
| Tanque portaprobeta | 33,52 | N |
| Tanque de almacenamiento | 83,94 | N |
| Tanque portaprobeta con fluido de enfriamiento sobrante | 1,54 | N |
| Tanque de almacenamiento lleno $\frac{3}{4}$ de su capacidad | 155,82 | N |
| Disco Portaprobeta | 13,73 | N |
| Probeta | 4,02 | N |
| Boquilla de enfriamiento | 1,01 | N |
| Bomba | 50,96 | N |
| Accesorios Hidráulicos | 5,39 | N |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Ahora bien, una vez calculados los pesos individuales se procedió a determinar las cargas de diseño que serán de tipo distribuida. Para esto se aplica lo siguiente:

$$Q = \frac{W}{A} \quad (21)$$

Donde:

Q: Carga de diseño $[\frac{N}{m^2}]$

W: Peso total [N]

A: Área de la sección transversal donde se aplica la carga [m^2]

A continuación, se calculan las cargas de diseño aplicadas a las platinas superiores e inferiores:

- *Carga de diseño aplicada en las platinas superiores.*

La fuerza total (W_{PS}) aplicada sobre las platinas superiores corresponde a la sumatoria de los pesos de: tanque portaprobeta, disco portaprobeta, probeta, boquilla de enfriamiento y líquido sobrante; con lo que se obtiene un valor de:

$$W_{PS} = 53,82 N$$

En vista de que la carga total es aplicada sobre la base del tanque portaprobeta, su sección transversal se determina mediante:

$$A = \pi * r^2 \quad (22)$$

Donde:

A: Área de la sección circular donde se aplica la carga [m²]

r: Radio [m]

Reemplazando datos, se obtiene:

r= 0,125 m

$$A = \pi * r^2$$

$$A = \pi * (0,125)^2$$

$$A = 0,0490 \text{ m}^2$$

Reemplazando datos, la carga de diseño aplicada sobre las platinas superiores es:

$$Q_{PS} = \frac{W_{PS}}{A}$$

$$Q_{PS} = \frac{53,82 \text{ N}}{0,0490 \text{ m}^2}$$

$$Q_{PS} = 1098,367 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1,098 \times 10^{-3} \text{ MPa}$$

- *Carga de diseño aplicada en las platinas inferiores.*

Las fuerzas aplicadas sobre las platinas inferiores corresponden al peso de: tanque de almacenamiento y de la bomba. Para los cuales se obtiene un valor de:

$$W_{TA} = 239,76 \text{ N}$$

$$W_B = 50,96 \text{ N}$$

Aplicando la ecuación 22, se encontró el área de la sección transversal del tanque; mientras que la base de la bomba es rectangular y su sección transversal se calcula mediante:

$$A = b * h \quad (23)$$

Reemplazando datos, se obtiene:

r= 0,15m.

$$A = \pi * r^2$$

$$A = \pi * (0,15)^2$$

$$A = 0,0706 \text{ m}^2$$

$$b = 0,121 \text{ m}$$

$$h = 0,11 \text{ m}$$

$$A = b * h$$

$$A = 0,121 * 0,11$$

$$A = 0,0133 \text{ m}^2$$

Finalmente, aplicando la ecuación 21 las cargas de diseño producidas por el tanque de almacenamiento (Q_{TA}) y la bomba (Q_B), tienen un valor de:

$$Q_{TA} = 3391,77 \frac{N}{m^2}$$

$$Q_B = 3926,99 \frac{N}{m^2}$$

$$Q_{TA} = 3,391 \times 10^{-3} \text{ MPa}$$

$$Q_B = 3,927 \times 10^{-3} \text{ MPa}$$

3.6.4.4 Análisis estático de la estructura.

Para conocer si la estructura resiste las cargas y esfuerzos actuantes sobre la misma, se realizó un análisis estático en el programa ANSYS y se obtuvo los valores de: esfuerzo, deformación y factor de seguridad bajo las condiciones de diseño establecidas inicialmente; para compararlos con los valores admisibles. A continuación, se describe el procedimiento de simulación:

- a) Se inicia asignando las propiedades del material, que en este caso es acero ASTM A-36 como se muestra a continuación:

| Property | Value | Unit |
|---|-------------------------------------|--------------------|
| Density | 7850 | kg m ⁻³ |
| Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion | 1,2E-05 | C ⁻¹ |
| Isotropic Elasticity | Young's Modulus and Poisson's Ratio | |
| Young's Modulus | 2E+11 | Pa |
| Poisson's Ratio | 0,3 | |
| Bulk Modulus | 1,66E+11 | Pa |
| Shear Modulus | 7,6923E+10 | Pa |
| Strain-Life Parameters | Strain-Life | |
| Display Curve Type | 9,2E+08 | Pa |
| Strength Coefficient | -0,106 | |
| Strength Exponent | 0,213 | |
| Ductility Coefficient | -0,47 | |
| Ductility Exponent | 3E+09 | Pa |
| Cyclic Strength Coefficient | 0,2 | |
| Cyclic Strain Hardening Exponent | Tabular | |
| S-N Curve | 1 | |
| Interpolation | 0 | Pa |
| Scale | 2,5E+08 | Pa |
| Offset | 2,5E+08 | Pa |
| Tensile Yield Strength | 4,6E+08 | Pa |
| Compressive Yield Strength | 0 | Pa |
| Tensile Ultimate Strength | | |
| Compressive Ultimate Strength | | |

Figura 19-3 Asignación de material a la estructura.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

- b) Se genera un mallado tetraédrico de la estructura de 5mm de densidad, con el fin de obtener resultados mucho más reales y precisos.

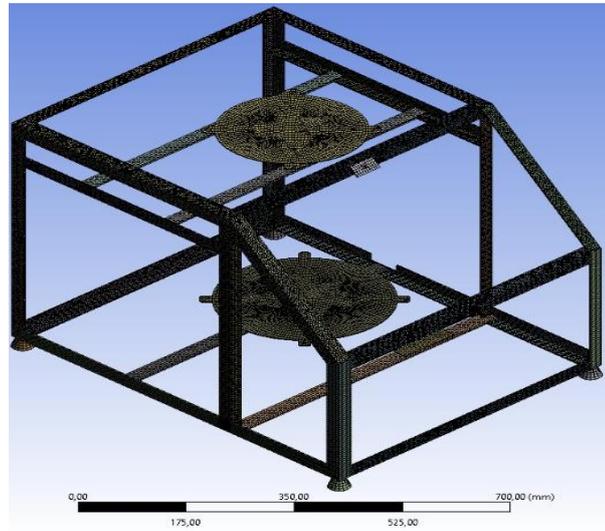


Figura 20-3 Mallado de la estructura.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

- c) Ahora, se ubican las cargas de diseño sobre las secciones de análisis (tanque portaprobeta, almacenamiento, bomba) y se las designa como “Esfuerzo [MPa]”.

$$A = 1,098 \times 10^{-3} \text{ MPa}$$

$$B = 3,391 \times 10^{-3} \text{ MPa}$$

$$C = 3,927 \times 10^{-3} \text{ MPa}$$

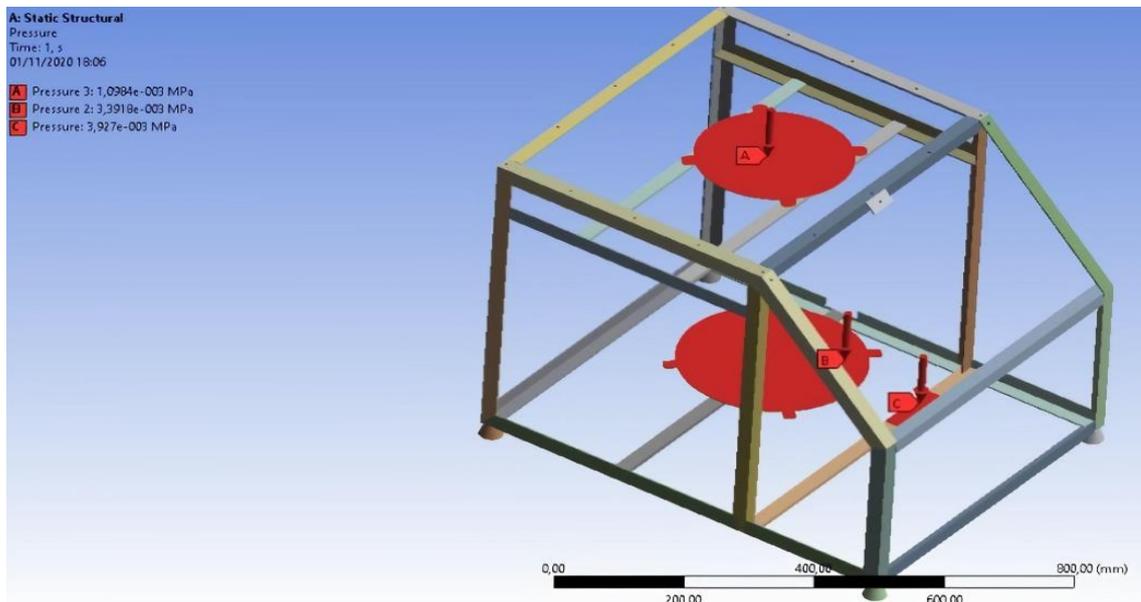


Figura 21-3 Aplicación de cargas sobre la estructura.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

- d) Una vez especificadas las condiciones de diseño, se inicia la simulación y se obtiene los valores de esfuerzo.

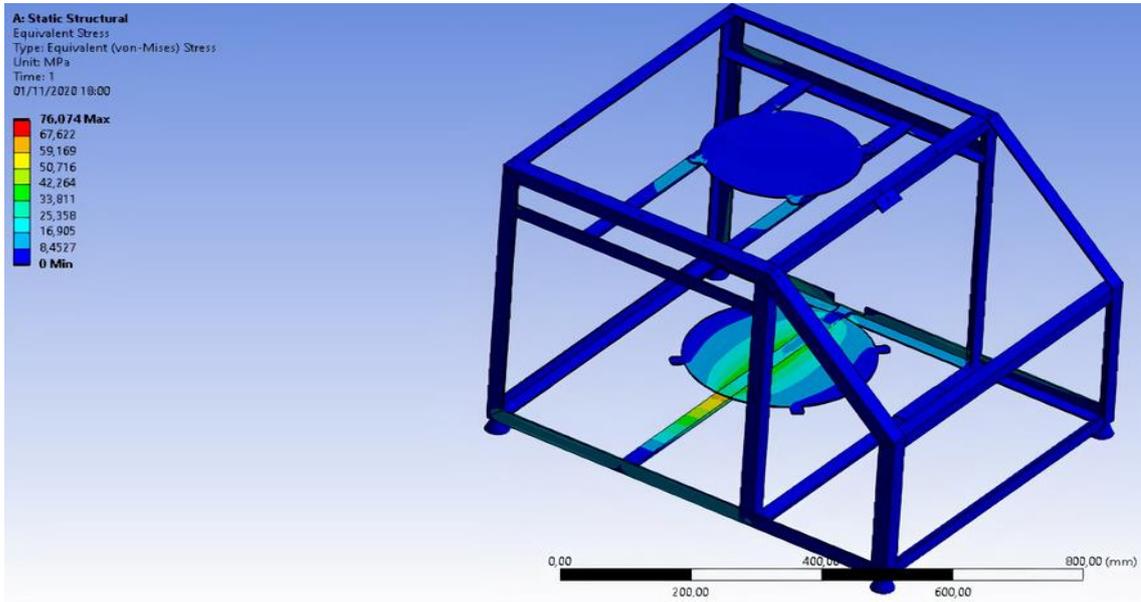


Figura 22-3 Esfuerzo máximo y mínimo que soporta la estructura.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

La teoría de Von Misses indica que un elemento resistirá los esfuerzos que actúan sobre él, siempre y cuando el material del cual está fabricado no alcance la zona plástica (INFAIMON, 2018). Para verificar esto, se compara el esfuerzo máximo (σ_{max}) obtenido de la simulación en ANSYS con el límite de fluencia (S_y) del material dado por el fabricante. A continuación, se muestran los valores obtenidos:

$$\sigma_{max} < S_y$$

Esfuerzo máximo obtenido en ANSYS:

$$\sigma_{max} = 76,074 \text{ MPa}$$

Límite de Fluencia para el acero ASTM A-36 (AAMSA):

$$S_y = 250 \text{ MPa}$$

Comparación:

$$76,074 < 250 \rightarrow \text{OK}$$

Comparando ambos valores se evidencia que el esfuerzo generado sobre la estructura es mucho menor que el límite de fluencia del acero ASTM A36, lo que garantiza una resistencia plena de la estructura frente a los pesos que actúan sobre ella.

e) Luego, se determinó el coeficiente de seguridad de la estructura.

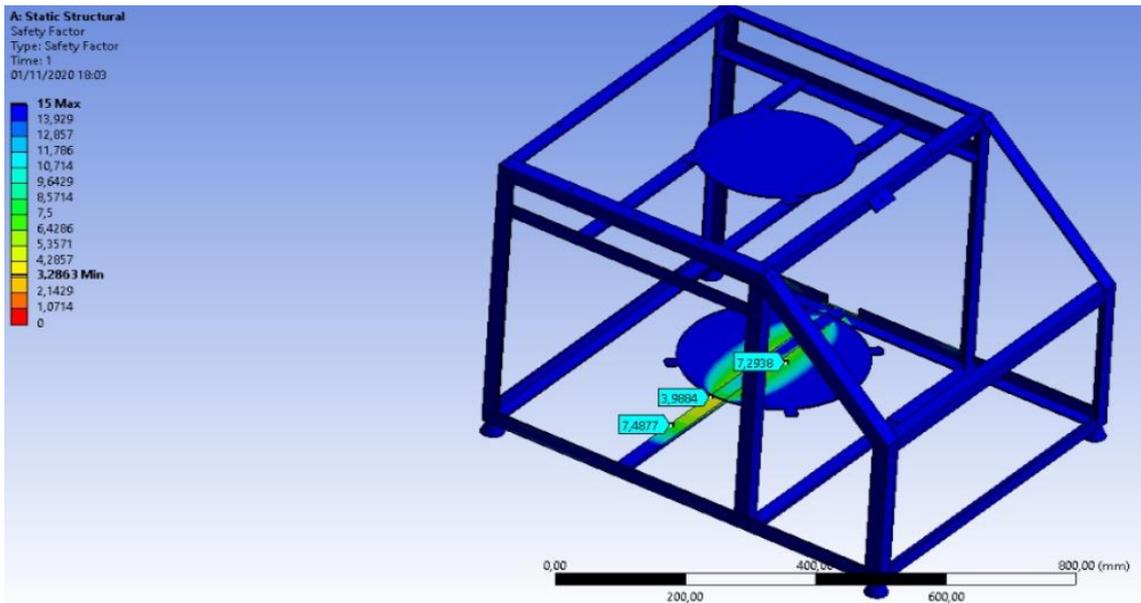


Figura 23-3. Factor de seguridad obtenido para la estructura.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

De igual manera, en diseño mecánico el cálculo del factor de seguridad de un elemento diseñado garantizar su funcionalidad frente a las condiciones de servicio impuestas por el usuario. Debido a esto, aquellos elementos diseñados para soportar bajos esfuerzos y cuyo funcionamiento no representan un riesgo para su operario, requieren de un factor de seguridad igual o mayor a uno; en comparación con aquellos elementos de mayores prestaciones que requieren factores superiores a cinco (Garcia, 1985, p.40). A continuación, se analizan los resultados obtenidos:

Factor de seguridad mínimo dado por ANSYS:

$$\eta_{calculado} = 3,2863$$

Factor de seguridad admisible:

$$\eta_{admisible} = 1$$

Comparación:

$$\eta_{calculado} > \eta_{admisible}$$

$$3,2863 > 1 \rightarrow \text{OK}$$

Una vez comparados los factores de seguridad se verifica que la capacidad de resistencia de la estructura de la máquina Jominy es tres veces mayor que la mínima requerida por el material; con lo que se garantiza un diseño funcional.

- f) Finalmente, ANSYS determina la deformación total que sufre la estructura de la máquina Jominy.

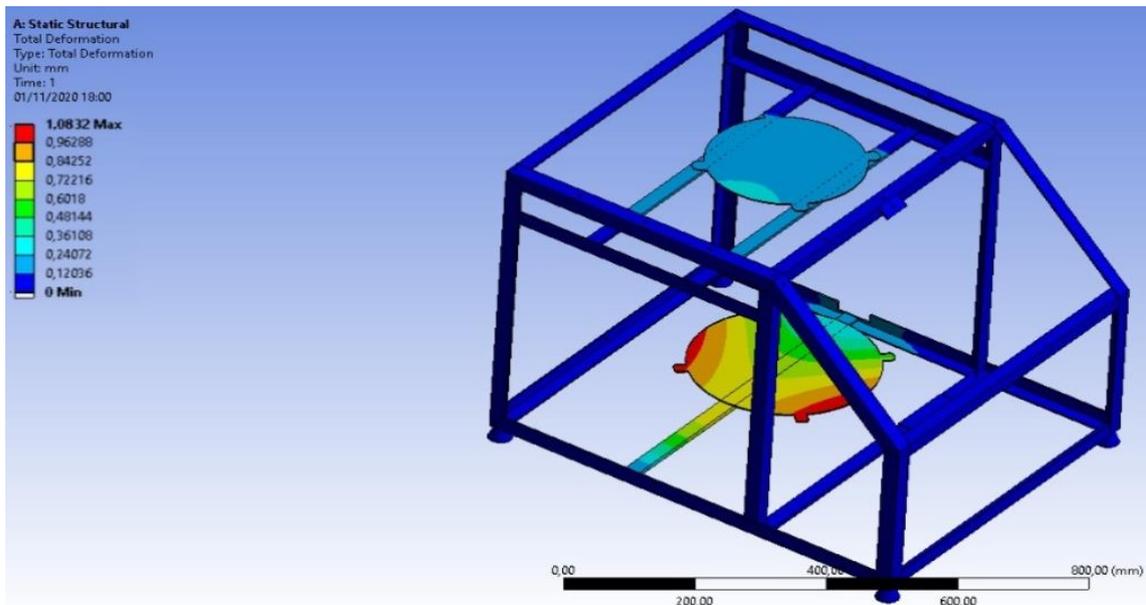


Figura 24-3. Deformación total en la estructura de la máquina Jominy.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Como se puede observar, en la figura 24-3 la deformación total obtenida es de 1,08 mm y la zona crítica se pinta sobre los extremos de la base del tanque de almacenamiento, lo que indica que la platina inferior donde se apoya el tanque requiere ser reforzada. En vista de esto, se ha optado por ubicar una plancha de acero inoxidable AISI 304 en la base de la estructura, para que los esfuerzos se distribuyan de mejor manera y con ello se contrarreste la deformación excesiva.

3.6.4.5 Diseño del piso de la estructura

Para este diseño, se ha considerado que el piso está expuesto a derrames de líquido de enfriamiento y que debe soportar el peso de la bomba, accesorios hidráulicos y el tanque de almacenamiento lleno los $\frac{3}{4}$ de su capacidad. Por ende, las dimensiones del piso están dadas en función de la base de la estructura diseñada previamente y el material seleccionado es acero inoxidable AISI 304 de 2 mm de espesor para garantizar su resistencia mecánica y a la corrosión. A continuación, se describen sus dimensiones:

Tabla 28-3: Dimensiones de la base.

| PARAMETRO | DIMENSIÓN | UNIDAD |
|-----------|---------------------------|--------|
| Largo | 744 | mm |
| Ancho | 594 | mm |
| Espesor | 2 | mm |
| Material | Acero Inoxidable AISI 304 | - |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

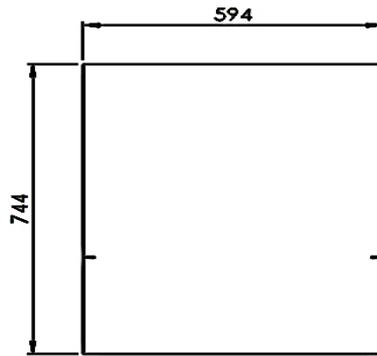


Figura 25-3. Base de la estructura.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.6.4.6 Diseño de la carcasa de la estructura

La carcasa de la máquina Jominy cubre el armazón estructural, el sistema hidráulico y porta los botones de control; su geometría y dimensiones están dadas en función del armazón diseñado previamente. El material seleccionado para la fabricación de la cara superior es acrílico de 6 mm de espesor y las restantes de tol de acero galvanizado de 0,7 mm de espesor.

