

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA**



**TESIS**

**INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y TIEMPO DEL  
TRATAMIENTO TÉRMICO DE TEMPLE Y REVENIDO EN LA  
RESISTENCIA A LA DUREZA DEL ACERO HARDOX 450  
(INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)**

**PRESENTADO POR:**

Br. RUBEN QUILLAHUAMAN CUSICUNA

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO METALÚRGICO**

**ASESOR:**

MGT. Sc. HONORATO SÁNCHEZ QUISPE

**CUSCO – PERÚ**

**2024**

# INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, Asesor del trabajo de investigación/tesis titulada: Influencia de la Temperatura y Tiempo del Tratamiento Térmico de Temple y Revenido en la Resistencia a la Dureza del Acero Hardox 450 (Investigación Tecnológica)

presentado por: Ruben Quillahuaman Cusi con DNI Nro.: 23835340 presentado por: \_\_\_\_\_ con DNI Nro.: \_\_\_\_\_ para optar el título profesional/grado académico de Ingeniero Metalúrgico

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 4 %.

## Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 25 de Agosto de 2024

  
Firma  
Post firma: Sandy Quispe  
Nro. de DNI: 23903892  
ORCID del Asesor: 0000-0002-4267-2636

### Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 272591375707832

NOMBRE DEL TRABAJO

**INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y TIEMPO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE TACÓN Y REVENIDO EN LA RESISTENCIA**

AUTOR

**RUBÉN QUILLAHUAMAN CUSICUNA**

RECUENTO DE PALABRAS

**29610 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**170852 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**145 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**4.4MB**

FECHA DE ENTREGA

**Aug 25, 2024 6:18 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Aug 25, 2024 6:19 PM GMT-5**

### ● 4% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 4% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 1% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

### ● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Bloques de texto excluidos manualmente
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)

## **PRESENTACIÓN**

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Señores Docentes, Miembros de Jurado:

En cumplimiento al Reglamento de Grados y Títulos vigente en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, y con el objeto de optar al Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, pongo a vuestra disposición la tesis intitulada:

### **INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y TIEMPO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE TEMPLE Y REVENIDO EN LA RESISTENCIA A LA DUREZA DEL ACERO HARDOX 450**

**(INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)**

El actual trabajo de investigación tiene por objetivo determinar la influencia de la variación de la temperatura y tiempo por efecto del tratamiento de temple y revenido en la resistencia a la dureza del acero HARDOX 450. Este acero micro aleado se emplea en la fabricación de cucharas de excavadoras, tolvas de vehículos de carga de material abrasivo, revestimiento de trituradores, cribadoras y otros componentes de maquinaria minera.

La investigación permitirá conocer de mejor forma el comportamiento del acero en estudio frente a las fluctuaciones térmicas puesto que, debido a su composición química y microestructura, estos aceros son sensibles a temperaturas provocando así la disminución de sus propiedades mecánicas.

Bach. Rubén Quillahuaman Cusicuna

## DEDICATORIA

Al altísimo dios por dejarme llegar hasta aquí hoy,  
por brindarme fortaleza, salud y una familia maravillosa y  
concluir mis objetivos y metas trazados.

Con mucha ternura y amor a mis padres Tomas Quillahuaman  
Cusihuaman y Simeona Cusicuna Choqueconza, por ser un pilar vital  
en mi vida, por sus consejos y preocupaciones de titularme como profesional,  
por su apoyo continuo e incondicional y agradezco que estén siempre a mi lado.

A mi hija Raysha en especial, que es la razón  
de mi vida y me motiva siempre, aportando a mi  
responsabilidad y perseverancia por quien hago  
esfuerzos por ser una persona al servicio de la  
sociedad y como ser humano.

A mis hermanas(as) Mercedes, Vilma, Teresa,  
Elizabeth y María Antonieta que esta con dios, Tomas,  
Wilbert y mis sobrinas Lucero y Luya por su cariño, apoyo,  
comprensión, y que han estado en momentos adversos y alegres  
de mi vida y a los demás familiares

Bach. Rubén Quillahuaman Cusicuna

## AGRADECIMIENTO

Quiero mi dar mi agradecimiento a nuestro creador Dios y la virgen de Fátima quienes iluminan mi camino y me bendicen siempre, y mi familia en especial por estar siempre apoyándome y estar presentes.

Mi agradecimiento a mi alma mater Universidad Nacional San Antonio Abad Del Cusco y autoridades porque me permitió formarme profesionalmente y ser útil a la sociedad.

Mi agradecimiento eterno a los docentes y a la Escuela Profesional De Ingeniería Metalúrgica, por sus valiosos conocimientos, enseñanzas y experiencias adquiridos para ser un buen profesional y agradezco de corazón a cada uno por su dedicación y apoyo incondicional.

A los ingenieros del dictamen, por su tiempo, generosidad y valioso tiempo, para revisar el trabajo y a los ingenieros miembros del jurado de sustentación, para la conclusión de este trabajo de investigación.

A mi asesor, M. Sc. Honorato Sánchez Quispe y Co-asesor: Ing. Alfredo Tomás Benito Aragón, por sus aportes, asesorías, y guía en el término del presente trabajo de tesis.

Bach. Rubén Quillahuaman Cusicuna

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo determinar la influencia de la variación de la temperatura y tiempo por efecto del tratamiento de temple y revenido en la resistencia a la dureza del acero HARDOX 450. Este acero micro aleado se emplea en la fabricación de cucharas de excavadoras, tolvas de vehículos de carga de material abrasivo, revestimiento de trituradoras, cribadoras y otros componentes de maquinaria minera. La investigación permitió conocer de mejor forma el comportamiento del acero en estudio frente a las fluctuaciones térmicas. Se utilizaron doce probetas normalizadas del acero HARDOX 450, sometándose a pruebas de temple y revenido, según recomendaciones de los manuales técnicos de ingeniería de tratamientos térmicos, posteriormente se evaluaron mediante ensayos de dureza estandarizado respectivamente, además del examen metalográfico en cada caso. Se determinaron los parámetros operativos, es decir, se encontraron las condiciones experimentales más adecuadas del comportamiento de las variables en estudio durante las pruebas de templado y revenido. Los resultados de las pruebas experimentales fueron examinados mediante el diseño experimental de bloques con el propósito de contrastar la hipótesis de investigación mediante el análisis de Anova, encontrándose que la temperatura y tiempo de temple y revenido tienen efectos significativos sobre la dureza del acero HARDOX 450. Complementariamente, se verificó experimentalmente que la microestructura del material fue modificada según las fluctuaciones de las variables en estudio.

***Palabras clave:*** Hardox 450, temple, revenido, microestructura, dureza.

## ABSTRACT

The objective of this research work is to determine the influence of the variation in temperature and time due to the effect of quenching and tempering treatment on the hardness resistance of HARDOX 450 steel. This micro-alloyed steel is used in the manufacture of ladles, excavators, hoppers of abrasive material loading vehicles, lining of crushers, screeners and other components of mining machinery. The research allowed us to better understand the behavior of the steel under study against thermal fluctuations. Twelve standardized specimens of HARDOX 450 steel were used, undergoing quenching and tempering tests, according to recommendations in the technical manuals of heat treatment engineering, subsequently they were evaluated by standardized hardness tests respectively, in addition to the metallographic examination in each case. The operating parameters were determined, that is, the most appropriate experimental conditions for the behavior of the variables under study during the quenching and tempering tests were found. The results of the experimental tests were examined through the experimental block design with the purpose of contrasting the research hypothesis through Anova analysis, finding that the temperature and time of quenching and tempering have significant effects on the hardness of HARDOX 450 steel. Additionally, it was experimentally verified that the microstructure of the material was modified according to the fluctuations of the variables under study.

Keywords: Hardox 450, quenching, tempering, microstructure, hardness.



## INDICE

PRESENTACIÓN.....	ii
DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTO .....	iv
INDICE .....	vii
INDICE DE TABLAS .....	xi
INDICE DE FIGURAS.....	xii
SIMBOLOGIA .....	xv
CAPÍTULO I .....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
1.1. Situación del problema.....	1
1.2. Formulación del problema .....	2
1.2.1. Problema general.....	2
1.2.2. Problemas específicos.....	3
1.3. Justificación.....	3
1.3.1. Conveniencia.....	3
1.3.2. Relevancia social .....	3
1.3.3. Relevancia tecnológica .....	4
1.3.4. Valor teórico.....	4
1.3.5. Utilidad metodológica .....	4
1.4. Objetivos .....	5
1.4.1. Objetivo general .....	5
1.4.2. Objetivos específicos .....	5
CAPÍTULO II .....	6
MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Antecedentes de la investigación .....	6
2.1.1. Antecedentes nacionales .....	6
2.1.2. Antecedentes internacionales .....	7
2.2. Bases teóricas .....	10
2.2.1. Sistema hierro-carbono .....	10
2.2.1.1. Diagrama de equilibrio hierro-carburo de hierro.....	10
2.2.1.2. Los aceros.....	11
2.2.1.2.1. Clasificación general.....	12
2.2.1.2.2. Aceros al carbono .....	13
2.2.1.2.3. Aceros HARDOX .....	15
2.2.1.2.4. Aceros HARDOX 450 .....	16
2.2.2. Transformaciones de las aleaciones Fe-C.....	20
2.2.2.1. Transformaciones en la microestructura de tipos de acero .....	21
2.2.2.2. Microestructura de un acero hipoeutectoide .....	25
2.2.3. Diagramas Tiempo, Temperatura y Transformación (TTT).....	26
2.2.3.1. Diagramas TTT para un acero hipoeutectoide .....	27
2.2.3.2. Diagramas Curvas de Enfriamiento Continuo (CCT).....	28
2.2.4. Tratamiento térmico del acero.....	29
2.2.5. Temple .....	31
2.2.5.1. Calentamiento.....	32
2.2.5.2. Austenización .....	33
2.2.5.3. Enfriamiento .....	35

2.2.5.4.	Transformación martensítica.....	37
2.2.6.	Revenido .....	39
2.2.7.	Efectos de los elementos aleantes en el tratamiento térmico de los aceros .....	41
2.2.8.	Distribución de los elementos aleantes en los aceros .....	42
2.2.9.	Efecto de los elementos aleantes y la temperatura de revenido en la dureza .....	44
2.2.10.	Dureza de metales.....	45
2.2.11.	Hornos para tratamientos térmicos.....	46
2.3.	Definición de términos básicos. ....	47
2.3.1.	Fases .....	47
2.3.2.	Microestructura .....	48
2.3.3.	Equilibrio de fases .....	48
2.3.4.	Diagramas de equilibrio de fases.....	49
2.3.5.	Interpretación de los diagramas de fase .....	49
2.3.6.	Resiliencia .....	50
2.3.7.	Tenacidad .....	50
2.3.8.	Fragilidad .....	50
2.3.9.	Temple .....	50
2.3.10.	Propiedades físicas .....	50
2.3.11.	Propiedades mecánicas. ....	50
CAPITULO III.....		51
HIPÓTESIS Y VARIABLES .....		51
3.1.	Hipótesis.....	51
3.1.1	Hipótesis general .....	51
3.1.2.	Hipótesis específicas.....	51
3.2	Variables e indicadores .....	51
3.2.1.	identificación de variables .....	51
3.2.2.	Indicadores .....	52
3.2.3.	Operacionalización de variables.....	52
3.2.4.	Matriz de consistencia .....	52
CAPITULO IV.....		54
METODOLOGÍA.....		54
4.1.	Delimitación espacial .....	54
4.2.	Diseño de investigación: Método, tipo, nivel, alcance .....	54
4.2.1.	Método de investigación .....	54
4.2.2.	Tipo de investigación.....	54
4.2.3.	Nivel de la investigación.....	55
4.2.5.	Alcance de la investigación.....	55
4.3.	Población de estudio.....	56
4.3.1.	Población.....	56
4.3.2.	Muestra .....	56
4.3.3.	Material de estudio .....	56
4.3.4.	Técnicas y procedimientos.....	56
4.3.5.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	57
4.4.	Plan de Análisis de datos.....	57
4.4.1.	Técnicas de recolección de información.....	57
4.4.2.	Técnicas de análisis e interpretación de la información .....	57
4.4.3.	Técnicas para probar la aceptación o rechazo de las hipótesis planteadas .....	58
CAPÍTULO V.....		59
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS DE PRUEBAS .....		59
5.1.	Procedimiento experimental.....	59
5.2.	Material de investigación .....	59
5.2.1	Composición química del Hardox 450 .....	60
5.2.2	Propiedades mecánicas del Hardox 450 Chapa.....	62

5.3	Maquinaria, equipo, herramientas y reactivos químicos.....	62
5.3.1	Maquina cizalladora hidráulica .....	63
5.3.2	Esmeril de banco .....	63
5.3.3	Horno eléctrico de Muflas BIOBASE (máx 1200°C) y SM (máx 950°C).....	64
5.3.4	Durómetro Rockwell digital LCR-500 con kit de apoyo y laptop.....	65
5.3.5	Máquina desbastadora METASINEX con dispensador de agua.....	65
5.3.6	Máquina pulidora MONTASUPAL con dispensador de agua.....	66
5.3.7	Reactivo químico NITAL (5 %) y alcohol (75 %).....	66
5.3.8	Secadora eléctrica portátil SUOL.....	67
5.3.9	Microscópio metalográfico PETIP – CARL ZEISS.....	67
5.3.10	Herramienta manual de sujeción de probetas.....	68
5.3.11	Termómetro de laboratorio (100 °C).....	68
5.3.12	Recipientes de vidrio y plástico (lunas de reloj y cubetas).....	69
5.3.13	Equipo de protección personal (mandil, guantes y careta de protección).....	69
5.3.14	Cámara digital .....	70
5.4	Desarrollo de pruebas experimentales.....	70
5.4.1	Preparación de probetas de acero Hardox 450 .....	70
5.4.2	Tratamiento de temple.....	71
5.4.2.1	Determinación de temperaturas críticas $A_1$ y $A_3$ .....	71
5.4.2.2	Condiciones de templado .....	73
5.4.3	Tratamiento de revenido .....	74
5.4.3.1	Delimitación de la temperatura de revenido .....	74
5.4.3.2	Condiciones de revenido .....	75
5.5	Pruebas de dureza.....	76
5.6	Análisis metalográfico .....	77
5.7	Resultados experimentales.....	79
5.7.1	Resultados de la dureza después del temple.....	79
5.7.2	Resultados de la dureza de revenido.....	80
5.7.3	Resultados del análisis metalográfico.....	81
CAPÍTULO VI.....		87
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		87
6.1.	Dureza del material testigo.....	87
6.2.	Análisis metalográfico del material testigo.....	87
6.3.	Dureza en probetas templadas.....	87
6.4.	Análisis metalográfico de temple.....	88
6.5.	Dureza en probetas revenidas.....	89
6.6.	Análisis metalográfico de revenido.....	91
6.7.	Discusión de los resultados .....	91
6.7.1.	Estrategias de análisis de resultados .....	91
6.7.1.1.	Prueba de hipótesis .....	94
6.7.1.2.	Variables de proceso .....	94
6.7.1.3.	Acondicionamiento de los datos experimentales.....	96
6.7.2.	Primera etapa: Modelo de primer orden para el proceso de templado .....	99
6.7.2.1.	Análisis de varianza .....	99
6.7.2.2.	Ecuación de regresión para el proceso de templado .....	103
6.7.2.3.	Coefficiente de correlación.....	104
6.7.2.4.	Grafica de probabilidad normal.....	104
6.7.2.5.	Diagrama de Pareto.....	105
6.7.2.6.	Grafica de caja respecto a la temperatura.....	106
6.7.2.7.	Grafica de caja respecto al tiempo.....	106
6.7.2.8.	Grafica de efectos.....	107
6.7.2.9.	Optimización de la dureza.....	108
6.7.3.	Segunda etapa: Modelo de primer orden para el proceso de revenido.....	109

6.7.3.1. Análisis de varianza .....	110
6.7.3.2. Modelo de la ecuación de regresión .....	111
6.7.3.3. Grafica de probabilidad normal .....	113
6.7.3.4. Grafica de caja respecto a la temperatura .....	114
6.7.3.5. Grafica de intervalos respecto a la temperatura .....	116
6.7.3.6. Grafica de efectos. ....	117
6.7.4. Validez de la hipótesis y comparación con otras investigaciones .....	118
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>119</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b> .....	<b>122</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>126</b>
Anexo 1 .....	127
Anexo 2 .....	128
Anexo 3 .....	129

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Composición química (% e.p.) del acero Hardox 450 (análisis térmico) .....	17
<b>Tabla 2:</b> Contenido en carbono equivalente CET (CEV) .....	17
<b>Tabla 3:</b> Propiedades mecánicas para un acero Hardox 450. ....	18
<b>Tabla 4</b> Matriz de operacionalización de variables.....	53
<b>Tabla 5</b> Composición Química del acero Hardox 450 Chapa* (Laminado en caliente) .....	61
<b>Tabla 6</b> Propiedades mecánicas del Hardox 450 Chapa, espesor (2.0 – 8.0) mm. ....	62
<b>Tabla 7</b> Resultados de pruebas de dureza del testigo Hardox 450.....	79
<b>Tabla 8</b> Resultados de pruebas experimentales del proceso de temple. Hardox 450.....	80
<b>Tabla 9</b> Resultados de pruebas experimentales del proceso de revenido. Hardox 450.....	81
<b>Tabla 10</b> Cantidad porcentual estimada de martensita. Hardox 450 (0.26% C). ....	82
<b>Tabla 11</b> Dureza obtenida en el temple del Hardox 450 .....	88
<b>Tabla 12</b> Dureza obtenida en el revenido del Hardox 450. ....	89
<b>Tabla 13.</b> Variables involucradas en el proceso de templado .....	95
<b>Tabla 14</b> Variables involucradas en el proceso de revenido.....	95
<b>Tabla 15</b> Datos de dureza después del templado .....	97
<b>Tabla 16</b> Datos de resistencia de la dureza del proceso de revenido (templo a 850 °C) .....	98
<b>Tabla 17</b> Datos de resistencia de la dureza del proceso de revenido (templo a 910 °C) .....	98
<b>Tabla 18</b> Datos de resistencia de la dureza del proceso de revenido (templo a 950 °C) .....	99
<b>Tabla 19</b> Total de grados de libertad del modelo factorial en el proceso de templado .....	101
<b>Tabla 20</b> Anova del proceso de templado .....	102
<b>Tabla 21</b> Optimización de la resistencia a la dureza del proceso de templado .....	109
<b>Tabla 22</b> Anova del proceso de revenido para las probetas templadas a 850 °C .....	110
<b>Tabla 23</b> Anova del proceso de revenido para las probetas templadas a 910 °C .....	111
<b>Tabla 24</b> Anova del proceso de revenido para las probetas templadas a 950 °C .....	111
<b>Tabla 25</b> Correlación y regresión del proceso de revenido para probetas templadas a 850 °C.....	112
<b>Tabla 26</b> Correlación y regresión del proceso de revenido para probetas templadas a 910 °C .....	113
<b>Tabla 27</b> Correlación y regresión del proceso de revenido para probetas templadas a 950 °C .....	113

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> <i>Diagrama de equilibrio hierro – carbono</i> .....	11
<b>Figura 2</b> <i>Chapa gruesa de Hardox 450</i> .....	19
<b>Figura 3</b> <i>Tolva y cucharas fabricadas con acero Hardox</i> .....	20
<b>Figura 4</b> <i>Zona de los aceros del diagrama hierro-carbono</i> .....	21
<b>Figura 5</b> <i>Transformaciones de las microestructuras de un acero al carbono eutectoide</i> .....	22
<b>Figura 6</b> <i>Transformaciones de las microestructuras de un acero al carbono hipoeutectoide</i> .....	23
<b>Figura 7</b> <i>Transformaciones de las microestructuras de un acero al carbono hipereutectoide</i> ....	24
<b>Figura 8</b> <i>Microestructura de acero hipoeutectoide</i> .....	26
<b>Figura 9</b> <i>Transformación isotérmica de un acero hipoeutectoide</i> .....	27
<b>Figura 10</b> <i>Diagrama de transformación isotérmica de un acero (1.13 %C).</i> .....	29
<b>Figura 11</b> <i>Tratamientos térmicos en aceros</i> .....	30
<b>Figura 12</b> <i>Temperaturas de Austenización para el temple</i> .....	31
<b>Figura 13</b> <i>Curva de calentamiento en el temple ordinario</i> .....	33
<b>Figura 14</b> <i>Transformación de la estructura perlítica a austenítica</i> .....	34
<b>Figura 15</b> <i>Transformación austenítica de un acero hipoeutectoide</i> .....	35
<b>Figura 16</b> <i>Velocidades de enfriamiento y gradientes de temperatura: temple y revenido</i> .....	36
<b>Figura 17</b> <i>Transformación de desplazamiento y reconstructiva</i> .....	37
<b>Figura 18</b> <i>Transformación estructural a escala atómica de la austenita en martensita</i> .....	38
<b>Figura 19</b> <i>Efecto: temperatura de revenido en propiedades mecánicas: acero SAE 1050</i> .....	40
<b>Figura 20</b> <i>Efecto del porcentaje de elementos de aleación en temperatura eutectoide Ac1</i> .....	42
<b>Figura 21</b> <i>Distribución de los elementos presentes en los aceros de aleación*</i> .....	43

<b>Figura 22</b> <i>Efecto de los elementos aleantes y la Temperatura de revenido en la dureza</i> .....	44
<b>Figura 23</b> <i>Tipos y características de los ensayos de dureza</i> .....	45
<b>Figura 24</b> <i>Durómetro digital de laboratorio</i> .....	46
<b>Figura 25</b> <i>Hornos de Tratamientos Térmicos Tipo Caja</i> .....	47
<b>Figura 26</b> <i>Flujograma de pruebas experimentales - Acero HARDOX 450.</i> .....	59
<b>Figura 27</b> <i>Maquina cizalladora hidráulica y medidas de acero comercial Hardox 450</i> .....	63
<b>Figura 28</b> <i>Esmeril de banco para desbaste</i> .....	64
<b>Figura 29</b> <i>Horno eléctrico de Muflas</i> .....	64
<b>Figura 30</b> <i>Durómetro digital LCR-500</i> .....	65
<b>Figura 31</b> <i>Máquina desbastadora de muestras</i> .....	65
<b>Figura 32</b> <i>Máquina pulidora de muestras</i> .....	66
<b>Figura 33</b> <i>Reactivo químico</i> .....	66
<b>Figura 34</b> <i>Secadora eléctrica</i> .....	67
<b>Figura 35</b> <i>Microscopio metalográfico petip</i> .....	67
<b>Figura 36</b> <i>Herramienta manual de sujeción</i> .....	68
<b>Figura 37</b> <i>Termómetro de laboratorio</i> .....	68
<b>Figura 38</b> <i>Luna reloj y cubetas</i> .....	69
<b>Figura 39</b> <i>Equipo de protección personal</i> .....	69
<b>Figura 40</b> <i>Uso del acero Hardox 450 y preparación de probetas mediante mecanizado</i> .....	71
<b>Figura 41</b> <i>Diagrama Temperatura – tiempo para el tratamiento de temple</i> .....	73
<b>Figura 42</b> <i>Diagrama TTT del acero Hardox 450</i> .....	73
<b>Figura 43</b> <i>Templado y enfriamiento de probetas tratadas</i> .....	74
<b>Figura 44</b> <i>Diagrama Temperatura – Tiempo para el tratamiento de revenido</i> .....	75

<b>Figura 45</b> <i>Revenido de probetas</i> .....	75
<b>Figura 46</b> <i>Hornos eléctricos de laboratorio para procesos de Temple y Revenido</i> .....	76
<b>Figura 47</b> <i>Equipo durómetro digital (Escala Rocwell C)</i> .....	77
<b>Figura 48</b> <i>Operaciones previas al análisis metalográfico</i> .....	78
<b>Figura 49</b> <i>Microscopio Metalográfico.</i> .....	79
<b>Figura 50</b> <i>Relación entre la dureza, contenido de carbono y cantidad de martensita.</i> .....	82
<b>Figura 51</b> <i>Microestructuras del acero Hardox 450</i> .....	83
<b>Figura 52</b> <i>Microestructuras del acero Hardox 450, probetas 1T y 2T, temple a 950 °C.</i> .....	83
<b>Figura 53</b> <i>Microestructuras del acero Hardox 450, probetas 3T y 4T, temple a 910 °C.</i> .....	84
<b>Figura 54</b> <i>Microestructuras del acero Hardox 450, probetas 5T y 6T, temple a 850 °C.</i> .....	84
<b>Figura 55</b> <i>Microestructuras del acero Hardox 450, probetas revenidas 1R y 2R.</i> .....	85
<b>Figura 56</b> <i>Microestructuras del acero Hardox 450, probetas revenidas 3R y 4R.</i> .....	85
<b>Figura 57</b> <i>Microestructuras del acero Hardox 450, probetas revenidas 5R y 6R.</i> .....	86
<b>Figura 58.</b> <i>Diagrama de revenido (Dureza vs temperatura del hardox 450)</i> .....	90
<b>Figura 59</b> <i>Variables involucradas en el proceso de templado</i> .....	95
<b>Figura 60</b> <i>Variables involucradas en el proceso de revenido.</i> .....	96
<b>Figura 61</b> <i>Distribución de datos experimentales de temperatura y tiempo</i> .....	104
<b>Figura 62</b> <i>Diagrama de Pareto estandarizado del proceso de templado</i> .....	105
<b>Figura 63</b> <i>Diagrama de caja para la dureza – temperatura</i> .....	106
<b>Figura 64</b> <i>Diagrama de caja de la dureza – tiempo</i> .....	107
<b>Figura 65</b> <i>Grafica de efectos de temperatura – tiempo para la dureza</i> .....	108
<b>Figura 66</b> <i>Distribución de datos experimentales de temperatura en el proceso de revenido.</i> ...	114
<b>Figura 67</b> <i>Grafica de cajas para la temperatura y la dureza</i> .....	115
<b>Figura 68</b> <i>Grafica de intervalos para el proceso de templado</i> .....	116
<b>Figura 69</b> <i>Grafica de efectos para el proceso de revenido</i> .....	117



## SIMBOLOGIA

- A<sub>1</sub>:** Transformación de la austenita a perlita al enfriar
- A<sub>3</sub>:** Transformación alotrópica de la austenita a ferrita al enfriar
- ASM:** American Society for Metals= Sociedad Estadounidense de Metales
- bcc:** Cubica centrada en el cuerpo
- bct:** Cubica tetragonal centrada en el cuerpo
- CCT:** Transformación bajo enfriamiento continuo
- CET:** Carbono equivalente total
- CEV:** Valor del carbono equivalente
- cm:** Centímetro
- erg:** Ergio
- F:** Fuerza (Newton)
- fcc:** Cubica centrada en la cara
- g:** Gramo
- GMAW:** Gas Metal Arc Welding = La soldadura por arco de metal y gas
- HB:** Brinell Hardness = Dureza Brinell
- J:** Joule
- kg:** Kilogramo
- l:** Liquido
- m:** Metro
- MPa:** Megapascales
- N:** Newton
- °K:** Grados Kelvin
- Pa:** Pascal
- s:** Solido
- SSAB:** Swedish Steel AB = Acero sueco AB
- TM:** Toneladas métricas
- TTT:** Temperatura, tiempo, transformación de austenita
- W:** Trabajo (watts)

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.1. Situación del problema**

Los aceros HARDOX, comprenden varios tipos de aceros micro aleados los cuales han sido desarrollados fundamentalmente para aplicaciones de resistencia al desgaste, impacto, abrasión, corrosión y otras exigencias de la ingeniería moderna. Debido a sus excelentes propiedades estructurales, el mayor uso de estos aceros es en la fabricación de cucharones para los cargadores frontales, tolvas para vehículos livianos, volquetes y de camiones pesados para transporte de materiales abrasivos en las industrias de construcción y minera, etc. Los aceros HARDOX utilizados en nuestro país, provienen de Suecia, Alemania y la China principalmente y se comercializan mediante empresas intermediarias.