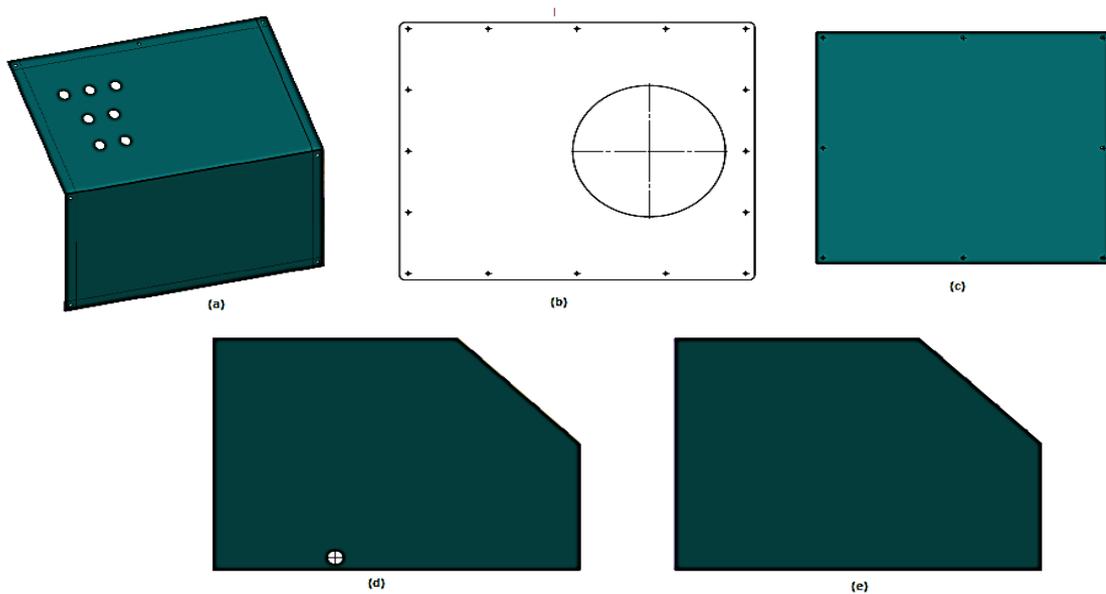


Figura 26-3. Cubiertas: a) Frontal, b) Superior, c) Posterior, d) Lateral Izquierda, e) Lateral Derecha

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.6.5 Diseño del sistema electrónico

El sistema electrónico diseñado para la máquina de ensayos Jominy tiene como objetivo principal controlar que las variables: altura de columna de flujo y tiempo de enfriamiento de la probeta se

mantengan dentro de los parámetros de experimentación establecidos en la norma ASTM A-255 con el fin de obtener resultados estandarizados.

3.6.5.1 Parámetros de diseño

La máquina de ensayos Jominy de manera automática debe:

- Calibrar la altura del flujo liberado por la boquilla hasta que alcance un valor de 63.5 mm establecido en la norma ASTM A-255.
- Controlar e indicar la finalización del proceso de calibración de flujo para dar inicio al enfriamiento de la probeta.
- Finalizar la incidencia de flujo sobre la probeta una vez que se hayan cumplido los 10 minutos de enfriamiento establecidos por la norma ASTM A-255.
- Retornar a las condiciones iniciales para ejecutar un nuevo ensayo

3.6.5.2 Modos de operación de la máquina Jominy

Se ha propuesto que el sistema electrónico diseñado para la máquina Jominy a parte de experimentar bajo los parámetros de la norma ASTM A255 permita al estudiante realizar el ensayo de templabilidad con valores de altura de columna de fluido y tiempo de experimentación diferentes a los normalizados, con el fin de verificar si existen cambios significativos en la estructura metalográfica o dureza del material ensayado. A continuación, se definen sus modos de operación:

- *Modo automático*

Este modo de operación cumple con los requerimientos de: tiempo de experimentación (10 min) y altura de columna libre de fluido (63,5 mm) establecidos en la norma ASTM A255 de forma directa, debido a que la obtención de la altura de columna libre de fluido es automática y su tiempo de permanencia durante el enfriamiento es controlado por un temporizador.

- *Modo manual.*

Este modo de operación brinda al usuario la posibilidad de realizar el ensayo de templabilidad bajo condiciones de: altura y tiempo de experimentación diferentes a los establecidos en la norma ASTM A255. Aquí, la altura de la columna libre de fluido con la que se experimenta se obtiene manipulando los botones de apertura y cierre de la válvula; mientras que el tiempo de duración del ensayo es controlado por el usuario con un cronómetro o temporizador externo.

- *Modo de regulación.*

Este modo tiene como función mantener de forma automática un caudal de referencia de $8,4 \frac{\text{litros}}{\text{min}}$ que garantiza una columna de fluido con altura de 63,5 mm según lo establecido en la norma además de brindar la posibilidad de variar los parámetros de experimentación requeridos para el ensayo.

3.6.5.3 Tablero de control

El operador será capaz de escoger entre tres modos de operación de la máquina: Manual, Regulación y Automático, de acuerdo con las necesidades del ensayo. El encendido del sistema hidráulico se realizará mediante un selector de dos posiciones, en donde: el botón START iniciará automáticamente el proceso de calibración de altura del flujo (válido solo en modo Automático). Un botón TEMPORIZADOR permitirá iniciar el tiempo de ensayo una vez cumplida la calibración de altura del flujo (solo válido en el modo Automático). El estado de calibración completa y la finalización del tiempo de ensayo se alertarán mediante un INDICADOR sonoro-luminoso (solo válido en el modo Automático). Dos botones de APERTURA y CIERRE permitirán al operador modificar la altura de flujo libre durante el ensayo (solo válido en el modo Regulación y Manual). Finalmente, un botón de RESET permitirá devolver el sistema a las condiciones iniciales antes de empezar la calibración o a su vez en el caso de que se cometiera un error durante la ejecución del ensayo.

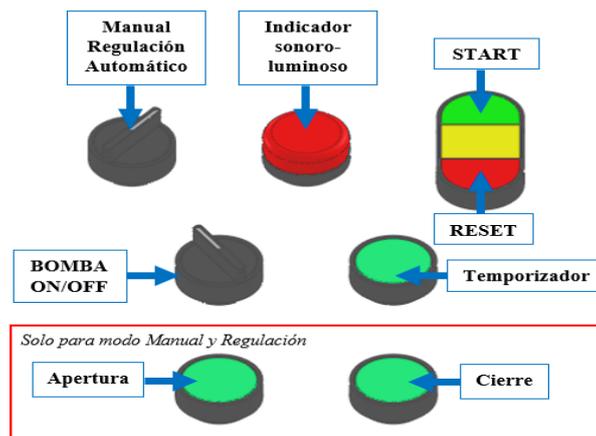


Figura 27-3. Tablero de control de la máquina Jominy

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.6.5.4 Estructura del sistema automatizado

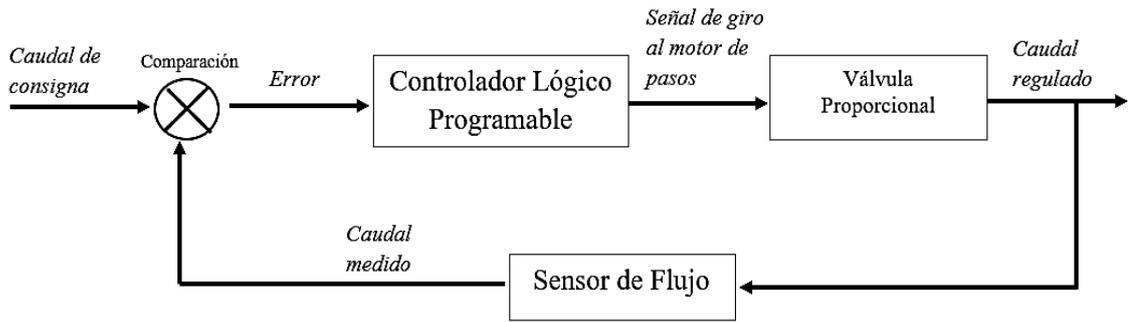


Figura 28-3. Diagrama de bloques control en lazo cerrado

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.6.5.5 Selección de componentes electrónicos.

Tabla 29-3: Elementos de entrada del sistema.

| CANT. | ELEMENTO | FUNCIÓN | IMAGEN |
|-------|-----------------------------|---|--------|
| 3 | PULSADOR MONOBLOCK VERDE NA | Brinda una orden específica al sistema | |
| 1 | PULSADOR MARCHA PARO | Brinda una orden de INICIO y RESET, respectivamente al sistema | |
| 1 | SELECTOR DE 3 POSICIONES | Permite elegir el modo de operación con el que va a trabajar la máquina | |
| 1 | SELECTOR DE 2 POSICIONES | Energiza el motor de la bomba | |
| 1 | Sensor de flujo YFs201 1/2" | Recibe la información de caudal en la línea de flujo libre | |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Tabla 30-3: Elementos actuadores del sistema.

| CANTIDAD | ELEMENTO | FUNCIÓN | IMAGEN |
|----------|---------------------------|--|--------|
| 1 | INDICADOR SONORO-LUMINOSO | Indica que la máquina está calibrada y la culminación del tiempo de ensayo | |

| | | | |
|---|---|--|---|
| 1 | Motor-Bomba Centrifuga ½ HP | Alimenta el sistema Hidráulico |  |
| 1 | Válvula Proporcional de compuerta ¾" 12V DC | Permite la micro regulación del caudal en la línea de bypass |  |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 202

Tabla 31-3: Elementos de protección del sistema.

| CANTIDAD | ELEMENTO | FUNCIÓN | IMAGEN |
|----------|-------------------|---|---|
| 1 | BRAKER BIPOLAR 6A | Protección abre o cierra el paso de corriente eléctrica AC al sistema |  |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Tabla 32-3: Elementos de maniobra del sistema.

| CANTIDAD | ELEMENTO | FUNCIÓN | IMAGEN |
|----------|---------------------------------|---|---|
| 2 | RELÉ TIPO BORNERA RIEL DIN 110V | Abre y cierra el paso de corriente DC que energiza el motor a pasos |  |
| 1 | RELÉ DE BOBINA 110V | Protege el sistema contra sobrecargas |  |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Tabla 33-3: Elementos auxiliares del sistema.

| CANTIDAD | ELEMENTO | FUNCIÓN | IMAGEN |
|----------|-------------------------------|--|---|
| 1 | Fuente de poder 600W | Alimentar los componentes de corriente continua |  |
| 1 | Gabinete eléctrico 400x400x20 | Garantiza el aislamiento de los componentes eléctricos de la humedad, el polvo y otros agentes externos del ambiente que puedan afectar su funcionamiento. |  |

| | | | |
|----|--|--|---|
| - | MATERIAL ELÉCTRICO (cable, riel DIN, canaleta ranurada). | Conexión eléctrica de los componentes del sistema. |  |
| 35 | BORNERA RIEL DIN 16AWG | Facilitan las conexiones y el cableado |  |
| 2 | PUENTE DE UNIÓN 10 POLOS | Permiten la interconexión entre borneras |  |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Tabla 34-3: Unidad de control del sistema.

| CANTIDAD | ELEMENTO | FUNCIÓN | IMAGEN |
|----------|----------------------|---|---|
| 1 | PLC XINJE XD3-16RT-E | Controlar de manera automática los distintos procesos en la máquina |  |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.6.5.6 Controlador del sistema electrónico

Como se definió inicialmente en el QFD desarrollado para la máquina Jominy, el elemento controlador del sistema es un PLC debido a que presenta un control de mayor precisión, mejor monitoreo del proceso de enfriamiento y agilitan el accionamiento de los dispositivos actuadores. En el presente trabajo de investigación, se optó por emplear un PLC XINJE XD3-16RT-E cuyas características se mencionan a continuación:

- Abastece el número de entradas y salidas requeridas en el proceso.
- Permite el ingreso de entradas de alta frecuencia.
- Brinda salidas de tipo relé y transistorizadas en un módulo compacto.
- Su software de programación es amigable, fácil de codificar y adquirir sus licencias.

Tabla 35-3: Ficha técnica de PLC XINJE XD3-16RT-E

| PLC XINJE XD3-16RT-E | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Controlador lógico programable 8 IN – 8 OUT - Entradas digitales de tipo NPN - Entradas de 100-240 VAC - Voltaje de salida 224 VDC - Corriente de salida 400mA |  |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Fuente: (ELECTROCONTROL, 2018)

3.6.5.7 Programación del Controlador PLC XINJE XD3-16RT-E

Para la programación del PLC se utilizó el software Xinje PLC Program Tool y como lenguaje de programación se empleó el diagrama de escalera o Ladder para cada acción ejecutada por el controlador. En vista de esto, cada una de las variables a emplear sea de entrada o salida requieren caracterizadas; como se muestra a continuación:

3.6.5.8 Relación Caudal-Frecuencia

Al ingresar el caudal de agua al sensor de flujo YF-S201 hace girar una turbina que tiene un imán acoplado a su cuerpo y activa un sensor de efecto Hall que emite un pulso eléctrico, el mismo que es leído por la entrada digital del PLC. Para determinar el caudal circulante por el sensor, puesto que el volumen de fluido por cada pulso es fijo y de un valor (promedio) conocido primero se debe contar la cantidad de pulsos medidos en unidad de tiempo (minuto) y luego multiplicarlos por el valor de volumen/pulso. De acuerdo con el ANEXO H la relación de volumen/ pulso para este sensor se puede expresar mediante la siguiente ecuación.

$$Q \left[\frac{\text{litros}}{\text{min}} \right] = \frac{F}{7.5} \quad (24)$$

Donde:

Q: Caudal requerido $\left[\frac{\text{litros}}{\text{min}} \right]$

F: Frecuencia medida por el sensor [Hz]

3.6.5.9 Caracterización de la señal para el sensor YF-S201

El pulso eléctrico emitido por el sensor se presenta en forma de una onda cuadrada, en donde para una determinada cantidad de volumen de flujo es necesario conocer su frecuencia y periodo. Para conocer el tiempo transcurrido durante el conteo de un determinado número de flancos de subida se emplean contadores rápidos (HSC) dentro de la programación del PLC. En la máquina Jominy este conteo se denomina tiempo de muestreo, el mismo que varía en función del tiempo en que se demora en contar 20 pulsos. De manera conservadora se ha elegido tomar el valor de 20 pulsos con el fin de tener una buena información de datos

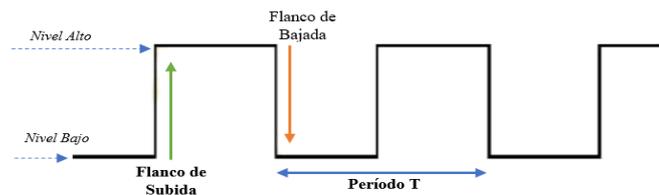


Figura 29-3. Señal de onda cuadrada.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

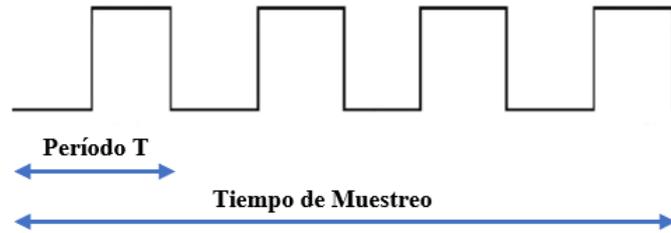


Figura 30-3. Representación general de período y tiempo de muestreo

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.6.5.10 Modelado matemático del tiempo requerido para alcanzar el caudal deseado

En el apartado 3.6.2.2 se calculó el caudal necesario para alcanzar la altura de flujo libre en el ensayo según la normativa ASTM A255. Es decir, se requiere 8.46 litros por minuto para alcanzar una altura libre de fluido de 2.5 pulgadas desde la salida de la boquilla; Reemplazando este valor en la ecuación 24 se obtiene una frecuencia de:

$$F = 8.4 \left[\frac{l}{min} \right] * 7.5$$

$$F = 63 \text{ Hz}$$

El tiempo en que se da cada pulso se define como Periodo. Se conoce por fórmula que el período es igual al inverso de la frecuencia. Por lo tanto, el periodo resultante es:

$$T = 1/63 = 0.0158 \text{ seg}$$

Como el valor referencial establecido para la toma de una muestra es de 20 pulsos, el tiempo durante esta toma en la máquina Jominy es:

$$T_{20} = 0.0158 * 20 = 0.316 \text{ seg}$$

Dado que la unidad de medida en TIMERS (o Contadores) en el autómatas son milisegundos, convertimos el dato obtenido a esta unidad.

$$T_{20} = 316 \text{ msec}$$

Entonces se concluye que cuando el PLC mida 316 milisegundos en el tiempo de muestreo, se estará obteniendo un caudal de 8.4 l/min que a su vez garantiza una altura de columna de fluido de 2.5 pulgadas requerida por la norma ASTM A255; por ende, el valor de T_{20} será el SETPOINT en la programación del PLC. De este modo a menor valor de T_{20} mayor caudal se obtendrá y viceversa.

3.6.5.11 Tolerancia de Medición Admisible

Una vez que el ensayo se encuentra en ejecución, debido a las condiciones y características oscilatorias del flujo se hace casi imposible determinar exactamente el valor de caudal establecido. Por lo que se hace oportuno generar una banda de tolerancia, con un límite máximo y mínimo. Mientras el caudal se encuentre entre estos dos valores no se tomará ninguna acción sobre el valor comparado con el SETPOINT.

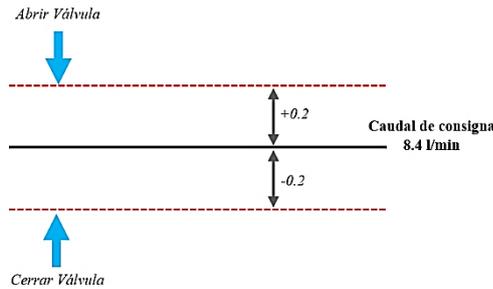


Figura 31-3 Banda de tolerancia y respuesta

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

De este modo si el valor medido está por arriba de la zona de tolerancia el controlador abrirá la válvula proporcional hasta llegar dentro de la banda de tolerancia, caso contrario si el valor medido es inferior al valor mínimo admisible el controlador cerrará la válvula proporcional hasta llegar nuevamente dentro del límite permisible. Así mismo, una vez obtenidos los caudales permisibles aplicamos el modelo matemático del apartado 3.6.5.12 para conocer sus tiempos en milisegundos.

Tabla 36-3: Valores límite en la banda de tolerancia

| VALOR | CAUDAL [l/min] | FRECUENCIA [Hz] | PERÍODO T[seg] | TIEMPO T ₂₀ [mseg] |
|--------|-------------------|--------------------|-------------------|----------------------------------|
| Máximo | 8,6 | 64,5 | 0,0155 | 310,1 |
| Mínimo | 8,2 | 61,5 | 0,0163 | 325,2 |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Mediante la comparación entre los tiempos límites de la banda de tolerancia y el valor medido durante el tiempo de muestra T₂₀, se realizará el cambio de giro del motor NEMA 17 en la válvula proporcional.

3.6.5.12 Valores porcentuales para ajuste fino de la válvula proporcional.

El sistema requiere de un cierto tiempo para alcanzar el caudal de consigna. Durante este tiempo se puede trabajar por zonas de funcionamiento, de modo que la válvula proporcional realice un ajuste fino cuando los valores de caudal estén lo más cercanos posible al valor de consigna.

Debido a la naturaleza del elemento de impulsión empleando en este proyecto (bomba centrífuga) es necesario contemplar dos posibles escenarios para el alcance del caudal de consigna: El primero cuando el flujo se encuentre por encima del valor de consigna (donde será necesario reducir su caudal) y el segundo y más probable cuando el flujo se encuentre por debajo del valor de consigna (donde será necesario requerirá incrementar su caudal). En ambos escenarios, cuando se cumpla el 80% del tiempo requerido para alcanzar el caudal de consigna la válvula entrará en la zona de ajuste fino, para que el 20% restante del tiempo que le toma al sistema en llegar al punto de consigna sea realizado con un ajuste más preciso.

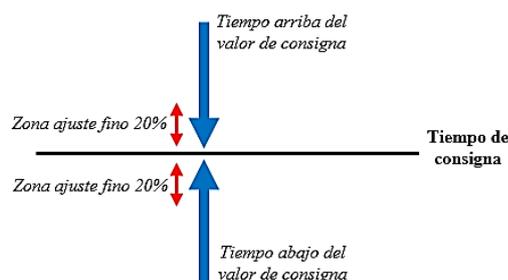


Figura 32-3 Zona de ajuste fino

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

En la figura 32-3, el tiempo de consigna hace referencia a los 8.4 l/min requeridos para obtener una altura de 2.5 in. Los valores porcentuales por encima y debajo del tiempo de consigna corresponden a los dos escenarios antes mencionados. Si se toman los 8.4 l/min como un valor porcentual de 100%, cuando el flujo se encuentre por debajo del caudal de consigna el sistema entrara en la zona de ajuste fino cuando se mida el 80% de los 8.4 l/min. De igual manera cuando el flujo se encuentre por encima del caudal de consigna el sistema entrara en la zona de ajuste fino cuando se mida el 120% de los 8.4 l/min.

Con los valores porcentuales sobre el valor de consigna de 8.4 l/min podemos conocer los caudales y tiempos en milisegundos límites de ingreso a la zona de ajuste fino.

Tabla 37-3: Valores límites de ingreso a la zona de ajuste fino

| VALOR | % | CAUDAL PORCENTUAL [l/min] | FRECUENCIA [Hz] | T[seg] | T ₂₀ [mseg] |
|-----------------------------------|-----|---------------------------|-----------------|--------|------------------------|
| Por debajo del caudal de consigna | 80 | 6,72 | 50,4 | 0,0198 | 396,82 |
| Por encima del caudal de consigna | 120 | 10,08 | 75,6 | 0,0132 | 264,55 |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Mediante la comparación entre los tiempos límites de ingreso a la zona de ajuste fino y el valor medido durante el tiempo de muestra T_{20} , se realizará el cambio de velocidad en la válvula proporcional.

3.6.5.13 Asignación de velocidad en la válvula proporcional

La válvula proporcional integra un motor a pasos NEMA 17, en cuya ficha técnica indica que da 200 pasos por cada revolución. Además, el Driver que controla este motor está configurado para manejar un microstepping de 1/8, lo que equivale a dividir un paso en 8 unidades iguales. Esto indica que el motor en la válvula proporcional tiene que dar 1600 pasos para completar una revolución. Mediante el siguiente sistema de factores de conversión se puede conocer la velocidad del motor partiendo de su frecuencia.

$$Frecuencia \left[\frac{\text{ciclos}}{\text{segundo}} \right] \times \left[\frac{1 \text{ revolución}}{1600 \text{ ciclos}} \right] \times \left[\frac{60 \text{ segundos}}{1 \text{ minuto}} \right] = \text{Velocidad [RPM]}$$

Con el modelo anterior; a continuación, se presentan las velocidades de trabajo para la válvula proporcional.

Tabla 38-3: Velocidades de trabajo de la válvula proporcional

| VALOR | FRECUENCIA [HZ] | VELOCIDAD [RPM] |
|--------------------------|-----------------|-----------------|
| Alto | 600 | 22,5 |
| Bajo (Ajuste fino) | 40 | 1,5 |
| Modo Manual y Regulación | 300 | 11,25 |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Mediante el envío de señales pulsantes con mayor o menor frecuencia hacia el motor NEMA 17, se regulará la velocidad de operación en la válvula proporcional. Cuando el valor medido se encuentre sobre o debajo de la zona de ajuste fino la válvula tomará una velocidad alta; mientras que si el valor se encuentra dentro de esta zona la velocidad será más baja para garantizar el ajuste fino. Cabe recalcar, que las velocidades del motor están relacionadas al escenario en que se presente el valor medido.

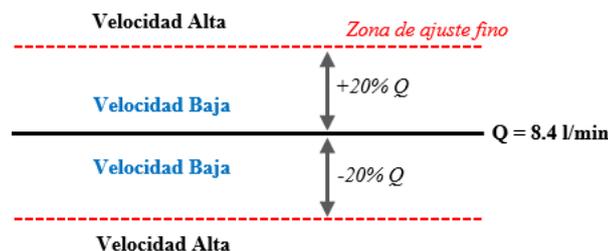


Figura 33-3 Velocidades de trabajo y zona de ajuste fino

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.6.5.14 Caudales de seguridad

Con el fin de cuidar la integridad de la válvula proporcional debido a que posee un límite mecánico en su apertura máxima, se establece un caudal de seguridad mínimo. Mediante este valor se realiza una comparación, de modo que si el caudal medido está por debajo del mínimo no existirá ninguna clase de movimiento en la válvula.

Así mismo, se establece un caudal máximo teniendo en cuenta que la salida de flujo libre no incremente su altura descontroladamente de manera que pueda comprometer la integridad de los equipos electrónicos cercanos o de la misma máquina. Estos valores de seguridad se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 39-3: Caudales de Seguridad

| VALOR | CAUDAL [l/min] | FRECUENCIA [Hz] | PERÍODO T[seg] | TIEMPO T ₂₀ [mseg] |
|--------|-------------------|--------------------|-------------------|----------------------------------|
| Máximo | 10 | 75 | 0,013 | 266.66 |
| Mínimo | 6 | 45 | 0,022 | 444.44 |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.6.5.15 Comprobación de existencia de flujo

En caso de que el tanque de almacenamiento de la máquina se encuentre vacío, ya sea por mantenimiento o por otras circunstancias; se establece que por seguridad de la válvula proporcional el controlador detecte la existencia o no de flujo en las tuberías. En vista de esto y de acuerdo con la figura 31-3, se puede decir que no existirá flujo mientras el sensor no registre una variación en los flancos. Por ende, según el ANEXO H el rango de medición del sensor YF-S201 es de 1 a 30 $\left[\frac{\text{litros}}{\text{min}}\right]$ y en donde aplicando la ecuación 24 para los valores del rango de medición, se encontró la frecuencia máxima y mínima que presenta el sensor. Estos valores se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 40-3: Rango de medición del sensor YF-S201

| VALOR | CAUDAL [l/min] | FRECUENCIA [Hz] | PERÍODO T[seg] | TIEMPO T ₂₀ [mseg] |
|--------|-------------------|--------------------|-------------------|----------------------------------|
| Máximo | 30 | 225 | 0,0044 | 88,89 |
| Mínimo | 1 | 7,5 | 0,1333 | 2666,67 |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Con el uso de un temporizador o Timer en la programación del PLC dentro del tiempo de muestreo, podemos definir como límite el valor mínimo T₂₀ calculado en la tabla 39-3. De tal forma que, si el valor medido es mayor y supera el Timer, significa que no hay flujo en las tuberías

y con ello se detiene el funcionamiento de la válvula proporcional porque le resulta imposible alcanzar el caudal de consigna.

3.6.5.16 Acondicionamiento de señal del Sensor de Flujo YF-S201

De acuerdo con el ANEXO H, el sensor de flujo proporciona en su salida una onda cuadrada pulsante de 12V DC. Esta señal necesariamente tendrá que ser amplificada a la tensión de entrada requerida por el autómatas para su correcta interpretación o lectura, manteniendo su frecuencia. Para esto se diseñó un circuito eléctrico de acondicionamiento en donde un transistor NPN actuará como interruptor entrando en la zona de corte o saturación según la señal obtenida por el sensor de flujo, permitiendo así la adquisición de una señal de 24V DC en una entrada transistorizada del PLC. A continuación, se detallan los cálculos de las resistencias que permitirán al transistor ingresar en la zona de corte según los requerimientos de funcionamiento.

Se asume un valor de corriente de colector

$$I_C = 10 \text{ mA}$$

La resistencia del colector RC se calcula mediante la ecuación de Ley de Ohm

$$V = IR \tag{25}$$

$$R = \frac{V}{I}$$

Remplazando valores para un voltaje igual a 24V requerido en la entrada del PLC, obtenemos un RC de:

$$R_C = \frac{24[V]}{10[mA]}$$

$$R_C = 2400 \Omega$$

La corriente de base IB se calcula mediante la ecuación:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \tag{26}$$

Donde:

β : Ganancia del transistor

I_C : corriente del colector [mA]

De acuerdo con el ANEXO I β es igual a 100. Remplazando datos, obtenemos:

$$I_B = \frac{10 [mA]}{100}$$

$$I_B = 0.1 \text{ mA}$$

Para el cálculo de la resistencia de base R_B se realiza una malla en el circuito de donde se puede obtener el valor deseado

$$-V + R_B * I_B + V_{BE} = 0$$

Donde

V : Voltaje de la señal del sensor de flujo [V]

V_{BE} : Voltaje base emisor [V]

Despejando de la ecuación, el valor de R_B se calcula mediante:

$$R_B = \frac{V - V_{BE}}{I_B} \quad (27)$$

Reemplazando datos, se obtiene:

$$V = 12 \text{ V}$$

$V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ para transistores de silicio (Boylestad y Nashelsky, 2009, p.136).

$$R_B = \frac{12[V] - 0.7[V]}{0.1 [mA]}$$

$$R_B = 113 \text{ k}\Omega$$

3.6.5.17 Construcción del circuito acondicionador del sensor de flujo YF-S201

Para acondicionar la señal del sensor de flujo, se construyó un circuito que consta de: un transistor NPN 2N3904, una resistencia base (R_1) de 113 k Ω y una resistencia de colector (R_2) de 2.4 k Ω , en la figura 34-3 muestra el circuito de acondicionamiento implementado.

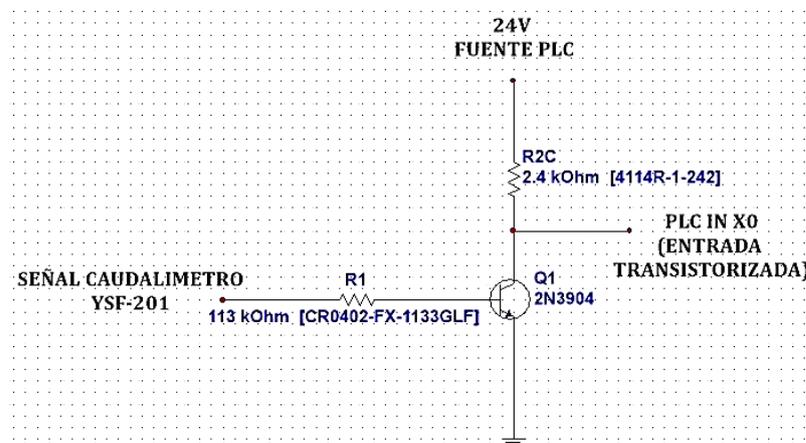


Figura 34-3 Circuito acondicionador sensor de flujo YF-S201

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.6.5.18 Acondicionamiento señales para el sentido de giro del motor NEMA 17

De acuerdo con las especificaciones de funcionamiento proporcionadas por WUXI XINJE ELECTRIC CO., LTD; las salidas en el modelo XD3-16RT-E son de tipo NPN, es decir que proporcionan valores bajos de voltaje (0 Voltios). Al tener valores “bajos” no se pueden ingresar directamente al Driver del motor a pasos, por lo que deben ser acondicionados en su salida. La tensión de salida del autómatas es una señal en bajos de 5V DC y mediante una fuente de poder de 5V DC en altos se alimentará el pin DIR para controlar el sentido de giro del motor en el Driver A4988, tomando en cuenta que la alimentación debe conservar la frecuencia de la señal en la salida del PLC. El diseño del circuito fue realizado de modo que un transistor NPN funcione como un interruptor entrando en la zona de corte o saturación según la señal de salida del PLC, obteniendo una señal en altos para la entrada al pin DIR del Driver. A continuación, se detallan los cálculos de las resistencias que permitirán al transistor entrar en la zona de corte según los requerimientos de funcionamiento.

Se asume un valor de corriente de colector

$$I_C = 10 \text{ mA}$$

La resistencia del colector RC se calcula mediante la ecuación (25) y reemplazando los valores para un voltaje de alimentación de 5V, se obtiene un RC de:

$$R_C = \frac{5[V]}{10[mA]}$$

$$R_C = 500 \Omega$$

La corriente de base IB se calcula mediante la ecuación (26) teniendo en cuenta las características del transistor. Reemplazando datos se obtiene:

$$I_B = \frac{10 [mA]}{100}$$

$$I_B = 0.1 \text{ mA}$$

Al igual que el proceso anterior encontramos la resistencia de base RB mediante una malla en el circuito, en donde aplicando la ecuación 27 y reemplazando un voltaje de 5V y VBE= 0,7 V se obtiene:

$$R_B = \frac{5[V] - 0.7[V]}{0.1 [mA]}$$

$$R_B = 43 \text{ k}\Omega$$

3.6.5.19 Construcción del circuito de acondicionamiento de señal del sentido de giro del motor

Para la construcción del circuito de acondicionamiento de la señal de salida del PLC para la dirección del motor a pasos se utilizó: un transistor NPN 2N3904, una resistencia base de 43 kΩ y una resistencia de colector R2 de 500 Ω. La figura 35-3 muestra el circuito de acondicionamiento implementado.

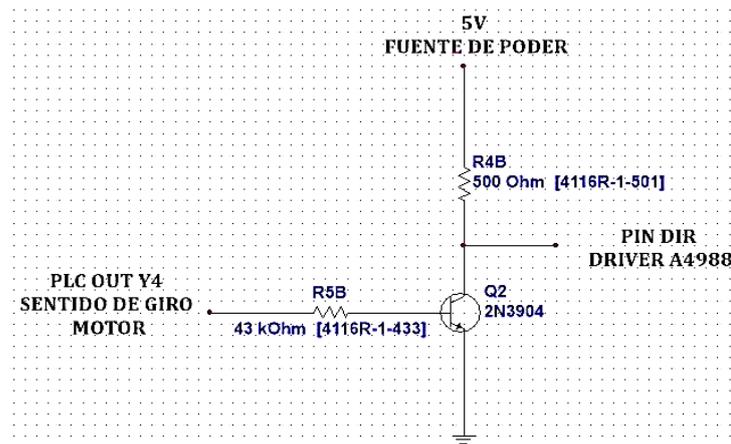


Figura 35-3. Circuito acondicionador sentido de giro NEMA 17

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.6.5.20 Acondicionamiento de señal de paso del motor

Debido a que las salidas del PLC son de tipo NPN, y como se mencionó con anterioridad, al ser de valores “bajos” estas requieren ser acondicionadas para ingresar directamente al Driver del motor a pasos. Para el acondicionamiento, se utilizó la misma fuente de poder de 5VDC para alimentar el pin de control de pasos del motor STEP en el Driver A4988 tomando en cuenta de que se conserve la frecuencia de la señal en la salida del PLC. El diseño del circuito fue realizado de modo que un transistor PNP funcione como un interruptor entrando en la zona de corte o saturación según la señal en la salida del PLC, el mismo que está configurado como un interruptor debido a que la base estará sesgada negativamente por la señal del PLC y con ello obtener una señal en altos para la entrada al pin STEP del Driver. A continuación, se detallan los cálculos de las resistencias que permitirán al transistor entrar en la zona de corte según los requerimientos de funcionamiento.

Se asume un valor de corriente de colector

$$I_C = 10 \text{ mA}$$

Corriente máxima requerida 1mA

$$I_{max_{req}} = 1 \text{ mA}$$

La corriente de base mínima para que entre en saturación el transistor calcula mediante la ecuación (26):

Reemplazando valores, se encontró:

$$I_{B_{min}} = \frac{10 \text{ mA}}{100}$$

$$I_{B_{min}} = 0.1 \text{ mA}$$

Se toma el 30% más de corriente de base mínima para garantizar que el transistor se sature

$$I_{B_{min\ 30\%}} = 0.13 \text{ mA}$$

La resistencia de base RB se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$RB = \frac{V}{\frac{I_{max_{req}}}{\beta * I_{B_{min\ 30\%}}}} \quad (28)$$

Reemplazando datos, se obtiene:

$$V = 5 \text{ V}$$

$$I_{max_{req}} = 1 \text{ mA}$$

$$\beta = 100$$

$$I_{B_{min\ 30\%}} = 0.13 \text{ mA}$$

$$RB = \frac{5V}{\frac{1mA}{100 * 0.13mA}}$$

$$RB = 65 \Omega$$

3.6.5.21 Construcción del circuito para el acondicionamiento de la señal de paso del motor

En el circuito se emplea una resistencia R2 para asegurar la estabilidad del circuito, no es esencial, pero se usa para asegurar que no haya corrientes que hagan que el transistor se sature cuando no debe. Se recomienda un valor de cinco veces RB

$$R2 = 325 \Omega$$

En RC se usa una resistencia de 1kΩ para dar mayor protección al pin STEP del driver debido a que la corriente se dividirá al driver y a la resistencia. Esta resistencia no es necesaria, pero se usa por seguridad. La figura 36-3 muestra el circuito de acondicionamiento implementado.

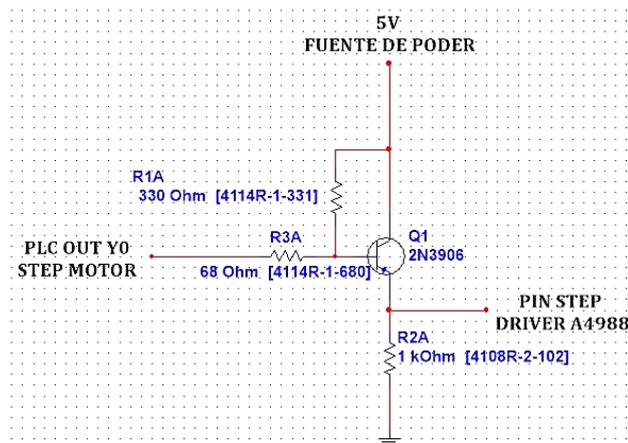


Figura 36-3 Circuito acondicionador de paso NEMA 17

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.6.5.22 Proceso de secuencia en el modo automático.

El proceso automático de ensayo inicia con la condición de caudal mínimo negada, es decir que si no existe el caudal mínimo la etapa 1 será abrir la válvula proporcional, una vez el caudal mínimo sea alcanzando la etapa 2 será parar la apertura de la válvula y activar el contador de transición TMR20.

Antes de pasar a la etapa 3 existe inicialmente también un salto condicional que ahora bajo la condición de existencia de un caudal mínimo dará paso directamente a la condición previa a esta etapa. Las condiciones para que inicie la etapa 3 serán: que exista ya un caudal mínimo, que el contador TMR20 finalice y adicionalmente se requiere un pulso de paso.

En la etapa 3 se realizará la función de compensación, donde se abrirá y cerrará la válvula proporcional dentro de la banda de tolerancia establecida en el diseño previo hasta alcanzar el caudal de consigna. Una vez alcanzado el caudal de consigna en la etapa 4 se activará el contador de transición TMR21. Finalmente, en la etapa 5 se encuentra el contador TMR22 en donde estará seteado el tiempo de duración del ensayo de acuerdo con la normativa ASTM A255. las condiciones para que inicie la etapa 5 serán: que el contador TMR21 finalice y además se requiere un pulso de inicio TEMP. Una vez consumido el tiempo de ensayo en TMR22 el sistema retorna a su etapa inicial y el proceso de vuelve cíclico.

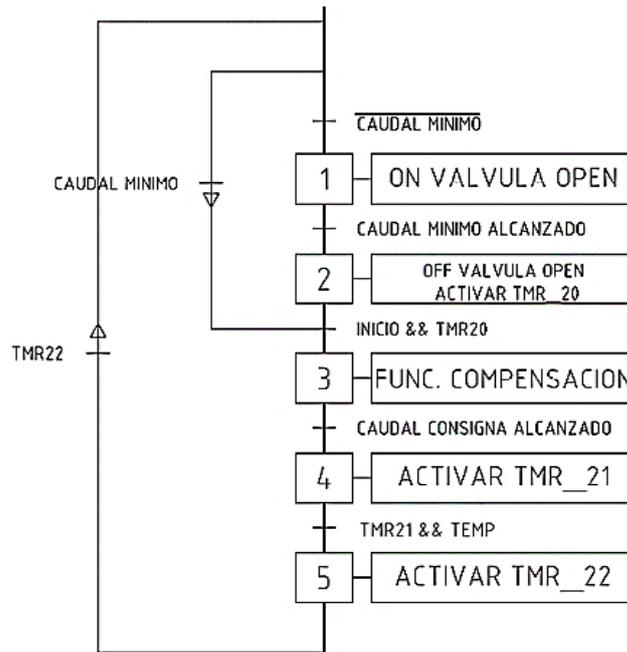


Figura 37-3 Graficet de la secuencia en modo automático

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.6.5.23 Entradas y salidas físicas definidas para el PLC

Tabla 41-3: Entradas PLC XINJE

| ETIQUETA | FUNCIÓN |
|----------|--|
| X0 | Señal del sensor de flujo YF-S201 |
| X1 | Mando modo Manual |
| X2 | Mando modo Automático |
| X3 | Iniciar calibración de altura de flujo libre |
| X4 | Reset |
| X5 | Activar Temporizador |
| X6 | Mando abrir válvula proporcional |
| X7 | Mando cerrar válvula proporcional |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Tabla 42-3: Salidas físicas PLC XINJE

| ETIQUETA | FUNCIÓN |
|----------|--|
| Y0 | Salida de pulsos hacia el Driver del motor NEMA 17 |
| Y2 | Activación del indicador sonoro luminoso |
| Y3 | Activación de relees para habilitar o deshabilitar el motor a pasos del driver |
| Y4 | Dirección del motor NEMA 17 |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.6.5.24 Diagrama de Conexiones Eléctricas

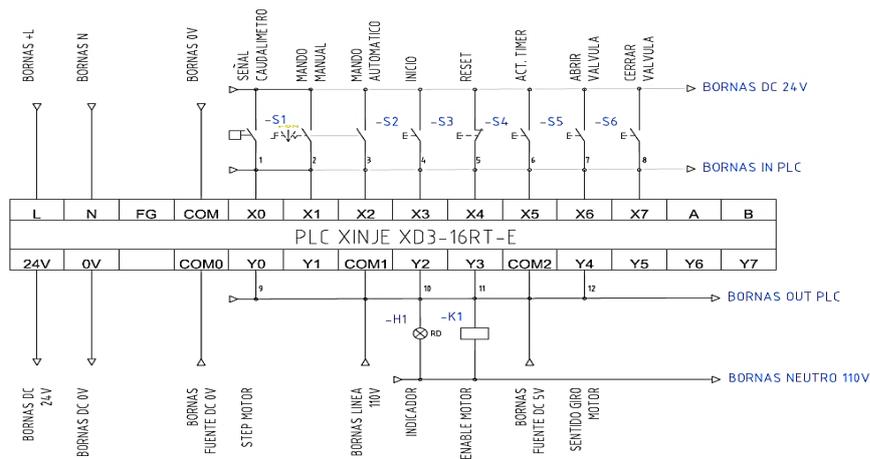


Figura 38-3 Diagrama eléctrico de la máquina Jominy

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.7 Construcción de la máquina de ensayos Jominy

Una vez conocidos los requerimientos del usuario mencionados en el despliegue de la casa de la calidad, se realizaron los cálculos respectivos para el diseño y selección de cada componente de la máquina Jominy para finalmente ser construidos y ensamblados en su totalidad. La construcción de la máquina se desarrolló bajo la orientación de un mecánico industrial quien aportó sus conocimientos teórico – prácticos en cada una de las etapas descritas a continuación:

3.7.1 Tanque Porta probeta y de Almacenamiento

Para la elaboración de los tanques se adquirió una plancha de acero inoxidable ASTM A304 de 1220 x 2440 mm y de 2mm de espesor, sobre la cual se trazaron dos círculos y dos rectángulos que fueron cortados con cizalla. Luego, empleando una máquina roladora de rodillos se dio forma al cuerpo de los tanques y mediante soldadura SMAW con electrodos E308 sean unidos a los respectivos círculos base además las perforaciones existentes en los tanques se realizaron con un taladro de banco. Finalmente, para mejorar la estética de los tanques se realizó el acabado y limpieza de los cordones de soldadura utilizando ácido muriático y pulimento.