Por su composición química y microestructural, estos aceros son sensibles a temperaturas mayores que 250 °C tal como lo especifica el catálogo del fabricante de dichos materiales y cuando no se cumplen estrictamente las recomendaciones técnicas de seguridad y operatividad durante los procesos de soldadura, termo mecánicos, conformabilidad, corte y rectificado, el acero sufre alteraciones microestructurales que provocan la disminución de sus propiedades mecánicas afectando de ese modo en la vida útil de los componentes construidos. Los cambios internos que se presentan son consecuencia de la difusión del carbono hacia las dislocaciones y límites de placas de la martensita presente, además de la precipitación de carburos; los mecanismos de formación de estos defectos microestructurales no son conocidos ni considerados por los técnicos al momento de la manufactura del acero Hardox 450

Los aceros HARDOX se suministran a los clientes en estado laminado en espesores de 0.60 mm a 160 mm y cumplen con la norma EN 10029. Se consideran en la categoría de aceros de bajo

carbono cuyo contenido es menor al 0.25%. El acero Hardox 450 contiene como principales microaleantes al manganeso, cromo, níquel y molibdeno. Estos aceros en su microestructura presentan como fase principal la martensita, esta fase proviene de la separación de la austenita por efecto de un tratamiento térmico en dicho material, el entendimiento de esta transformación y sus efectos, viene a considerarse como importante, considerando el HARDOX 450 como objeto de estudio.

Por otra parte, en los talleres industriales de metal mecánica de nuestro país y particularmente en el Cusco, si bien es cierto que se tiene cierta experiencia de trabajo en el uso de los aceros HARDOX 450 para el ensamblaje y fabricación de diversos elementos de vehículos y máquinas, aún no está tecnificado eficientemente por lo que se requiere mayor conocimiento tecnológico y científico del comportamiento de estos aceros frente a las fluctuaciones térmicas a las que se somete.

Por lo mencionado, en esta investigación de nivel descriptivo, experimental y correlacional, se pretende determinar los niveles de dureza en el acero HARDOX 450 cuando es influenciada por la variación de temperatura en diferentes condiciones de tiempo en el temple y revenido durante los ensayos.

## **1.2. Formulación del problema**

Habiendo descrito la situación del problema y sus implicancias, y con el propósito de desarrollar esta investigación, de manera concreta se formula lo siguiente.

### ***1.2.1. Problema general***

**PG:** ¿Influirá la temperatura y el tiempo isotérmico del tratamiento térmico de temple y revenido en el comportamiento de la dureza del acero HARDOX 450?

### **1.2.2. Problemas específicos**

**PE1:** ¿Influirá la temperatura del tratamiento térmico de templado en agua en el comportamiento de la dureza del acero HARDOX 450?

**PE2:** ¿Influirá el tiempo isotérmico del tratamiento térmico de templado en agua en el comportamiento de la dureza del acero HARDOX 450?

**PE3:** ¿Influirá la temperatura del tratamiento térmico de revenido en el comportamiento de la dureza del acero HARDOX 450?

## **1.3. Justificación**

### **1.3.1. Conveniencia**

El carácter para desarrollar la presente investigación es apropiado para obtener resultados que podrían ser de gran utilidad para los expertos en la práctica de la utilización del acero Hardox 450 para el ensamblaje y fabricación de diversos elementos componentes de vehículos, máquinas y estructuras metálicas de ingeniería.

### **1.3.2. Relevancia social**

La trascendencia de un mayor conocimiento del acero Hardox 450 beneficiará a un conjunto de personas involucradas en la actividad metal-mecánica a nivel académico, técnico, tecnológico y profesional e inclusive al usuario final demandante de este material quien tendrá la garantía de darle utilidad al producto fabricado en las mejores condiciones de seguridad en favor de la sociedad. De la misma forma se beneficiarán de manera directa, los empresarios y trabajadores de los talleres de metal mecánica quienes utilizan el acero Hardox 450 como base para la fabricación de productos industriales.

### ***1.3.3. Relevancia tecnológica***

El presente trabajo permitió establecer la asociación entre los cambios inducidos por temple y revenido con el control del tiempo de exposición de los aceros Hardox 450 con la finalidad de pronosticar y controlar oportunamente los potenciales inconvenientes posteriores a la exposición del acero frente a las variaciones de temperatura por encima de la normal y ante otros agentes externos como las exigencias mecánicas en servicio en desmedro de la vida útil durante el uso del acero, presentándose así cambios inevitables en su microestructura fundamentalmente como en el caso de los procesos de manufactura de conformado metálico por doblado, cizallamiento y soldadura.

### ***1.3.4. Valor teórico***

El conocimiento de los cambios microestructurales del acero Hardox 450 frente a los factores involucrados en la investigación, aún no es del todo conocido por ser un acero que tiene microaleantes cuya influencia en dichos cambios han sido poco estudiados, además de que la información especializada no está plenamente difundida; por tal razón, esta investigación tratará de contribuir en un mayor conocimiento de los cambios del acero frente a las variaciones de la temperatura durante el servicio de los productos con Hardox 450.

### ***1.3.5. Utilidad metodológica***

Con la metodológica planteada en esta investigación de nivel descriptivo correlacional para el acero Hardox 450 se logrará obtener los resultados acordes al planteamiento del problema, dicha metodología servirá como modelo de diseño para crear nuevas herramientas para la recopilación de datos, elaborar el planteamiento de variables y sus indicadores con el propósito de desarrollar

otras investigaciones enfocadas con nuevos objetivos y con mayor profundización en los temas conexos.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. *Objetivo general***

**OG:** Determinar la influencia de la temperatura y tiempo isotérmico del tratamiento térmico de temple y revenido en el comportamiento de la dureza del acero HARDOX 450.

### **1.4.2. *Objetivos específicos***

**OE1:** Determinar la influencia de la temperatura del tratamiento térmico de templado en agua para evaluar el comportamiento de la dureza del acero HARDOX 450.

**OE2:** Determinar la influencia del tiempo isotérmico de tratamiento térmico de templado en agua para evaluar el comportamiento de la dureza del acero HARDOX 450.

**OE3:** Determinar la influencia de la temperatura del tratamiento térmico de revenido al medio ambiente para evaluar el comportamiento de la dureza del acero HARDOX 450.

## CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes de la investigación

Se expone la siguiente información de temas de investigación, consideradas como antecedentes de la presente Tesis, temas relacionados con la soldadura del Hardox 450 en el que se evalúan microestructuralmente la presencia de martensita y perlita fina como producto del tratamiento térmico de la soldadura con el propósito de evaluar la dureza del Hardox 450. Cabe indicar, el Hardox 450 es un material relativamente novedoso y estudios respecto a temple y revenido de este material no están publicados, por tratarse de investigaciones tecnológicas patentadas por los fabricantes. Por tanto, esta investigación, como un aporte, trata de llenar el vacío de conocimiento en el comportamiento de los procesos de temple y revenido del Hardox 450.

#### 2.1.1. Antecedentes nacionales

- Thomas (2019) desarrolló su tesis de pregrado “Investigación y análisis sobre la influencia del proceso de soldadura en las propiedades mecánicas de los aceros antidesgaste Hardox”. Dicha tesis tuvo como objetivo analizar la influencia del proceso de soldadura en las propiedades mecánicas de los aceros antidesgaste Hardox. En esta investigación de nivel descriptivo, se aplicó pruebas experimentales. Como resultado de análisis metalográfico se determinó la presencia de la martensita revenida y perlita fina debido a la influencia de calor del proceso de soldadura y consecuentemente influye también en la variación de la dureza del metal base como de la zona ZAC”.
- Armas & Sevillano (2015) en su tesis “Desarrollo microestructural, tamaño de grano y dureza transversal de la unión de soldadura mediante el proceso GMAW del acero Hardox

450, a diferente temperatura de precalentamiento, indican como objetivo determinar y explicar la relación existente entre la temperatura de precalentamiento y el desarrollo microestructural y dureza de uniones soldadas mediante el proceso GMAW de acero Hardox 450. En esta investigación de alcance descriptivo se aplicó el método experimental y tuvo como resultados identificar a los parámetros que tienen mayor efecto en la fisuración en frío siendo la dureza, la microestructura de la unión soldada y la amplitud de la ZAC; por otra parte, se confirma la disminución de la susceptibilidad a fisuración en frío a la temperatura de precalentamiento de 180 °C de la unión soldada del acero Hardox 450”.

### **2.1.2. Antecedentes internacionales**

- Gallina et al. (2022) en su trabajo de investigación desarrollado en la Universidad Federal de Rio Grande de Brasil: “Estudo Dos Efeitos Do Tratamento Térmico em los aceros Hardox® 500 E Strenx® 700” publicado en la revista Ciencia e Engenharia de Materiais: principios e fundamentos em pesquisa, señalan como objetivo, analizar la microestructura y la microdureza de los aceros Hardox 500 y el STREX 700, como resultado de la aplicación de los procesos térmicos de temple, revenido, normalizado y recocido en dichos materiales que fueron suministrados por la empresa Yara Brasil S.A.,. Con dicho motivo se desarrollaron pruebas de microscopía óptica y espectrometría con emisión óptica, micrografía óptica y ensayos de microdureza Vickers. Como resultados de las pruebas se determinó que la reducción de la dureza de HARDOX® fue más significativa que la de STREX®. Tanto en el proceso de temple como en el de revenido, ambos materiales presentaron una dureza superior a la del material original, caracterizado por un mayor grado de refinamiento austenítico, mientras que HARDOX presentó un aumento eficaz de la dureza. En el tratamiento térmico de recocido total, ambos materiales presentaron



microestructuras semejantes presentando ferrita, perlita y percibiéndose estructuras esferoidizadas, por estas razones, los valores de dureza son casi similares.

- Białobrzaska et al. (2021) desarrollaron el artículo de investigación: “Analysis of the properties of hardox extreme steel and possibilities of its applications in machinery”, fue elaborado en la Universidad de Ciencia y Tecnología de Wroclaw de Polonia y publicado en la revista Metals. En dicho estudio se establece como objetivo determinar las propiedades del acero Hardox Extreme después del temple, revenido y normalizado, esto se logró mediante diversos ensayos. La secuencia de investigación incluyó un análisis de la microestructura por microscopía; un ensayo de tracción estática a temperatura ambiente para determinar su resistencia a la tensión, límite elástico, módulo de Young, alargamiento y reducción de la sección tras la fractura. Así también se efectuó el ensayo de impacto Charpy en el intervalo de temperatura de la transición dúctil-frágil en relación con el análisis fractográfico realizado con el uso de un microscopio de barrido (SEM).

Como principales resultados y conclusiones se lograron: La estructura del acero Hardox Extreme en el estado de proveído está constituida por carbono medio (0.44% C), martensita de láminas finas con una dureza de 60 HRC (orientación longitudinal) y 61 HRC (orientación transversal). En el estado normalizado, su estructura con una dureza de 38 HRC (orientación longitudinal y transversal) se compone principalmente de sorbita templada y martensita. En estado de suministro, el acero Hardox Extreme posee la resistencia a la tracción de 2411 MPa, un módulo de 210 GPa y un alargamiento de 3.5%, esto en dirección longitudinal; resistencia a la tracción de 2116 MPa, módulo de 206 GPa y un alargamiento de 1.5%, esto en dirección transversal. En estado normalizado, resistencia a la tracción de 1255 MPa, módulo de 203 GPa y un alargamiento de 10.5%

(dirección longitudinal); resistencia a la tracción de 1129 MPa, módulo de 212 GPa y un alargamiento de 11.3%, esto en dirección transversal. Los elevadísimos índices de resistencia obtenidos en la investigación, ofrecen al acero Hardox Extreme amplias posibilidades de aplicación en la industria y en la fabricación de vehículos pesados de gran capacidad.

- Hernández (2019) en su tesis de pregrado “Análisis de la soldabilidad y propiedades mecánicas de una plancha de acero anti abrasivo grado 450 mediante el proceso GMAW” establece como objetivo analizar la soldabilidad y propiedades mecánicas del acero anti abrasivo grado 450. Esta investigación es de nivel descriptivo y se aplica el método experimental. Se determina como resultado principal las condiciones de soldadura para lograr un cierto grado de dureza del acero en función de su microestructura bainítica y martensítica”.
- Vélez (2016) en su reporte de proyecto “Reducción del defecto de falta de fusión en soldadura para el proceso GMAW en acero Hardox 450”, propone cambiar las medidas a la unión para eliminar fallas de fusión de juntas en piezas del Hardox 450 de 2.5 cm de espesor por mig-mag en la fabricación de cajas para camión.

Vélez (2016) En esta investigación de alcance descriptivo y con pruebas experimentales, se determina principalmente que el cambio en la dureza por soldeo en parte superior de la soldada fluctúan entre 400 y 450 HB lo que contribuye a que la unión de soldadura sea resistente a la abrasión que es objeto de emplear Hardox 450, en la parte media e inferior fluctúan entre 300 HB a 400 HB y contribuye a ser dúctil y no presenta fracturas prematuramente, también concluye que en el proceso de soldadura no debe incrementarse

el amperaje para lograr mayor penetración debido a la microestructura martensítica del material”.

## **2.2. Bases teóricas**

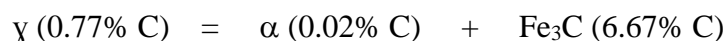
### **2.2.1. Sistema hierro-carbono**

Es un sistema de aleaciones bastante estudiado y utilizado en la industria, en él se representa la presencia de diversos compuestos denominados aceros con máximo del 2.0% en carbono y las fundiciones de hierro hasta 6.67% de carbono, de manera general se tratan como aleaciones binarias de hierro y carbono.

#### **2.2.1.1. Diagrama de equilibrio hierro-carburo de hierro**

Este diagrama de fases presenta como componentes principales el hierro metálico de comportamiento alotrópico y el compuesto de carácter Inter metálico denominado carburo de hierro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) o cementita. Este carburo tiene un comportamiento metaestable puesto que a ciertas condiciones se descompone en hierro y carbono los cuales son más estables. En la figura 1, se presenta: “Las líneas sólidas indican el diagrama hierro-carburo de hierro, las líneas discontinuas indican el diagrama hierro-grafito” (ASM International, 1998). El gráfico muestra fases presentes en los materiales de hierro y carbono, es de interés el diagrama en la utilización como punto de partida para estudiar fundamentalmente las transformaciones de los aceros durante los procesos de tratamientos térmicos.

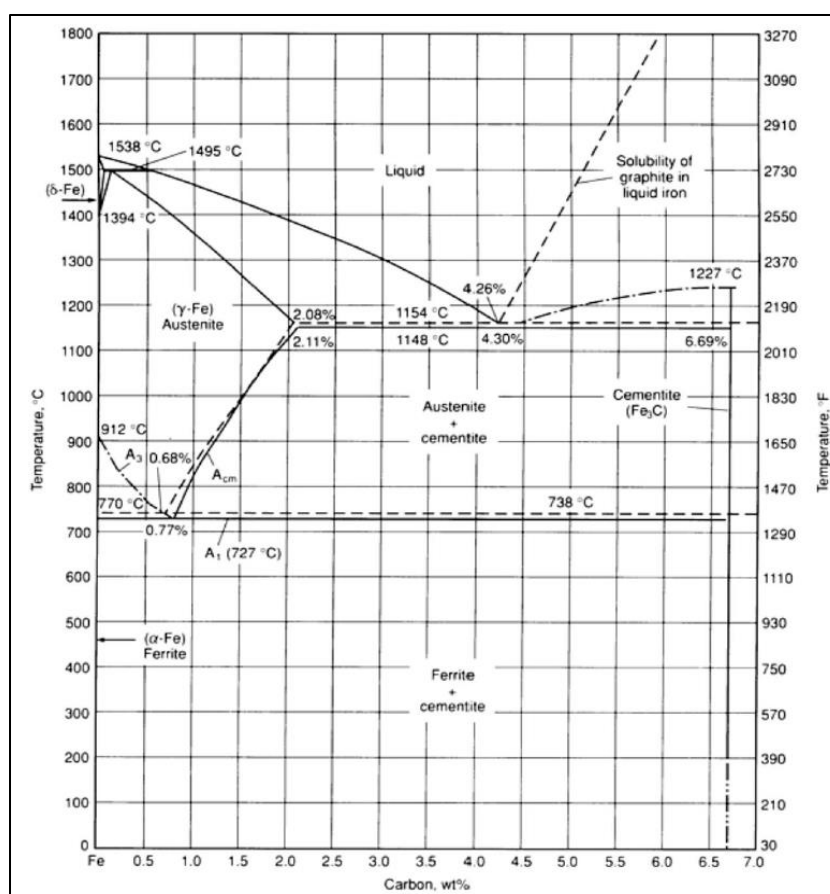
La reacción de transformación sólida más significativa que presenta este diagrama para el estudio de los cambios térmicos es aquella que se realiza a 723 °C y para una composición de 0.8% de carbono se conoce como reacción eutectoide:



Durante el enfriamiento lento y por debajo de  $723\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la fase austenita ( $\gamma$ ), se descompone en la fase ferrita ( $\alpha$ ) y la fase cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), el resultado de la reacción es perlita. Dicha transformación en fase sólida y en condiciones de equilibrio, durante el calentamiento o enfriamiento de las aleaciones hierro y carbono, está representada en el diagrama por la línea de temperatura crítica inferior y se designa por  $A_1$ .

**Figura 1**

*Diagrama de equilibrio hierro – carbono*



Nota. ASM Metals Handbook, Heat Treating Volume IV (p. 17), por ASM International. (1998).

### 2.2.1.2. Los aceros

De acuerdo a (Belzunce., 2001). “Los aceros y fundiciones de hierro son materiales industriales de mayor uso, porque se producen en grandes volúmenes y a costos relativamente

bajos, las propiedades mecánicas son amplias, desde resistencia regular (200-300 MPa) hasta resistencias altas (2000 MPa).

El acero y las fundiciones de hierro son productos en base a las aleaciones de hierro y carbono, y tienen elementos de aleación, para endurecerlos, ya que el hierro puro es muy blando y el límite elástico bordea los 150 MPa”. Cabe recordar que aleaciones de hierro y carbono en proporciones adecuadas son aceros.

#### ***2.2.1.2.1. Clasificación general***

Como dice (Vélez Chavira, 2016), “Los aceros están clasificados sistemáticamente dentro de grupos basados en algunas características comunes, como composición química, la práctica de desoxidación, método de acabado, o forma del producto. La composición química es incluso la más usada básicamente para identificar y asignar designaciones estándar para los aceros forjados. Los aceros estándar pueden ser divididos en tres grupos principales: aceros al carbono, aceros aleados, aceros inoxidable y aceros grado herramienta”.

- **Aceros al carbono**

El acero, “es clasificado de esta manera cuando su contenido de manganeso es limitado a 1.65 % (máx.), silicio a 0.60% (máx.), y cobre a 0.60% (máx.). Con la excepción de los desoxidantes y de boro cuando se especifica, otros aleantes no deben ser agregados intencionalmente, pero pueden estar presentes como residuos. Si alguno de estos elementos incidentalmente es considerado perjudicial para aplicaciones especiales, los límites máximos aplicables pueden ser especificados” (Vélez Chavira, 2016).

- **Aceros aleados**

También (Vélez Chavira, 2016) afirma que, “Los aceros aleados comprenden no solo los

grados que exceden los límites de contenido del elemento de carbono, si no también cualquier grado para los diferentes elementos que son añadidos para hacer alguna modificación a sus propiedades mecánicas. Por esta definición los aceros de aleación incluyen a todos los otros aceros a parte de los aceros al carbono, pero, por convención, los aceros que contienen arriba de 3.99% de cromo son tipos especiales de aceros aleados, los cuales incluyen los aceros inoxidable y muchos de los aceros grado herramienta”.

- **Aceros inoxidables**

Los estudios de (Vélez Chavira, 2016) indican que “Los aceros inoxidables son aceros de alta aleación y tienen una resistencia superior a la corrosión que los aceros al carbono y los aceros convencionales de baja aleación porque estos contienen relativamente más cantidad de cromo. otros elementos pueden incrementar la resistencia a la corrosión también y su uso en este sentido es limitado. Los aceros inoxidables normalmente poseen al menos 10% de cromo, con o sin otros elementos”.

- **Aceros grado herramienta**

“Son los aceros para formar y maquinar otros materiales y por lo tanto son diseñados para tener alta dureza y durabilidad bajo severas condiciones de servicio” (Vélez Chavira, 2016).

#### **2.2.1.2.2. Aceros al carbono**

Según (Armas M. & Sevillano C., 2015) indican, “De acuerdo al instituto americano del hierro y el acero (AISI), los aceros al carbono pueden contener hasta 1,6 % Mn y elementos como el Cu y Si hasta 0,6 % y otros elementos de aleación normalmente están presentes como impurezas. Son aleaciones de Fe-C en las que el % C normalmente no excede el 1,0 %”. Con el incremento

de carbono en el acero se sube la de tracción, aumenta el índice de fragilidad en frío y hace que baje su tenacidad y ductilidad”.

- **Aceros especiales antidesgaste**

Este acero posee propiedades mecánicas mayores a los aceros al carbono, están dentro del tipo HSLA y usados en equipos industriales donde el impacto y desgaste son severos; como cucharones de maquinaria pesada, tolvas, máquinas para movimiento de tierras, etc. y se evalúa: A qué tipo de tensiones externas y desgaste está expuesto el material, componente, mecanismos de corrosión o altas temperaturas. Con esta data es posible determinar el material más adecuado e idóneo. Es decir, mayor será su resistencia a la tracción y desgaste cuanto mayor sea su dureza, El acabado superficial o la rugosidad o, la distribución microestructural y su composición química son también factores que influyen en la resistencia al desgaste de un componente. Si con menor rugosidad se incrementa la resistencia al desgaste y por otro lado con la composición química nos referimos al potencial de carbono, elementos aleantes y compuestos presentes. Así, un acero con mayor cantidad de elementos aleantes formará compuestos muy duros (carburos) y proporcionará mayor resistencia al desgaste frente a otro acero con igual dureza, pero con menor cantidad de elementos aleantes, el cual tendrá menor resistencia al desgaste” (Armas M. & Sevillano C., 2015).

- **Aceros de mediano porcentaje de carbono**

“Este tipo de aceros presenta mayor dureza y resistencia que los aceros de bajo porcentaje de carbono; su contenido de carbono puede variar entre el 0.25 y 0.55%. Entre otras características destacables podemos mencionar que aceptan cierto grado de temple, son más resistentes y duros; son más difíciles de soldar. Es bastante empleado en la fabricación de ejes para vehículos y maquinas, resortes, engranajes, herramientas de agricultura, etc. Estos requieren por lo general un

precalentamiento antes de ser soldadas. Por lo general se utiliza para la fabricación de cables y alambres con excelentes resultados” (Vásquez Montenegro, 2016).

- **Aceros de bajo carbono**

Aceros de bajo carbono son hasta 0,25 %, y por esta consideración estos materiales son denominados aceros de bajo carbono. (PLATA, 2017) indica, “Los aceros de bajo contenido de carbono son dúctiles, maleables, altamente maquinables, soldables y no responden al tratamiento térmico de temple. Este tipo de acero se emplea en la fabricación de perfiles estructurales, alambres, clavos, tornillos, barras, varillas, etc. Los aceros dulces presentan una buena soldabilidad y no suelen presentar problemas; se les practica un ligero calentamiento en caso las temperaturas sean bajas, también cuando el espesor de las chapas sea mayor a los 25 mm”.