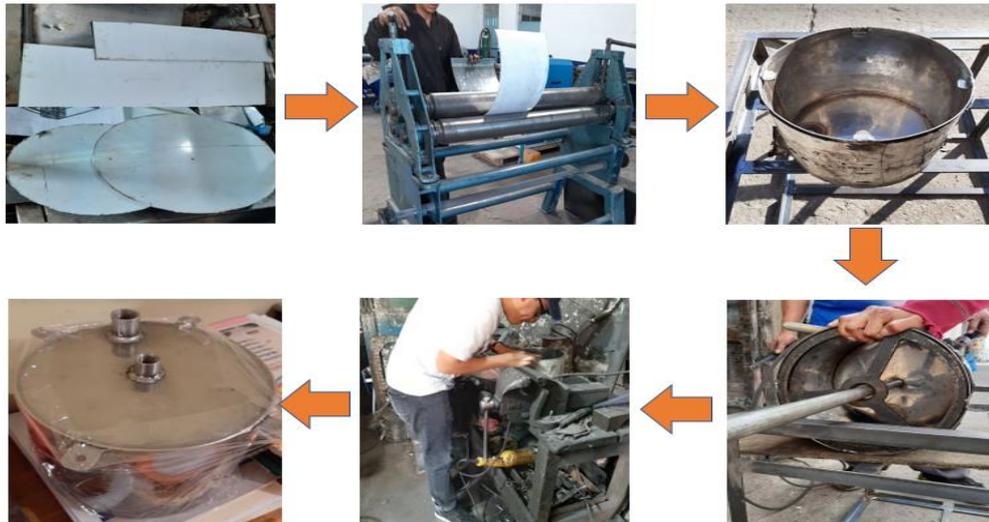


Figura 39-3 Construcción del tanque portaprobeta y de almacenamiento .

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.7.2 Estructura de la máquina

Para armar la estructura de la máquina se adquirió dos perfiles angulares comerciales de $1 \times \frac{1}{8}$ in y una platina de 25x3 mm, los mismos que fueron cortados de acuerdo con las medidas mostradas en los planos constructivos. Luego, estos fueron alineados y unidos secuencialmente mediante soldadura SMAW con electrodo E6011 para formar el armazón externo. Finalmente, con la ayuda de una amoladora se realizó el acabado y limpieza de los cordones de soldadura presentes en la estructura para posteriormente ser cubierta con pintura anticorrosiva.

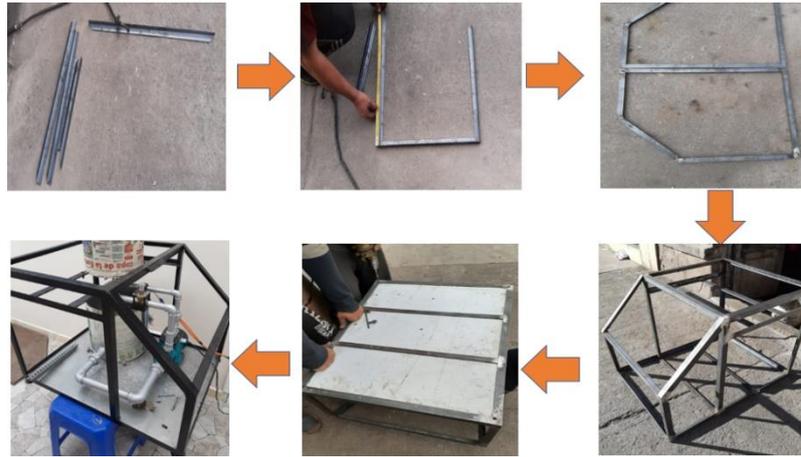


Figura 40-3 Construcción del armazón de la estructura .

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.7.3 Construcción del sistema hidráulico

La construcción del sistema hidráulico se lo realizó en dos partes: la primera fue el armado de la línea de succión de la bomba, en donde al tanque de almacenamiento se acoplaron neoplos de 1 in hasta la succión de la bomba de ½ HP y en cuyo intermedio se colocó una válvula Check. La segunda, corresponde al armado de la línea de descarga en la cual se realizó un bypass con una Te de ¾ a ½ in y en donde a sus salidas se unieron neoplos de ¾ in para drenar el fluido en exceso y de ½ in para la línea que llega al tanque portaprobeta. Además, en la línea de recirculación del bypass se acopló una válvula reguladora de caudal y un sensor de flujo en la de enfriamiento. Para construir la boquilla de enfriamiento se adquirió un eje de latón de $\varnothing = \frac{1}{2}$ in de diámetro y se mecanizó según lo indicado en el plano.



Figura 41-3 Construcción del sistema hidráulico

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.7.4 Construcción de la carcasa

Para construir la carcasa se adquirió una plancha de tol metálico de 1200x2400x0,7 mm, sobre la cual se dibujó el respectivo contorno de las caras: laterales, frontal y posterior de la estructura, de acuerdo con las dimensiones especificadas en el plano constructivo. Luego las llevamos a una dobladora de tol para su respectiva sujeción, a través de la cuales se realizaron agujeros para ubicar los tornillos; para la cubierta superior con la ayuda de una cortadora laser se cortó una lámina de acrílico de 6mm de espesor. Finalmente, para mejorar la apariencia de la carcasa metálica se fondeó, pintó y barnizó cada una de las cubiertas.

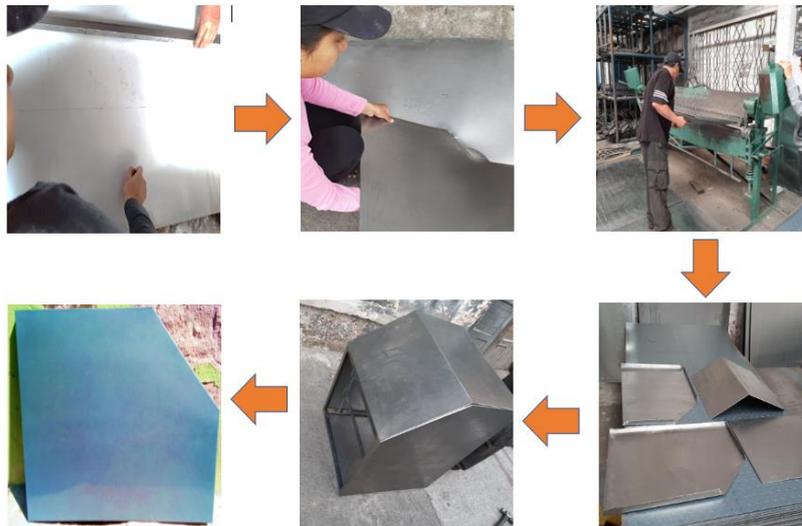


Figura 42-3 Construcción de la carcasa.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.7.5 Ensamblaje del circuito electrónico.

Para ensamblar cada uno de los componentes electrónicos de la máquina Jominy, se adquirió un gabinete de 400x400x200 mm, en donde se ubicó una canaleta ranurada en el borde y centro del gabinete para direccionar el cableado interno. Luego, se ubicó riel DIN para que soporte el contactor, las borneras, la placa de acondicionamiento de señal, el PLC, la fuente de energía y el relé de bobina.

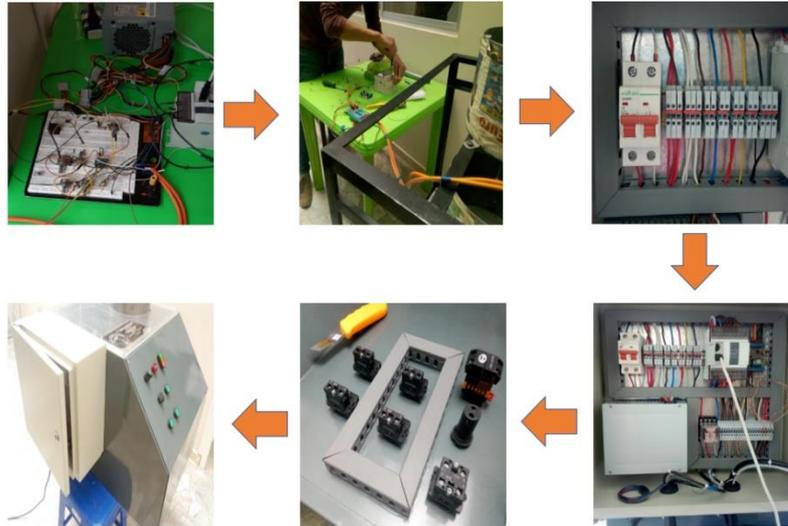


Figura 43-3 Ensamblaje del circuito electrónico.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.7.6 Ensamblaje de la válvula de control

Para el diseño del proyecto, en el mercado no se obtuvo información sobre una válvula proporcional que se ajuste a los requerimientos y dimensiones del mismo. Por lo que se construyó una; partiendo de una válvula de compuerta comercial, a la que se mecanizó su vástago con el fin de que sea adaptable a un motor eléctrico por medio de un acople flexible para permitir la apertura y cierre de la misma. En función del torque necesario para mover el mecanismo de compuerta de la válvula tanto en operación como en vacío se seleccionó un motor paso a paso NEMA 17 con el fin de tener precisión en la operación de la válvula. Al sistema válvula-motor se incluyó una estructura que proporcione sujeción y estabilidad, por medio de barras de acero, además para evitar obtener un producto pesado en su estructura se hizo uso de materiales como acrílico de 4 mm y una base realizada en PLA mediante impresión 3D.

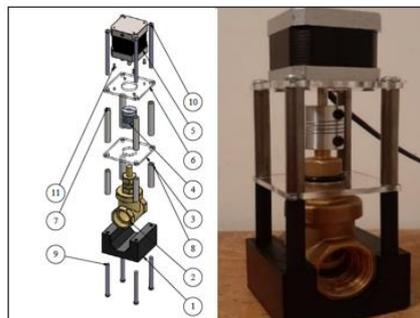


Figura 44-3 Válvula de Control.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.7.7 Ensamblaje final de la máquina de ensayos Jominy

Una vez contruidos cada uno de los sistemas que componen la máquina, se procedió a su ensamblaje final como se muestra a continuación:



Figura 45-3 Máquina de ensayos Jominy.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.8 Ficha técnica de la máquina de ensayos Jominy

Tabla 43-3: Ficha técnica de la máquina de ensayos Jominy

| | | | | |
|--|---|-------------------------------|--|---|
|  | FICHA TECNICA DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS JOMINY | | |  |
| Fecha de elaboración: 26/11/2020 | Aprobado por: Ing. Otto Balseca. Ing. Carlos Serrano | | Elaborado por: Erika Pilco Marcelo Merino | |
| Descripción: La máquina de ensayos Jominy, tiene como función enfriar una probeta Jominy bajo los parámetros establecidos en la norma ASTM A255. | | | | |
| Peso Total (kg) | Largo (m) | Ancho (m) | Altura (m) | |
| 350 | 0,75 | 0,6 | 0,55 | |
| Material - Armazón | Material – Carcasa | Material Cubierta | | |
| ASTM A-36 | Tool metálico | Acrílico | | |
| SISTEMA HIDRAULICO | | | | |
| Voltaje de alimentación | Fluido de trabajo | Temperatura de trabajo | | |
| 110 V | Agua | 20°C | | |
| Componentes | | | | |
| Características | Material | | | |

| | | | | | |
|---|----------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------------|--|
| Tanques de almacenamiento portaprobeta | de – | Acero Inoxidable AISI A304 | | | |
| Tuberías, codos, uniones universales y neoplos de 1, 3/4 y 1/2 in | | Polipropileno | | | |
| Válvula Check 1 in. | | Bronce | | | |
| Bomba PAOLO PBP50/ 1/2 HP | | Hierro Fundido | | | |
| Boquilla de enfriamiento | | Bronce | | | |
| Válvula de globo 3/4 in. | | Bronce | | | |
| SISTEMA ELECTRONICO | | | | | |
| Corriente | Voltaje – PLC | Voltaje – Motor | Voltaje – Fuente | Voltaje - Sensor de caudal | |
| Continua | 110 V | 12 V | 110 V | 5 V | |
| Componentes | | | | | |
| PLC XINJE XD3-16RE | | | | | |
| Sensor de flujo de agua 1/2 in | | | | | |
| Motor paso a paso NEMA 17 | | | | | |
| Relé tipo bornera SIEMENS | | | | | |
| Pulsadores de control e indicador sonoro | | | | | |
| Contactor de PLC | | | | | |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.9 Revisiones previas a la puesta en marcha de la máquina Jominy.

Previo a la puesta en marcha de la máquina de ensayos Jominy, hay que tomar en cuenta las siguientes instrucciones:

- Verificar que la línea de succión y la cámara de cebado de la bomba, se encuentren llenos de líquido para evitar su cavitación al momento del encendido; revisar el procedimiento respectivo en el ANEXO M.
- Revisar la integridad del toma corriente disponible en el laboratorio y el enchufe general de la máquina Jominy.
- Energizar el contactor del PLC y la fuente de poder que se encuentran en el interior del tablero eléctrico.

3.10 Calibración de la máquina Jominy previo a su funcionamiento.

Antes de iniciar con un ensayo de templabilidad, la máquina Jominy debe ser calibrada para obtener de manera automática una altura de columna de fluido de enfriamiento de 2,5 in (63,5 mm) (valor normalizado) además de mantenerla constante hasta culminar el ensayo. Con los cálculos realizados en el apartado 3.6.2.2 se determinó que para alcanzar una altura libre de fluido

de 2,5 in desde la salida de la boquilla se requieren $8,46 \frac{l}{min}$; en función de este dato se estableció como SETPOINT del sistema un caudal de $8,4 \frac{l}{min}$. Debido a que es muy complicado controlar la oscilación del flujo vertical, es necesario ubicar el valor del SETPOINT dentro de una banda con tolerancia $\pm 0,2 \frac{l}{min}$ con el fin de minimizar el margen de error, con lo cual se obtuvo un caudal máximo de $8,2 \frac{l}{min}$ y mínimo de $8,6 \frac{l}{min}$. Cabe recalcar, que siempre que el caudal medido por el sensor de flujo se encuentre dentro de la banda de tolerancia no existirán variaciones significativas en la altura libre de fluido de 2,5 in (63,5 mm). De esta forma se describe de manera teórica la calibración de la altura libre de fluido dado en el modo automático de la máquina Jominy.

El proceso de calibración de la máquina Jominy tendrá dos etapas de ajuste de la columna libre de fluido, la primera corresponde a un ajuste normal: hasta que el tiempo medido sobre o debajo del valor de consigna ($8,4 \frac{l}{min}$) llegue al 80% del mismo y otra de ajuste fino en el 20% restante del tiempo en alcanzar el SETPOINT del sistema. Ya en operación se determinó que el proceso de calibración en modo automático dura de entre 9 a 10 segundos, en los cuales los primeros 3 son de ajuste normal y el tiempo restante corresponde a un ajuste fino. Mediante medición directa con la ayuda de un flexómetro se corroboró la altura de flujo libre obtenida al final de la calibración obteniendo un valor aceptable teniendo en cuenta la oscilación de flujo.

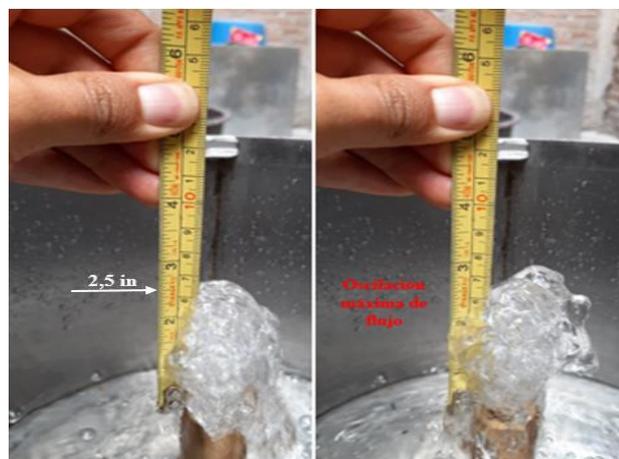


Figura 46-3 Comprobación de la calibración del flujo.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.11 Análisis de costos

A continuación, se clasifican y describen de forma detallada los costos: directos e indirectos del presente trabajo de titulación.

3.11.1 Costos directos

Este tipo de costos están relacionados directamente con el producto o servicio brindado desde la etapa de diseño hasta la obtención del producto terminado; estos costos engloban la materia prima, su procesamiento, el costo de la mano de obra, accesorios y transporte del producto terminado (School).

3.11.1.1 Costo de Materiales

Tabla 44-3: Costo de Materiales.

| COSTO MATERIA PRIMA | | | |
|--|---|---------------|-------------------|
| DESCRIPCION | DIMENSION | UNIDAD | COSTO (\$) |
| SISTEMA HIDRAULICO | | | |
| Plancha de Acero Inox - A304 | 1220x2440x2 | mm | 174,00 |
| Accesorios Hidráulicos de PP (Neplos, Codos, Tee, Uniones Universales) | $\varnothing 1$; $\varnothing \frac{3}{4}$; $\varnothing \frac{1}{2}$ | in | 45,00 |
| Válvulas (Globo, Check, Bola) | $\varnothing 1$; $\varnothing \frac{3}{4}$; $\varnothing \frac{1}{2}$ | in | 28,00 |
| Accesorios Hidráulicos de Inox (Couplings) | $\varnothing 1$; $\varnothing \frac{3}{4}$; $\varnothing \frac{1}{2}$ | in | 18,25 |
| Bomba de Agua | 1/2 | HP | 50,00 |
| Accesorios Extras | | | 13,00 |
| COSTO SISTEMA HIDRAULICO | | | 328,25 |
| SISTEMA ELECTRONICO | | | |
| Gabinete eléctrico | 40x40x20 | mm | 40,00 |
| Kit de armado de Gabinete | 25x25 | mm | 8,00 |
| Pulsadores | 22 | mm | 7,50 |
| Cables Flexible (16,18,12 AWG) | 29 | m | 12,50 |
| PLC XD3 XINJE 16RTE | | | 200,00 |
| Fuente de poder PC | | | 18,00 |
| Motor NEMA 17 | | | 18,00 |
| Breaker Riel EBAS | | | 4,26 |
| Relé encapsulado 8PIN | | | 5,66 |
| Placa Acondicionadora de señal | | | 20,00 |
| Sensor de caudal 1/2 in | | | 12,00 |
| Reles Optoacopladores Siemens | | | 50,00 |
| Borneras Riel | | | 39,20 |
| Barras Equipotenciales | | | 20,56 |
| Selectores de Posición | | | 5,50 |
| Alarma sonora | | | 2,75 |
| Accesorios extras | | | 25,00 |
| COSTO SISTEMA ELECTRONICO | | | 488,93 |
| ESTRUCTURA DE LA MÁQUINA | | | |
| Plancha de Chapa metálica | 1220x2440x0,7 | mm | 48,50 |
| Ángulos | 25x25x3 | mm | 17,00 |
| Lamina de Acrílico | 500x600x5 | mm | 20,00 |
| Kit de pintura - Carcasa | | | 42,00 |
| Accesorios Extras | | | 37,00 |

| | | | |
|--|--------------|----|----------------|
| COSTO ESTRUCTURA | | | 164,50 |
| PROBETAS y TOBERA DE ENFRIAMIENTO | | | |
| Eje de acero AISI 4340 | ∅ 30; L: 230 | mm | 8,00 |
| Eje de cobre | ∅ 1; L: 4 | in | 13,00 |
| COSTO PROBETAS | | | 21,00 |
| COSTO TOTAL - MATERIA PRIMA | | | 1002,68 |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.11.1.2 Costo de Fabricación

Tabla 45-3: Costo de Fabricación.

| COSTO DE FABRICACION | | | |
|-----------------------------------|---|-------------------|-------------------------|
| No. HORAS | ACTIVIDAD | COSTO/HORA | COSTO TOTAL (\$) |
| 2 | Corte Láser de Plancha Inox | 34,16 | 68,32 |
| 1/2 | Corte de ángulos | 0,50 | 0,25 |
| 1 | Corte Laser de Chapa metálica | 5,00 | 5,00 |
| 1/2 | Rolado de tanques | 40,00 | 20,00 |
| 1/2 | Doblado de Chapa metálica | 5,00 | 2,50 |
| 16 | Soldado de Tanques y Estructura | 10,00 | 160,00 |
| 3 | Mecanizado de la Boquilla de enfriamiento | 5,00 | 15,00 |
| 8 | Pintura de carcasa | 5,00 | 40,00 |
| 5 | Mecanizado de Probetas | 5,00 | 25,00 |
| COSTO TOTAL DE FABRICACION | | | 336,07 |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.11.1.3 Costo de Mano de Obra

Tabla 46-3: Costo de Mano de Obra

| ACTIVIDAD | COSTO (\$) |
|------------------------------------|-------------------|
| Maestro Mecánico | 250,00 |
| Ingeniero Electrónico | 300,00 |
| Maestro Gasfitero | 30,00 |
| COSTO TOTAL DE MANO DE OBRA | 580,00 |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.11.1.4 Costo Directo Total

Tabla 47-3: Costo Directo Total.

| DESCRIPCION | COSTO (USD) |
|----------------------------|--------------------|
| Costo Material | 1002,68 |
| Costo de Fabricación | 336,07 |
| Costo de Mano de obra | 580 |
| COSTO DIRECTO TOTAL | 1918,75 |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.11.2 Costos indirectos

Este tipo de costos no se relacionan directamente con el proceso productivo del elemento, pero influye en su costo final debido a que modifican el presupuesto planteado inicialmente. Estos costos abarcan el diseño, la investigación, el transporte y los insumos didácticos empleados (Nuño, 2017).

3.11.2.1 Costos de Ingeniería

Los costos de ingeniería abarcan las etapas de: planeación, investigación y diseño de la máquina de ensayos Jominy; las mismas que duraron un total de 80 horas. Se conoce también que cada hora de trabajo ingenieril cuesta \$10 dólares; por ende, el costo de ingeniería invertido en este proyecto es de \$800,00 dólares.

3.11.2.2 Costo Indirecto Total

Tabla 48-3: Costo Indirecto Total.

| DESCRIPCION | COSTO (USD) |
|------------------------------|-------------|
| Costo de Ingeniería | 800 |
| Costo de Transporte | 80 |
| Costo de Insumos | 50 |
| Costo de Experimentación | 200 |
| COSTO INDIRECTO TOTAL | 1130 |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

3.11.3 Costo total de la máquina de ensayos Jominy

Una vez realizado el análisis de costos directos e indirectos, se concluye que el costo total de la máquina de ensayos Jominy es:

Tabla 49-3: Costo Total.

| COSTO TOTAL | |
|--------------------|-----------------|
| DESCRIPCION | COSTO (USD) |
| Costo Directo | 1918,75 |
| Costo Indirecto | 1130,00 |
| COSTO TOTAL | 3.048,75 |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020.

CAPITULO IV

4. RESULTADOS

Una vez concluidas las etapas de diseño y construcción de la máquina de ensayos Jominy, se procedió a realizar las respectivas pruebas de funcionamiento para verificar que se cumpla con los requerimientos de diseño establecidos en el capítulo 3. Para esto, se realizó el ensayo Jominy en una probeta de acero AISI 4340, se contrastó su curva de templabilidad experimental con respecto de la teórica y se caracterizó el material mediante un análisis metalográfico.

4.1 Características del acero a ensayar

El acero AISI 4340, posee una excelente templabilidad y es el de mayor comercialización en la industria ecuatoriana. Se lo utiliza en la fabricación de elementos mecánicos como: barras de torsión, árboles de leva, piñones, cigüeñales, etc. sometidos a elevadas cargas y esfuerzos. Para el ensayo, se adquirió un eje AISI 4340 cuya composición química fue analizada previamente con la ayuda de un espectrómetro y de lo cual se obtuvo:

Tabla 1-4: Composición química de la probeta de suministro.

| | | | | |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| C (%) | Si (%) | Mn (%) | P (%) | S (%) |
| 0,35 | 0,633 | 1,125 | < 0,003 | < 0,0030 |
| Cr (%) | Mo (%) | Ni (%) | Cu (%) | Al (%) |
| 1,228 | 0,448 | 2,085 | 0,171 | 0,119 |
| Co (%) | Nb (%) | Ti (%) | V (%) | W (%) |
| 0,027 | <0,0050 | 0,0093 | 0,013 | 0,041 |
| B (%) | Sn (%) | Fe (%) | | |
| <0,0010 | 0,035 | 93,76 | | |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

4.2 Ensayo Jominy del acero AISI 4340

A continuación, se presenta a detalle el procedimiento que se desarrolló para la ejecución del ensayo Jominy sobre la máquina de acuerdo con la normativa ASTM A255.

Tabla 2-4: Procedimiento del ensayo Jominy realizado bajo la norma ASTM A-255

| | | |
|-------------------------|---|---|
| Obtención de la probeta | <ul style="list-style-type: none"> • Se mecanizó un eje de acero AISI 4340 según las dimensiones establecidas en la figura 18-2. (ASTM INTERNATIONAL, 2014, pp.2-3). |  |
|-------------------------|---|---|

| | | |
|---------------------------------|---|---|
| Calentamiento | <ul style="list-style-type: none"> • La probeta de acero AISI 4340 se calentó a su temperatura de austenización de 870°C (Fig. 19-2) durante 30 min, según lo indicado en la norma (ASTM INTERNATIONAL, 2014, p.2); mientras que para pruebas Jominy de producción se la calentará durante 35 min. |  |
| Enfriamiento | <ul style="list-style-type: none"> • Se trasladó la probeta desde el horno hasta el disco portaprobeta en 3 segundos. • Una vez colocada la probeta, se dio paso al flujo enfriamiento durante 10 min. |  |
| Rectificado de Planos paralelos | <ul style="list-style-type: none"> • Una vez templada la probeta, se procedió a rectificar dos caras paralelas separadas a 180° a una profundidad de 0,38mm (ASTM INTERNATIONAL, 2014, p.2) |  |
| Medición de la Dureza | <ul style="list-style-type: none"> • Finalmente, en el durómetro se calibraron las fuerzas de prueba y se tomaron las respectivas lecturas de dureza a lo largo de la probeta. |  |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

4.3 Medición de dureza Rockwell según la norma ASTM E18-15 “Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials”.

En la norma ASTM A255, brevemente se muestra información sobre el proceso de medición de dureza Rockwell; mientras que la norma *ASTM E18-15 “Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials”* indica parámetros más específicos.

TABLE 1 Rockwell Hardness Scales

| Scale Symbol | Indenter | Total Test Force, kgf | Dial Figures | Typical Applications of Scales |
|--------------|--------------------------|-----------------------|--------------|---|
| B | 1/16-in. (1.588-mm) ball | 100 | red | Copper alloys, soft steels, aluminum alloys, malleable iron, etc. |
| C | diamond | 150 | black | Steel, hard cast irons, pearlitic malleable iron, titanium, deep case hardened steel, and other materials harder than B100. |
| A | diamond | 60 | black | Cemented carbides, thin steel, and shallow case-hardened steel. |
| D | diamond | 100 | black | Thin steel and medium case hardened steel, and pearlitic malleable iron. |
| E | 1/8-in. (3.175-mm) ball | 100 | red | Cast iron, aluminum and magnesium alloys, bearing metals. |
| F | 1/16-in. (1.588-mm) ball | 60 | red | Annealed copper alloys, thin soft sheet metals. |
| G | 1/16-in. (1.588-mm) ball | 150 | red | Malleable irons, copper-nickel-zinc and cupro-nickel alloys. Upper limit G92 to avoid possible flattening of ball. |
| H | 1/8-in. (3.175-mm) ball | 60 | red | Aluminum, zinc, lead. |
| K | 1/8-in. (3.175-mm) ball | 150 | red | |
| L | 1/4-in. (6.350-mm) ball | 60 | red | |
| M | 1/4-in. (6.350-mm) ball | 100 | red | Bearing metals and other very soft or thin materials. Use smallest ball and heaviest load that does not give anvil effect. |
| P | 1/4-in. (6.350-mm) ball | 150 | red | |
| R | 1/2-in. (12.70-mm) ball | 60 | red | |
| S | 1/2-in. (12.70-mm) ball | 100 | red | |
| V | 1/2-in. (12.70-mm) ball | 150 | red | |

Figura 1-4 Parámetros de dureza Rockwell para diferentes escalas de medición.

Fuente: (ASTM INTERNATIONAL, 2016, p.4)

En vista de que se trató un acero templado y conforme la información proporcionada en la figura 1-4, para el presente trabajo de investigación se empleó la escala “C” de dureza Rockwell (ASTM INTERNATIONAL, 2016, p.4). A continuación, se muestra el procedimiento estandarizado de medición de la dureza Rockwell:

Tabla 3-4: Procedimiento de medición de dureza Rockwell definido por la ASTM E18-15.

| ETAPA | DESCRIPCIÓN |
|-----------------------------------|---|
| Preparación de la probeta | Rectificar dos caras paralelas separadas 180° a lo largo de toda la probeta y con una profundidad mínima sea de 0,015 in (0,38 mm) según lo indicado en la norma ASTM A255 (ASTM INTERNATIONAL, 2014, p.2). |
| Revisión del durómetro | Revisar y calibrar el durómetro antes de iniciar la medición, según el proceso detallado en el anexo A1.5 de la norma ASTM E18-15. |
| Revisión del laboratorio. | Controlar y verificar que la temperatura interna del laboratorio se encuentre entre (10-15) °C, además la temperatura de la probeta y el indentador. |
| Ubicación de la probeta | Colocar de forma perpendicular el indentador sobre la superficie plana de la probeta, a una velocidad menor o igual a 2,5 mm/s (ASTM INTERNATIONAL, 2016, p.6). |
| Aplicación de la carga preliminar | |

| | |
|----------------------------------|---|
| | Establecer en el durómetro, el valor de 98 N de carga preliminar para la prueba de dureza Rockwell, tomando en cuenta que su tiempo de aplicación (t_{QP}) sea entre (0,1 - 4) s (ASTM INTERNATIONAL, 2016, p.10). |
| Posicionamiento de la línea base | De forma inmediata, luego de aplicar la carga preliminar posicionar la línea base de referencia; según lo establecido por el manual de fabricante del durómetro Rockwell. |
| Aplicación de la carga total | Automáticamente, el durómetro Rockwell obtiene el valor de la carga total (1471 N) y la aplica por un tiempo (t_{QT}) entre (2 - 6)s (ASTM INTERNATIONAL, 2016, p.10). |
| Recuperación elástica | Una vez aplicada la carga final, mantener la probeta por un tiempo de recuperación elástica (t_{RE}) de (0,2 - 0,5)s (ASTM INTERNATIONAL, 2016, p.10); hasta que el material alcance su recuperación elástica y con ello determinar la profundidad real dejada por el indentador. |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Fuente: (ASTM INTERNATIONAL, 2016, p.6)

4.3.1 Medición de dureza Rockwell en la probeta templada de AISI 4340.

La medición de dureza Rockwell en la probeta Jominy se realizó bajo el proceso establecido por la norma ASTM E18-15. A continuación, se describen los parámetros empleados:

Tabla 4-4: Parámetros empleados en la medición de dureza Rockwell C

| PARÁMETRO | VALOR | UNIDAD |
|--|------------------|--------|
| Carga preliminar | 98 | N |
| Carga total | 1471 | N |
| Tipo de indentador | Cono de diamante | |
| Tiempo de aplicación de la carga preliminar (t_{QP}) | 4 | s |
| Tiempo de aplicación de la carga total (t_{QT}) | 6 | s |
| Tiempo de recuperación elástica (t_{RE}) | 0,5 | s |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020.

La medición de dureza se realizó cada $\frac{1}{16}$ in durante la primera pulgada, luego a 18, 20, 22, 24 dieciseisavos de pulgada y finalmente a 28, 32 dieciseisavos de pulgada; según lo indicado en la norma ASTM A255.

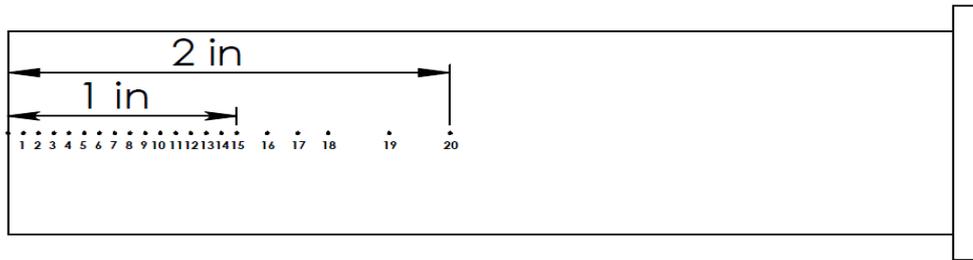


Figura 2-4 Puntos de referencia.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Los valores de dureza obtenidos fueron:

Tabla 5-4: Valores de dureza Rockwell C.

| No. Punto | Distancia (in) | Dureza Rockwell (HRC) |
|-----------|----------------|-----------------------|
| 1 | 1/16 | 60 |
| 2 | 1/8 | 55 |
| 3 | 3/16 | 54 |
| 4 | 1/4 | 54 |
| 5 | 5/16 | 53 |
| 6 | 3/8 | 53 |
| 7 | 7/16 | 53 |
| 8 | 1/2 | 52 |
| 9 | 9/16 | 49 |
| 10 | 5/8 | 49 |
| 11 | 11/16 | 48 |
| 12 | 3/4 | 48 |
| 13 | 13/16 | 48 |
| 14 | 7/8 | 48 |
| 15 | 1 | 48 |
| 16 | 9/8 | 47 |
| 17 | 5/4 | 47 |
| 18 | 3/2 | 47 |
| 19 | 7/4 | 47 |
| 20 | 2 | 47 |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

4.3.2 Dureza teórica de la martensita en función del contenido de carbono.

El valor de dureza de la martensita está estrechamente relacionado con el porcentaje de carbono que presenta el acero. Con el fin de contrastar los resultados obtenidos en el ensayo Jominy; se obtiene la dureza teórica para la martensita y la bainita en función del contenido de carbono dado por el espectrómetro para la probeta de acero AISI 4340.

Para porcentajes de carbono menores al 0.6% la dureza de la martensita se puede calcular mediante la siguiente expresión (Fosca, 2005, p.141).

$$HRC = 60 * \sqrt{\%C} + 20 \quad (29)$$

Donde:

HRC : Dureza Rockwell C

$\%C$: Porcentaje de carbono del acero

Reemplazando datos, se obtiene:

Contenido de carbono= 0,35 $\%C$

$$HRC = 60 * \sqrt{0,35} + 20$$

$$HRC = 55.5 \text{ HRC}$$

La dureza de la bainita se obtiene aplicando la ecuación de Düren:

$$HV_B = 305 CE_B + 101 \quad (30)$$

Donde:

HV_B : Dureza Vickers

CE_B : Carbono equivalente

El carbono equivalente presente en la aleación se determina mediante la siguiente expresión:

$$CE_B = C + \frac{Si}{11} + \frac{Mn}{8} + \frac{Cu}{9} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{17} + \frac{Mo}{6} + \frac{V}{3} \quad (31)$$

Reemplazando los datos mostrados en la tabla 1-4, se obtiene:

$$CE_B = 0,35 + \frac{0,633}{11} + \frac{1,125}{8} + \frac{0,171}{9} + \frac{1,228}{5} + \frac{2,085}{17} + \frac{0,448}{6} + \frac{0,013}{3}$$

$$CE_B = 1,0144$$

Por lo tanto, la dureza Vickers de la bainita es:

$$HV_B = 305 CE_B + 101$$

$$HV_B = 305 (1,0144) + 101$$

$$HV_B = 410,39 = 42 \text{ HRC}$$

En vista de que la bainita presenta una baja dureza, se estima que en el análisis micrográfico no se encontrará una microestructura 100% bainítica.

4.4 Curva de templabilidad experimental obtenida para el acero AISI 4340

Al graficar los datos de la tabla 5-4, se obtuvo la curva de templabilidad experimental para el acero AISI 4340, como se muestra a continuación:

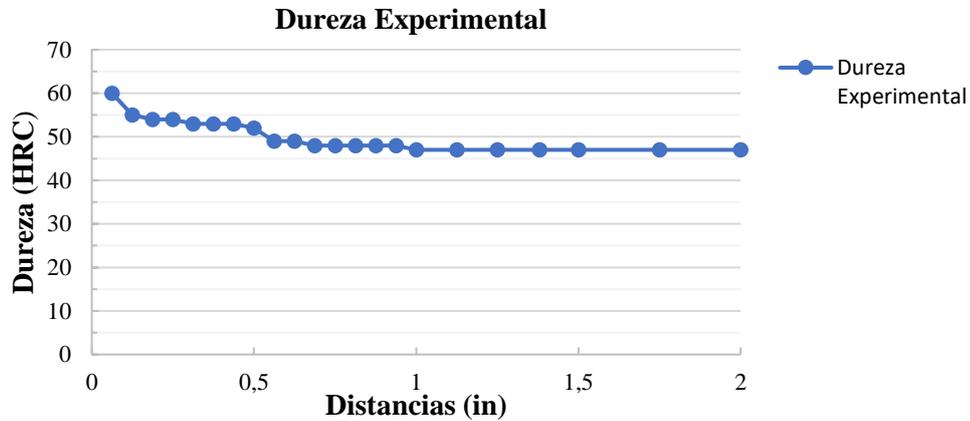


Gráfico 1-4. Curva experimental de templabilidad - AISI 4340.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

En el gráfico 1-4, se observa que la curva de dureza en la probeta de acero AISI 4340 tiene un valor máximo de 60 HRC y mínimo de 47 HRC. Además, los valores de dureza medidos en la primera pulgada presentan saltos parcialmente significativos y a medida que la distancia aumenta, estos se vuelven casi constantes.

4.5 Curva de templabilidad teórica tomada como referencia

Debido a que el proceso productivo de acero es diferente entre fabricantes sus curvas de templabilidad varían entre sí; razón por la cual en el libro de (Callister, 1995, p.344) los datos de dureza Rockwell (HRC) están representados en forma de bandas de templabilidad para el acero AISI 4340 e indican el porcentaje de martensita obtenida luego del temple. A continuación, se muestra la composición química y banda de templabilidad expuesta en bibliografía:

Tabla 6-4: Composición química del acero AISI 4340

| Acero | %C | %Ni | %Cr | %Mo |
|-------|-----|------|-----|------|
| 4340 | 0,4 | 1,85 | 0,8 | 0,25 |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Fuente: (Callister, 1995, p.344)

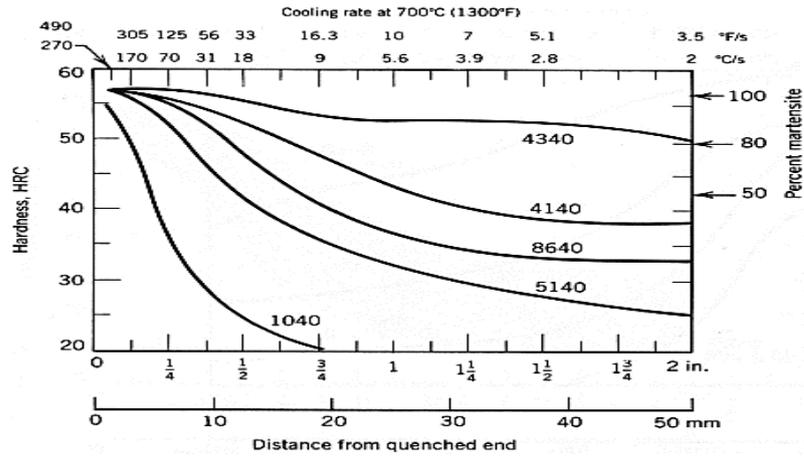


Figura 3-4 Banda de templabilidad teórica - AISI 4340.

Fuente: (Cabrera, 2017, p.31)

4.6 Contraste de las curvas de templabilidad

La presente investigación se relaciona con un diseño experimental, debido a que su validación resulta del análisis del grado de precisión con que este mide una variable (Ramon, 2017); razón por la cual para validar la funcionalidad de la máquina Jominy se verifica que la curva experimental de templabilidad obtenida se ajuste a la curva modelo definida en bibliografía para el acero AISI 4340.

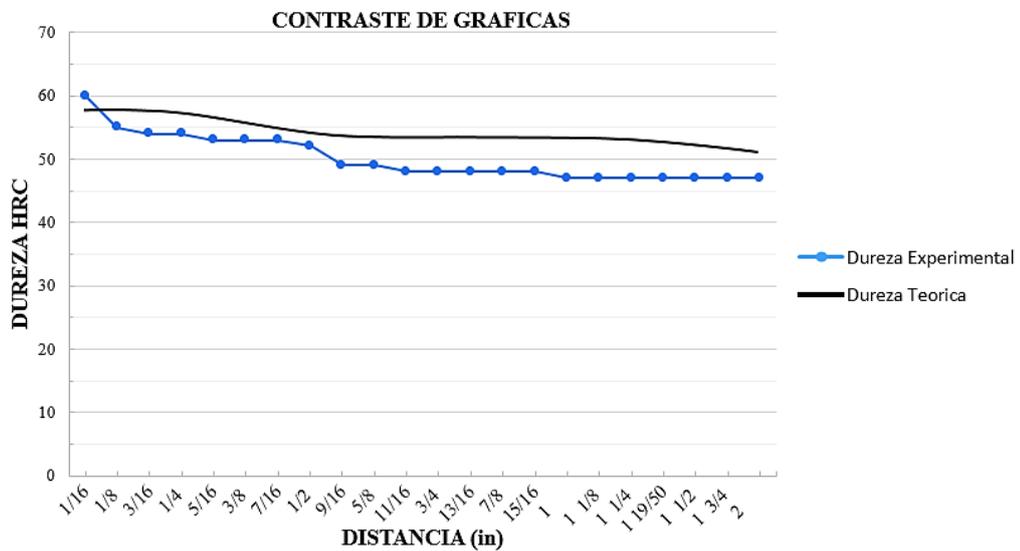


Gráfico 2-4. Contraste de curvas de templabilidad: experimental vs teórica.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Al realizar un análisis cualitativo del gráfico 2-4, se observa que la curva de templabilidad experimental obtenida bajo los parámetros establecidos por la norma ASTM A-255 para el acero AISI 4340, se ajusta y sigue la misma tendencia que la curva teórica expuesta en la figura 3-4

(Callister, 1995, p.344). Con lo cual se comprueba que el diseño de la máquina Jominy cumple con los parámetros experimentales normalizados y es apto para ser utilizado en el laboratorio de materiales de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Ahora mediante un análisis cuantitativo, se evidencia que existe una ligera variación entre los valores de dureza teóricos y experimentales. En la probeta ensayada el valor de dureza obtenido en el primer punto ubicado junto al extremo templado es 60 HRC; mientras que su valor teórico es de aproximadamente 57 HRC, y a medida que la medición se aleja de este punto los valores experimentales de dureza son menores a los teóricos. La variación de dureza en el primer punto se puede atribuir a las condiciones experimentales del ensayo, debido a que fue realizado en un sitio abierto y una vez que la probeta fue extraída del horno entró en contacto directo con la corriente de aire circundante del lugar. En la probeta ensayada a partir del segundo punto de medición, la dureza experimental es menor a la teórica. Esto se puede atribuir a la composición química del acero ensayado; debido a que posee un menor contenido de carbono (0,35 % C) con respecto al acero de bibliografía (0,4 %C) y que según lo mostrado en la figura 4-4 indica que la dureza aumenta conforme se incrementa el contenido de carbono.