#### ***2.2.1.2.3. Aceros HARDOX***

“El acero Hardox se destaca, porque tiene una elevada resistencia a la abrasión, y con una dureza nominal mayor de 400 HB, y está entre los 400 a 600 HB. Es un material anti desgaste con alta dureza, concebido para productos y aplicaciones que requieren resistencia al desgaste de la mano de buenas propiedades para el conformado en frío; un rasgo característico de este material es la excepcional combinación de tenacidad y dureza” de acuerdo a (Vélez Chavira, 2016).

El original Hardox® es producido por la compañía nórdica SSAB, especialistas en el desarrollo y producción de acero de alta resistencia. Hace 40 años Hardox® implanto el estándar de extrema resistencia al desgaste e impacto, y es indicador internacional, se fabrica con durezas de 350 a 670 HB. Este acero incrementa la performance operacional y eficiencia de carga de equipos minero industriales.

Trabaja en condiciones duras de desgaste sin distorsiones y los componentes no se deterioran durante su uso respecto a otros productos



Respecto a los aceros al manganeso, este acero se puede mecanizado, perfilado, y ser unidos con máquinas e infraestructura de fábrica convencionales y el seccionamiento con equipos de corte se realiza sin producción de grandes humos

De hecho, “Ni la roca, la arena, el carbón, los minerales, el metal de desguace ni otros materiales hostiles consiguen afectar en gran medida a las chapas antidesgaste Hardox®. Gracias a la combinación de gran dureza, resistencia y tenacidad, el acero Hardox® es el acero resistente al desgaste perfecto para alargar la vida útil de equipos, piezas y estructuras usados en los entornos más difíciles” (*Soldadura hardox*, 2016).

#### **2.2.1.2.4. Aceros HARDOX 450**

Según, (Vélez Chavira, 2016) “El acero Hardox 450 es un acero que se caracteriza porque posee una elevada resistencia a la abrasión, además de una dureza nominal de 450 HB, que en realidad oscila entre los 425 a 475 HB. Debido a esto, está diseñado para aplicaciones donde es necesario mantener dichas propiedades. Es un material anti desgaste con alta dureza, concebido para productos y aplicaciones que requieren resistencia al desgaste de la mano de buenas propiedades para el conformado en frío; un rasgo característico de este material es la excepcional combinación de tenacidad y dureza”.

- **Composición química**

“Las propiedades que posee este material son debido a su composición química, donde el Mn juega un papel muy importante para lograr las propiedades que caracterizan a este acero, ya que está previsto para utilizarse donde se requiera resistencia a la abrasión combinada con otras propiedades” (Vélez Chavira, 2016).

**Tabla 1**

Composición química (% e.p.) del acero Hardox 450 (análisis térmico)

Grade	C (máx. %)	Si (máx. %)	Mn (máx. %)	P (máx. %)	S (máx. %)	Cr (máx. %)	Ni (máx. %)	Mo (máx. %)
CR Sheet	0.19	0.30	1.50	0.020	0.005	0.10	0.10	0.05
Sheet & Plate	0.26	0.70	1.60	0.025	0.010	1.40	1.50	0.60

Nota. Empresa SSAB - Hardox Wear Plate., <https://www.ssab.com/es-mx/products/brands/hardox> (anexo 3).

“Una combinación única de sustancias de aleación optimiza las propiedades mecánicas de la chapa antidesgaste Hardox. Esta combinación controla las temperaturas de precalentamiento y entre pasadas del acero Hardox durante la soldadura, y se puede utilizar para calcular el carbono equivalente. El carbono equivalente se expresa normalmente como CEV o CET, de acuerdo con las ecuaciones que se indican en la tabla 2. (Soldadura hardox, 2016).

**Tabla 2**

Contenido en carbono equivalente CET (CEV)

Espesor	Chapa							
	laminada en frío 0.8 – 2.10	Chapa 0.08 – 0.31	placa 3.2 – 4.9	placa 5.0 – 9.9	placa 10.0 – 19.9	placa 20.0 – 39.9	placa 40.0 – 80.0	placa 80.1 130.0
Max CET (CEV)	0.36 (0.49)	0.35 (0.48)	0.37 (0.48)	0.38 (0.49)	0.39 (0.52)	0.41 (0.60)	0.43 (0.74)	0.41 (0.67)
CET(CEV) tip	0.32 (0.41)	0.26 (0.39)	0.29 (0.39)	0.33 (0.45)	0.36 (0.48)	0.38 (0.56)	0.38 (0.61)	0.39 (0.64)
$CET = C + \frac{Mn+Mo}{10} + \frac{Cr+Cu}{20} + \frac{Ni}{40}; \quad CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15}$								

Nota. Empresa SSAB - Hardox Wear Plate., <https://www.ssab.com/es-mx/products/brands/hardox> (anexo 3).

- **Propiedades mecánicas**

De acuerdo a (Vélez Chavira, 2016), “El acero Hardox 450 es un material que tiene alta resistencia a la abrasión, diseñado para aplicaciones donde las demandas sobre esta resistencia en

combinación con buenas propiedades son demasiado importantes. Este acero presenta muy buena soldabilidad. Un rasgo característico de este material es su excepcional combinación de tenacidad y dureza, lo que prolonga considerablemente la duración del producto final. considerablemente la duración del producto final”. Las propiedades mecánicas se muestran en la tabla 3.

**Tabla 3**  
*Propiedades mecánicas para un acero Hardox 450.*

Grade	Espesor	Dureza	Resistencia a la tracción (MPa) garantizado	Límite de elasticidad típico (MPa)	
				No garantizado	
Hardox 450 Cr sheet	0.03 – 0.08	425	1370 - 1600	1250	
Hardox 450 sheet	0.08 – 0.31	425 - 475	N/A	1250	
Hardox 450 plate	0.13 – 3.15	425 - 475	N/A	1250	
Hardox 450 plate	3.15 – 4.06	410 – 475	-	1250	
Hardox 450 plate	4.06 – 5.12	390 - 475	N/A	1250	

Nota. Empresa SSAB - Hardox Wear Plate., <https://www.ssab.com/es-mx/products/brands/hardox>.

- **Aplicaciones**

“El acero Hardox 450 tiene muchas aplicaciones en la industria. Dentro de sus aplicaciones más destacadas se encuentran cajas de volteo, contenedores, trituradoras, cribas, tolvas, alimentadores dosificadores, elevadores volcadores para minas, cucharas, cuchillas para cucharas, transportadores, cuchillas de corte, piñones y poleas para cadenas, máquinas cargadoras, camiones, máquinas de movimiento de tierras, excavadoras, tuberías sometidas a desgaste, transportadores de tornillo sin fin, prensas, etc.”; según lo mencionado por (Vélez Chavira, 2016).

**Figura 2***Chapa gruesa de Hardox 450*

Nota. <https://www.damatech.com/en/Prehardened-steel/Hardox/Hardox-400/ArtMID/511/ArticleID/2/mediaid/210>.

Hardox® es un acero destinado a maximizar el rendimiento antidesgaste en equipos y maquinarias construidas con el material, “Con su combinación de alta dureza, excelente resistencia y gran tenacidad, Hardox puede utilizarse en una variedad de aplicaciones, desde la recolección forestal hasta la preparación del suelo, pasando por los trabajos de asfaltado” (Soldadura hardox, 2016). Como menciona (Soldadura hardox, 2016). “el desgaste por deslizamiento y por impacto no son los comunes, también está el desgaste por presión. Las cucharas de las maquinas mineras construidas con Hardox 450/500/550 soportan la situación de desgaste (ver figura 3). En la tolva de vehículos de descarga, Hardox 500/550/600 representa la elección adecuada para soportar un entorno difícil.

### Figura 3

*Tolva y cucharas fabricadas con acero Hardox*



Nota. Bagant & Cat Com. <https://www.bagant.com/index-mobile.php?idSeccion=576>

#### 2.2.2. Transformaciones de las aleaciones Fe-C

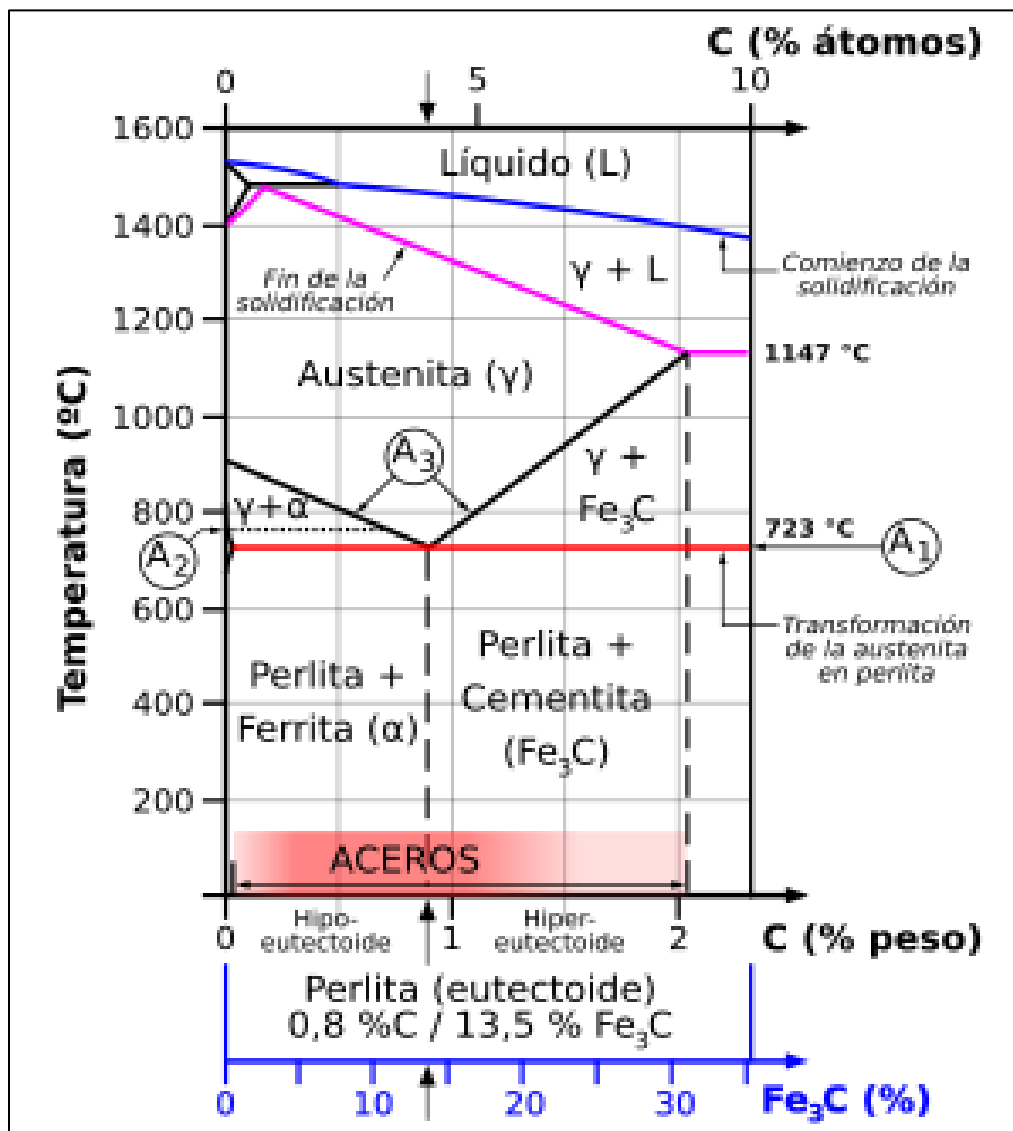
La presencia del estado eutectoide en las aleaciones Fe-C, permite clasificar en tres categorías de aleaciones de acero (ver figura 4):

- Aceros eutectoides (contenido de C de 0,80%).
- Acero hipereutectoides (contenido de C mayor de 0,80%).
- Aceros hipoeutectoides (contenido de C menor de 0,80%).

“Este campo de composiciones muestra una transformación para la composición hipoeutectoide, menor a 0.8% C, si bien la magnitud de la transformación eutectoide tiene un crecimiento lineal con el contenido de carbono. En figura 4, se identifica esta transformación por los cristales oscuros, perlita, cuya proporción también es creciente con la composición” según las expresiones de (Litoral, s/f, 2005).

Figura 4

Zona de los aceros del diagrama hierro-carbono



Nota. PNGWING, <https://www.pngwing.com/es/free-png-puqgb>

### 2.2.2.1. Transformaciones en la microestructura de tipos de acero

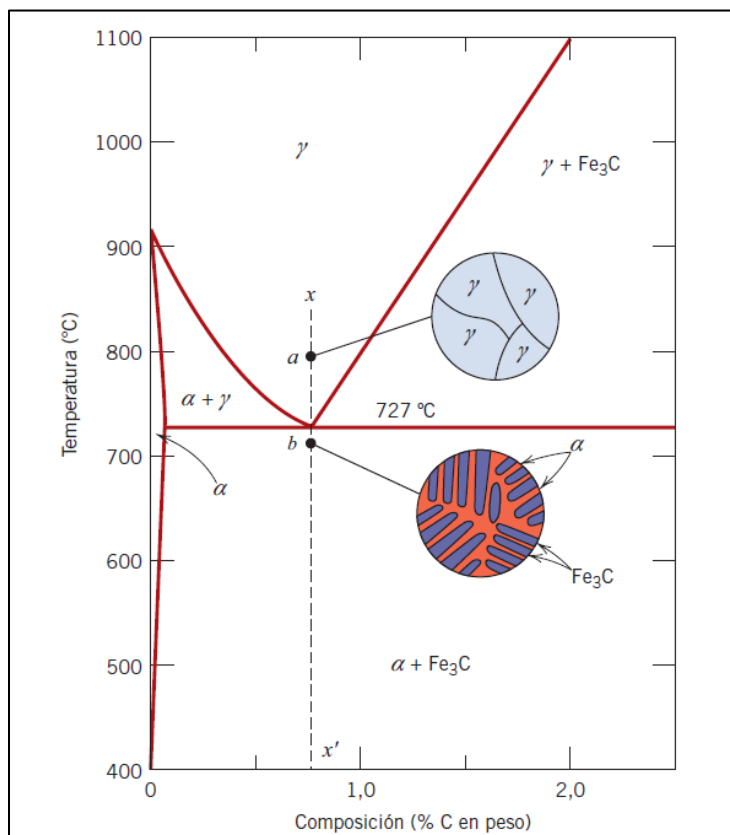
- **Transformaciones eutéctoides**

De acuerdo con (Callister & Rethwisch, 2016), “El enfriamiento de una composición eutéctica (0,76% C en peso) desde los 800 °C de la región monofásica  $\gamma$  (punto *a* de la Figura 5)

equivale a descender por la vertical  $xx'$ . Inicialmente la aleación de composición 0,76% C en peso tiene la microestructura austenítica indicada en la figura 5. Al enfriar no ocurre ningún cambio hasta alcanzar la temperatura eutectoide (727 °C). En el punto  $b$ , por debajo de esta temperatura, la austenita se transforma. La microestructura del acero eutectoide enfriado lentamente a través de la temperatura eutectoide, consiste en capas o láminas alternas de las dos fases ( $\alpha$  y  $Fe_3C$ )” que se forman simultáneamente durante la transformación. “En este caso, la relación de los espesores de las dos capas es de 8 a 1. La microestructura esquematizada en el punto  $b$  de la figura 5 se denomina perlita porque tiene la apariencia de la madreperla al observarse microscópicamente a pocos aumentos” menciona (Allauca P., 2011).

### Figura 5

*Transformaciones de las microestructuras de un acero al carbono eutectoide*



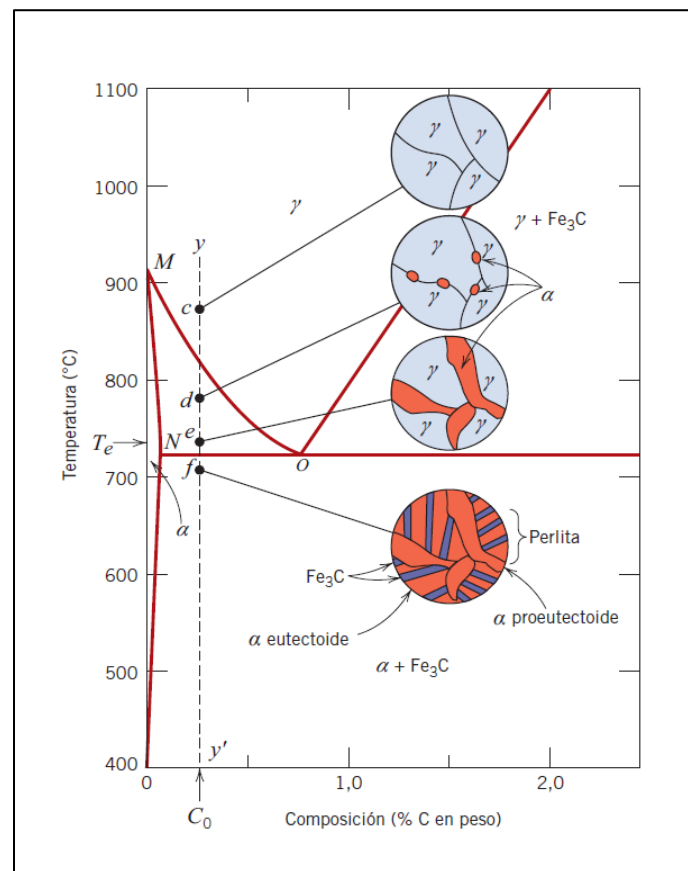
Nota. Callister & Rethwisch, (2016), p.366.

- **Transformaciones hipoeutectoides**

“Una aleación de composición  $C_0$  a la izquierda del eutectoide, entre 0,022% y 0,76% C en peso se denomina acero hipoeutectoide (*menos que eutectoide*). El enfriamiento de una aleación de esta composición está representado en el descenso a lo largo de la vertical  $yy'$  de la figura 6. Hacia los 875 °C, punto  $c$ , la microestructura consta enteramente de granos de fase  $\gamma$ , como está esquematizado en la figura 6. En el punto  $d$ , cerca de 775 °C, en la región bifásica  $\alpha + \gamma$ , estas fases coexisten, según indica el esquema microestructural. La mayoría de las partículas  $\alpha$  se generan en los límites de grano de la fase  $\gamma$  original” (ALLAUCA P., 2011).

**Figura 6**

*Transformaciones de las microestructuras de un acero al carbono hipoeutectoide*



Nota. Callister & Rethwisch, 2016, p.368.

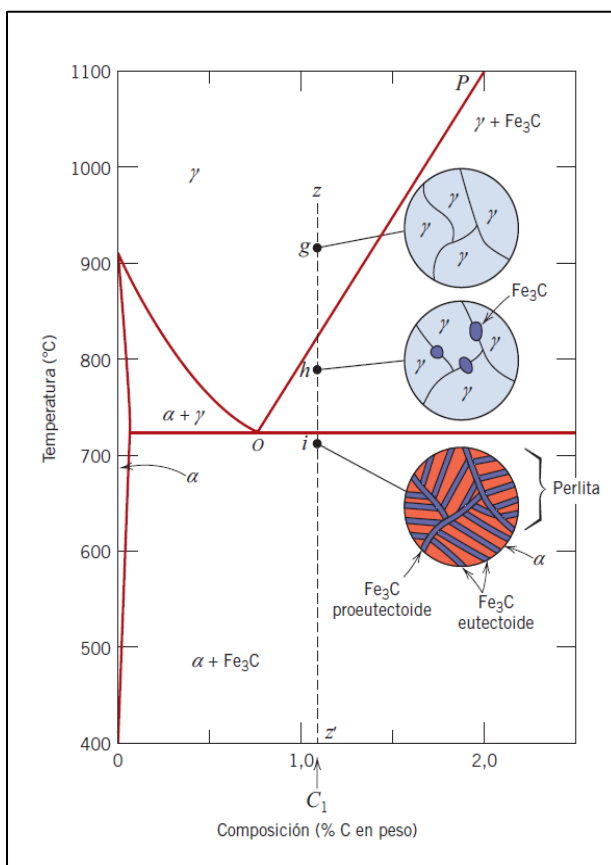


Según (Callister & Rethwisch, 2016), “Las composiciones de las fases  $\alpha$  y  $\gamma$  se determinan utilizando el segmento de reparto, cuyos extremos coinciden con 0,020 y 0,40% C en peso, respectivamente. Cuando se enfría un acero a través de la región de fases  $\alpha + \gamma$ , la composición de la ferrita varía según la línea  $MN$ , del límite de fases  $\alpha - (\alpha + \gamma)$ , y se enriquece ligeramente en carbono”.

“Enfriando desde el punto  $d$  al  $e$ , muy próximo al eutectoide pero dentro de la región  $\alpha + \gamma$ , se aprecia un incremento de la fracción de fase  $\alpha$  en la microestructura. Al descender la temperatura al punto  $f$ , justo por debajo del eutectoide, toda la fase  $\gamma$  presente a la temperatura  $T_e$ , y con la composición del eutectoide, se transforma en perlita” (Callister & Rethwisch, 2016).

### Figura 7

*Transformaciones de las microestructuras de un acero al carbono hipereutectoide*



Nota. Callister & Rethwisch, 2016, p.370.

- **Transformaciones hipereutectoides.**

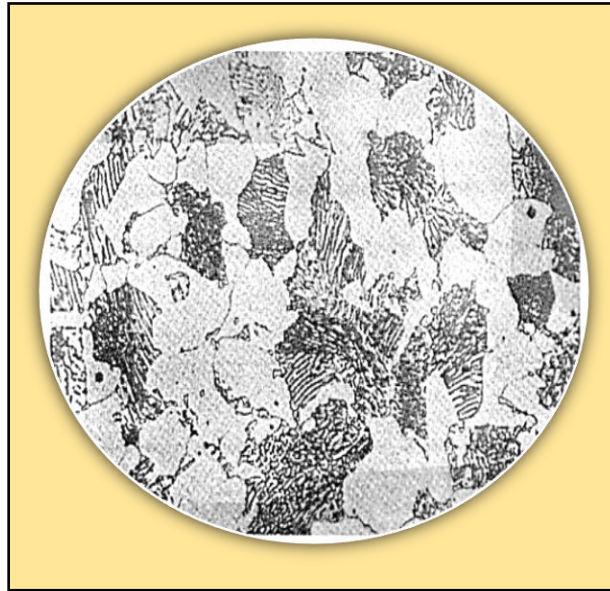
Como dijo (Callister & Rethwisch, 2016) “El enfriamiento de aceros al carbono de composición comprendida entre 0,76% y 2,14% C en peso, desde el campo  $\gamma$ , origina transformaciones y microestructuras análogas que dan como resultado aceros hipereutectoides”. “El acero de composición  $C_I$  de la figura 7 se enfría descendiendo por la vertical  $zz'$ . En el punto  $g$  sólo aparecen granos de fase  $\gamma$  y composición  $C_I$ . Al enfriar a lo largo del campo de fase  $\gamma + Fe_3C$ ” (ALLAUCA P., 2011); entonces, “la fase cementita va creciendo en los límites iniciales de grano  $\gamma$ , como indica el punto  $d$  de la figura 6. Esta cementita se denomina cementita proeutectoide, porque se forma antes de la reacción eutectoide. La composición de la austenita permanece constante (6,70% C) al variar la temperatura. Sin embargo, la composición de la austenita se desplaza a lo largo de la línea  $PO$  antes del eutéctico. Al descender por debajo de la temperatura eutéctica, toda la austenita remanente de composición eutectoide se transforma en perlita. De este modo, la microestructura resultante consiste en perlita y cementita proeutectoide como microconstituyentes” (Callister & Rethwisch, 2016). (Ver figura 5).

#### 2.2.2.2. Microestructura de un acero hipoeutectoide

La figura 8, muestra una microestructura hipoeutectoide típica de un acero de 0,38 %C. Estos aceros presentan microestructuras de ferrita proeutectoide y perlita al ser enfriadas lentamente desde la fase austenítica. la perlita son láminas intercaladas de cementita y ferrita eutectoide (formada después de la temperatura crítica  $-727^\circ\text{C}$ ), mientras que la ferrita proeutectoide está formada como matriz alrededor de las perlitas antes de la temperatura crítica. Las zonas blancas son la ferrita proeutectoide. A mayor porcentaje de carbono se tendrá menor porcentaje de ferrita proeutectoide, y se incrementará el porcentaje de perlita. La mayor parte de ferrita se forma en los bordes de grano de la austenita original.