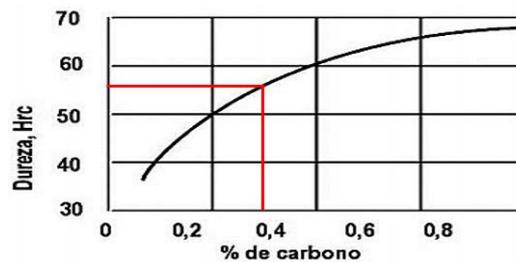


Figura 4-4 Variación de la dureza HRC en función del contenido de carbono.

Fuente: (Lefevre, 2014, p.7)

4.7 Caracterización del acero AISI 4340 frente a la templabilidad.

Para caracterizar el acero AISI 4340 frente a la templabilidad, primero se realizó una estimación teórica de las posibles microestructuras a obtener luego del temple y luego se corroboró con un análisis de micrografías reales tomadas en la probeta de suministro y templada.

4.7.1 Estimación teórica del cambio microestructural en la probeta templada de AISI 4340

Previo al análisis micrográfico, se realizó el estudio de las Curvas de Enfriamiento Continuo o CCT, con el fin de respaldar teóricamente el cambio microestructural presentado después del ensayo. Como punto de partida y haciendo uso del gráfico 1-4, para la estimación del porcentaje

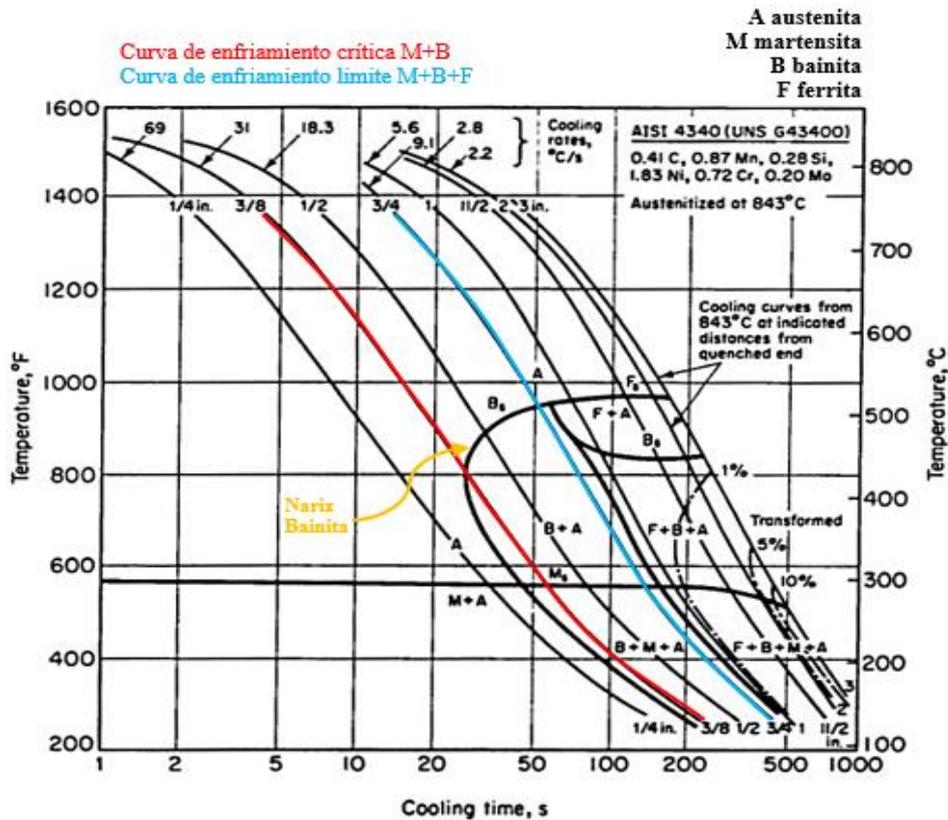


Figura 6-4 . Curvas de enfriamiento continuo (CCT) para el acero AISI 4340.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Fuente: (Steeldata, 2019)

Además, se prevé que después de una distancia de 3/8 in (9.52mm) del extremo templado se presentará martensita en menor cantidad y bainita hasta aproximadamente 3/4 in (19.05mm); y a partir de este punto se mantendrá la martensita, bainita y posiblemente aparecerá austenita retenida y ferrita como constituyentes adicionales en la microestructura de la probeta.

4.7.2 Preparación de las probetas de acero AISI 4340 para el análisis metalográfico.

La preparación de probetas fue realizada en base a normas; para conocer la secuencia de desbaste se utilizó la norma ASTM E3 “Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens” y para determinar la solución de ataque se empleó la norma ASTM E340 “Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys”. A continuación, se describe el proceso:

Tabla 7-4 Procedimiento de preparación de las probetas.

| | | |
|-----------------------|--|---|
| <p>Pulido</p> | <p>La norma ASTM E3, indica que el desbaste se debe iniciar con abrasivos de elevado número de grano (ASTM INTERNATIONAL, 2007, p.5). Por ende, el desbaste se inició:</p> <ul style="list-style-type: none">• Con abrasivo # 200 para retirar la escoria de la probeta templada, mientras que en la probeta de suministro se empleó abrasivo #1000.• Se continuó el desbaste de ambas probetas, con abrasivos de mayor grado hasta alcanzar el #2500.• Ambas probetas fueron pulidas en el disco de paño con aplicación de alúmina constante, hasta conseguir un efecto espejo.• Finalmente, ambas probetas fueron enjuagadas con alcohol. |  |
| <p>Ataque químico</p> | <p>En la norma ASMT E340, se recomienda que en aleaciones de la serie 4XXX se emplee como solución de ataque Nital al 5% (ASTM INTERNATIONAL, 1995, p.3).</p> <ul style="list-style-type: none">• Se realizó el ataque químico en ambas probetas con y se lo dejó actuar durante 5 segundos.• Se colocaron ambas probetas en el microscopio y se observaron sus micrografías a 200x. |  |

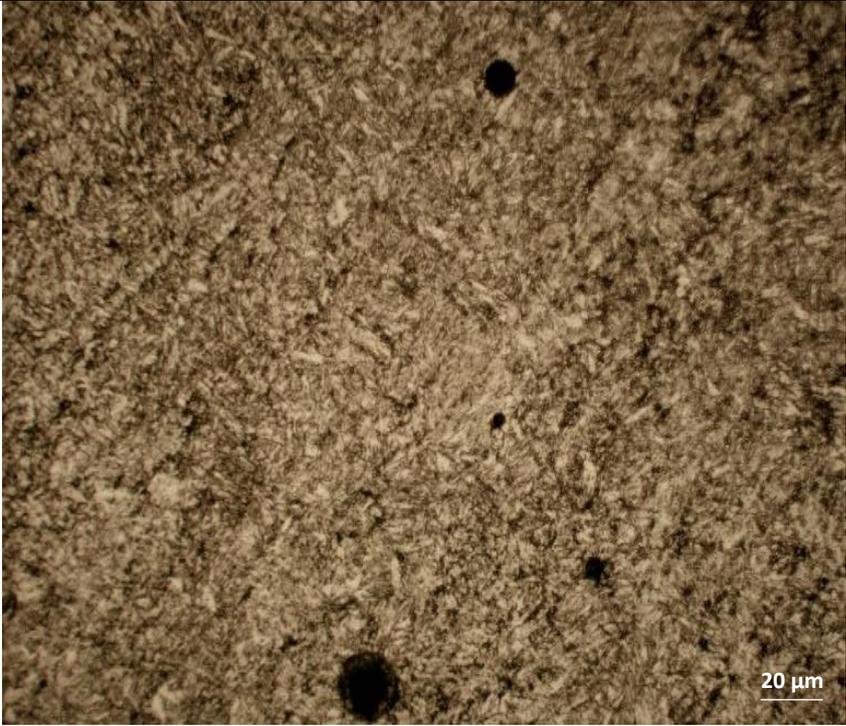
Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

4.7.3 Interpretación de micrografías obtenidas en las probetas de acero AISI 4340.

Para una mejor apreciación del cambio microestructural desarrollado en la probeta luego del tratamiento térmico de temple, se decidió tomar micrografías tanto en la probeta de suministro como en la ensayada. Por ende, debido a que la microestructura en la probeta de suministro es la

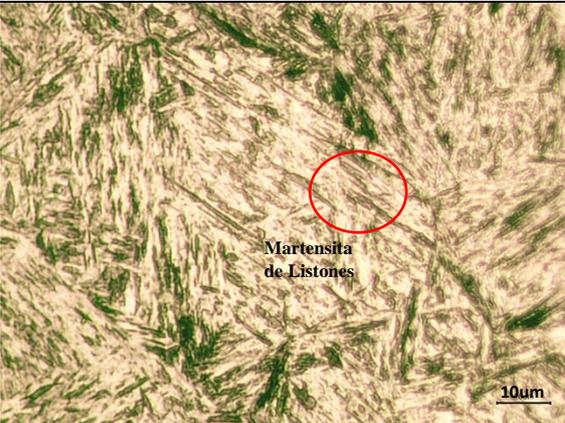
misma a lo largo de su cara de análisis se tomó una sola micrografía; mientras que en la probeta ensayada se tomaron seis. Estas fueron tomadas a: 5, 19, 38, 57, 76 y 98 mm del extremo templado. A continuación, se realiza la respectiva interpretación:

Tabla 8-4: Micrografía de la probeta de suministro acero AISI 4340.

| Micrografía tomada a 200x | |
|--|--|
|  | |
| <p>ANÁLISIS:</p> <p>El acero presenta una estructura de martensita revenida conservando en menor grado su carácter acicular (estructura de agujas propia de la martensita). El proceso de revenido es realizado para evitar la aparición de fisuras despues del temple y facilitar su posterior mecanizado. Experimentalmente se obtuvo una dureza de 42 HRC.</p> | |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Tabla 9-4: Microestructura tomada a 5 mm de su extremo templado.

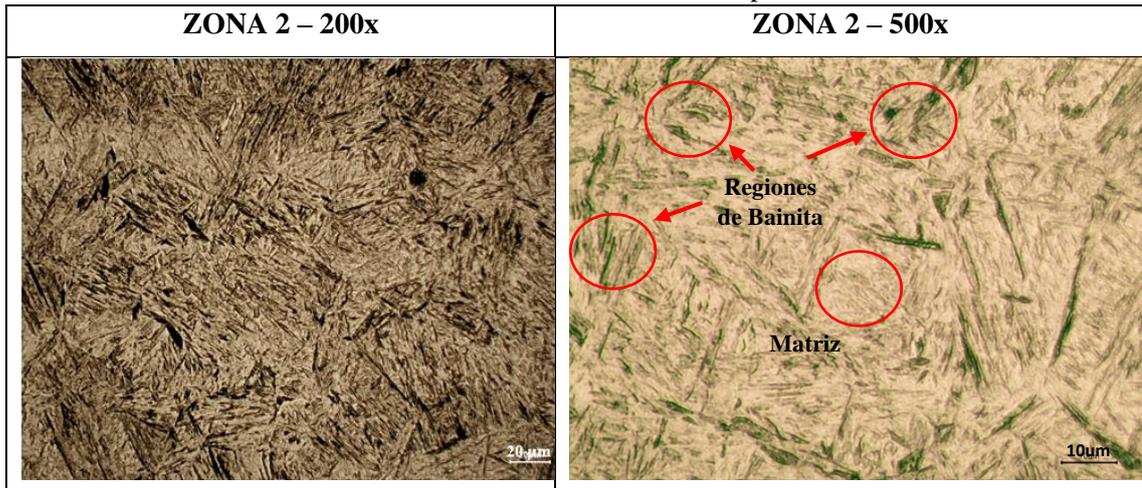
| ZONA 1 – 200x | ZONA 1 – 500x |
|---|--|
|  |  |

ANÁLISIS:

A 5 mm del extremo templado se observa una estructura 100% martensítica. Al tratarse de un acero de medio carbono (0,35 %C) y de baja aleación, la morfología de la martensita obtenida es de listones. Los listones pequeños traen un efecto significativo en el mecanismo de fortalecimiento del acero. Se presenta una estructura martensítica fina propiciada por la rápida velocidad de enfriamiento.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Tabla 10-4: Microestructura tomada a 19 mm del extremo templado

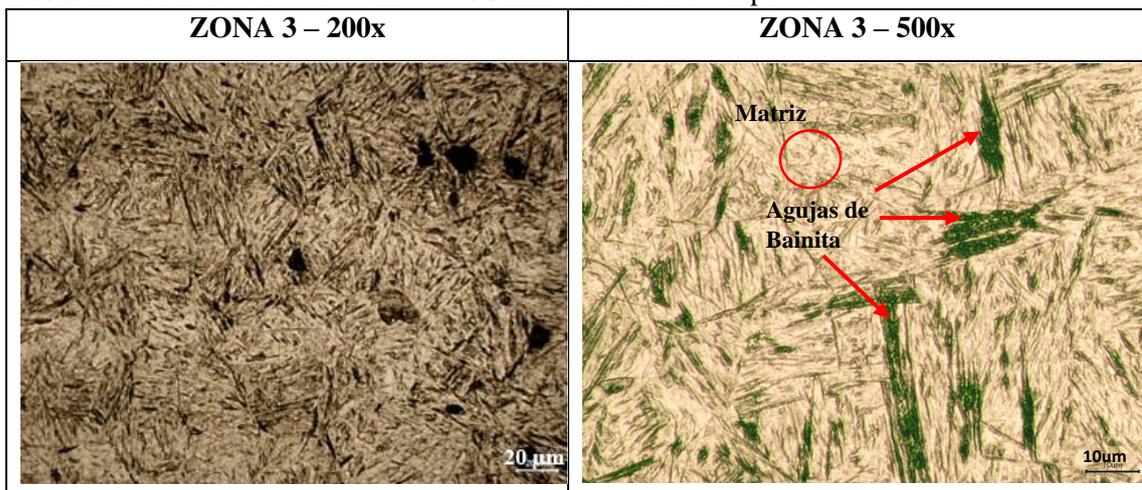


ANÁLISIS:

A 19 mm del extremo templando se observa la aparición de regiones de bainita distribuidas en una matriz martensítica, además los listones de martensita son de mayor tamaño respecto al extremo templado

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Tabla 11-4: Microestructura tomada a 38 mm del extremo templado

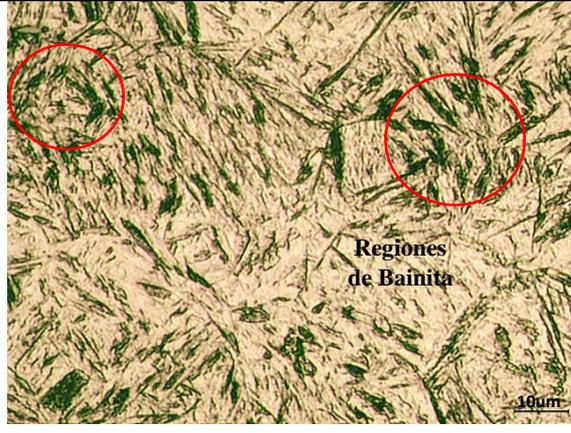


ANÁLISIS:

La estructura se mantiene similar a la Zona 2 (agujas de bainita en una matriz martensítica).

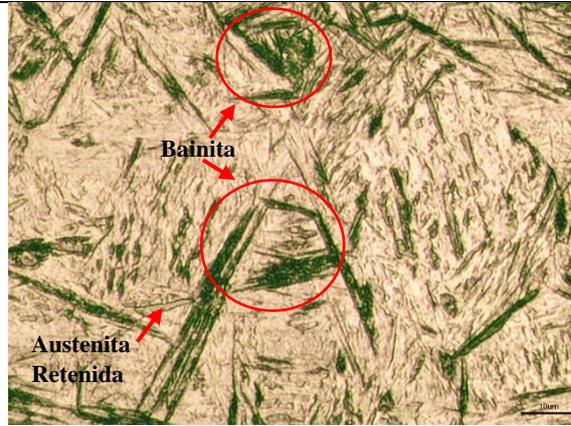
Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Tabla 12-4: Microestructura tomada a 57 mm del extremo templado

| ZONA 4 – 200x | ZONA 4 – 500x |
|---|--|
|  <p>20 μm</p> |  <p>Regiones de Bainita</p> <p>10 μm</p> |
| <p>ANÁLISIS:</p> <p>A los 57 mm del extremo templado se observa un aumento de regiones de bainita en una matriz de martensita.</p> | |

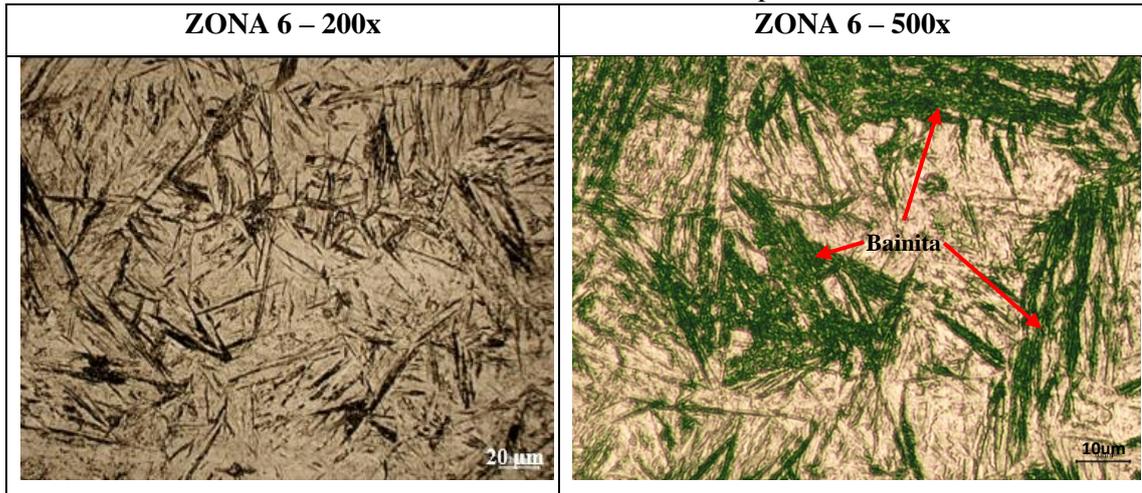
Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020

Tabla 13-4: Microestructura tomada a 76 mm del extremo templado

| ZONA 5 – 200x | ZONA 5 – 500x |
|---|--|
|  <p>20 μm</p> |  <p>Bainita</p> <p>Austenita Retenida</p> <p>10 μm</p> |
| <p>ANÁLISIS:</p> <p>A 76 mm respecto al extremo templado se presenta una mayor dispersión de las agujas de bainita en una matriz martensítica. Debido a que se cuenta con más tiempo para realizar la transformación, la estructura de la bainita se presenta más prominente y alargada. Existe también presencia de austenita retenida presentes como pequeños granos de color claro.</p> | |

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020.

Tabla 14-4: Microestructura tomada a 98 mm del extremo templado



ANÁLISIS:

A 98 mm del extremo templado, se considera la sección más alejada en donde no se observa cambios significativos en la microestructura; el mantener aun una matriz martensítica, es un buen referente de la propiedad de templabilidad para el acero 4340. Finalmente, como se puede observar a lo largo del análisis micrográfico no se encontró el desarrollo de una matriz 100% bainítica, debido a que su dureza (42 HRC) es baja con respecto a la de la martensita.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M., 2020



Figura 7-4 Zonas de análisis en la probeta templada.

Realizado por: Pilco, E., Merino, M.,

4.7 Discusión de resultados

La propuesta de diseño, construcción y automatización de una máquina que permita la realización de ensayos de templabilidad o Jominy bajo la norma ASTM A255, surgió como respuesta a una necesidad académica presente en el laboratorio de materiales de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Por ende, el desarrollo del presente proyecto técnico parte desde el despliegue de la casa de la calidad en donde se conocieron los detalles técnicos y funcionales requeridos por los usuarios; siendo los más sobresalientes: la obtención automática de una altura de columna de fluido de 2,5 in y su permanencia durante 10 min; además de una máquina de estructura compacta, de larga durabilidad y de fácil operación.

En vista de estos requerimientos, para su diseño la máquina Jominy fue dividida en tres sistemas: hidráulico, electrónico y estructural. Para el diseño del sistema hidráulico, se tomó en cuenta el apartado 6.3 de la norma ASTM A-255 en donde se establecen los valores de diámetro de salida de la boquilla de enfriamiento (0,5 in), altura de columna de fluido (2,5 in) y la distancia entre el extremo inferior de la probeta y la boquilla de enfriamiento (0,5 in); que obligatoriamente se deben cumplir para garantizar el correcto enfriamiento de la probeta. Estos parámetros y el criterio de obtener una máquina compacta sirvieron de guía para establecer mediante cálculos: las dimensiones de los tanques (almacenamiento y portaprobeta), el diámetro de las tuberías en las líneas de succión, descarga y de enfriamiento y con ello la selección de la bomba. En vista, de que el usuario definió la durabilidad de la máquina Jominy como un requisito de diseño, se decidió utilizar tuberías de polipropileno, mecanizar la boquilla de enfriamiento en latón y construir ambos tanques en acero inoxidable A304, con el fin de evitar la corrosión y el deterioro prematuro de cada uno estos elementos.