**Figura 8:**

*Microestructura de acero hipoeutectoide*



Nota. *Reed-Hill, (1971); p. 578.*

### **2.2.3. Diagramas Tiempo, Temperatura y Transformación (TTT)**

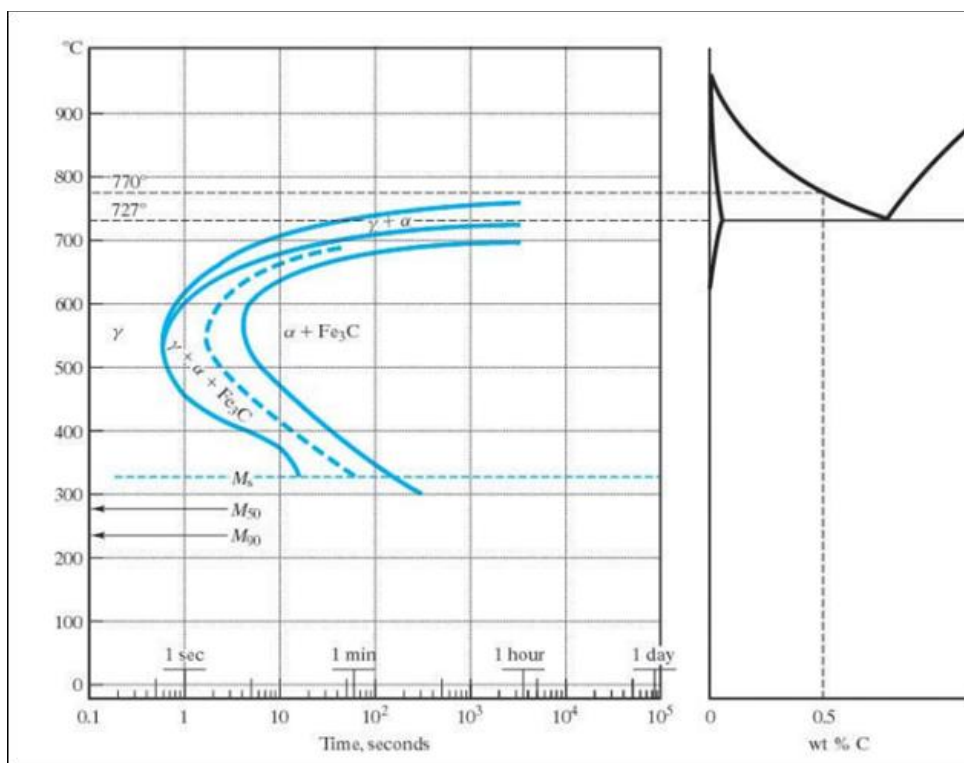
Según (Dayana, 2016), “En condiciones de enfriamiento lento los cambios de fase que tienen lugar en los aceros pueden predecirse mediante el diagrama de equilibrio Fe-C. Pero si las transformaciones no se producen en equilibrio se obtendrán otras fases y constituyentes, que adquieren gran importancia cuando se trata de modificar las propiedades mediante los tratamientos térmicos”. “Las estructuras que aparecen según las condiciones a la que ocurre la transformación alotrópica desde la austenita, se representan en los diagramas temperatura/tiempo/transformación o diagramas TTT. En 1930 Bain y Davenport idearon un diagrama que llamaron diagrama de temperatura, tiempo, transformación (TTT), también conocido como diagrama de transformación isotérmica o curva en C” (Litoral, s/f, 2005)

### 2.2.3.1. Diagramas TTT para un acero hipoeutectoide

El diagrama de tratamiento térmico para el acero hipoeutectoide sin difusión muestra en la figura 9 la formación de microestructuras de martensita, en donde se aprecia  $M_s$  que representa el inicio de transformación a martensita,  $M_{50}$  indica el 50 por ciento de la transformación y  $M_{90}$  el 90 por ciento de la transformación en martensita y el 100 por ciento de martensita no se alcanza a temperatura ambiente. Este tipo de acero se considera hipoeutectoide cuando su porcentaje de carbono es menor al 0,8 % de carbono.

**Figura 9:**

*Transformación isotérmica: acero hipoeutectoide*



Nota. *Reed-Hill, (1971), p. 580.*

Obsérvese, que estas líneas son asintóticas (a tiempos largos) a las líneas a temperatura constante hechas sobre el diagrama de la figura 9, para pasar a través de las temperaturas a las cuales las dos aleaciones dadas son capaces de tomar primero los constituyentes proeutectoides (ferrita y cementita respectivamente) en enfriamiento muy lento. También, en la línea *mn* corresponde a la iniciación de la precipitación de la cementita.

“A continuación por debajo de la temperatura Eutectoide, comienzan a formarse las colonias de perlita; cuando la temperatura es elevada, los granos son grandes y las láminas gruesas. A temperaturas más bajas, la perlita se hace más fina, y cerca de la nariz se forma troostita, un agregado muy fino de cementita y ferrita” expresado por (Dayana, 2016).

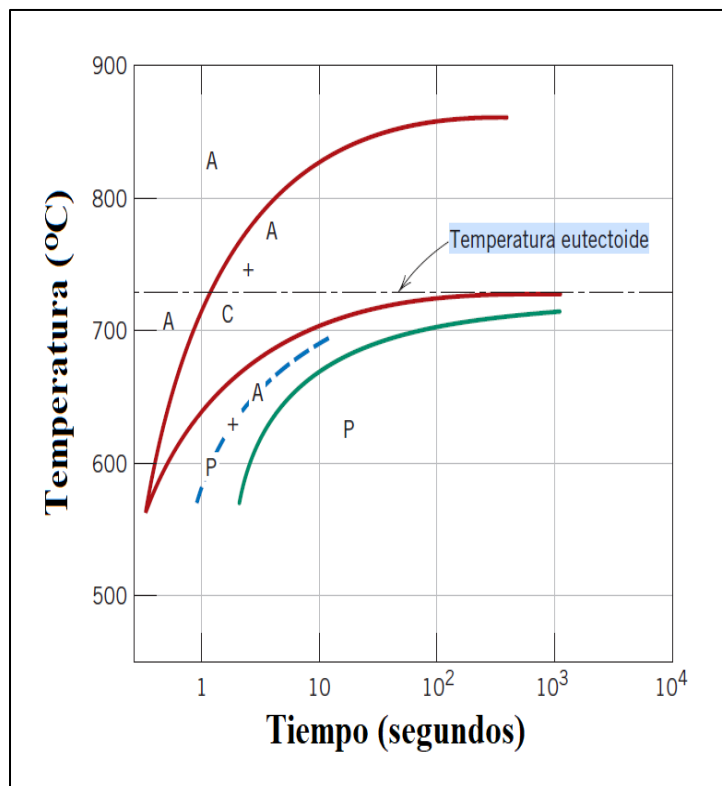
### **2.2.3.2. Diagramas Curvas de Enfriamiento Continuo (CCT)**

“A nivel industrial, los tratamientos térmicos en su gran mayoría implican un enfriamiento continuo del material, lo que lleva a una limitación en el uso de los diagramas TTT, ya que no proporcionan información correcta en el caso de enfriamientos continuos. De aquí surge la necesidad de tener diagramas de transformación con enfriamiento continuo o curvas CCT (Continuos Cooling Transformation). El método más usual y más directo para obtener las curvas CCT es por dilatometría. La representación gráfica de las transformaciones en condiciones de enfriamiento continuo, se realiza en un diagrama temperatura contra el logaritmo del tiempo” (Belzunce, 2001). Por la dependencia de las propiedades mecánicas con la microestructura del material, estos diagramas permiten analizar de manera visual esa relación cuando se realiza procesos de enfriamiento continuo.

En la Figura 10 se observa un diagrama de transformación isotérmica de un acero hipereutectoide con 1.13% de carbono en peso: A, austenita; C, cementita proeutectoide; P, perlita, también, se aprecia la curva correspondiente a la transformación proeutectoide.

**Figura 10:**

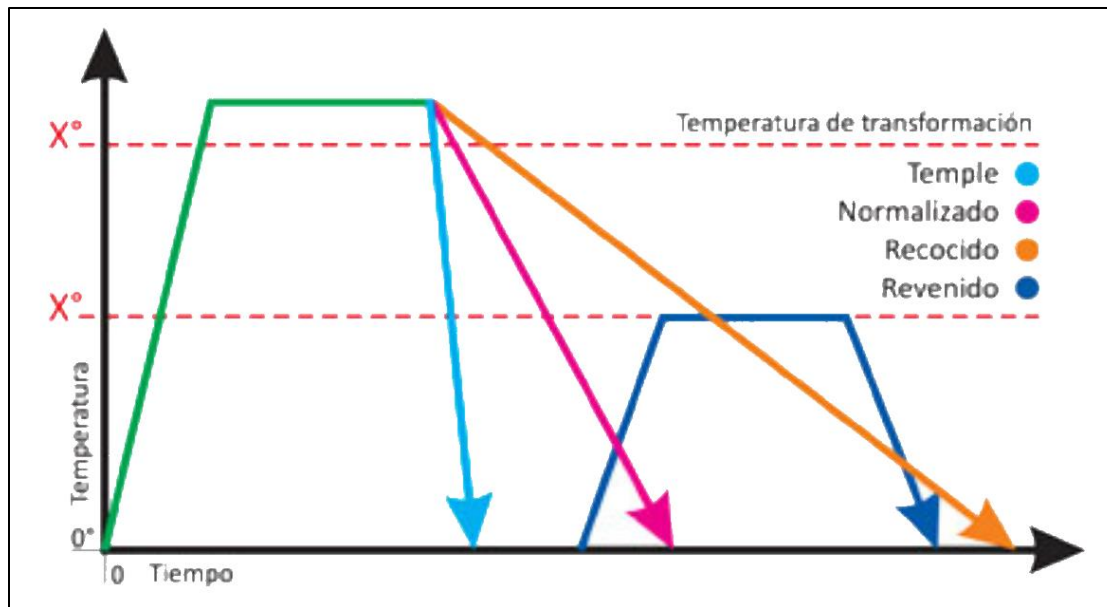
*Diagrama de transformación isotérmica de un acero (1.13 %C).*



Nota. Callister & Rethwisch, (2016), p. 402.

#### 2.2.4. Tratamiento térmico del acero

El propósito del tratamiento térmico en un acero, es provocar los cambios deseados en la estructura metalúrgica, constitución y en sus propiedades mecánicas, “Los tratamientos térmicos son operaciones de calentamiento y enfriamiento cuidadosamente controlados, y que se aplican a un metal o aleación en estado sólido, con el fin de obtener ciertas propiedades deseadas para su empleo” (Díaz Del Castillo, 2015, p. 112).

**Figura 11:***Tratamientos térmicos en aceros*

Nota. Steemit, Gerardo Alfred, (2017). <https://steemit.com/stem-espanol/@gerardoalfred/tratamientos-terxicos-en-una-probeta-de-acero>

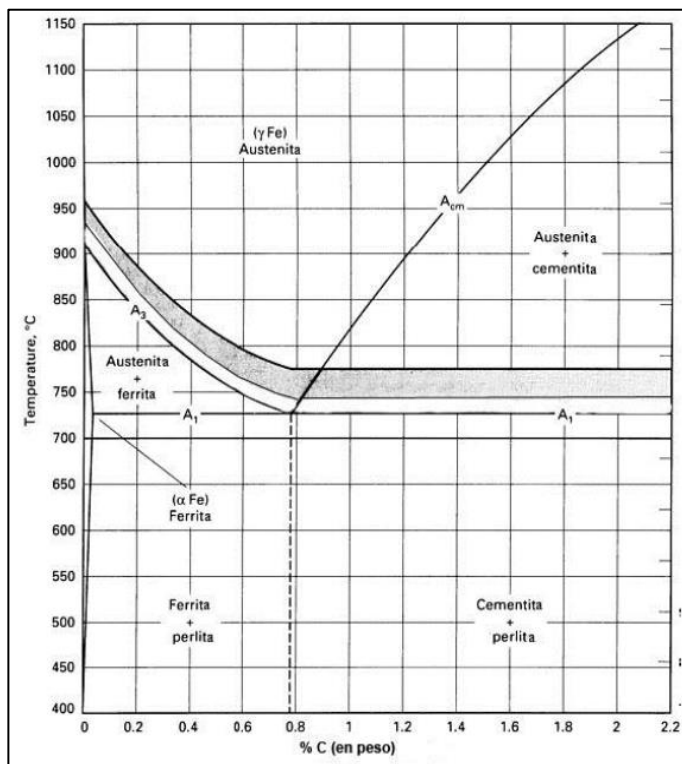
Como tratamientos térmicos principales aplicados a un acero; se consideran el temple, revenido, recocido y normalizado como se muestra en la figura 11; a su vez cada uno de ellos se subclasifican en otras variedades de tratamientos particulares. Para propósitos de este trabajo, sólo se considera el temple y revenido ordinario. Para un correcto tratamiento y durante la fase de calentamiento del acero, la temperatura debe ser controlada exactamente mediante pirómetros digitales. La duración de la permanencia a cierta temperatura está relacionada con la velocidad con la cual se transforma la estructura del acero y depende del tipo y de las dimensiones de la pieza tratada.

### 2.2.5. Temple

El temple ordinario o directo tiene como propósito esencial obtener sobre la pieza de acero tratada una dureza elevada y un aumento de la resistencia, esto se logra con el aumento de la presencia de la martensita en el acero, esta fase microestructural es el componente más duro de los aceros de baja aleación. Para ello es necesario un enfriamiento energético, en relación con la velocidad crítica de temple considerada como la velocidad mínima con la cual puede ser enfriado el material con el fin de lograr el temple sobre éste.

**Figura 12:**

*Temperaturas de Austenización para el temple*



Nota. *Metalografía y Tratamientos Térmicos*, (p. 01), por UTNA, s/a.

Para los aceros hipoeutectoides el temple se realiza calentando el material a temperaturas de 20 a 50 °C por encima de A<sub>3</sub> y para aceros hipereutectoides por encima de A<sub>cm</sub>. Se mantiene a dichas temperaturas durante un cierto tiempo que permita la formación de la estructura austenítica



homogénea, luego se somete a enfriamiento con velocidades relacionadas con el tipo y dimensiones del material. Durante el calentamiento, se debe evitar temperaturas altas por encima de las críticas para evitar la formación de granos cristalinos excesivamente gruesos lo que causaría en el enfriamiento una alta fragilidad del acero y “la presencia de grietas debido a las dilataciones térmicas y a los cambios de volumen que sufre el acero paralelamente con las transformaciones de microestructuras” (WordPress.com, 2022).

En la figura 12, se presenta la franja de color gris correspondiente a las temperaturas utilizadas para la austenización en el diagrama hierro-carbono.

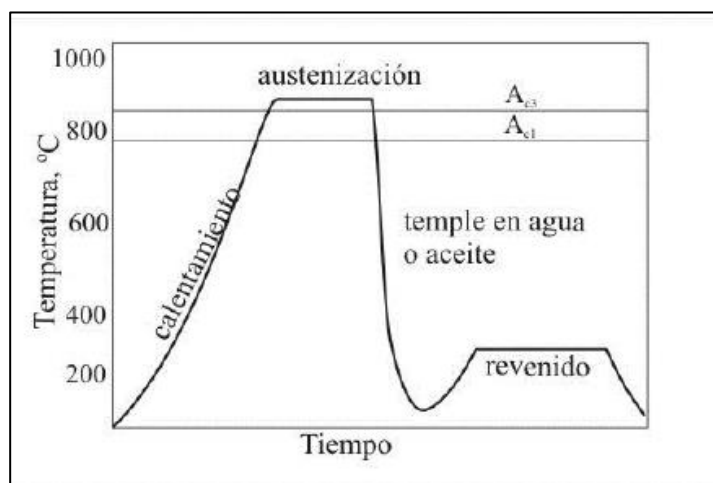
#### **2.2.5.1. Calentamiento**

La primera etapa del temple es calentar el acero hasta la temperatura de austenización. Se calienta la pieza de acuerdo al tipo de acero del que está compuesta, a una temperatura por encima del punto de transformación  $A_3$  o  $A_1$ .

“El proceso de calentamiento hasta la temperatura de temple es muy importante. El calentamiento debe ser lento hasta los 450-500°C, a partir de esta temperatura se aumenta la velocidad de calentamiento hasta la temperatura de temple. Si la pieza es grande, el calentamiento debe ser lo más homogéneo posible en el exterior y en el núcleo de la pieza. Un gradiente alto de temperatura entre el exterior y el interior de la pieza provocaría grietas lo que puede aparecer durante o después del templado, esto, debido a las dilataciones térmicas y a los cambios de volumen que sufre el acero paralelamente con las transformaciones de microestructuras” (WordPress.com, 2022). En la figura 13, se muestra en la porción inicial la curva de calentamiento en el temple ordinario.

**Figura 13:**

*Curva de calentamiento en el temple ordinario*



Nota. *Metalografía y Tratamientos Térmicos, (p. 01), por UTNA, s/a.*

El valor de la temperatura de calentamiento está en función al material y al medio de temple a utilizar, se considera de 20 a 30 °C más elevada cuando se temple en aceite que en agua. El tiempo de calentamiento para la disolución de los constituyentes depende de las dimensiones y forma de la pieza y de la estructura previa (UTNA, s/a).

### 2.2.5.2. Austenización

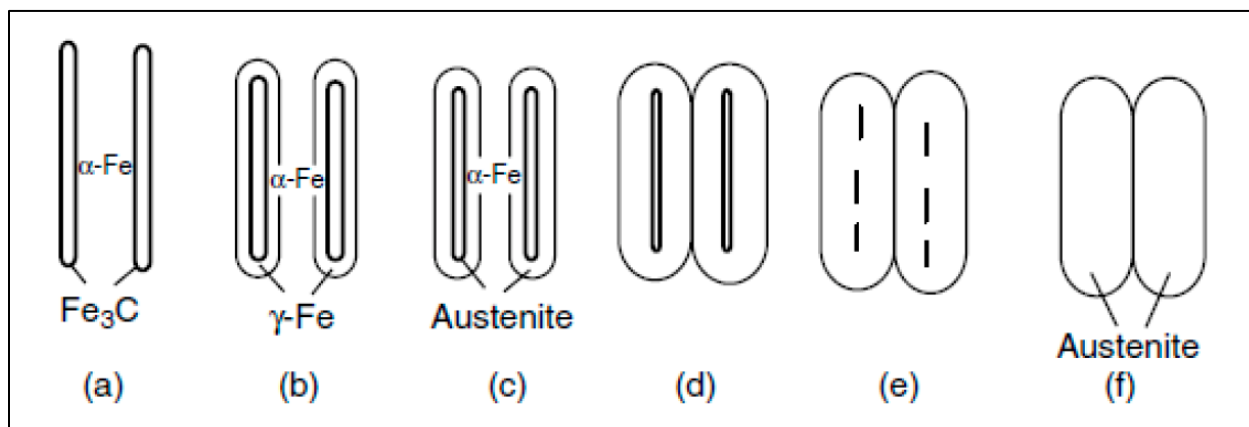
Luego del calentamiento hasta una temperatura superior a la crítica  $A_3$ , se procede a la austenización isotérmica de la estructura inicial del acero. “Para los aceros hipoeutectoides con menos de 0.8 % de carbono, se mantiene el acero a tal temperatura” (Smith, William F.; Hashemi, 2006) durante un cierto tiempo suficiente para la formación de una estructura austenítica homogénea, ver figura 14.

El mecanismo de formación de la austenita desde un acero eutectoide no aleado se muestra en los esquemas de la figura 14. A temperatura ambiente, las placas de cementita ( $Fe_3C$ ) de la perlita están en contacto directo con la ferrita ( $Fe-\alpha$ ), figura 14a. Los átomos de carbono de la

cementita tienden a difundirse en la red de ferrita. Cuanto más alta es la temperatura, mayor es esta tendencia. Al calentar a la temperatura  $A_{c1}$  ( $723^{\circ}\text{C}$ ), se produce la transformación de la ferrita en austenita ( $\text{Fe}-\gamma$ ) y comienza inmediatamente alrededor de las placas de cementita, figura 14b. Después de eso, las placas de cementita comienzan a disolverse dentro de la austenita recién formada, haciéndose más y más delgadas, figura 14c, y 14d. De modo que se dan dos procesos simultáneos: la formación de granos de austenita a partir de ferrita y la disolución de placas de cementita en la red austenítica. Los experimentos han demostrado que el proceso de transformación de ferrita en austenita termina antes que la cementita se haya disuelto completamente. Esto significa que después de que toda la ferrita se haya transformado en austenita, pequeñas partículas de cementita permanecerán dentro de los granos de austenita tal como se muestra en la figura 14e, finalmente se obtiene la austenita completa, ver figura 14f.

**Figura 14:**

*Transformación de la estructura perlítica a Austenita*



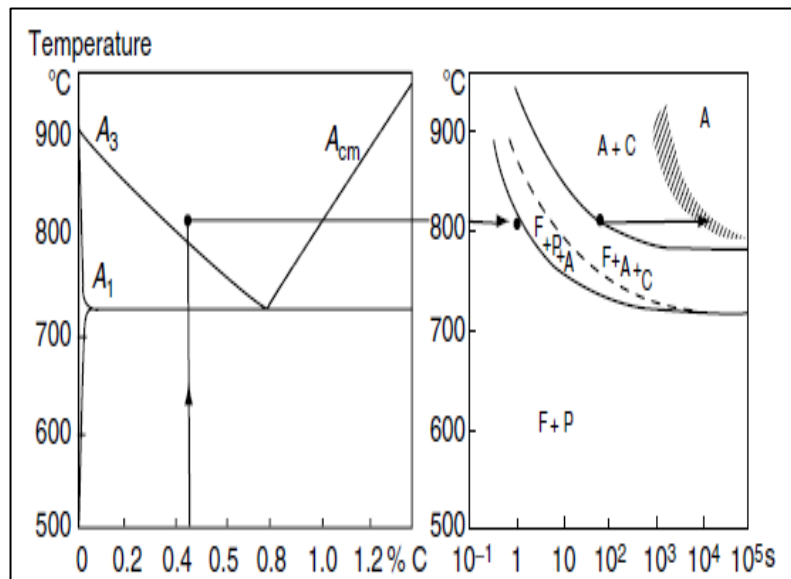
Nota. *Steel Heat Treatment Handbook* (p. 356) por Taylor & Francis Group, 2007.

En la figura 15, se muestra que para un acero hipoeutectoide de 0.42 % C, a una temperatura de austenización de  $810^{\circ}\text{C}$ , la transformación de perlita en austenita comienza en aproximadamente 1 segundo. En unos 5 segundos la perlita se ha transformado y la estructura

consta de ferrita, austenita y cementita. Aproximadamente 1 min después, el carbono se ha difundido a la ferrita, que se ha transformado así en austenita. Sin embargo, quedan partículas residuales de cementita y se tarda unas 5 horas esta temperatura en disolverlas por completo.

**Figura 15:**

*Transformación austenítica de un acero hipoeutectoide*



Nota. *Steel Heat Treatment Handbook* (p. 359) por Taylor & Francis Group, 2007.

### 2.2.5.3. Enfriamiento

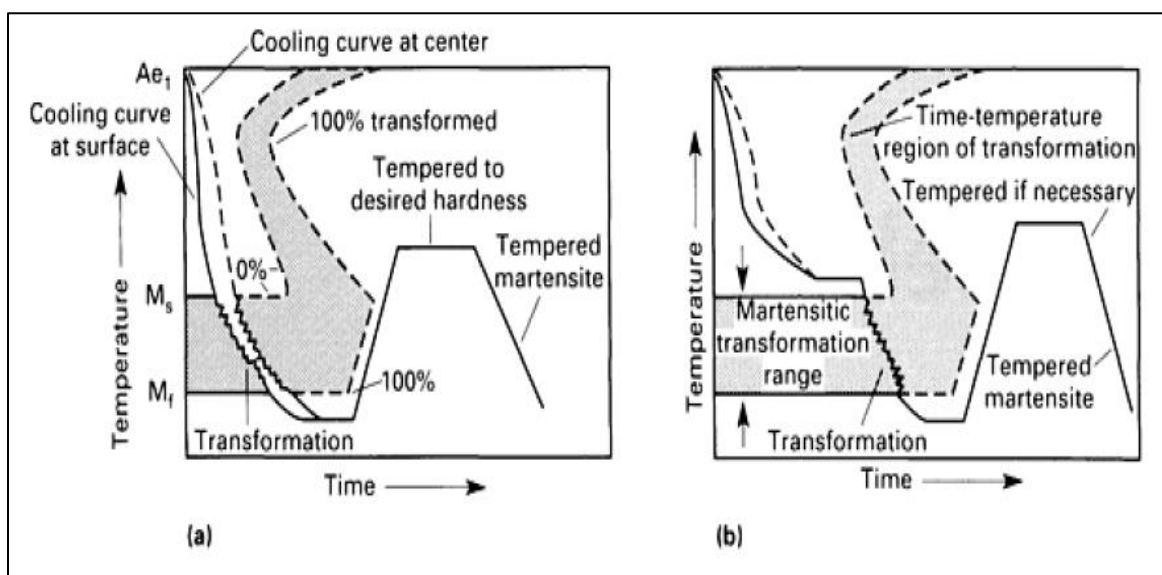
En la etapa de enfriamiento normalmente se utiliza el agua o aceite, a temperatura ambiente, el enfriamiento en agua es más enérgico que en aceite. En casos particulares se pueden emplear medios de enfriamiento más enérgicos constituidos por los mismos líquidos los cuales se mantienen agitados o se preparan soluciones de agua con salmuera o sustancias causticas, en el caso del aceite con soluciones de polímeros. También se utilizan medios de enfriamiento menos enérgicos lo que se logra aumentando la temperatura del baño de enfriamiento, o manteniéndolo

cerrado, o utilizando sales fundidas a distintas temperaturas, o el uso del plomo fundido. Cuando la austenización se realiza en vacío, se emplean enfriadores gaseosos como el helio, argón y nitrógeno.

“La profundidad de la dureza en una dimensión dada de la pieza de trabajo está determinada por la composición química del acero, el tamaño del grano austenítico establecido durante el tratamiento de austenización y la velocidad de enfriamiento (ver figura 16). La selección juiciosa del medio de enfriamiento es crítica para obtener propiedades mecánicas óptimas, evitar grietas por enfriamiento rápido y minimizar la distorsión. La selección de un medio de temple depende de la templeabilidad de la aleación en particular, el grosor y la forma de la sección involucrada y las velocidades de enfriamiento necesarias para lograr la microestructura deseada”. (ASM International, 1998, p. 35).

**Figura 16:**

*Velocidades de enfriamiento y gradientes de temperatura: temple y revenido*



Nota. *ASM Metals Handbook, Heat Treating Volume IV (p. 162) por (ASM International, 1998).*

(a): *Temple y revenido convencionales que utilizan agua, aceite o polímeros.*

(b): *Temple y revenido que utiliza sal en solución o aceite caliente.*

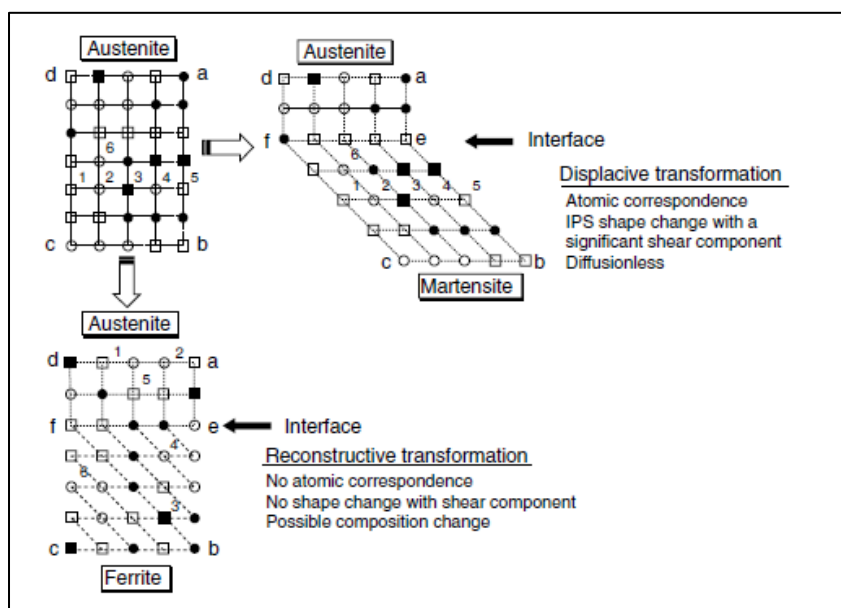
### 2.2.5.4. Transformación martensítica

“En aceros de baja aleación, el cambio de fase fuera de equilibrio más importante como consecuencia de un enfriamiento enérgico es de austenita en la martensita, esta microestructura es dura y contiene plaquetas de ferrita sobresaturadas de carbono con una alta densidad de dislocaciones, tiene una estructura cristalina tetragonal centrada en el cuerpo con carbono sobresaturado (ver figura 16).

La formación de la martensita a partir de la austenita se considera como una transformación heterogénea que se logra mediante un proceso de nucleación y crecimiento atérmico a través de interfaces deslizantes”. (Taylor & Francis Group, 2007, p. 105).

**Figura 17:**

*Transformación de desplazamiento y reconstructiva*



Nota. *Steel Heat Treatment Handbook* (p. 107) por Taylor & Francis Group, 2007.

El mecanismo de transformación heterogénea, en general implica un movimiento de interfaz deslizante denominado de desplazamiento o un transporte de largo alcance denominado

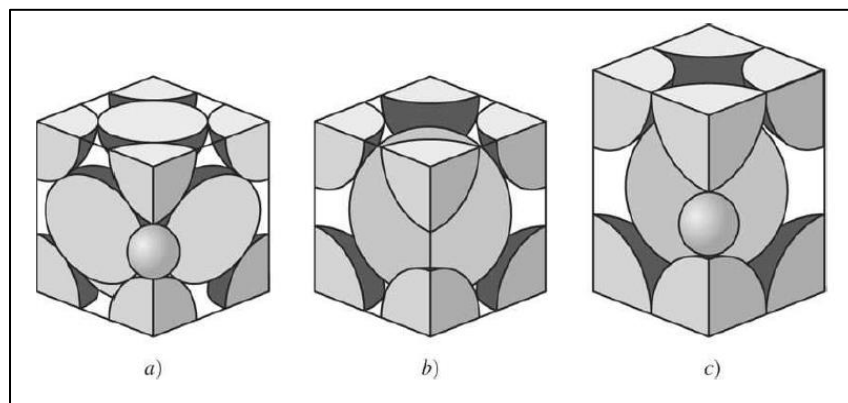
reconstructivo tal como se observa en la figura 17. Para la formación de la martensita, la transformación deslizando involucra un movimiento coordinado de átomos en cambio la transformación reconstructiva de la ferrita comprende la mezcla de átomos a ambos lados de la interfase de la fase principal y del producto a través del proceso de difusión,

En la parte superior derecha de la figura 17, se observa la formación de la martensita cuya red cúbica centrada tetragonal está representada por una configuración de diamante como resultado del desplazamiento lateral atómico de manera coordinada y en paralelo a la interface austenita-martensita ef, esta transformación se produce por cizallamiento o deformación por cortante.

La estructura de la austenita, su cambio alotrópico a ferrita y luego su transformación a martensita a escala atómica se muestran en la figura 18. Esto se debe a la diferencia de diámetros de los átomos de hierro y carbono y a los espacios intersticiales que presenta cada una de las estructuras mencionadas.

**Figura 18:**

*Transformación estructural a escala atómica de la austenita en martensita*



Nota. *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales* (p. 376) por Smith, William F.; Hashemi, 2006.

“El hueco intersticial más grande en la estructura cristalina fcc de hierro y tiene un diámetro de 0.104 nm (figura 18a), mientras que el hueco intersticial más grande en la estructura cúbica

centrada en el cuerpo (bcc) de hierro  $\alpha$  tiene un diámetro de 0.072 nm (figura 18b). Puesto que el átomo de carbono tiene un diámetro de 0.154 nm, se puede acomodar en la solución sólida intersticial en mayor medida en la red de hierro y cúbica centrada en las caras (fcc). Por tanto, como se observa en la figura 18c, los átomos de carbono se acomodan en la celda bcc distorsionando dicha celda en uno de los ejes generando así la estructura tetragonal centrada en el cuerpo (bct)” (Smith, William F.; Hashemi, (2006), p. 376).

### **2.2.6. Revenido**

“El revenido es un tratamiento térmico complementario que se realiza después del temple para disminuir la fragilidad y mejorar la tenacidad del acero, consiste en el calentamiento del acero a una temperatura inferior a la crítica  $A_{c1}$ ; el efecto es la descomposición de la martensita y transformarla según la temperatura, el tiempo de exposición y la velocidad de enfriamiento del material en agua, aceite o al aire libre, ver figuras 13 y 16. Se distinguen tres tipos de revenido: a baja temperatura (200-300 °C) para la eliminación de tensiones, a temperatura elevada (580-630 °C) para aumentar la tenacidad de los aceros templados y el revenido de estabilización dimensional (150 °C).

La martensita obtenida posee elevada dureza, pero tensiones internas alrededor de los átomos de carbono atrapados en la red cristalina del hierro, generan fragilidad en componentes templados. y puede anticipar la fractura en servicio, y también puede fisurarse espontáneamente estando solo almacenadas. Es necesario reducir la fragilidad; para ello se las somete a un calentamiento inmediatamente posterior al temple, denominado revenido” (UTNA, s/a, 2000, p. 14).

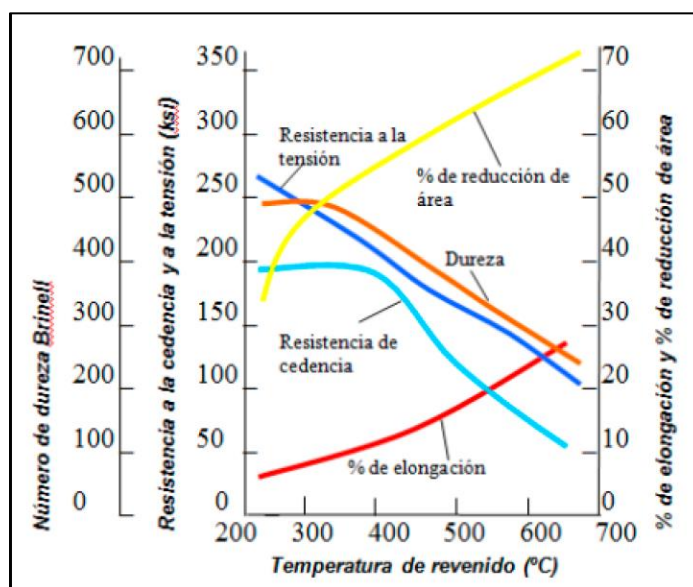
“Los principales procesos que tienen lugar durante el revenido son la precipitación y la recristalización de la martensita. El acero templado tiene una estructura metaestable. Si se somete



a calentamiento, la estructura se acerca más al equilibrio. El carácter de los procesos que ocurren durante el revenido está determinado por tres características principales del acero templado: fuerte sobresaturación de la solución sólida de martensita, alta densidad de defectos de red cristalina (dislocaciones, límites de ángulo bajo y grande, capas intermedias gemelas) y la presencia de austenita retenida” (Taylor & Francis Group, 2007, p. 135).

**Figura 19:**

*Efecto: temperatura de revenido en propiedades mecánicas: acero SAE 1050*



Nota. Laboratorio de Producción (p. 8) por Ingeniería Industrial, 2008.

El objetivo primordial del revenido es proporcionar una estructura dispersa en un rango predeterminado de enfriamiento, consecuentemente tiene un mayor efecto sobre el límite elástico, se disminuye la dureza y se logra una mayor tenacidad. Una mejora de las tensiones de fractura, fluencia y un aumento en su relación pueden tomarse como una medida de la eficiencia del revenido. La eficiencia del revenido depende del área de la sección transversal y del contenido de carbono y elementos de aleación en los aceros.

Durante el revenido, mediante un proceso de difusión se forma la martensita revenida bifásica constituida por una mezcla íntima de ferrita bcc y cementita a partir de la martensita monofásica bct sobresaturada de carbono, en la figura 19, se muestra el efecto de la temperatura de revenido en las propiedades mecánicas del acero.

***Fragilización por revenido.*** Es un fenómeno inherente en muchos aceros, se caracteriza por la reducción de la tenacidad y se da en muchos aceros templados y revenidos. La fragilización por revenido es causada por la presencia de impurezas específicas en el acero como antimonio, fosforó, estaño y arsénico y la fractura de un material por estos elementos tiene una apariencia intergranular

### ***2.2.7. Efectos de los elementos aleantes en el tratamiento térmico de los aceros***

“Los elementos de aleación otorgan una amplia variedad de microestructuras al acero después del tratamiento térmico que da lugar a una amplia gama de propiedades, estos elementos interactúan con el hierro, el carbono y otros elementos del acero, lo que provoca cambios de mejoramiento en sus propiedades mecánicas, químicas y físicas, esto de acuerdo con el propósito designado para una determinada aleación. El nivel de cambio de las propiedades del acero depende de la cantidad de elementos de aleación introducidos y el carácter de su interacción con los elementos principales del acero” (Taylor & Francis Group, (2007), p. 179).

Al agregar elementos de aleación en un acero al carbono, presenta un desplazamiento de los puntos críticos de equilibrio del diagrama hierro-carbono con respecto a la temperatura, y su concentración de carbono.

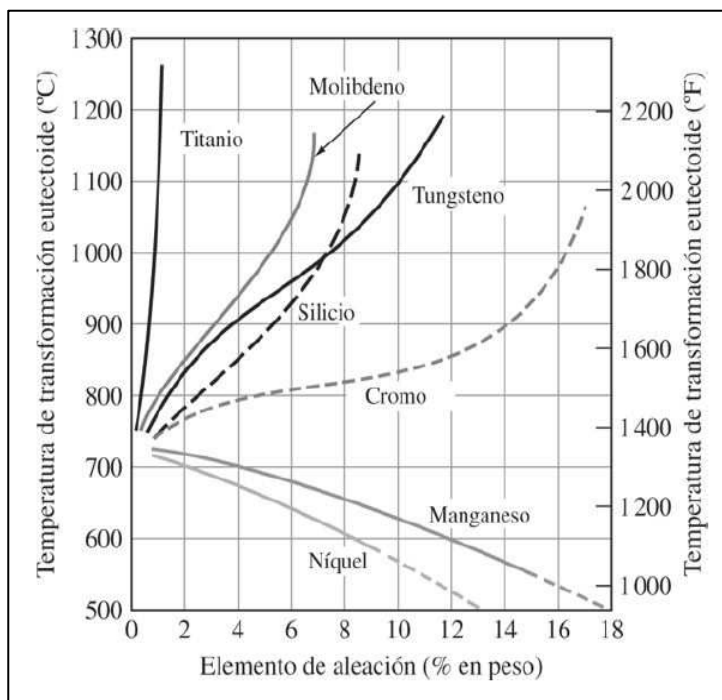
“Los diversos elementos de contenidos en una aleación hacen que la temperatura eutectoide del diagrama de fases Fe-Fe<sub>3</sub>C aumente o disminuya, ver figura 20. Tanto el manganeso como el níquel hacen que la temperatura eutectoide disminuya y actúan como elementos estabilizadores de austenita que agrandan la región austenítica del diagrama de fases hierro-carburo de hierro, motivo

por el que se les denomina gammágenos. En algunos aceros con suficientes cantidades de níquel o manganeso, la estructura austenítica puede obtenerse a temperatura ambiente” (Smith, William F.; Hashemi, 2006).

“Los elementos formadores de carburo, como el tungsteno, el molibdeno y el titanio, elevan la temperatura eutectoide del diagrama de fases Fe-Fe<sub>3</sub>C a valores más altos y reducen el campo de la fase austenítica. Dichos elementos reciben el nombre de elementos estabilizadores de ferrita o alfégenos” (Smith, William F.; Hashemi, 2006).

**Figura 20:**

*Efecto del porcentaje de elementos de aleación en temperatura eutectoide Ac1*



Nota. *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales* (p. 396) por Smith, William F.; Hashemi, 2006.

### 2.2.8. Distribución de los elementos aleantes en los aceros

Los elementos aleantes de los aceros pueden formar compuestos y carburos, estos componentes influyen en el comportamiento del acero durante el templeado y revenido. En la

figura 21 se presenta la distribución de los principales elementos presentes en los aceros de aleación.

**Figura 21:**

*Distribución de los elementos presentes en los aceros de aleación\**

Elemento	Disuelto en ferrita	Combinado en carburo	Combinado como carburo	Compuesto	Elemental
Níquel	Ni			Ni <sub>3</sub> Al	
Silicio	Si			SiO <sub>2</sub> · M <sub>x</sub> O <sub>y</sub>	
Manganeso	Mn	↔ Mn	(Fe,Mn) <sub>3</sub> C	MnS; MnO · SiO <sub>2</sub>	
Cromo	Cr	↔ Cr	(Fe,Cr <sub>3</sub> )C Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>		
Molibdeno	Mo	↔ Mo	Mo <sub>2</sub> C		
Tungsteno	W	↔ W	W <sub>2</sub> C		
Vanadio	V	↔ V	V <sub>4</sub> C <sub>3</sub>		
Titanio	Ti	↔ Ti	TiC		
Columbio <sup>†</sup>	Cb	↔ Cb	CbC		
Aluminio	Al			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; AlN	
Cobre	Cu (en pequeña cantidad)				
Plomo					Pb

\*Las flechas indican las tendencias relativas de los elementos de la lista a disolverse en ferrita o a combinarse para formar carburos.  
<sup>†</sup>Cb = Nb (niobio).  
Fuente: E. C. Bain y H. W. Paxton, "Alloying Elements in Steel", 2a. ed., American Society for Metals, 1966.

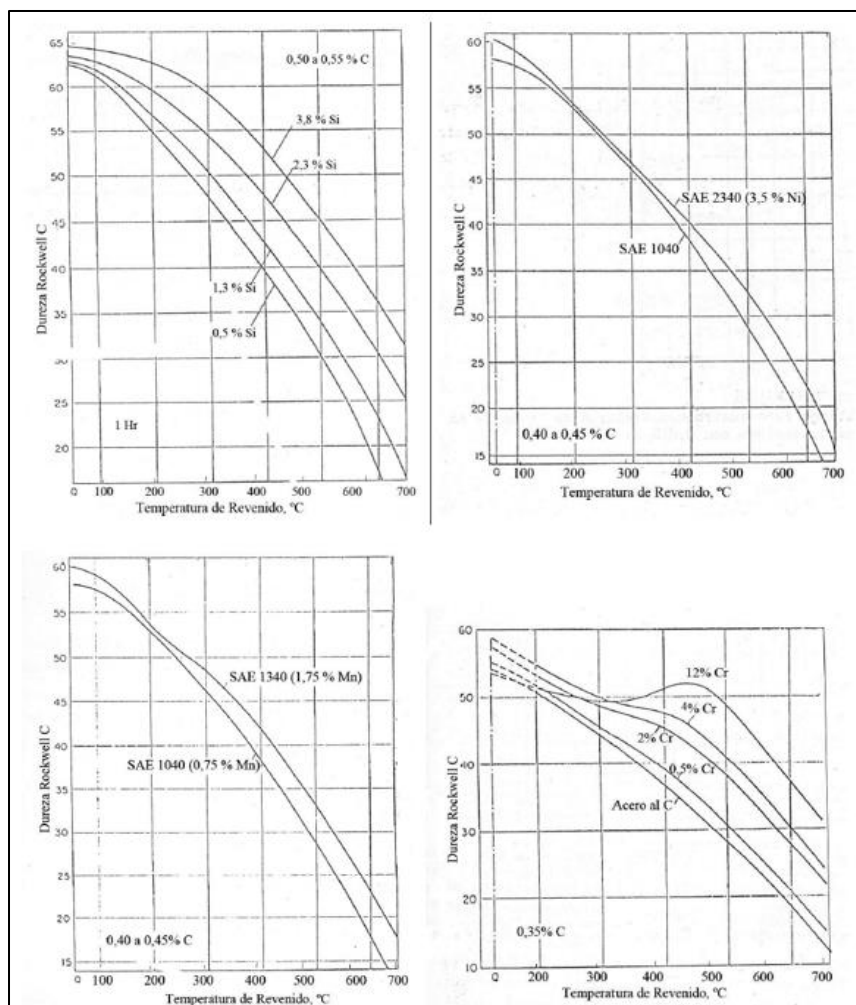
Nota. *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales* (p. 395) por Smith, William F.; Hashemi, 2006.

El níquel se disuelve en la ferrita porque su tendencia a formar carburos es menor que la del hierro. El silicio se combina con el oxígeno del acero hasta cierto punto formando inclusiones no metálicas y otra parte se disuelve en la ferrita. La mayor parte del manganeso se disuelve en la ferrita; sin embargo, parte del manganeso forma carburos, pero por lo general se incorpora a la cementita como (Fe, Mn)<sub>3</sub>C. El cromo, tiene tendencia a formar carburos que el hierro y se reparte entre las fases de ferrita y de carburo. La distribución del cromo depende de la cantidad de carbono presente. "El tungsteno y el molibdeno se combinan con el carbono para formar carburos si hay suficiente

carbono presente. El vanadio, el titanio y el columbio son elementos con fuerte tendencia a formar carburos y se encuentran en los aceros, principalmente en forma de carburos” (Smith, William F.; Hashemi, 2006).

**Figura 22:**

*Efecto de los elementos aleantes y la Temperatura de revenido en la dureza*



Nota. *Metalografía y Tratamientos Térmicos, (Cap. 10, p. 15), por UTNA, s/a.*

### 2.2.9. Efecto de los elementos aleantes y la temperatura de revenido en la dureza

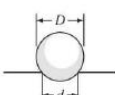

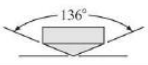

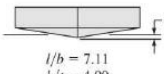

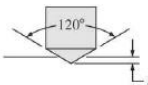

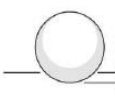

El contenido de elementos aleantes en los aceros y la temperatura de revenido influyen en el incremento relativo de la dureza; por otra parte, a mayor temperatura de revenido, los valores

de la dureza obtenida disminuyen de acuerdo al contenido de carbono. En la figura 22 se muestra el comportamiento de los principales aleantes.

El aumento de silicio incrementa la dureza en los aceros templados y revenidos, de la misma forma el manganeso, cromo y níquel incrementan la dureza. En cambio, a mayor temperatura de revenido, se observa que en cada caso la dureza disminuye.

### Figura 23:

#### *Tipos y características de los ensayos de dureza*

Ensayo	Penetrador	Forma del penetrador		Carga	Fórmula del número de dureza
		Vista lateral	Vista en planta		
Brinell	Esfera de 10 mm fabricada de acero o carburo de wolframio			$P$	$BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Pirámide de diamante			$P$	$VHN = \frac{1.72P}{d_1^2}$
Microdureza Knoop	Pirámide de diamante			$P$	$KHN = \frac{14.2P}{l^2}$
Rockwell	Cono de diamante			60 kg $R_A =$ 150 kg $R_C =$ 100 kg $R_D =$	$100-500f$
	Esfera de acero de $\frac{1}{16}$ pulgadas			100 kg $R_B =$ 60 kg $R_F =$ 150 kg $R_G =$ 100 kg $R_E =$	
E	Esfera de acero de $\frac{1}{8}$ pulgadas				

Fuente: Según H. W. Hayden, W. G. Moffatt y J. Wulff, "The Structure and Properties of Materials", vol. III, Wiley, 1965, p. 12.

Nota. *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales* (p. 229), por Smith, William F.; Hashemi, 2006, McGraw-Hill.

#### 2.2.10. Dureza de metales

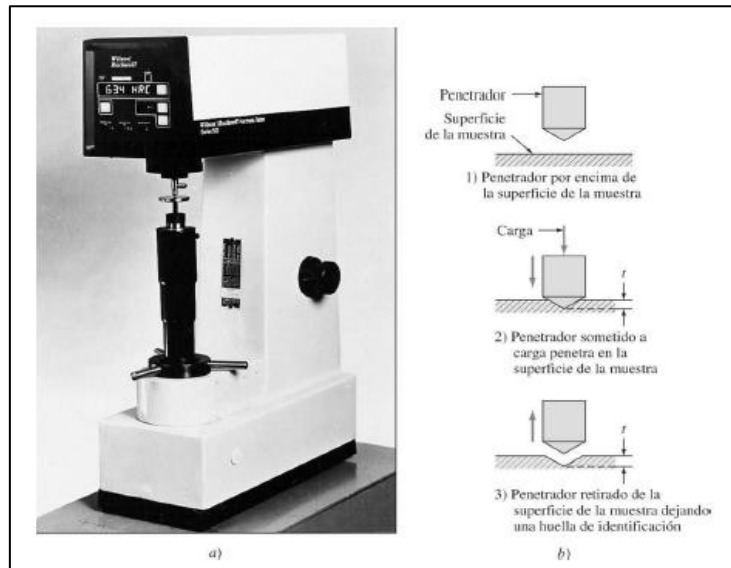
“La dureza es una medida de la resistencia de un metal que de manera localizada puede ser indentado, rayado o penetrado por otro material de mayor dureza” (Smith, William F.; Hashemi, 2006). Estas pruebas se fundamentan en la aplicación de un pequeño penetrador el cual es

presionado sobre una superficie del componente de prueba en condiciones controladas de carga y velocidad de aplicación de la carga.

Aquí se determina la profundidad o tamaño de la huella, y se relaciona con un número de dureza; cuanto más blando es el material, mayor y más profunda es la huella, y menor es el número de dureza. En la figura 23 se muestran los tipos principales de ensayos de dureza y sus características, y en la figura 24 se muestra un durómetro provisto de una pantalla digital, el soporte principal, el panel de trabajo y diversos accesorios de control.

**Figura 24:**

*Durómetro digital de laboratorio*



Nota. *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales* (p. 228), por Smith, William F.; Hashemi, 2006, McGraw-Hill.

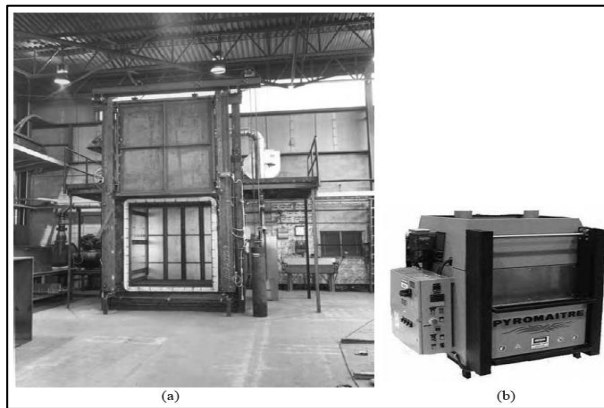
### **2.2.11. Hornos para tratamientos térmicos**

Para los procesos de tratamientos térmicos de los aceros se emplean varios tipos de hornos calentados con diferentes fuentes de energía como: eléctrica, gas o combustibles líquidos. De manera general, los hornos de tratamiento térmico se clasifican en discontinuos, semicontinuos o continuos. Los discontinuos son los más utilizados, la pieza a tratar se mantiene estacionaria en la

cámara del horno, la carga y descarga de la pieza se hace en una sola operación por lotes. En los semicontinuos, las piezas se mueven de manera continua, pero de manera escalonada. En los continuos, la carga se mueve al interior del horno de manera continua a través de diferentes zonas que se encuentran a temperaturas variables.

**Figura 25:**

*Hornos de Tratamientos Térmicos Tipo Caja*



Nota. *Steel Heat Treatment Handbook* (p. 872) por Taylor & Francis Group, 2007.

Los hornos eléctricos de mayor empleo y difusión son los de tipo caja, (a) industrial y (b) de laboratorio, ver figura 25. Se utiliza para realizar el calentamiento de las piezas y para los tratamientos de templado, revenido, recocido, normalizado y cementado.

### 2.3. Definición de términos básicos.

#### 2.3.1. Fases

“El concepto de fase es fundamental para comprender los diagramas de equilibrio. Una fase es cualquier materia homogénea y físicamente distinta. Una fase tiene las siguientes características:

- La misma estructura y ordenamiento atómico
- La misma composición química y propiedades
- Hay una interface definida y cualesquiera otras fases circundantes.



Algunos metales son alotrópicos en estado sólido como el hierro y tendrán diferentes fases solidas dependiendo de la temperatura.