Para la automatización del proceso de enfriamiento de la probeta Jominy se estableció como variables a controlar: la altura de columna de fluido de enfriamiento (2,5 in) y el tiempo de duración del ensayo (10 min) establecidos en la norma ASTM A-255. El ciclo de trabajo definido para la máquina Jominy consiste en transportar el caudal necesario que garantice la altura de 2,5 in a la salida de la boquilla de enfriamiento. Constructivamente para alcanzar este caudal, se bifurcó mediante un bypass el flujo en la descarga de la bomba en dos tuberías, una de enfriamiento que llega al tanque portaprobeta y en cuyo trayecto tiene un sensor de flujo que lee el caudal circulante y otra de drenaje, que tiene instalada una válvula proporcional en su trayecto y cuya apertura o cierre depende del caudal medido por el sensor. Mediante cálculos se determinó que un caudal de $8,46 \frac{l}{min}$ garantiza la altura de 2,5 in de la columna de fluido, valor que fue definido como el SET POINT del sistema, pero debido a la naturaleza oscilatoria del flujo vertical se definió una tolerancia de $\pm 0,2 \frac{l}{min}$; lo que indica que si el sensor de flujo lee valores fuera de

los permisibles envía una señal al PLC que activa la apertura o cierre de la válvula proporcional instalada en la línea de drenaje hasta alcanzar un caudal dentro de la zona permisible. En vista que en el mercado no se encontró una válvula proporcional automática que cumpla con las prestaciones requeridas para el presente proyecto, se optó por adaptar un acople flexible entre el eje de una válvula de compuerta y el eje de un motor a pasos NEMA 17, el mismo que gira conforme recibe la señal de apertura o cierre emitida por el controlador.

Para el diseño de la estructura de la máquina Jominy, se tomó en cuenta el criterio de estabilidad, resistencia y compactibilidad requerida por el usuario; razón por la cual su dimensionamiento está en función de los elementos diseñados y seleccionados previamente; fue construida con ángulo de 25x25x3 mm y platina de 25x4 mm de acero ASTM A36. Para cumplir con el criterio de compactibilidad, se definió como dimensiones generales de la estructura 750x550x600 mm mientras que, para comprobar su resistencia y estabilidad frente a las cargas de diseño, se realizó una simulación estática en ANSYS. Las cargas de diseño que fueron aplicadas en la simulación, corresponden al peso de los elementos hidráulicos y electrónicos montados sobre la estructura, de lo cual se observó que producen un esfuerzo de 76,074 MPa menor al límite de fluencia (250 MPa), un factor de seguridad mínimo de 3,28 mayor a 1 que es el requerido para máquinas que no representan riesgos para el operario y finalmente se obtuvo una deformación máxima de 1,08 mm en las platinas inferiores que soportan el tanque de almacenamiento y la bomba que fue contrarrestada al ubicar una base de acero inoxidable sobre las platinas; con ello se evidenció que el diseño de estructura propuesto es resistente y segura para el operario. Para cuidar la integridad de los elementos montados en la estructura se diseñó una carcasa de tol metálico que cubre todas las caras laterales e inferior de la máquina; mientras que en la parte superior de la máquina se colocó una lámina de acrílico para facilitar la visibilidad de los elementos internos.

Una vez concluida la etapa de diseño se procedió con la construcción y ensamblaje de la máquina Jominy, y se la dotó de tres modos de operación que son: automático, manual y de regulación. El modo automático calibra de forma instantánea la columna de fluido de 2,5 in a la salida de la boquilla apenas la máquina es encendida y la mantiene hasta culminar los 10 min de ensayo requeridos por la norma ASTM A255. Además, brinda la opción de parar, reiniciar el ciclo y calibrar automáticamente el flujo, cuantas veces necesite el usuario; solo con pulsar los botones de START y RESET. En el modo manual, la calibración de la altura de flujo requerida es realizada por el propio usuario mediante la manipulación de los botones de APERTURA y CIERRE de la válvula proporcional y su tiempo de permanencia tendrá que ser controlado de forma independiente. Finalmente, el modo de regulación calibra directamente la columna de fluido requerida por la norma y brinda la posibilidad de modificarla manualmente, de igual forma el tiempo de duración del ensayo tendrá que ser controlado independientemente de forma externa.

Para verificar la funcionalidad de la máquina Jominy y el cumplimiento de los parámetros de experimentación establecidos en la norma ASTM A-255; se realizó el contraste de la curva de templabilidad teórica dada en bibliografía (Callister, 1995, p.344) con respecto de la curva experimental obtenida, la estimación teórica de la dureza para la martensita y bainita además de un análisis micrográfico luego del temple para la probeta de acero AISI 4340. La medición de la dureza Rockwell C se realizó bajo el procedimiento definido en la norma ASTM E 18-15, respetando las distancias entre indentaciones definidas en la norma ASTM A-255. Cualitativamente, se evidenció que la curva obtenida sigue la misma tendencia que la teórica; sin embargo, cuantitativamente se observó que los valores de dureza obtenidos presentan una ligera variación de los mostrados en bibliografía; esto indica que el funcionamiento de la máquina Jominy es correcto debido a que los valores experimentales no difieren significativamente de los reales. En la probeta templada, la dureza del punto más cercano al extremo templado es de 60 HRC, superior al valor bibliográfico lo cual se atribuye a las condiciones ambientales del lugar donde se realizó el ensayo debido a que fue hecho en un lugar abierto a la atmósfera en donde se tuvo presencia de corrientes de aire que posiblemente incidieron en la probeta una vez extraída del horno. Se observó también que a partir del segundo punto, los valores de dureza son menores a los teóricos, esto se atribuye a la composición química del acero debido a que la dureza aumenta proporcionalmente con el contenido de carbono y para el acero ensayado se tiene un 0,35% C, mientras que la composición dada en la teoría tiene 0,4% de carbono y esto se corroboró con el cálculo teórico de la dureza de la martensita en donde se obtuvo un valor de 55,5 HRC.

Previo al análisis micrográfico, se realizó teóricamente el análisis del cambio microestructural desarrollado por el temple en la probeta. Como resultado de esto y con sustentación bibliográfica, en principio se estimó que dentro de los primeros 3 mm de distancia al extremo templado se encontrará una estructura 100% martensítica; mientras que a los 50 mm aproximadamente la estructura será de un 75% de martensita. Durante el ensayo Jominy se habla de un enfriamiento continuo en donde se producirán diferentes microestructuras a lo largo de la probeta templada. Para realizar el análisis microestructural de la probeta ensayada se hizo uso de las curvas CCT (Diagramas de enfriamiento continuo) del acero AISI 4340, en donde se concluyó que con un enfriamiento mínimo aproximado de 31°C/s se obtendrá martensita al 100% en el extremo templado, estimando así que la probeta templada muestre martensita hasta una distancia de 3/8 in (9.52mm) del extremo templado.

El análisis micrográfico fue realizado siguiendo los procedimientos establecidos en la normativa ASTM E3-11 y E340-95 para preparación de muestras metalográficas. En principio se analizó la probeta en estado de suministro obteniendo una estructura de martensita revenida, estructura característica en este tipo de aceros comerciales obtenida para evitar la formación de fisuras

después del temple y facilitar su mecanizado. Experimentalmente se obtuvo una dureza de 42 HRC.

Como se esperaba, en la distancia más cercana al extremo templado (5 mm) se observó el 100% de martensita en su microestructura, presente en su morfología de listones. La aparición de martensita en esta forma es característica de los aceros de medio carbono y de baja aleación. Los listones pequeños tendrán un efecto significativo en el mecanismo de fortalecimiento del acero. Teóricamente, la dureza hasta los 9.52 mm de distancia al extremo templado debería mantenerse sin variación, pero experimentalmente no se logró, esto se puede atribuir a la presencia de austenita retenida en la composición final del acero, sabiendo que la austenita es el microconstituyente más frágil de los aceros.

A los 19 mm y hasta los 38 mm del extremo templado se empiezan a observar pequeñas regiones de bainita lo que corrobora el análisis previo realizado sobre las curvas CCT del acero, Al pasar la velocidad de enfriamiento crítica, la curva de enfriamiento corta la nariz bainítica propiciando que no toda la transformación sea martensítica. Pasado los 57mm y hasta los 76 mm medidos del extremo templado se empieza a observar el crecimiento en de regiones de bainita en una matriz martensítica. Pese a un aumento de 200X en el microscopio, se puede evidenciar meticulosamente la presencia de carburos (zonas blancas) dentro de las agujas de bainita, lo que permitió caracterizar de forma certera la presencia de este microconstituyente. También en este intervalo de distancia se distinguen cristales de austenita retenida; constituyente que junto con la bainita influyen directamente en reducción de la dureza del acero. Hasta los 98 mm del extremo templado el acero mantiene una matriz martensítica y se observa que no permite el desarrollo de una estructura 100% bainítica debido a que esta presenta una dureza muy baja (42 HRC), con lo cual se concluye que el acero AISI 4340 tiene una buena capacidad de templabilidad

Finalmente, con el análisis micrográfico y la obtención de la curva de templabilidad experimental similar a la teórica se dio como satisfactoria la validación de funcionamiento de la máquina Jominy. Además, mediante los cálculos electrónicos y de resistencia mecánica, se verificó que el algoritmo de control implementado y el diseño mecánico en la máquina Jominy cumplen con los requerimientos exigidos por la norma ASTM A-255: altura de columna de fluido (2,5 in) y tiempo de duración del ensayo (10 min); con lo cual se garantiza que es apta para ser utilizada en el laboratorio de materiales de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH.

5. CONCLUSIONES

- El diseño propuesto para la máquina Jominy cumple con los requerimientos técnicos presentados en el despliegue de la función calidad (QFD) debido a que se logró construir una máquina didáctica, de dimensiones compactas, de fácil operabilidad y que cumple con los parámetros establecidos por la norma ASTM A-255.
- Se requiere un caudal de $8,46 \frac{l}{min}$ a la salida de la boquilla de enfriamiento para alcanzar la altura de columna requerida de 2,5 in; en función de este caudal se desarrolló el algoritmo de control automático del sistema y se definió los valores directrices de seguridad, tolerancias de medición y velocidades de operación con los que trabajará el controlador lógico programable
- Se evidenció que la curva de templabilidad obtenida experimentalmente para el acero AISI 4340 sigue la misma tendencia que la mostrada en bibliografía, además con los resultados del análisis micrográfico se comprueba la estimación teórica del cambio microestructural realizado sobre los diagramas CCT, concluyendo así la buena templabilidad del acero.
- El acoplamiento válvula – motor propuesto para este proyecto, permitió una operación precisa del sistema para facilitar el control del caudal requerido durante el enfriamiento.
- La máquina de ensayos Jominy presentada en este trabajo está orientada hacia un entorno de laboratorio, los tres protocolos de operación permiten la versatilidad del equipo en posteriores trabajos referentes a los temas de investigación tratados en este proyecto.
- La solución eficaz de posibles inconvenientes en el funcionamiento de la maquina y el manejo adecuado el equipo serán direccionadas en función del manual de operación y mantenimiento.

6. RECOMENDACIONES

Puesto que las temperaturas de trabajo durante el ensayo de templabilidad son altas, se recomienda revisar el manual de seguridad de la máquina Jominy y tomar las precauciones pertinentes y el uso obligatorio del EPP necesario con el fin de evitar accidentes o quemaduras.

En cuanto al ensayo Jominy, se recomienda revisar las normas ASTM A255, ASTM E18, ASTM E3 y ASTM E340; previo a la ejecución del ensayo para conocer los parámetros experimentales, el proceso de preparación de la probeta y medición de dureza; con el fin de garantizar la obtención de resultados confiables.

Previo a realizar el tratamiento térmico de temple, se recomienda hacer un análisis de espectrometría en la probeta para conocer su composición química real que servirá como referencia para el contraste con datos experimentales, su análisis y discusión de resultados.

Se recomienda seguir el plan de mantenimiento de la máquina Jominy de forma continua, con el fin de preservar su estado integral y funcional.

Se recomienda controlar la temperatura y humedad del lugar en donde se realice la experimentación, la manipulación de la probeta durante el transporte hacia el disco portaprobeta y la coordinación del botón temporizador con el inicio del ensayo, para cumplir con el tiempo de experimentación requerido.

Como se puede observar, mantener la altura de la columna de fluido exactamente a 2,5 in resulta complicado debido a que el flujo por acción de la gravedad presenta oscilaciones, las mismas que influyen en el enfriamiento de la probeta. En vista de esto, para mantener un caudal constante a la salida se recomienda instalar un estabilizador de flujo en la línea de enfriamiento.

En vista de que el control del tiempo de duración del ensayo Jominy en los modos de operación: manual y de regulación se los hace con ayuda de un cronómetro, se recomienda instalar en la máquina una interfaz HMI que permita observar en tiempo real la duración del ensayo y el caudal circulante por la línea de enfriamiento con el cual se realiza la experimentación.

GLOSARIO

Análisis microestructural: corresponde a un amplio estudio sobre la composición, caracterización, y forma de las estructuras presentes en un material, con la ayuda de microscopía óptica y electrónica (Cidaut, 2021).

Bypass mecánico: corresponde a un arreglo de dos tuberías, en donde la línea principal se acopla a una línea de respaldo la misma que continúa trabajando en caso de que la primera sufra una avería (TLV, 2021).

Cargas de diseño: corresponde a las fuerzas o pesos que actúan sobre un miembro estructural, estas pueden ser dinámicas o estáticas (Sheila, 2018).

Propiedad mecánica: son propiedades propias del material relacionadas con su capacidad de transmitir y resistir fuerzas o deformaciones (Petrocuyo).

Dureza mecánica: es la resistencia que presenta un material a ser rayado (Ibérica).

EPP: los equipos de protección personal son aquellos objetos que mitigan en el operario los peligros existentes en su lugar de trabajo (Superiorglove, 2021).

Listones de martensita: corresponden a matrices de granos en forma de placas finas y paralelas, semejantes a los tallos de césped (UPV).

Norma: es un proceso estandarizado definido que establece las bases de un comportamiento aceptado por una organización (Raffino, 2020).

Probeta metálica: corresponde a una pieza cuya geometría está dada por dimensiones normalizadas y es fabricada en un material específico, dependiendo del estudio a realizar (Torre, 2018).

QFD: corresponde a una herramienta de planificación de la calidad, lo cual permite a una empresa organizar y alinear las necesidades del cliente con las características técnicas requeridas (Formento, 2012).

Sensor: es un dispositivo cuya estructura detecta acciones o estímulos externos presentes en un espacio físico y brinda una respuesta instantánea a las mismas. Miden magnitudes físicas y las convierten en señales eléctricas que son interpretadas por microcontroladores (PrototipadoLAB, 2018).

Tolerancia dimensional: es la desviación permitida que tiene una medición con respecto de un valor objetivo, se conoce también como los incrementos normalizados en una medición (Minitab, 2020).

BIBLIOGRAFIA

AAMSA. *Placa A-36* [en línea]. Mexico: AAMSA. [Consulta: 09 septiembre 2020]. Disponible en: [http://www.aamsa.com/productos/placa/placa-a-36/#:~:text=El acero A36 en barras,400 MPa \(58 ksi\).](http://www.aamsa.com/productos/placa/placa-a-36/#:~:text=El acero A36 en barras,400 MPa (58 ksi).)

ACCUWEATHER. *El tiempo ahora* [en línea]. Riobamba: AccuWeather, 2020. [Consulta: 08 mayo 2020]. Disponible en: <https://www.accuweather.com/es/ec/riobamba/122060/current-weather/122060>.

APRAIZ, Jose. *Tratamientos termicos de los aceros* [en línea]. España: Madrid, 1949. [Consulta: 03 febrero 2020]. Disponible en: <https://doku.pub/documents/tratamientos-termicos-de-los-aceros-apraiz-barreiro-el9vzn66xjqy>

ASM INTERNATIONAL. *ASM Handbook - Metallography and Microstructures Vol.9* [en línea]. 9ª ed. Ohio-EEUU: Metals Handbook, 1985. [Consulta: 12 febrero 2020]. Disponible en: <https://docs.google.com/file/d/0B3Mrzn2Z7-tSbURmRThQQnh6Skk/view>

ASM INTERNATIONAL. *ASM Handbook - Heat Treating Vol.4* [en línea]. 10ª ed. EEUU: Metals Handbook, 1991. [Consulta: 15 febrero 2020]. Disponible en: <http://www.eurospares.com/graphics/metalwork/heat%20treating/ASM%20Metals%20HandBook%20Volume%204%20-%20Heat%20Treating.pdf>

ASM INTERNATIONAL. *Introduction to Steels and Cast Irons* [en línea]. 2002. [Consulta: 21 diciembre 2020]. Disponible en: https://www.asminternational.org/documents/10192/22833166/06040G_Sample_BuyNow.pdf/0a0244d6-8b12-4303-8133-b1350b69cc8d?fbclid=IwAR1TQ04QhmLMeARxPHLBUGKxxjQQNgAJrFx6YH9PRP-rnxuG0ZJAppnghY.

ASTM A 255. *Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel.*

ASTM E18 -15. *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials.*

ASTM E3. *Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens*

ASTM E340. *Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys.*

AWEDA, J; et al. "Development and Performance Evaluation of Jominy End-Quench Apparatus". *Pacific Journal of Science and Technology*, vol.18, n° 1 (2017), pp. 5–12.

BELZUNCE, F. *Aceros y Fundiciones: estructuras, transformaciones, tratamientos termicos y aplicaciones* [en línea] (Reporte). Universidad de Oviedo, Oviedo, España. 2001. pp. 1-199. [Consulta: 15 abril 2020]. Disponible en: <https://aceroplatea.es/docs/documento138.pdf>

BIBBY, M. & PARR, G. 'The Martensitic Transformation in Pure Iron'. Journal of the Iron and Steel Institute [en línea], 1964, 202, pp. 100–104. [Consulta: 18 marzo 2020]. Disponible en: <https://studylib.es/doc/6359255/cap3-martensita---facultad-de-ingeniería>.

BORTEC. *Common Alloying Elements for Steel and their Effects* [en línea]. Alemania.[Consulta: 12 diciembre 2019]. Disponible en: <https://bortec.de/en/blog/common-alloying-elements/>.

BOYLESTAD, R. AND NASHESKY, L. *Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos* [en línea]. 10^{ma} ed. Mexico: PEARSON EDUCACION, (2009). [Consulta: 25 septiembre 2021]. Disponible en: https://unahll.files.wordpress.com/2015/05/electrc3b3nica-teorc3ada-de-circuitos-y-dispositivos-electrc3b3nicos_10ed-boylestad.pdf.

CABALLERO, Ana. *Ferrita Delta* [en línea]. Slide Player, 2018. [Consulta: 20 marzo 2020]. Disponible en: <https://slideplayer.es/slide/13336504/>.

CABALLERO, N. & FIGUEROA, G. "Medios de enfriamiento para el temple". Ingeniería Mecánica [en línea], 1999, (Cuba) 2(2), pp. 63-66. [Consulta: 22 marzo 2020]. Disponible en: <https://ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/view/395/735>

CABRERA, Sara. *ACEROS - Estructura y propiedades de aceros al carbono y de baja aleación* [en línea]. Docplayer, 2017. [Consulta: 23 marzo 2020]. Disponible en: <https://docplayer.es/54056845-Aceros-estructura-y-propiedades-de-aceros-al-carbono-y-de-baja-aleacion.html>.

CALLISTER, W. *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. 3^a ed. New York - EEUU: Reverté, 1995. (978-84-291-9560-6), pp. 251-384.

CASCO POZO, Santiago, & SIGCHA LEDESMA, Andrés. Diseño y construcción de una máquina para caracterizar la templeabilidad de los aceros aleados en probetas, destinada para los laboratorios de ingeniería mecánica de la universidad politécnica salesiana [en línea] (Trabajo de titulación) . Pregrado Universidad Politécnica Salesiana, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica, Quito - Ecuador. 2015. pp. 2-89. [Consulta: 25 de marzo 2020]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/8922>

CENGEL, Y. & CIMBALA, J. *Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones* [en línea]. México: Mc Graw Hill, 2015. [Consulta: 02 abril 2020]. Disponible en: https://www.academia.edu/35477658/Mecánica_de_Fluídos_Cengel_Cimbala_1ra_Edición.

CHANDRA, B. et al. "A review on jominy test and determination of effect of alloying elements on hardenability of steel using jominy end quench test". International Journal of Advances in Engineering & Technology [en línea], 2011, (República de la India) 1(3), pp. 65–71. [Consulta:05 abril 2020]. ISSN 2231-1963. Disponible en:

<https://pdfs.semanticscholar.org/d431/76019226b38db273c075cb771d00a77ef4e6.pdf>.

CIDAUT. *Caracterización Microestructural de Materiales* [en línea]. 2021. [Consulta: 13 enero 2021]. Disponible en: <https://www.cidaut.es/es/caracterizacion-microestructural-materiales>.

COLLINS, E. " Factors affecting the inherent hardenability of steel". *Journal of Materials Engineering and Performance* [en línea], 1979, 1, pp. 57-100. [Consulta: 07 abril 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/288807088_Factors_affecting_the_Inherent_Hardenability_of_Steel

CRANE. *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías* [en línea]. McGRAW - HILL, 1987. [Consulta: 12 mayo 2020]. Disponible en: https://www.academia.edu/6258765/Crane_Mecanica_de_fluidos.