Una aleación es homogénea si es de una fase, si hay una combinación posible de fases en estado sólido la aleación es una mezcla.

Las fases interactúan de tal modo que la combinación de propiedades de un sistema multifase es diferente de las propiedades de cualquiera de las fases individuales y más atractivas que ellas.” (Pinzon & Ramos R., 2017; p.34)

### ***2.3.2. Microestructura***

Tiene una microestructura martensita templada de grano fino y de morfología de listones empaquetados y esta tiene cristales lamelares. También es denominada acero martensítico de baja aleación por contener elementos aleantes. Tiene uso en componentes y sistemas antidesgaste. Este acero posee propiedades de resistencia al desgaste y alta tenacidad. Sus elementos aleantes menores a cincuenta partes por millón incrementan su templabilidad y demoran la formación de ferrita y perlita.

### ***2.3.3. Equilibrio de fases***

El equilibrio de fases se manifiesta, cuando coexisten dos o más fases y se puede predecirse este equilibrio por el potencial químico. La fase de equilibrio es siempre la que tiene menor energía libre de gibs. El equilibrio es el estado con energía libre mínima bajo algunas condiciones de presión, temperatura y composición.

Un instrumento para explorar los equilibrios de fases son los diagramas de fases. Las aleaciones pueden presentar diversas fases, que son función de temperatura, presión y concentración.

En casos como los sistemas sólidos, el equilibrio nunca llega en su integridad, porque su velocidad es lenta para alcanzar el equilibrio y se le llama metaestable y experimenta solo imperceptibles cambios a lo largo del tiempo.

Aparte del estado de equilibrio y las microestructuras, se debe saber la velocidad con que se alcanza, así como, que influyen en esta velocidad.” (CALLISTER, Jr., (1995), p.254)

#### ***2.3.4. Diagramas de equilibrio de fases***

Los diagramas de equilibrio de fases o constitucionales son una representación gráfica de temperatura versus composición en porcentaje en peso de un sistema de aleación.

Los diagramas de fase son útiles en la interpretación de estructuras metálicas y cerámicas, pero están sujetas a varias restricciones como no dar información sobre la morfología de las estructuras y la distribución de fases (ejemplo los esferoides, listones, aciculares, etc.). Esas dos características dependen de los efectos de la energía superficial entre diferentes fases y los efectos de la energía de deformación por los cambios de volumen y forma durante las transformaciones juegan un rol importante en las propiedades mecánicas de los materiales. Al modificar las fases por cambios de temperatura como subenfriamiento se originan varias microestructuras, por la transformación de una fase a otra fase o aparición o desaparición de una fase. Los diagramas de equilibrio posibilitan el pronóstico de la transformación y la microestructura a obtenerse y pueden estar no en equilibrio. Estos diagramas relacionan la composición, estructura y cantidad de fases presentes en equilibrio. La presión y temperatura parametrizan a las aleaciones binarias. Para más de dos componentes se complica el diagrama y su representación es difícil”. (Pinzon & Ramos R., (2017), p. 35).

---

#### ***2.3.5. Interpretación de los diagramas de fase***

Los sistemas de dos componentes con la temperatura y composición de equilibrio facilitan:

1. Fases presentes
2. Composición por fase
3. Porcentaje de cada fase” (CALLISTER, Jr., (1995), p.257)

### **2.3.6. Resiliencia**

Capacidad de un metal de resistir deformación elástica por fuerzas externas. y absorber energía cuando se deforma elásticamente y liberar esa energía al descargarse.

### **2.3.7. Tenacidad**

Capacidad de un material de resistir deformación plástica por fuerzas externas y absorber energía en el rango plástico.

### **2.3.8. Fragilidad**

Cuando un material no puede absorber energía al ser deformado por fuerzas externas.

### **2.3.9. Temple**

Proceso térmico por el cual se endurecen los materiales, calentado a una cierta temperatura según el material y enfriarla rápidamente.

### **2.3.10. Propiedades físicas**

Es lo que describe a un material o sustancia (ejemplos, punto de fusión, tamaño, forma, densidad, color,)

### **2.3.11. Propiedades mecánicas.**

Comportamiento de un material ante esfuerzos aplicados sobre él. (ejemplos, tenacidad, fragilidad, dureza, resiliencia.

## CAPITULO III HIPÓTESIS Y VARIABLES

### 3.1. Hipótesis

#### 3.1.1 *Hipótesis general*

**HG:** La temperatura y tiempo del tratamiento térmico de temple y revenido tiene efecto en la dureza del acero HARDOX 450.

#### 3.1.2. *Hipótesis específicas*

**HE1:** La temperatura del tratamiento térmico de temple en agua influye en la dureza del acero HARDOX 450.

**HE2:** El tiempo del tratamiento térmico de temple en agua influye en la dureza del acero HARDOX 450.

**HE3:** La temperatura del tratamiento térmico de revenido influye en la dureza del acero HARDOX 450.

### 3.2 Variables e indicadores

#### 3.2.1. *identificación de variables*

**Variable dependiente:**

- Resistencia a la dureza

**Variables independientes:**

- Temperatura de temple

- Tiempo de temple
- Temperatura de revenido
- Tiempo de revenido

### **3.2.2. *Indicadores***

- Dureza (HRc)
- Temperatura (°C)
- Tiempo (min.)

### **3.2.3. *Operacionalización de variables***

La tabla 4 muestra la operacionalización de variables, a controlar durante los experimentos planificados.

### **3.2.4. *Matriz de consistencia***

Ver la matriz de consistencia en Anexo 2

**Tabla 4**  
*Matriz de operacionalización de variables*

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDADES	INSTRUMENTO	
<b>DEPENDIENTE</b>	Dureza	La Dureza es la capacidad de una sustancia sólida para resistir deformación o abrasión de su superficie. Está relacionada con la solidez, la durabilidad y la resistencia de sustancias sólidas, y, en sentido amplio, este término suele extenderse para incluir todas estas propiedades.	La determinación de la resistencia a la dureza del material se realizó mediante un durómetro digital de banco siguiendo la recomendación de la norma ASTM E10.	Dureza	Resistencia a la indentación	HRC	Durómetro digital LECCO serie LCR 500 automático. Escala Rockwell C
<b>INDEPENDIENTE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura de temple.</li> <li>• Tiempo de temple.</li> <li>• Temperatura de revenido.</li> </ul>	<p>El Temple es un tratamiento térmico que tiene por objetivo aumentar la dureza y resistencia mecánica del material, transformando toda la masa en Austenita con el calentamiento y después, por medio de un enfriamiento brusco (con aceites, agua salmuera), se convierte en Martensita, que es el constituyente duro típico de los aceros templados.</p> <p>El Revenido es un tratamiento complementario del Temple, que generalmente prosigue a éste. Después del Temple, los aceros suelen quedar demasiados duros y frágiles para los usos a los cuales están destinados. Lo anterior se puede corregir con el proceso de Revenido, que disminuye la dureza y la fragilidad excesiva, sin perder demasiada tenacidad.</p>	Las temperaturas críticas de calentamiento para el temple y revenido se controlaron mediante el termopar incorporado en la mufla eléctrica.	Temperatura de calentamiento	Temperatura	°C	Termopar de la mufla eléctrica. Horno eléctrico BIOBASE (950 a 1200 °C)
			Los tiempos de austenización y revenido se midieron con un cronómetro digital	Tiempos de austenización	Tiempo	min.	Cronómetro digital OPPO-A17
<b>INTERVINIENTE</b>	Medio ambiente	El medio ambiente durante el proceso del tratamiento térmico de temple y revenido del acero micro aleado HARDOX 450 es considerado la temperatura del medio ambiente	La temperatura del medio ambiente donde se realiza el ensayo se midió y registró.	Temperatura del ambiente	Temperatura	°C	Termómetro de laboratorio de mercurio de escala opal de -10 °C a 100°C

Nota : Elaboración propia, considerando las definiciones en: <https://prezi.com/76slx96ubc7a/tratamientos-termicos-para-aleaciones-de-aluminio/>. y

<http://repositorio.unjfsc.edu.pe/bitstream/handle/UNJFSC/4098/DOMITILA%20ROSARIO%2c%20SALAZAR%20ALBINO.pdf?isAllowed=y&sequence=4>

## **CAPITULO IV METODOLOGÍA**

### **4.1. Delimitación espacial**

Este trabajo desarrollado se efectuó en la región del Cusco y para la toma de muestras de acero Hardox se recurrirá a los talleres de ensamblaje de tolvas de vehículos ubicados en la provincia del Cusco. Las pruebas experimentales se realizaron en los laboratorios de Metalurgia Física de las Universidades Nacionales de San Antonio Abad del Cusco.

### **4.2. Diseño de investigación: Método, tipo, nivel, alcance**

#### ***4.2.1. Método de investigación***

El método de investigación es científico y tecnológico, porque se planteó hipótesis para ser evaluado, se diseñó el experimento tecnológico para ser realizado en laboratorio, se analizó los resultados obtenidos y se formuló las conclusiones en el presente trabajo de la investigación.

Bueno E. (2003) señala que el método científico utilizado para contrastar la hipótesis deberá conducirse principalmente por las características del estudio, los objetivos, el problema, las variables de estudio y su correspondiente relación. Según el autor, existen dos momentos en el proceso de investigación científica: la orientación del campo de investigación y la contrastación de la hipótesis.

#### ***4.2.2. Tipo de investigación***

Según, Miranda, y Medina (2015), menciona: “La investigación tecnológica es el proceso, ordenado, sistemático, riguroso, controlado y crítico, que, apoyado en la ciencia y experiencia previa, persigue transformar la realidad, optimizando o creando nuevas formas de hacer las cosas; resolviendo problemas concretos de la sociedad” (pág. 8). Por lo tanto, esta investigación es

tecnológica. Por otra parte, según Hernández (2018), esta investigación es de tipo experimental con enfoque cuantitativo.

#### **4.2.3. Nivel de la investigación**

Para comprender el fenómeno estudiado y lograr los objetivos de la presente investigación, se describió y caracterizó el material en estudio, según los siguientes niveles de investigación:

**Correlacional:** Es importante la determinación del grado de relación entre las variables en estudio: temperatura, tiempo y dureza; con el propósito de conocer el comportamiento del acero HARDOX 450 frente a las fluctuaciones de temperatura y tiempo. Lo cual implicará en los cambios microestructurales del material.

**Explicativo:** Se explicó la causa-efecto entre las variables en investigación. Mediante esta investigación se encontró la relación causal del temple y revenido que origina el efecto en la dureza del Hardox 450.

#### **4.2.5. Alcance de la investigación**

Según Hernández, Fernández y Baptista (2010) una investigación con enfoque cuantitativo puede tener varios alcances,

**Descriptivo:** Se describió el proceso de temple y revenido en el acero hardox 450 efectuado bajo parámetros considerados para el material en investigación

**Analítico:** Permitió la valoración de las probetas experimentadas en temple y revenido respectivamente para su interpretación, observación y análisis crítico.

En este caso, la propuesta del estudio es hallar la influencia de la “temperatura y tiempo del tratamiento térmico de temple y revenido en la dureza del acero” (Pinzon & Ramos R., 2017) Hardox 450.



### **4.3. Población de estudio**

#### **4.3.1. Población**

La población de estudio se consideró a los aceros hardox 450 de espesor de 6 mm, Las especificaciones técnicas del material en estudio son uniformes, por lo tanto, se consideró como población todo el conjunto de chapas antidesgaste Hardox 450 de 6 mm de espesor, usado en la fabricación de tolvas para volquetes de carga de mineral, cucharas, uñas para cargadores frontales, cribas, tolvas, alimentadores dosificadores, excavadoras y tuberías sometidas a desgaste, etc.” (Armas M. & Sevillano C., 2015).

#### **4.3.2. Muestra**

Las muestras tomadas para las probetas fueron de una plancha del acero Hardox 450 de dimensiones 12 x 12 x 6 en mm para cada probeta y obtenidas cortando mecánicamente por cizalladura haciendo uso de una máquina de corte mecánico hidráulico y evitar cambios en la microestructura del acero. (Armas M. & Sevillano C., 2015)

#### **4.3.3. Material de estudio**

El material ensayado se muestreo de las planchas comerciales de Hardox 450, de los cuales se prepararon las probetas de este acero antidesgaste y antiabrasivo; Estas muestras se utilizaron para el desarrollo de los ensayos de temple, revenido y dureza. Se obtuvieron probetas en forma cuadrada de dimensiones 12 x 12 x 6 mm de espesor.

#### **4.3.4. Técnicas y procedimientos**

Se aplico el proceso de templado y se enfrió el material en agua y se realizó el revenido en diferentes condiciones de tiempos y temperaturas respectivamente al acero hardox 450 y se consideró los valores críticos de temperatura de austenización.

#### **4.3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

- **Ensayo de dureza:** Se investigo 06 probetas templadas y 6 probetas revenidas, se efectuaron tres mediciones de dureza por cada probeta y obteniéndose un promedio final en cada una. Se obtuvieron 12 durezas medias en promedio (cada probeta 3 durezas) en total de las probetas ensayadas y también dureza media de la probeta testigo (3 durezas).
- **Análisis metalográfico:** Se efectuaron pruebas metalográficas de las 12 probetas ensayadas en tratamiento térmico del material en estudio acero Hardox 450, incluye a la probeta testigo.

#### **4.4. Plan de Análisis de datos**

##### **4.4.1. Técnicas de recolección de información**

Durante el presente trabajo de indagación se emplearon técnicas de recolección de datos precedentes del diseño experimental y luego el análisis estadístico:

- Referencia bibliográfica
- Observación en la investigación para la comprensión de datos
- Correspondencia con resultados

##### **4.4.2. Técnicas de análisis e interpretación de la información**

“Se realizo la técnica del análisis estadístico, desde la recolección de datos y se procesó haciendo el uso de la estadística descriptiva y su condensación, se sometió a pruebas inferenciales” Gutiérrez H. & De la Vara Román (2012); igual que a los diseños experimentales, esta metodología facilito el discernimiento y análisis. En esta investigación se empleó el paquete estadístico Minitab 17 con el cual se encontró la tendencia de los datos y se halló las relaciones de significancia de las variables en estudio de la hipótesis planteada y creo visualizaciones del análisis efectuado.

#### ***4.4.3. Técnicas para probar la aceptación o rechazo de las hipótesis planteadas***

Una contrastación de la hipótesis formulada se empleó, previamente el parámetro de la población se estimó, para inferir las deducciones de las hipótesis planteadas. Los medios que llevaron a ser aceptados o rechazados las hipótesis estadísticas, se ejecutaron con el software estadístico MINITAB 17.

Según (Armas M. & Sevillano C., 2015), “Para la contrastación de la hipótesis y el análisis de datos se utiliza como primera consideración un modelo de experimento para el temple y el revendido, y se usaron procedimientos de prueba de hipótesis y de intervalos de confianza para comparar las medias y demostrar así si existe una diferencia significativa al comparar los niveles de este trabajo de investigación de manera individual y entre cada uno de ellos”.

## CAPÍTULO V

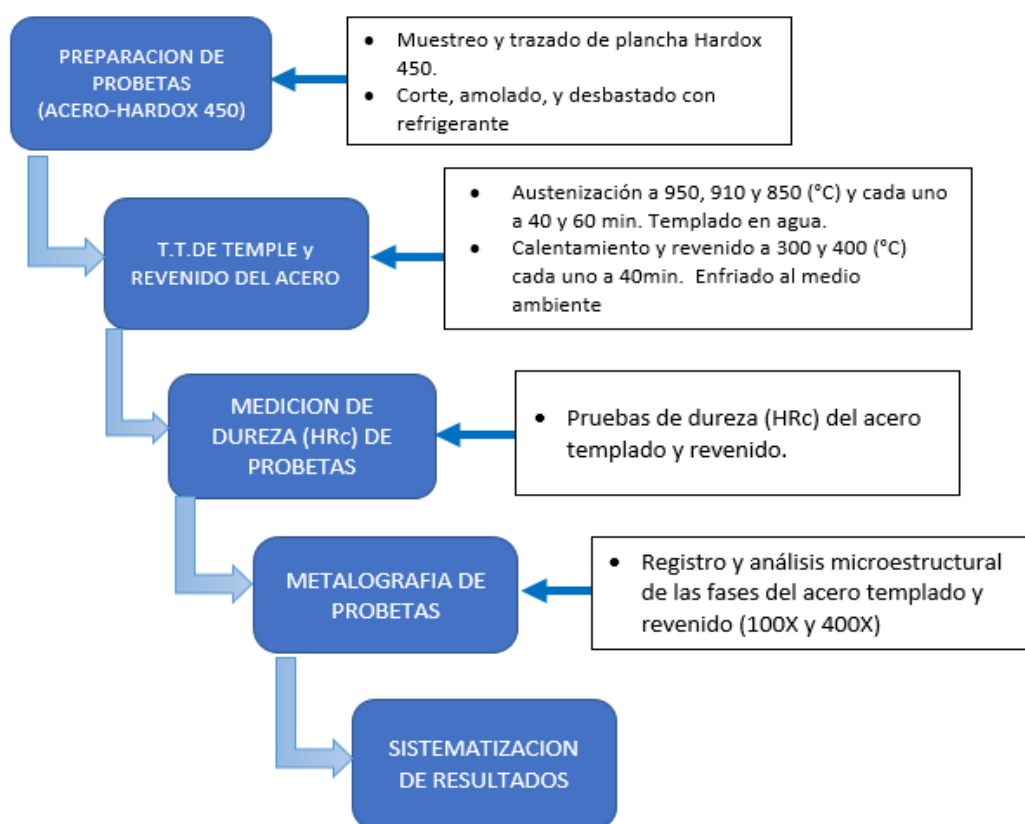
### PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS DE PRUEBAS

#### 5.1. Procedimiento experimental

El diagrama de flujo de las principales operaciones y tratamientos se alcanzan en la figura 26 para la secuencia de pruebas experimentales realizadas en las probetas del acero Hardox 450

**Figura 26**

*Flujograma de pruebas experimentales - Acero HARDOX 450.*



Nota. *Elaboración propia.*

#### 5.2. Material de investigación

El material usado para el presente trabajo, fue el acero Hardox 450 en Chapa, se producen mediante laminado en frío y en caliente, se adquirió del distribuidor comercial AceroSueco-Aceros de Chile Ltda. en forma de planchas de 6 m x 1.5 m y con un espesor de 6 mm con un peso de 429 kg. Este material resistente a la abrasión y desgaste, presenta una dureza nominal

promedio de 450 HBW, tiene excelentes propiedades estructurales, vida útil prolongada, buena capacidad de plegado y excelente soldabilidad; por ello su utilización en trabajos de desgaste por deslizamiento frente a materiales abrasivos es extendido. Se utiliza entolvas de volquetes, trituradoras, cucharas para excavadoras, cargadores frontales, carrocerías de remolques, rodillos de asfalto, camiones de basura, contenedores, cizallas y en la fabricación de diversos elementos de equipos mecánicos.

El Hardox 450 chapa de 6 mm de espesor, cumple con las tolerancias dimensionales y requisitos de la Norma EN 10-029 Clase A. Este acero junto a su ficha técnica del lote comprado y proveído (anexo 2) fue provisto y facilitado por la Industrias FIRME SAC, cuya instalación fabril está ubicada en la localidad de Huasao, distrito de Oropesa, provincia de Quispicanchi, departamento del Cusco. Dicha empresa, emplea el Hardox 450 Chapa como material fundamental para la fabricación y mantenimiento de tolvas, carrocerías, cisternas y semirremolques.

### **5.2.1 Composición química del Hardox 450**

El Hardox 450 es un acero de baja aleación. La tabla 5 indica los valores máximos del contenido porcentual de elementos aleantes en dicho material, lo que conlleva a una modificación de su composición química en función de los espesores disponibles en que se producen y comercializa los diferentes tipos de la serie de aceros Hardox POR LA EMPRESA SSAB, y es así que se tienen en el mercado los Hardox: 400, 450, 500, 500 Tuf, 550, 600, HiTuf, HiTemp y Extrem. Esta variedad de aceros se entrega en estado templado y en algunos casos templado y revenido, cada uno de ellos con diferentes propiedades particulares para una determinada aplicación.

**Tabla 5**

*Composición Química del acero Hardox 450 Chapa\* (Laminado en caliente).*

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>
0.183	0.180	1.280	0.011	0.001	0.250	0.140	0.040

<b>V</b>	<b>Ti</b>	<b>Cu</b>	<b>Al</b>	<b>Nb</b>	<b>B</b>	<b>N</b>	<b>CEV*</b>
0.010	0.010	0.010	0.035	0.001	0.0013	0.002	0.470

Nota. Certificado N° 21250983 (2023-03-13). Adaptado y reproducido de resultados del Departamento de inspección de calidad, Empresa SSAB. (2023a).

\* En estado de suministro por el fabricante al distribuidor comercial. CEV\* : Carbono equivalente, Instituto Internacional de Soldadura (IIW).  $CEV (IIW) = C + Mn/6 + (Ni + Cu)/15 + (Cr + Mo + V)/5$  (Anexo I)

La tabla 5 muestra resultados de ensaye químico del Hardox 450 (testigo), el cual fue realizado por el Departamento de inspección de calidad de la Empresa SSBA y proveído esta ficha técnica a la empresa FIRME SAC, el contenido porcentual de los elementos de aleación, corresponde al material suministrado por el fabricante SSBA mediante los distribuidores comerciales en Latinoamérica al cliente FIRME SAC y que nos facilitó esta información a través de su ficha técnica recabada (ver anexo 1), para transformar las láminas de acero Hardox 450 en diversos productos y bienes útiles.

Los elementos aleantes que acompañan a este acero proporcionan alta dureza, tenacidad, ductilidad y resistencia al desgaste, dando propiedades anti abrasivas y antidesgaste que presenta dicho material en pleno servicio; fundamentalmente, proporcionan endurecimiento mediante la formación de soluciones sólidas de ferrita, precipitan carburos de aleación en reemplazo de la cementita, mejoran la templabilidad. Los aleantes influyen notablemente en el comportamiento del Hardox 450 durante los procesos de temple y revenido, tienen trascendencia e influyen de sobremanera en la cinética de las diferentes reacciones de

transformación relacionadas con la formación y descomposición de la austenita y la martensita, así como de diversos compuestos. El manganeso contribuye a una contribuye a la formación de la martensita y a una mayor resistencia a la tracción, el cromo incrementa la templabilidad, el molibdeno durante el enfriamiento impide que se debilite el acero, el níquel baja la temperatura de austenizado, el silicio eleva el límite elástico y la dureza por endurecimiento debido a sustitución sólida. ( Ulewicz R, Mazur M, Bokůvka O (2013)).

### 5.2.2 Propiedades mecánicas del Hardox 450 Chapa

Este acero tiene excelentes propiedades de dureza y tenacidad lo cual se refleja en una prolongada vida útil, en la tabla 6 se exponen las propiedades mecánicas relevantes.

**Tabla 6**

*Propiedades mecánicas del Hardox 450 Chapa, espesor (2.0 – 8.0) mm.*

<b>Dureza (HBW)*</b>	<b>Dureza (HRC)**</b>	<b>Límite Elástico (Mpa)</b>	<b>Energía de Impacto***(J)</b>
425 – 475	45 - 50	1250	50

Nota. *Ficha técnica versión 2023, reproducido de Empresa SSAB. (anexo 3)*

\* *Dureza promedio. escala Brinell W, de conformidad con la norma EN ISO 6506-1. El acero está templado, la dureza mínima del núcleo es del 90% respecto a la dureza de superficie mínima garantizada (40.5 HRC).*

\*\* *Dureza promedio, escala Rockwell C.*

\*\*\* *Ensayo según norma ISO EN 148. Probeta Charpy V 10x10 mm (-40°C).*

### 5.3 Maquinaria, equipo, herramientas y reactivos químicos

Se desarrollo la parte experimental, los ensayos mecánicos y análisis metalográficos con: maquina cizalla hidráulica, esmeril eléctrico, muflas eléctricas (horno), durómetro, desbastador, pulidor, microscopio metalográfico, reactivo químico nital, secadora,

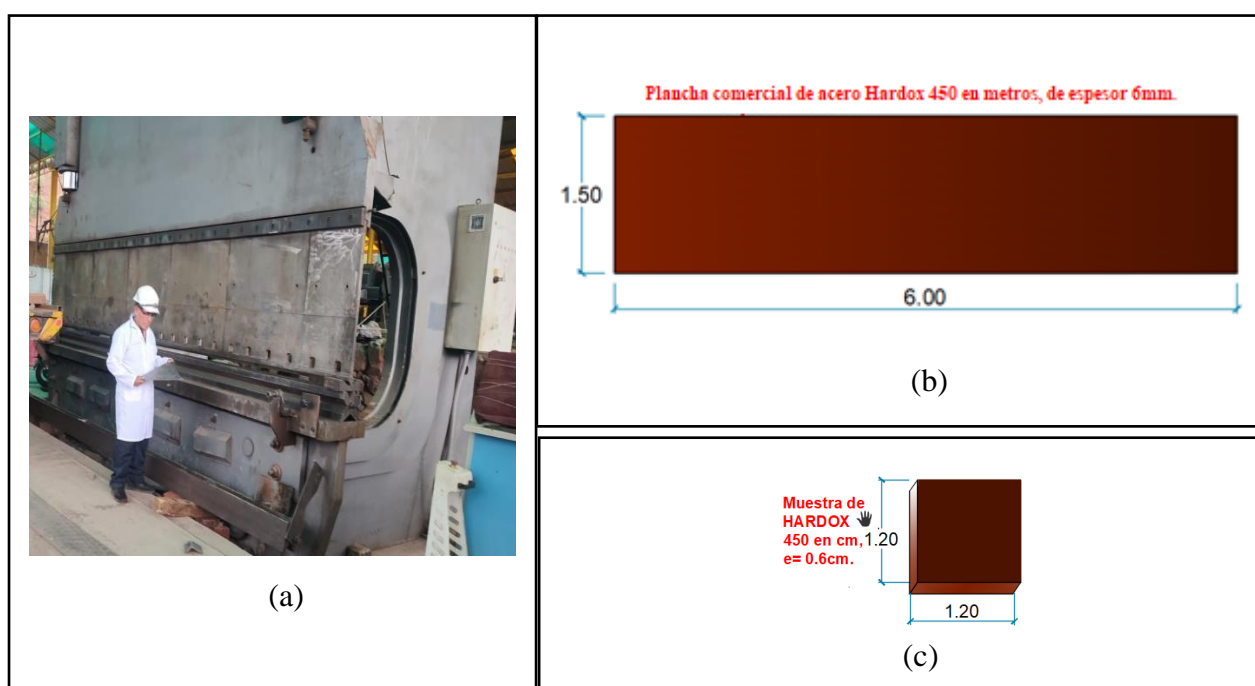
herramientas manuales de sujeción, termómetro de laboratorio, recipientes de vidrio y plástico, equipo de protección personal y cámara digital y se describen.