DELATORRE, L. ET AL. 'Velocidad de enfriamiento: su determinación en problemas de templado'. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica* [en línea], 2014, (Argentina) 18(1), pp. 57-64. [Consulta: 13 mayo 2020]. Disponible en: https://www2.uned.es/ribim/volumenes/Vol18N1Abril2014/V18N1A04_de_la_Torre.pdf.

DIAZ DEL CASTILLO RODRIGUEZ, Felipe, & REYES SOLIS, Alberto. *Aceros, estructuras y tratamientos térmicos* [en línea] (Reporte). Universidad Nacional Autónoma de México, Departamento de Ingeniería, Cautitlan, Mexico. 2012. pp. 2-154. [Consulta: 15 mayo 2020]. Disponible en: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/aceros%20estructuras%20y%20tratamientos%20termicos.pdf

DIEGO, J. *Tema 6. Materiales metálicos, cerámicos y polímeros* [en línea]. OPENCOURSEWARE, 2008. [Consulta: 13 mayo 2020]. Disponible en: http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/quimica-de-los-materiales/Material-de-clase/tema-6.materiales-metalicos-ceramicos-y-polimeros-i/skinless_view.

DIPAC. *Ejes - acero 705* [en línea]. Dipac, 2016. [Consulta: 15 agosto 2020]. Disponible en: [http://www.dipacmanta.com/aisi-4340#:~:text=Norma%3A AISI 4340 \(705\),a la fragilidad del revenido](http://www.dipacmanta.com/aisi-4340#:~:text=Norma%3A AISI 4340 (705),a la fragilidad del revenido).

DIPAC. *Planchas de acero inoxidable* [en línea]. Dipac, 2016. [Consulta: 13 mayo 2020]. Disponible en: <http://www.dipacmanta.com/acero-inoxidable/planchas-inoxidables>.

DONOSO, E. *Diagrama de fases* [en línea]. U - Cursos. [Consulta: 18 mayo 2020]. Disponible en: https://www.ucursos.cl/ingenieria/2008/1/ID32A/1/material_docente/bajar%3Fid_material%3D

ELECTROCONTROL. *PLC XINJE XD3-16R-E, PLC-Xinje-XD3* [en línea]. Cuenca: Electrocontrol, 2018. [Consulta: 28 mayo 2020]. Disponible en: <http://www.electrocontrol.com.ec/producto/plc-xinje-xd3-16r-e/>.

FOSCA, C. *Introduccion a la metalurgia de la soldadura* [en línea]. 5ª ed. Lima - Perú: Grambs, 2005. [Consulta: 15 diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-tecnologica-de-chile/tecnologia-de-materiales/otros/introduccion-metalurgia-de-la-soldadura/8424766/view>

FORMENTO, H. *¿Que es el QFD?* [en línea]. 2012. [Consulta: 13 enero 2021]. Disponible en: <http://mejoracontinuatotal.blogspot.com/2012/05/que-es-el-qfd.html>.

FRADE, R. *Los aceros* [en línea]. Wordpress, 2014. [Consulta: 06 mayo 2020]. Disponible en: [https://fradeblogs.wordpress.com/2014/02/01/los-aceros/\(2014\)](https://fradeblogs.wordpress.com/2014/02/01/los-aceros/(2014))

GARCÍA CABALLERO, Francisca. Modelización de las transformaciones de fase en calentamiento continuo de aceros con microestructura inicial de ferrita, perlita y ferrita-perlita [en línea] (Tesis doctoral). (Doctorado) Universidad Complutense de Madrid, Madrid. (1999). pp. 7-116. [Consulta: 21 abril 2020]. Disponible en: <https://eprints.ucm.es/3274/1/T23033.pdf>

GARCIA, G. " Una teoría general de análisis en el diseño de elementos de máquinas". Ingeniería e Investigación [en línea], 1985, (Colombia) 3(4), pp. 31–42. [Consulta: 12 junio 2020]. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ingainv/article/view/19532/20557>

GOMEZ, V. *Templabilidad - Ensayo Jominy* [en línea]. Tucuman, Facultad Regional Tucuman. [Consulta: 12 octubre 2020]. Disponible en: <http://www.frt.utn.edu.ar/tecnoweb/imagenes/file/mecanica/Ensayo%20de%20Jominy.pdf>

GONZALES. *Diagrama de fases de equilibrio hierro-carbono* [en línea]. researchgate, 2008. [Consulta: 15 abril 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Iron-Carbon-Equilibrium-Phase-Diagram-Gonzalez-2008_fig1_256454155

GUEMES, A. & MARTIN, N. *Ciencia de materiales para ingenieros* [en línea]. Madrid - España: PEARSON EDUCACION.S.A, 2012. [Consulta: 5 agosto 2020]. Disponible: https://www.academia.edu/39486152/Ciencia_de_materiales_para_ingenieros.

HERNANDEZ, R. *Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB* [en línea]. México: PEARSON EDUCACION, 2010. [Consulta: 10 Abril 2020]. Disponible en: [Introducción_a_los_sistemas_de_control_Conceptos_aplicaciones_y_simulación_con_MATLAB_Ricardo_Hernández_Gaviño](#).

IBÉRICA, G. I. *Dureza* [en línea]. [Consulta. 13 enero 2021]. Disponible en: <http://www.gisiberica.com/durometros/dureza.htm>.

INCO. *Isothermal Transformation Diagrams of Nickel Alloys Steels* [en línea]. New Jersey - EE.UU: Internacional Nickel INC. [Consulta: 30 noviembre 2020]. Disponible en: https://nickelinstitute.org/media/1711/isothermaltransformationdiagramsofnickelalloysteels_389_.pdf

INFAIMON. *Coeficiente de seguridad: toda una filosofía de diseño, Coeficiente de Seguridad* [en línea]. INFAIMON, 2018. [Consulta: 9 septiembre 2020]. Disponible en: <https://blog.infaimon.com/coeficiente-de-seguridad-filosofia-diseno/>

INGENIERÍA MECAFENIX. *¿Que es un Durómetro y para que sirve?* [en línea]. Ingeniería Mecafenix, 2018. [Consulta: 18 octubre 2020]. Disponible en: <https://www.ingmecafenix.com/medicion/durometro/>

KUMAR, R. *¿What is the basic difference in micro-structure between tempered and untempered martensite?* [en línea]. Quora, 2016. [Consulta: 05 diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.quora.com/What-is-the-basic-difference-in-micro-structure-between-tempered-and-unttempered-martensite>

LEFEVRE, R. *Tratamientos Termicos* [en línea]. España: Recursos Pedagogicos, 2014. [Consulta: 19 diciembre 2020]. Disponible en: <https://rephip.unr.edu.ar/bitstream/handle/2133/3285/5504-14%20Tratamientos%20t%c3%a9rmicos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

MALDONADO FLORES, Jose Luis. *Aceros y sus Aplicaciones* [en línea] (Trabajo de titulacion). (Maestria). Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Escuela de Posgrado. Nuevo León, México. 1996. pp. 1- 127. [Consulta: 12 enero 2020]. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/421/1/1020118272.PDF>

MATERIALS SCIENCE APPS LAB. " Phase Transformations - Hardenability (Jominy End-Quench)". Reporte [en línea]. [Consulta: 19 diciembre 2020]. Disponible en: [http://edge.rit.edu/edge/P16007/public/Detailed Design Documents/Schematics/MECE-306 Mat Sci Lab- Phase Transforms- Hardenability- Presentation- 2151.pdf](http://edge.rit.edu/edge/P16007/public/Detailed%20Design%20Documents/Schematics/MECE-306%20Mat%20Sci%20Lab-Phase%20Transforms-Hardenability-Presentation-2151.pdf).

MEJIA CADENA, Jorge Armando. *Diseño y construcción de una máquina de ensayo jominy de templabilidad para la carrera de ingeniería en mecatrónica de la universidad técnica del norte* [en línea] (Trabajo de titulacion). (Ingeniero). Universidad Tecnica del Norte, Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas. Ibarra - Ecuador. (2016). pp. 1 - 92. [Consulta: 22 mmayo 2020]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/5359>

MINITAB, S. *¿Qué es la tolerancia del sistema de medición (resolución del sistema de medición)?* [en línea]. 2020. [Consulta: 13 enero 2021]. Disponible en: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/measurement-system-analysis/supporting-topics/basics/what-is-gage-tolerance-gage-resolution/>.

MORALES, R. & RAMIREZ, R. *Sistemas de control moderno volumen I: Sistemas de Tiempo Continuo* [en línea]. Monterrey - Mexico: EDITORIAL DIGITAL, 2013. [Consulta: 19 enero 2020]. Disponible en: <http://prod77ms.itesm.mx/podcast/EDTM/ID295.pdf>

MOTT, R. *Mecánica de fluidos* [en línea]. 4ª ed. Mexico: PEARSON EDUCACIÓN, 2006. [Consulta: 12 abril 2020]. Disponible en: <https://deymerg.files.wordpress.com/2013/07/mecanica-fluidos-mott.pdf>

MUHAMMAD, H. et al. "Design and Fabrication of Jominy End-Quench Testing Machine: Hardenability Evaluation of AISI-8620 Case- Hardening Steel". *Journal of Testing and Evaluation* [en línea], 2018, (Pakistan) 46(1), pp. 1-56. [Consulta: 21 enero 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/322185169_Design_and_Fabrication_of_Jominy_End-Quench_Testing_Machine_Hardenability_Evaluation_of_AISI-8620_Case-Hardening_Steel

NARANJO SORIANO, Esteban. Optimización de proceso en la producción de piezas mediante forja de precisión [en línea]. (Proyecto de Investigación). Universitat de Barcelona, Barcelona - España. [Consulta: 28 octubre 2020]. Disponible en: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/85818/Memoria_de_PFC_Daniel_Rodriguez_Bardaji_03.pdf?sequence=1&isAllowed=y

NUÑO, P. *Costes indirectos* [en línea]. *Emprende Pyme*, 2017. [Consulta: 15 noviembre 2020]. Disponible en: <https://www.emprendepyme.net/costes-indirectos.html>

OGATA, K. *Ingeniería de control moderna* [en línea]. 5ª ed. Madrid - España: PEARSON EDUCACION, 2010. [Consulta: 12 marzo 2020]. Disponible en: https://www.u-cursos.cl/usuario/78303fe04da8e4eb340eae09f1840b2/mi_blog/r/Ingenieria_de_Control_Mode_rna_Ogata_5a_ed.pdf

OPOSINET. *Sistemas de control, elementos componentes, variables* [en línea]. [Consulta: 13 marzo 2020]. Disponible en: <https://www.oposinet.com/temario-de-tecnologia/temario-4-tecnologia/tema-65b-sistemas-de-control-elementos-componentes-variables/#:~:text=Un%20esquema%20general%20de%20un,actuador%20y%20transductores%20o%20captadores.>

OTAI. *Acero AISI 4340 | 36CrNiMo4 | 1,6511 | EN24 | 817M40 | SNCM439* [en línea]. China.

[Consulta: 26 marzo 2020]. Disponible en: <https://www.astmsteel.com/product/4340-steel-aisi/>.

PEÑAFIEL PILCO, Carlos Alberto. Diseño e implementación de un manual de operación y mantenimiento para los laboratorios de resistencia de materiales, metalografía, ensayos no destructivos y tratamientos térmicos de la facultad de mecánica [en línea] (Trabajo de Titulación). (Ingeniero). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Escuela de Ingeniería Mecánica. Riobamba - Ecuador. 2014. pp. 1-2. [Consulta: 20 noviembre 2020]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/3146/1/15T00559.pdf>

PÉREZ, Mario., et al. Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo [en línea] (Proyecto de Investigación). Universidad Nacional de San Juan, Facultad de Ingeniería. Argentina. [Consulta: 1 abril 2020]. Disponible en: <http://dea.unsj.edu.ar/control1/apuntes/unidad1y2.pdf>

PETROCUYO. *Propiedades mecánicas.* [en línea]. [Consulta: 13 enero 2021]. Disponible en: <http://www.petrocuyo.com/es/tecnologia/el-polipropileno/propiedades-mecanicas>.

PLASTIGAMA WAVIN. *Línea Dorada* [en línea]. Ecuador: plastigamawavin, 2019. [Consulta: 2 junio 2020]. Disponible en: https://plastigamawavin.com/wp-content/uploads/2020/02/HT_Linea_Dorada_2019_out.pdf

POZNAYKA. *Компоненты и фазы в системе железо - углерод* [en línea]. HeatTreatment. 2017. [Consulta: 12 marzo 2020]. Disponible en: <https://heattreatment.ru/diagramma-sostoyaniya-zhelezo>

%B5%D0%BC%D0%B5%20%22%D0%B6%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%B7%D0%BE%2D%D1%83%D0%B3%D0%BB%D0%B5%D1%80%D0%BE%D0%B4%22,%2C%20%D0%B0%D1%83%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%82%2C%20%D1%86%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B8%D1%82%2C%20%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%B8%D1%82.

PROMESA. *Bomba PAOLO - pbp50 1/2 hp* [en línea]. Ecuador: promesa, 2020. [Consulta: 8 junio 2020]. Disponible en: <https://www.promesa.com.ec/producto/bomba-paolo-pbp50-1-2-hp>

PROTOTIPADOLAB. *¿Qué es un sensor?* [en línea]. 2018. [Consulta: 13 enero 2021]. Disponible en: <http://paolaguimerans.com/openeart/2018/05/05/que-son-los-sensores/>.

PROYECTO BESSEMER. *Sistemas Automáticos* [en línea]. 2013. [Consulta: 22 marzo 2020]. Disponible en: <https://docplayer.es/10287326-Tecnologias-tecnologias-guadiel-guadiel-eso-eso-primer-trimestre-primer-trimestre-www-edebecom-tecnologias-proyecto-bessemer-primer-trimestre.html>

QUANSHUN, L. "A New XRD Method to Quantify Plate and Lath Martensites of Hardened

Medium-Carbon Steel". *Journal of Materials Engineering and Performance* [en línea], 2016, 25(6), pp. 2016-2171. [Consulta: 12 marzo 2020]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-016-2053-0>

RAFFINO, M. *Concepto de NORMA* [en línea]. 2020. [Consulta. 13 enero 2021]. Disponible en: <https://concepto.de/que-es-norma/>.

RAMON, G. *Diseños experimentales* [en línea]. Colombia. [Consulta: 22 marzo 2020]. Disponible en: http://viref.udea.edu.co/contenido/menu_alterno/apuntes/ac37-diseno_experiment.pdf.

RIVERA PESANTEZ, Martin. & VEGA SALGADO, Daniel. *Diseño y Construcción de un Banco de pruebas Jominy en el Laboratorio de Metalurgia y Tratamientos Térmicos en la Universidad del Azuay* [en línea] (Trabajo de Titulación). (Ingeniero). Universidad del Azuay, Cuenca - Ecuador. 2009. pp. 2-40. [Consulta: 22 noviembre 2019]. Disponible en: <http://dSPACE.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/6650/1/07549.pdf>

RUBIO, A. *Actuadores eléctricos y sus funciones principales, Instrumentación Digital* [en línea]. 2019. [Consulta: 27 junio 2019]. Disponible en: <https://www.instrumentaciondigital.es/actuadores-electricos-y-sus-funciones/#:~:text=Los%20actuadores%20son%20dispositivos%20que,cabo%20determinado%20movimiento%20u%20acci%C3%B3n.&text=As%C3%AD%20pues%2C%20un%20actuador%20en,activa%20a%20ra%C3%ADz%20de%20ella>.

SCHOOL, O. B. *Costos directos e indirectos de un proyecto* [en línea]. OBS, 2020. [Consulta: 11 octubre 2020]. Disponible en: <https://obsbusiness.school/es/blog-project-management/viabilidad-de-un-proyecto/costos-directos-e-indirectos-de-un-proyecto#:~:text=Un%20ejemplo%20de%20costes%20directos,el%20desarrollo%20de%20los%20proyectos.&text=Tambi%C3%A9n%20los%20que%20se%20relacionan,directa%20son%20considerados%20c>

SHACKELFORD, J. F. *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. 6ª ed. Madrid: PEARSON EDUCACION S.A., 2005. ISBN: 978-84-205-4451-9, pp.293-444.

SHEILA. *Cargas, esfuerzos y deformación - Diseño mecánico* [en línea]. 2018. [Consulta. 13 enero 2021]. Disponible en: <https://civilgeeks.com/2018/08/22/cargas-esfuerzos-y-deformacion-diseno-mecanico/>.

SITES.GOOGLE. *Que es un sistema de control, Sistemas automáticos* [en línea]. [Consulta: 08 mayo 2020]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/sistemasautomaticos/que-es-un-sistema-de-control>

SITES GOOGLE. *Diseño Conceptual* [en línea]. [Consulta: 15 enero 2020]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/ingenieriadeldisenocas>

SMITH, W. *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales* [en línea]. 3ªed. Madrid - España: McGRAW - HILL/ INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S.A., 1998. ISBN: 0-07-059241-1, pp. 289-483.

STEELDATA. *Acero AISI 4340* [en línea]. [Consulta: 23 diciembre 2020]. Disponible en: <http://www.steeldata.info/std/demo/data/343.html>

SUPERIORGLOVE. *La guía completa del equipo de protección personal (EPP)* [en línea]. 2021. [Consulta. 13 enero 2021]. Disponible en: [https://www.superiorglove.com/es/complete-guide-to-ppe#:~:text=El equipo de protección personal \(EPP\) incluye cualquier cosa que,Guantes.](https://www.superiorglove.com/es/complete-guide-to-ppe#:~:text=El equipo de protección personal (EPP) incluye cualquier cosa que,Guantes.)

TARIN, Pascual. Transformaciones estructurales de los aceros racionales para alta resistencia (Trabajo de titulación)(Doctorado). Universidad Politécnica de Madrid. España (Madrid). 1973. [Consulta: 01 abril 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/39425475_Transformaciones_estructurales_de_los_aceros_racionales_para_alta_resistencia

TIERNO, A. 'Constituyentes de los aceros' [en línea]. Slideshare, 2009. [Consulta: 15 febrero 2020]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/auladetecnologias/constituyentes-de-los-aceros-2481664>

TLV. *Válvulas de Bypass* [en línea]. 2021. [Consulta. 13 enero 2021]. Disponible en: https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/bypass-valves.html#toc_2.

TORIBIO, J; et al. "Influence of Microstructure on Strength and Ductility in Fully Pearlitic Steels". *MDPI* [en línea], 2016, (España) 6(12), pp. 1–12. [Consulta: 19 abril 2020]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2075-4701/6/12/318>.

TORRE, F. *Probetas - Ataques* [en línea]. 2018. [Consulta. 13 enero 2021]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/laboratorioensmateriales/probetas---ataques>.

TORRES, E; et al., "Aspectos Generales acerca de la Transformación Martensítica". *Tecnológicas* [en línea], 2011, (Colombia), 1(31), pp. 151-179. [Consulta: 1 diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3442/344234334009.pdf>

TOTTEN, G. *Steel Heat Treatment Handbook* [en línea]. 2ªed. Taylor & Francis Group, 2007. [Consulta: 3 diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.taylorfrancis.com/books/steel-heat-treatment-george-totten/10.1201/NOF0849384523>

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA. *Ensayos de dureza* [en línea]. [Consulta: 28 noviembre 2020]. disponible en: https://www.academia.edu/17249417/Apunte_Dureza

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA. *Diagrama Hierro Carbono* [en línea]. Pereira: Metalografía, 2013. [Consulta: 19 enero 2020]. Disponible en: <https://blog.utp.edu.co/metalografia/?s=Fase+Cementita>

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL. *Iv. Principios Generales de los Tratamientos Térmicos de los Aceros* [en línea]. UTN. [Consulta: 11 abril 2020]. Disponible en: https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/4-PRINCIPIOS_GENERALES_DE_LOS_TT_v2.pdf

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL. *VI. Transformaciones de la austenita fuera del equilibrio* [en línea]. UTN. [Consulta: 11 mayo 2020]. Disponible en: https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/6-_Transformaciones_de_la_austenita_fuera_del_equilibrio_v2.pdf

UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA. *Velocidad de enfriamiento mínima para alcanzar la transformación martensítica* [en línea]. UNV, 2011. [Consulta: 9 diciembre 2020]. Disponible en: https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm07/pfcm7_4_6.html

UNLP. *Capítulo 8 : Dureza y templabilidad en aceros* [en línea]. [Consulta: 9 diciembre 2020]. Disponible en: <https://studylib.es/doc/5111228/cap%C3%ADtulo-8--dureza-y-templabilidad-en-aceros-dureza-y-con...>

UPV. *4.2 MICROGRAFÍAS TÍPICAS DE LA MARTENSITA* [en línea]. [Consulta. 13 enero 2021]. Disponible en: https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm07/pfcm7_4_2.html#:~:text=En microscopía electrónica de transmisión,una gran densidad de dislocaciones.

VANDER, G. *Microstructure of Ferrous Alloys* [en línea]. Canada: VAC AERO, 2011. [Consulta: 3 diciembre 2020]. Disponible en: <https://vacaero.com/information-resources/metallography-with-george-vander-voort/894-microstructure-of-ferrous-alloys.html>

VELA, G. *El acero, recurso estrategico para el desarrollo* [en línea]. Peru: ASDOPEN. [Consulta: 9 febrero 2020]. Disponible en: <http://asdopen.unmsm.edu.pe/files/Articulo2-4.pdf>

YIN, J; et al. "Second Stage of Upper Bainite in a 0.3 Mass Pct C Steel". *Metallurgical and Materials Transactions* [en línea], 2016, 48-A, pp. 1444-1458. [Consulta: 19 abril 2020]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-016-3902-z>