### 5.3.1 Máquina cizalladora hidráulica

Se uso esta máquina para el corte de las probetas requeridas según medida, a partir de una plancha (6x1500x6000 mm) HARDOX 450, en la figura 27 se muestra la maquina cizalladora guillotina empleada, corta cualquier material metálico, cuya longitud máxima de corte es de 6m, espesor máximo de corte de chapas metálicas es de 15.88 mm (5/8"), posee un pedal para el control de pie en las operaciones corte, abrazaderas hidráulicas que sujetan la pieza de trabajo, Cuenta con pistones hidráulicos de sujeción y corte, alimentación eléctrica de 220 V y la potencia del motor principal es de 18.5 kv.

#### Figura 27.

*Maquina cizalladora hidráulica y medidas de acero comercial Hardox 450*



Nota. *Elaboración propia: (a) cizalla hidráulica, (b) plancha comercial hardox450 (c)muestra para ensayo*

### 5.3.2 Esmeril de banco

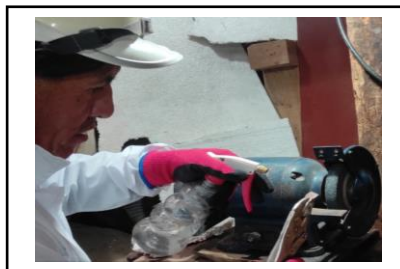
Se empleo el esmeril de banco marca REXON em-1550b 66 pulg. Es de 1/2 HP, 220 V, 60 HZ, y con velocidad de 3450 RPM este esmeril de banco con piedras de desbaste de carburo de



silicio se usó en la habilitación de las probetas para desbaste de cantos vivos producto de la cizalladura de las muestras obtenidas.

**Figura 28.**

*Esmeril de banco para desbaste.*



Nota. *Elaboración propia.*

**5.3.3 Horno eléctrico de Muflas BIOBASE (máx 1200°C) y SM (máx 950°C).**

Se emplearon hornos mufla, un horno BIOBASE para tratamiento térmico, el cual posee un controlador digital de temperatura de 0 a 1200 °C y otro horno SM para revenido, y también posee un controlador digital de temperatura de 0 a 950 °C, ambos hornos muflas son de resistencia eléctrica de 220 V y 50Hz- CA.

**Figura 29**

*Horno eléctrico de Muflas*



Nota. *Elaboración propia.*

### 5.3.4 Durómetro Rockwell digital LCR-500 con kit de apoyo y laptop.

Se uso el Durómetro digital LECO serie LCR 500 automático. Escala Rockwell C, modo de medición automatico, prueba tipo Rockwell personalizable usando carga menor/mayor combinaciones de 3 a 200 kgf., pantalla táctil, Iluminación LED de ayudas para la muestra en colocación de sangría, kit de accesorios para prueba Brinell y rockwell, pc portátil para recepcion y almacen de data del ensayo de dureza. Equipo de ensayo de la escuela profesional de ingenieria metalurgica

#### Figura 30

*Durómetro digital LCR-500.*



Nota. *Elaboración propia.*

### 5.3.5 Máquina desbastadora METASINEX con dispensador de agua.

Se empleo esta máquina y consta de dos platos giratorios conteniendo papel abrasivo al agua, de diámetro igual a 240 mm, velocidad de 450 rpm, motor de 370 W, 220 V-50 Hz, con dimensiones de 700 x 630 x 320 (mm). Equipo de ensayo de la escuela profesional de ingenieria metalurgica.

#### Figura 31.

*Máquina desbastadora de muestras*



Nota. *Elaboración propia.*

### 5.3.6 Máquina pulidora MONTASUPAL con dispensador de agua.

Se empleó esta máquina pulidora de probetas de un solo plato giratorio de 290 mm de diámetro conteniendo tela pulidora, velocidad de giro de 600 rpm, motor de 400W, 220V-50 Hz, con dimensiones de 650 x 500 x 280 (mm). Equipo de ensayo de la escuela profesional de ingeniería metalúrgica.

#### Figura 32.

*Máquina pulidora de muestras*



Nota. *Elaboración propia.*

### 5.3.7 Reactivo químico NITAL (5 %) y alcohol (75 %).

El reactivo químico nital al 5 % fue usado para análisis metalográfico y el alcohol 75 % para la limpieza de superficies de las muestras.

#### Figura 33.

*Reactivo químico*



Nota. *Elaboración propia*

### 5.3.8 Secadora eléctrica portátil SUOL.

Se empleo la secadora eléctrica de 220 V y 50Hz – CA, para secado de muestras después de la limpieza de las probetas con alcohol isopropílico.

#### Figura 34.

*Secadora eléctrica*



Nota. *Elaboración propia*

### 5.3.9 Microscópio metalográfico PETIP – CARL ZEISS.

El Equipo metalografico empelado es un Microscopio PETIP, con Aumentos de 100x hasta 1000x, con Alimentación 220V-CA/50Hz, se regula macrométricamente y micrométricamente con manesillas, posee soporte fijo y consta de portaobjetos que incluye sistema de pesion y fijacion. El microscopio es de la escuela profesional de ingenieria metalurgica

#### Figura 35.

*Microscopio metalografico petip*



Nota. *Elaboración propia*

### 5.3.10 Herramienta manual de sujeción de probetas.

Se uso pinzas metálicas medianas para manipulación de probetas durante los ensayos realizados en el laboratorio, tipo sencillo, apertura de 5cm, longitud 30 cm, material fierro fundido.

#### Figura 36.

*Pinza metálica*



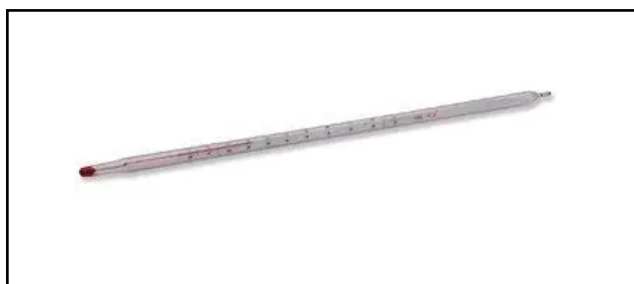
Nota. *Elaboración propia*

### 5.3.11 Termómetro de laboratorio (100 °C).

Se empleo el Termómetro de laboratorio de mercurio, y es de escala opal de -10 °C a 100 °C y con los intervalos de graduación de °C. La escala interna es en color negro. Dispone de una anilla de vidrio para facilitar el soporte y permite colgarlo.

#### Figura 37.

*Termómetro de laboratorio*



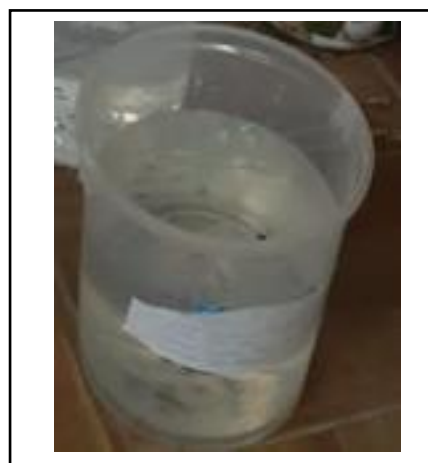
Nota. *Elaboración propia*

### 5.3.12 Recipientes de vidrio y plástico (lunas de reloj y cubetas).

El Recipiente de vidrio Luna Reloj usado fue de tamaño 70 mm fabricado en vidrio de sosa y cal, libre de polvo, con excelentes superficies suaves y con los bordes pulidos al fuego que evitan que se astillen y que se quiebren, usados para limpieza de probetas. Cubetas de plástico fabricado en polietileno, con diámetro de 33.5cm y de diámetro de la base 24.5cm, con una altura 31 cm, volumen de 17 L, empleado para recipiente de agua en el temple de probetas.

#### Figura 38.

*Luna reloj y cubeta*



Nota. *Elaboración propia*

### 5.3.13 Equipo de protección personal (mandil, guantes y careta de protección).

Se uso equipo de protección personal indumentaria blanca de algodón, guantes de cuero reforzado (manipulación de probetas para el horno), y careta de protección facial de HDPE, con sistema de suspensión con ratchet, (manipulación en frente del horno)

#### Figura 39.

*Equipo de protección personal*



Nota. *Elaboración propia*

### 5.3.14 Cámara digital

Se empleo la cámara de un celular OPPO A17 DE 50 Mpx., de software Color OS 12.1 basado en Android 12.

## 5.4 Desarrollo de pruebas experimentales

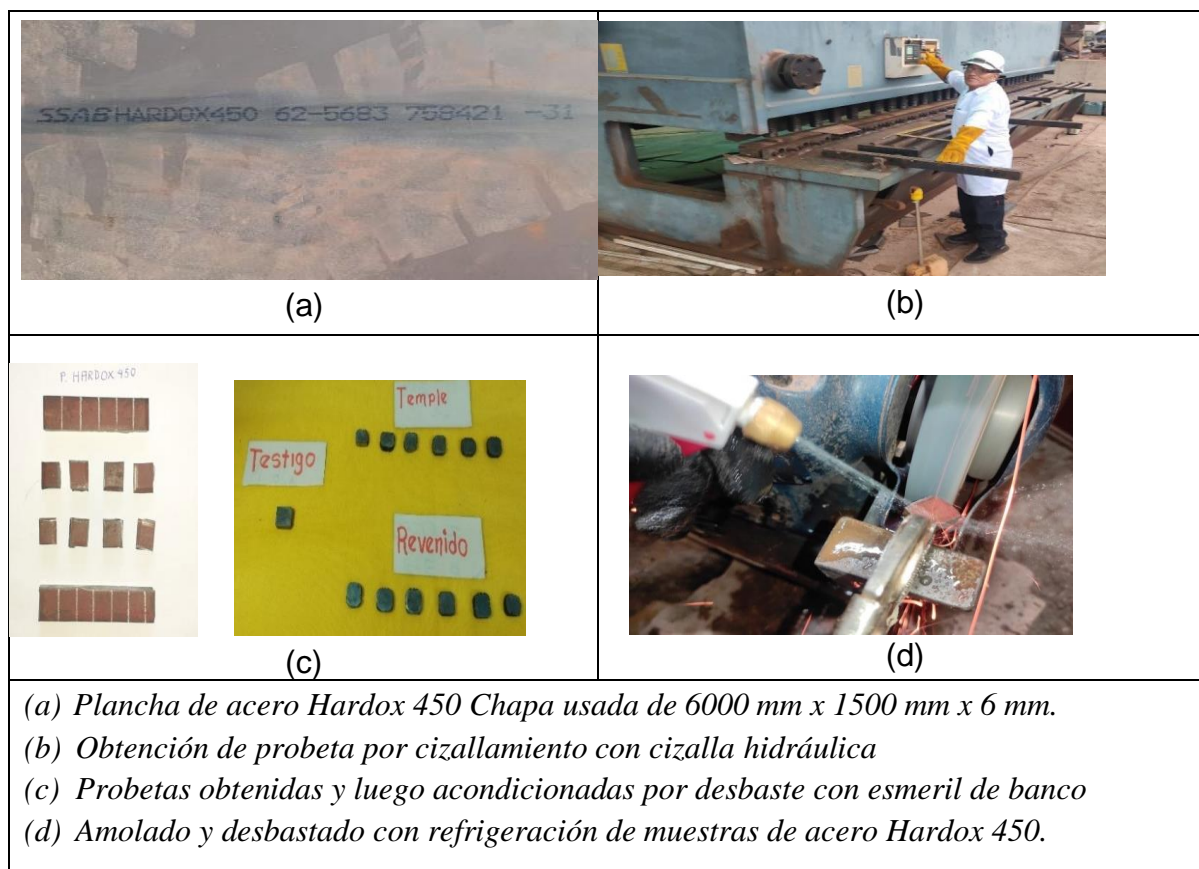
En la fig. 26 se aprecia que el metal base de investigación es el acero Hardox 450 (fig. 40 (a)) facilitado y proveído para estos ensayos por la Empresa Industrias FIRME SAC – Cusco y a partir de ella se extraerán probetas una para testigo y 12 para temple y revenido según condiciones mencionadas más adelante en el tratamiento de temple y revenido (6 templados y 6 revenidos) y Para el desarrollo de las presentes pruebas de templado, revenido, medición de la dureza y análisis metalográfico se utilizaron los equipos, máquinas y herramientas de las instalaciones del laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica – UNSAAC. Los ensayos fueron realizados con orientación y apoyo del **Mg. José Julio Farfán Yépez** de la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco-UNSAAC.

### 5.4.1 Preparación de probetas de acero Hardox 450

La preparación preliminar de las muestras se realizó mediante mecanizado para evitar calentamiento a las probetas mediante el cizallamiento de la plancha metálica HARDOX 450 por medio de una maquina cizalladora hidráulica (fig.40 (b)) facilitado por la Empresa Industrias FIRME SAC – Cusco, y se obtuvieron probetas de la plancha de Acero HARDOX 450 de dimensiones en milímetros de 12 x 12 x 6 cada probeta, luego se procedió al acondicionamiento de las probetas (fig. 40 (c)) al eliminar los cantos vivos en un esmeril de banco (fig. 40 (d)), refrigerando con agua para evitar alteraciones microestructurales del material. Esta última operación se realizó para evitar lesiones y accidentes personales en las manos y cumplir con seguridad y salud en el trabajo en el laboratorio de la Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica de la UNSAAC.

**Figura 40.**

*Uso del acero Hardox 450 y preparación de probetas mediante mecanizado.*



Nota. Elaboración propia.

## 5.4.2 Tratamiento de temple

Las probetas mecanizadas (mm) de 12 x 12 x 6, fueron sometidos a tratamiento de temple en el horno mufla eléctrico BIOBASE (fig. 43 (a)), para ello se austenizaron las muestras a temperaturas de 850, 910 y 950 °C en cada uno dos muestras a 40 y 60 min. y luego se templaron en agua a 10 °C, antes se eliminó con lijar al agua la pintura de protección.

### 5.4.2.1 Determinación de temperaturas críticas $A_1$ y $A_3$

La tabla 5 se usó para calcular las temperaturas críticas; de transformación de perlita en austenita ( $A_1$ ), la temperatura final de transformación de ferrita en austenita ( $A_3$ ) y la temperatura de inicio de transformación martensítica ( $M_s$ ) en el acero Hardox 450, se usaron ecuaciones de valor experimental de Andrews.



### a) Temperatura $A_1$

Según la ecuación de Andrews publicado en Gorni (2019), la temperatura de equilibrio inferior entre la ferrita y austenita es la siguiente:

$$A_1 = 723 - 16.9 \text{ Ni} + 29.1 \text{ Si} + 6.38 \text{ W} - 10.7 \text{ Mn} + 16.9 \text{ Cr} + 290 \text{ As}$$

Reemplazando las cantidades porcentuales, se obtuvo:  $A_1 = 716 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### b) Temperatura $A_3$

Para el cálculo de la temperatura de austenización del Hardox 450, se tomó como referencia la relación de Andrews citado en Gorni (2019). Por tanto, la temperatura de equilibrio superior ( $A_3$ ) entre la ferrita y austenita se calculó mediante siguiente ecuación:

$$A_3 = 910 - 203 \sqrt{C} + 44.7 \text{ Si} - 15.2 \text{ Ni} + 31.5 \text{ Mo} + 104 \text{ V} + 13.1 \text{ W} - 30.0 \text{ Mn} + 11.0 \text{ Cr} + 20.0 \text{ Cu} - 700 \text{ P} - 400 \text{ Al} - 120 \text{ As} - 400 \text{ Ti}$$

Reemplazando las cantidades porcentuales, se obtuvo:  $A_3 = 770 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Tomando en cuenta la regla práctica, para aceros hipoeutectoides se agrega  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . entonces, la temperatura mínima de austenización sería:  $A_3 = 820 \text{ }^\circ\text{C}$ . Para asegurar permanencia en fase austenítica, se considera realizar las pruebas a  $850, 910$  y  $950 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### c) Temperatura $M_s$

Para aceros con contenidos de baja aleación, caso del Hardox 450, la temperatura de inicio de transformación de la austenita en martensita ( $M_s$ ) se estima mediante la ecuación de Andrews tal como se menciona en Gorni (2019).

$$M_s = 512 - 453 \text{ C} - 16.9 \text{ Ni} - 9.5 \text{ Mo} + 217 \text{ C}^2 - 71.5 \text{ C Mn} + 15 \text{ Cr} - 67.6 \text{ C Cr}$$

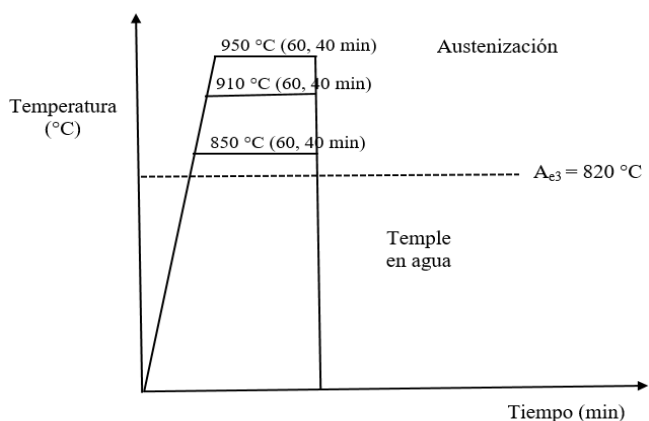
Reemplazando las cantidades porcentuales, se obtuvo:  $M_s = 417.53 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 5.4.2.2 Condiciones de templeado

Las muestras en estudio se austenizaron a temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ ) de 950, 910 y 850 con tiempos de 60 y 40 min para cada temperatura, como medio de enfriamiento se utilizó agua potable a  $10^{\circ}\text{C}$  con agitación manual (figura 43 (b)) para que la velocidad de temple sea uniforme y disperse las burbujas de vapor adheridas sobre las probetas en estudio. Las condiciones del templeado están representadas en el diagrama Temperatura – Tiempo para el Tratamiento de Temple en la figura 41 como sigue.

**Figura 41**

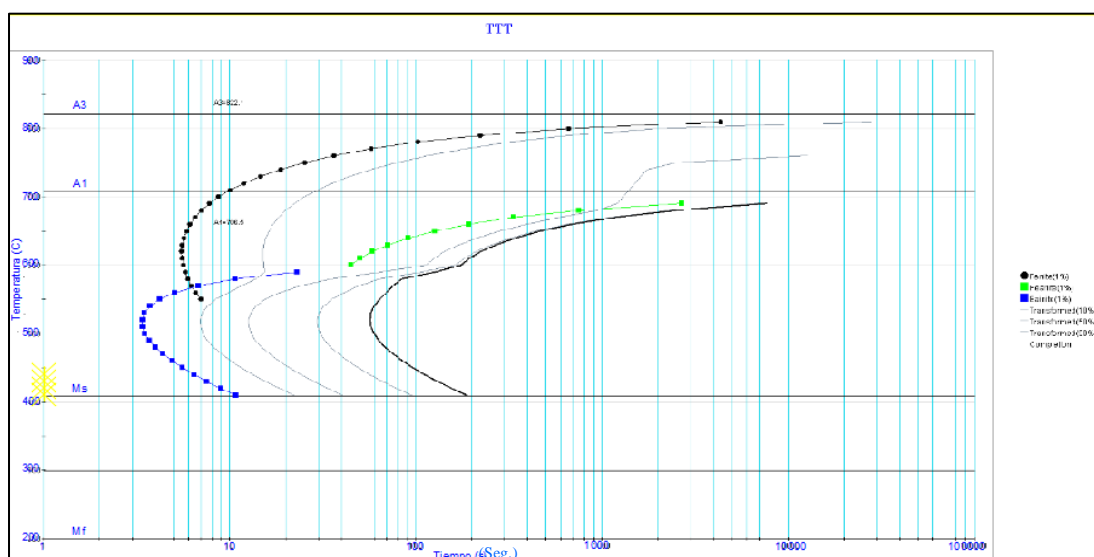
*Diagrama Temperatura – Tiempo para el Tratamiento de Temple*



Nota. *Elaboración propia*

**Figura 42**

*Diagrama TTT del acero Hardox 450*

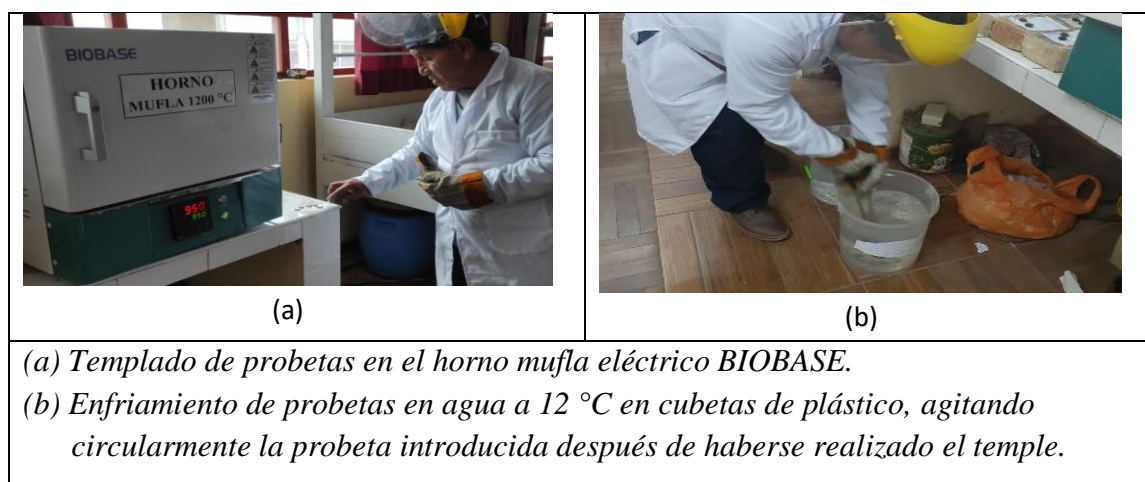


Nota. Data de Soporte técnico de la empresa Oxelösund SSAB

La figura 42 muestra el diagrama TTT (transformación, tiempo y temperatura) del acero Hardox 450, y se aprecia en ella que la temperatura de austenización es de  $822.1^{\circ}\text{C}$ , y también se tiene fases presentes de ferrita (puntos en negro), bainita (puntos en azul) y perlita (puntos en verde) respectivamente. El tiempo de enfriamiento empleado fue de 3 segundos en función al diagrama TTT del Hardox 450 de la figura 42.

### Figura 43

*Templado y enfriamiento de probetas tratadas*



Nota. *Elaboración propia*

### 5.4.3 Tratamiento de revenido

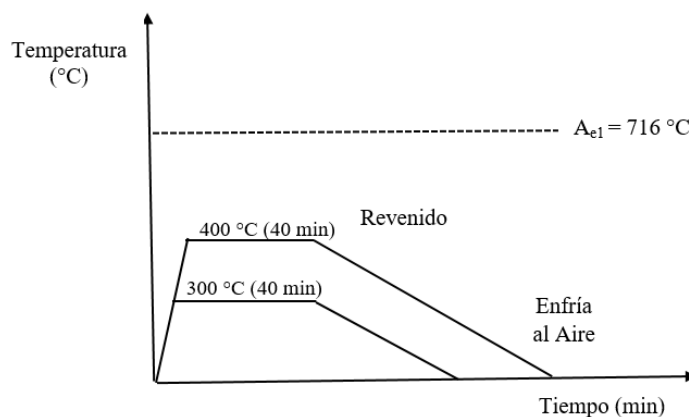
Las probetas de acero Hardox 450, luego de ser templados y con el propósito de mejorar los efectos del temple, fueron revenidos a temperaturas inferiores al punto crítico  $Ae_1$  seguido de un enfriamiento en corriente de aire (figura 45).

#### 5.4.3.1 Delimitación de la temperatura de revenido

En la delimitación de temperaturas mínima y máxima del proceso de revenido se consideró como referente las temperaturas de  $300^{\circ}\text{C}$  y  $400^{\circ}\text{C}$ . Por encima de dichas temperaturas se obtiene una microestructura homogénea de martensita revenida. La delimitación de la temperatura de revenido se figura en el Diagrama Temperatura – Tiempo para el Tratamiento de Revenido en la Figura 44 como se aprecia a continuación.

**Figura 44**

*Diagrama Temperatura – Tiempo para el Tratamiento de Revenido*



Nota. *Elaboración propia*

**Figura 45**

*Revenido de probetas*



*(a) Realizando el revenido de probetas después de realizar el templado de las mismas*

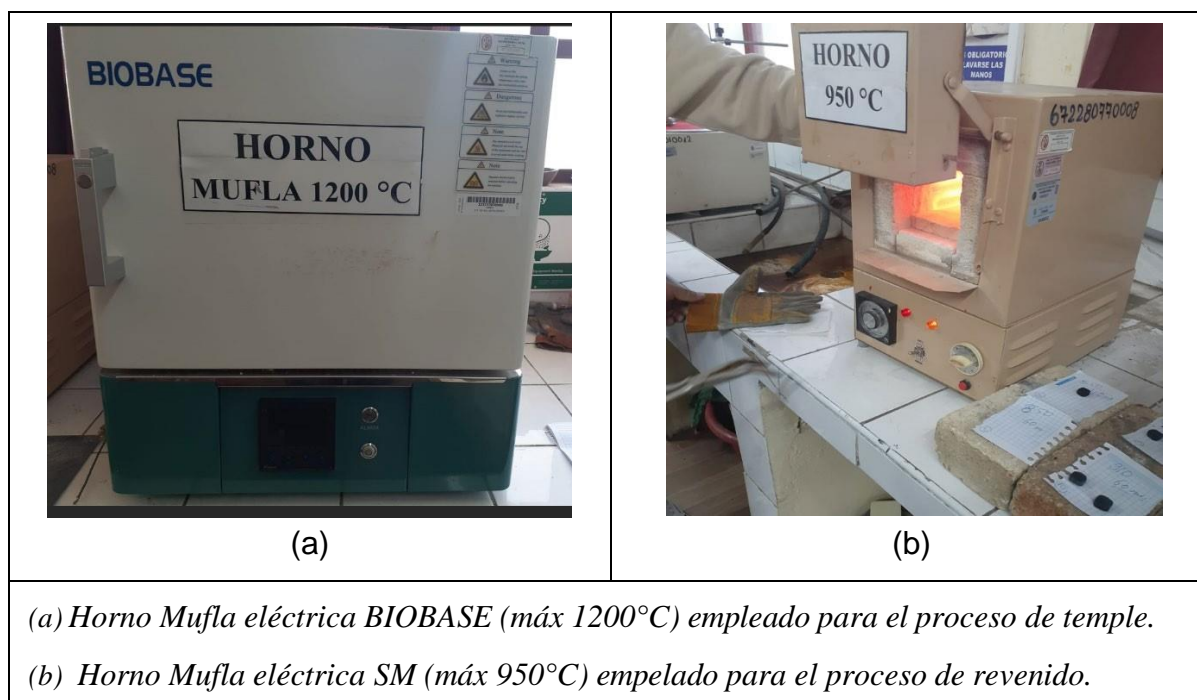
Nota. *Elaboración propia*

#### 5.4.3.2 Condiciones de revenido

El revenido se realizó a temperaturas alrededor de  $M_s$ , es así, que para las pruebas experimentales se tomaron en cuenta las temperaturas de 300 y 400 °C con una duración de 40 min en cada caso, el enfriamiento fue al aire a condiciones del laboratorio (17 °C). El Horno Mufla eléctrica SM es el que se empleó en este tratamiento de revenido. (fig. 46 (b)).

## Figura 46

Hornos eléctricos de laboratorio para procesos de Temple y Revenido.



(a) Horno Mufla eléctrica BIOBASE (máx 1200°C) empleado para el proceso de temple.  
 (b) Horno Mufla eléctrica SM (máx 950°C) empleado para el proceso de revenido.

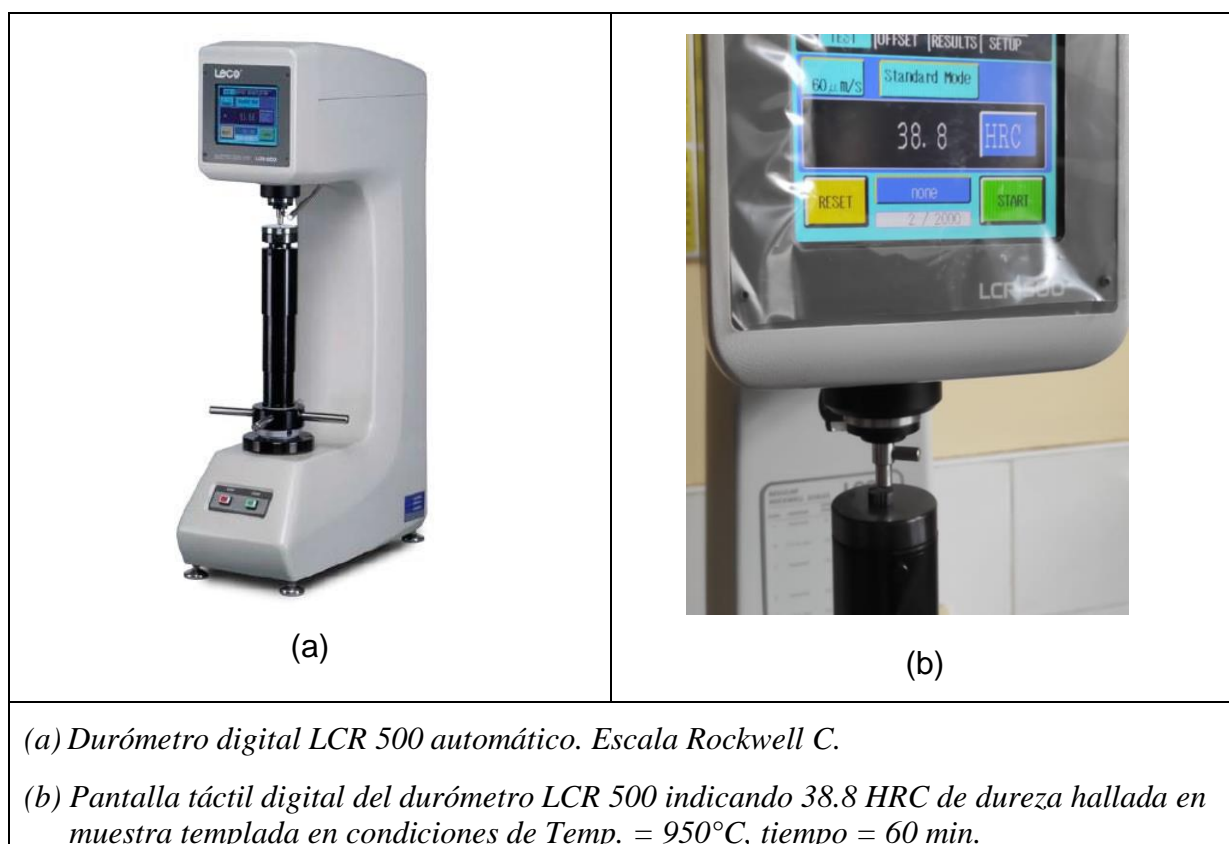
Nota. Elaboración propia.

### 5.5 Pruebas de dureza

La medida de la dureza superficial de las probetas del acero Hardox 450, se determinó considerando la norma ASTM E18 en el durómetro digital LCR 500 en la escala Rockwell C (fig. 47(a)), empleando un penetrador cónico de diamante y aplicando automáticamente una combinación como precarga de 10 kgf además de la carga principal de 150 kgf. La dureza Rockwell se obtiene por la diferencia en la profundidad de las indentaciones causadas por las cargas menores y mayores. Previamente al ensayo de dureza se eliminó de las muestras óxidos o impurezas presentes por el tratamiento térmico realizado y luego se realizó el ensayo de dureza indentando en tres puntos cercanos al eje central en cada muestra y obtener una dureza del promedio de los mismos hallados de la lectura de la pantalla del durómetro digital LCR 500 (fig. 47(b)) esto para cada muestra ensayada.

**Figura 47**

*Equipo durómetro digital (Escala Rockwell C).*



Nota. *Elaboración propia.*

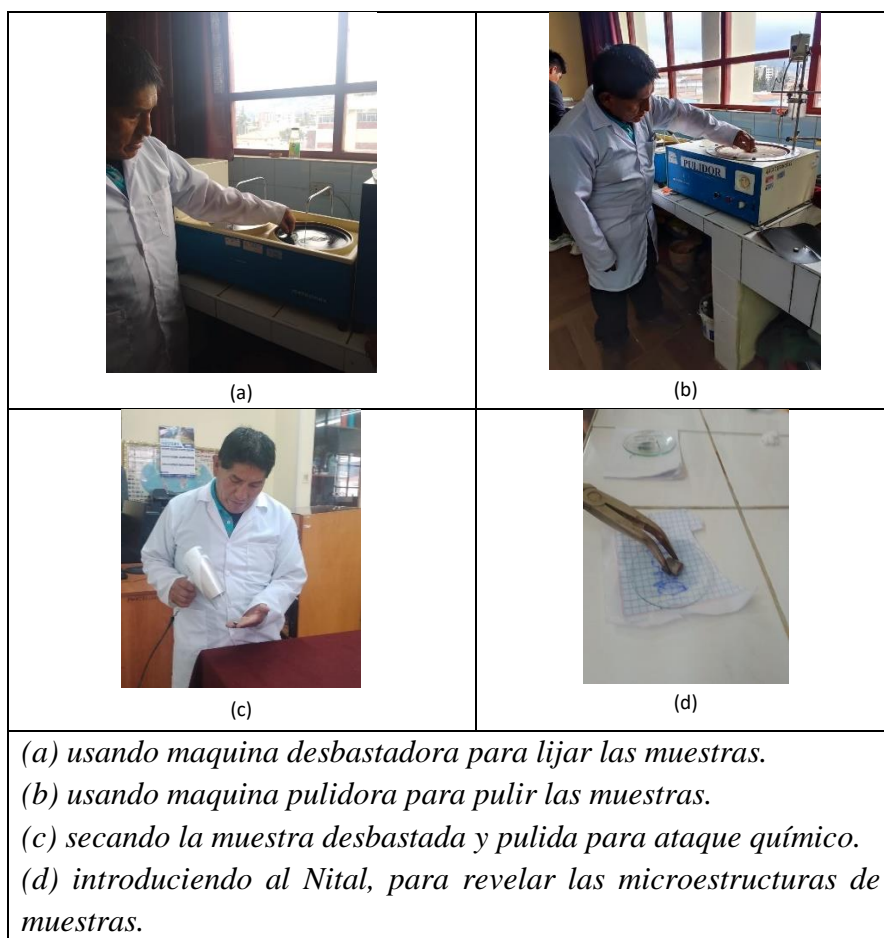
## 5.6 Análisis metalográfico

Para un análisis apropiado de las fases microestructurales presentes en las probetas de acero Hardox 450 templadas y revenidas se usó el Microscopio Metalográfico PETIP (fig. 49 (a)), considerando la norma ASTM E3 y previamente todas las muestras templadas y revenidas se desbastaron la superficie a ser analizada con papel abrasivo al agua desde un grano grueso a grano fino de numeración de 200, 400 y 600 en una máquina desbastadora METASINEX con dispensador de agua hasta obtener una superficie homogénea libre de óxidos o material extraño y esta operación se aprecia en la fig. 48 (a), posteriormente se realizó el pulido de estas muestras en una máquina pulidora MONTASUPAL con Alúmina de 1  $\mu\text{m}$  y dispensador de agua para eliminar toda presencia de líneas o rayas y se obtiene una superficie fina y lustrosa espejo y

favorezca en la observación metalográfica de las muestras, esta actividad se aprecia en la fig. 48 (b). Finalmente se aplica una solución química Nital al 5%, para el revelado de la superficie metálica mediante un ataque químico en su superficie de contacto, previamente antes se realiza la limpieza después del pulido con alcohol al 75% y se seca estas muestras con secadora eléctrica como en la fig. 48 (c) para estar apta al ataque químico del Nital como se aprecia en la fig. 48 (d). y luego llevar al microscopio para conseguir la microestructura de cada muestra, registrando imágenes en 100X y 400X ver fig.49 (b), seguidamente se procedió a su análisis correspondiente y se registró imágenes más representativas.

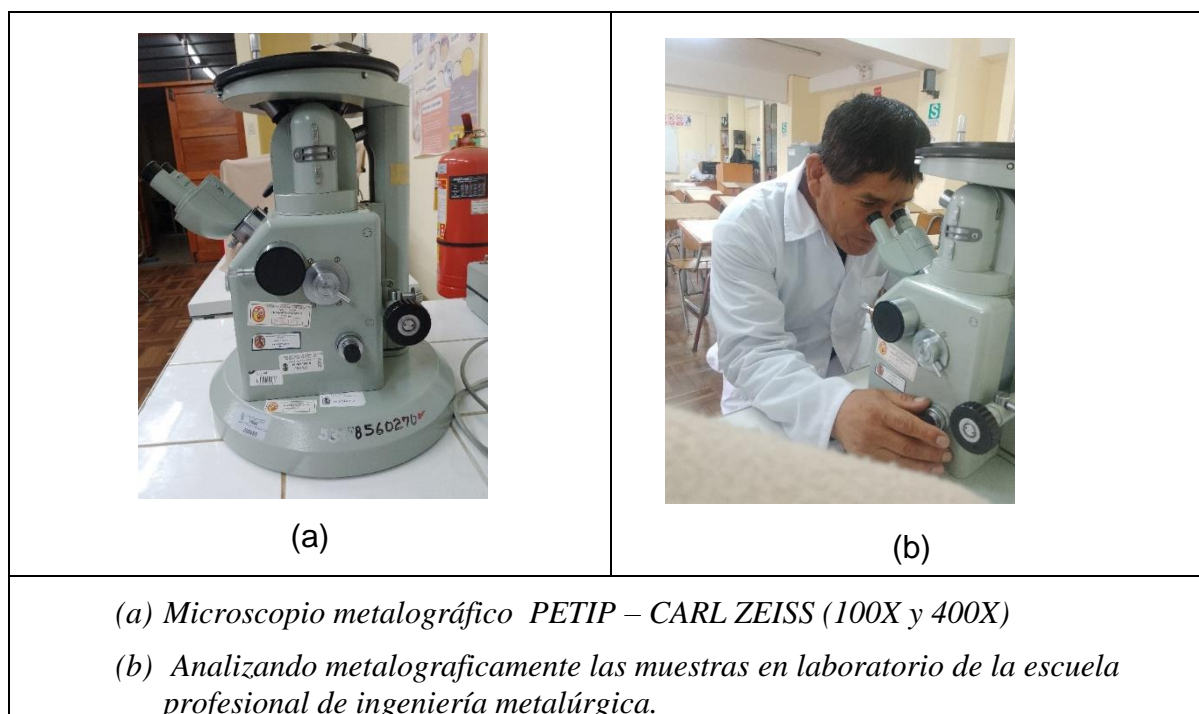
### Figura 48

*Operaciones previas al análisis metalográfico.*



Nota. Elaboración propia.



**Figura 49***Microscopio Metalográfico.*


Nota. *Elaboración propia.*

**5.7 Resultados experimentales****5.7.1 Resultados de la dureza después del temple**

En la tabla 7 se muestra mediciones de durezas del testigo en estado suministro, Para el proceso de temple, se usaron 12 probetas de acero Hardox 450, y en la tabla 8 se aprecian temperaturas y tiempos de austenización, además el valor de las pruebas de durezas obtenidas en el material de estudio..

**Tabla 7**

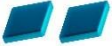


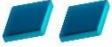


*Resultados de pruebas de dureza del testigo- Hardox 450*

Muestras para temple	Código de probeta (N°)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Dureza(HRC)	Dureza promedio (HRC)
	Testigo	-	-	45.4	45.70
				45.4	
				46.3	

Nota. *Elaboración propia*



**Tabla 8***Resultados de pruebas de dureza después del temple. Hardox 450*







Muestras para temple	Código de probeta (N°)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Dureza medida (HRC)	Dureza promedio (HRC)
	1T	950	60	38.8	38.63
				41.1	
				36.0	
	2T	950	40	42.1	43.53
				46.9	
				41.6	
	3T	910	60	22.8	30.87
				32.8	
				37.0	
	4T	910	40	37.3	38.37
				38.4	
				39.4	
	5T	850	60	34.8	36.50
				37.0	
				37.7	
	6T	850	40	41.2	41.63
				40.8	
				42.9	

Nota. *Elaboración propia con datos experimentales.*

### 5.7.2 Resultados de la dureza de revenido

Para el proceso de revenido se emplearon seis muestras del acero Hardox 450, en la tabla 8 se aprecian temperaturas y tiempos del proceso de revenido, además, el valor de las durezas obtenidas acero en estudio.

**Tabla 9***Resultados de pruebas de dureza después del revenido. Hardox 450*

Muestras para revenido	Código de probeta (N°)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Dureza medida (HRC)	Dureza promedio (HRC)
	1R	400	40	30.0	32.10
				33.0	
				33.3	
	2R	300	40	39.8	39.83
				39.7	
				40.0	
	3R	400	40	20.3	24.43
				25.2	
				27.8	
	4R	300	40	31.8	34.60
				36.9	
				35.1	
	5R	400	40	28.5	32.30
				34.6	
				33.8	
	6R	300	40	29.5	34.83
				37.9	
				37.1	

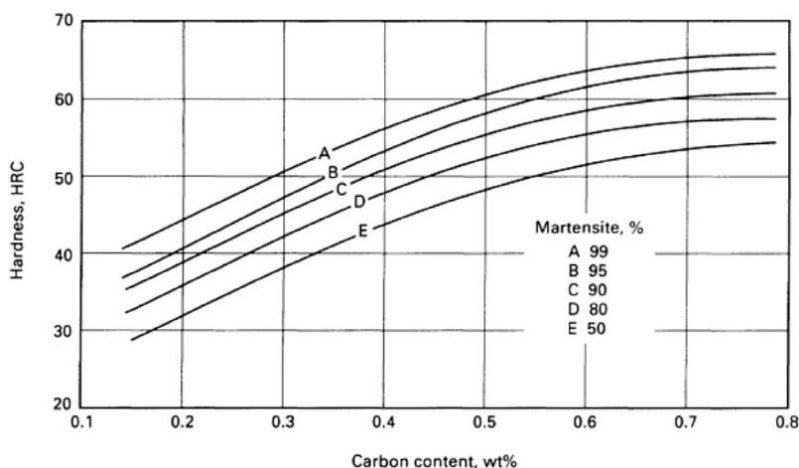
*Nota: Elaboración propia con datos experimentales.***5.7.3 Resultados del análisis metalográfico**

Por el temple de las muestras de acero efectuadas desde la temperatura de austenización mediante el enfriamiento rápido en agua, se desarrollan estructuras martensíticas con diferentes grados de dureza. La obtención de la cantidad porcentual de transformación martensítica en el acero dependió de la cantidad de carbono y elementos aleantes presentes, la presente figura 50 muestra la dureza del acero templado, y el contenido de la transformación

martensítica, ambos dependiendo de la cantidad de carbono. La utilidad de dicha gráfica permite estimar aproximadamente la cantidad de martensita conseguida en el temple de las muestras del hardox 450 y a partir de las durezas obtenidas en las pruebas experimentales de esta investigación con 0.183% de carbono en el hardox 450 se presenta en la tabla 10.

**Figura 50**

*Relación entre la dureza, contenido de carbono y cantidad de martensita.*



Nota. Recopilado de ASM International, 1998, p. 31. (Handbook Volume 4 - Heat Treating).

**Tabla 10**

*Cantidad porcentual estimada de martensita. Hardox 450 (0.26% C).*

Probeta (Código)	Testigo	1T	2T	3T	4T	5T	6T
Dureza (HRC)	45.70	38.63	43.53	30.87	38.37	36.50	41.63
Martensita (%)	99	92	98	50	91	83	96

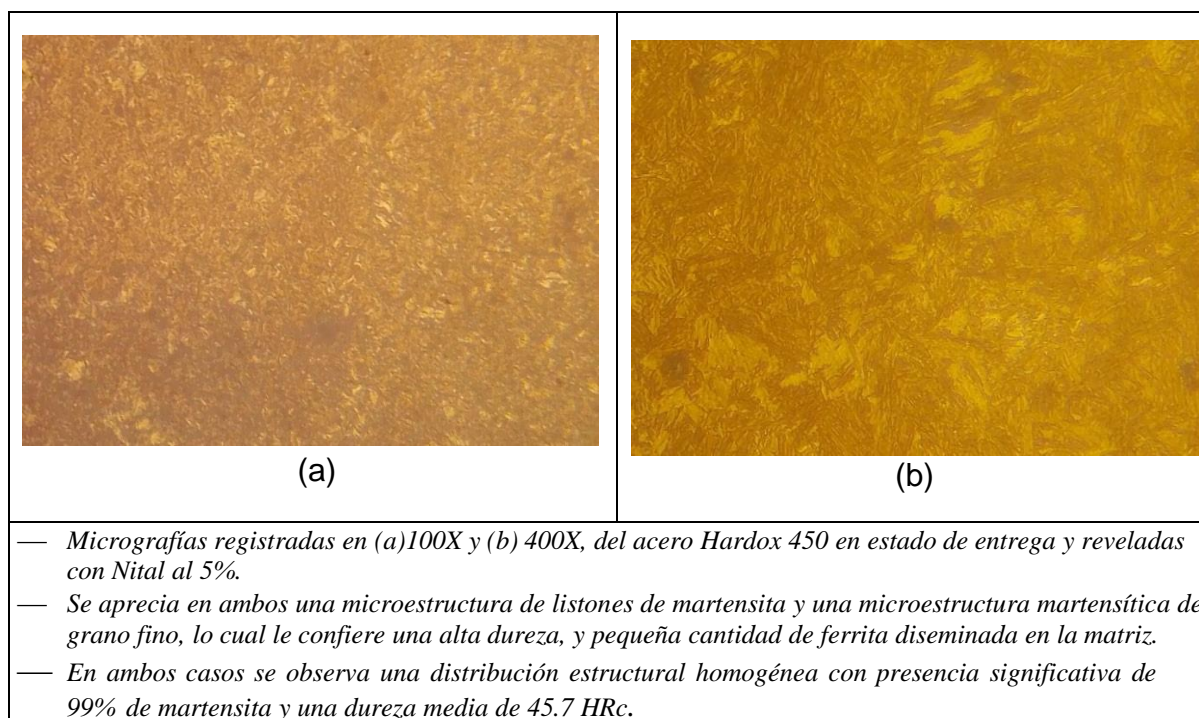
Nota. Fuente: Elaboración propia con datos experimentales.

En la figura 51 se representa la micrografía de la estructura del acero HARDOX 450 testigo con una microestructura caracterizada de martensita templada y las figuras 52 al 57 se presentan las micrografías de las estructuras de las muestras de acero en estudio después de los tratamientos de temple y revenido.

Las características de la microestructura están relacionadas con la composición química del acero, la temperatura y tiempo de austenización.

**Figura 51**

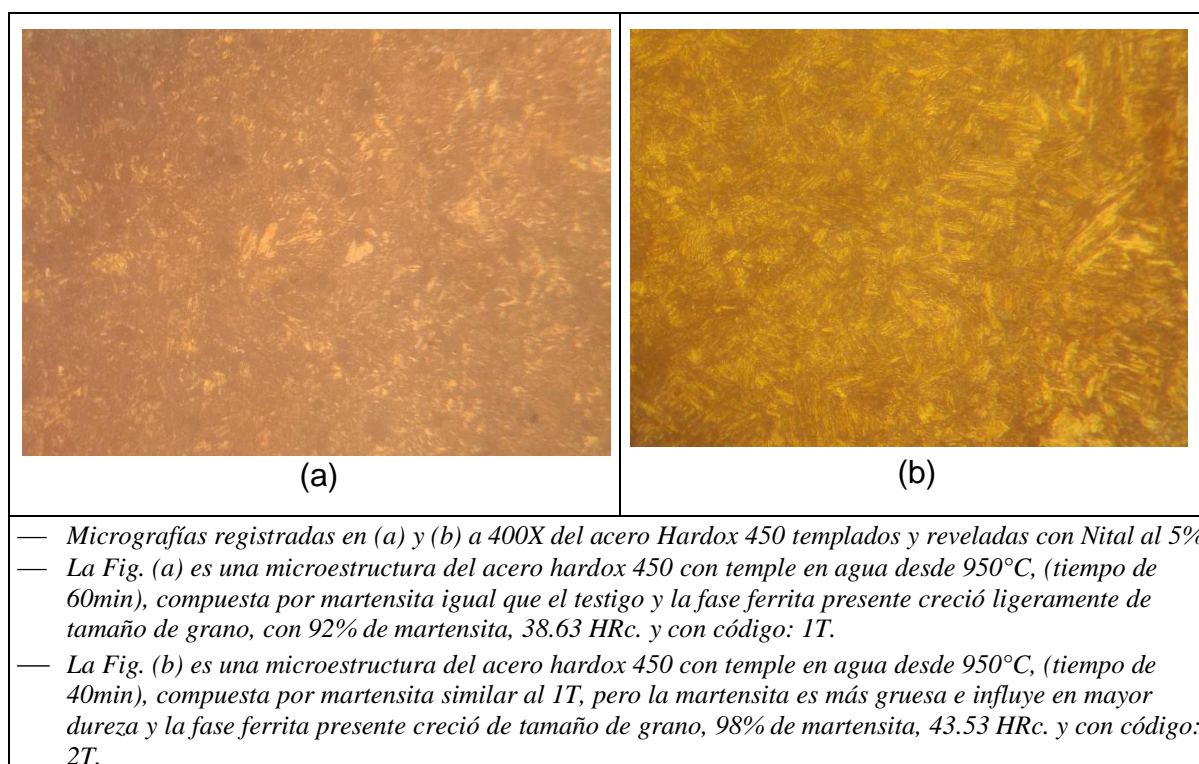
*Microestructuras del acero Hardox 450 testigo.*



Nota. Elaboración propia con datos experimentales.

**Figura 52**

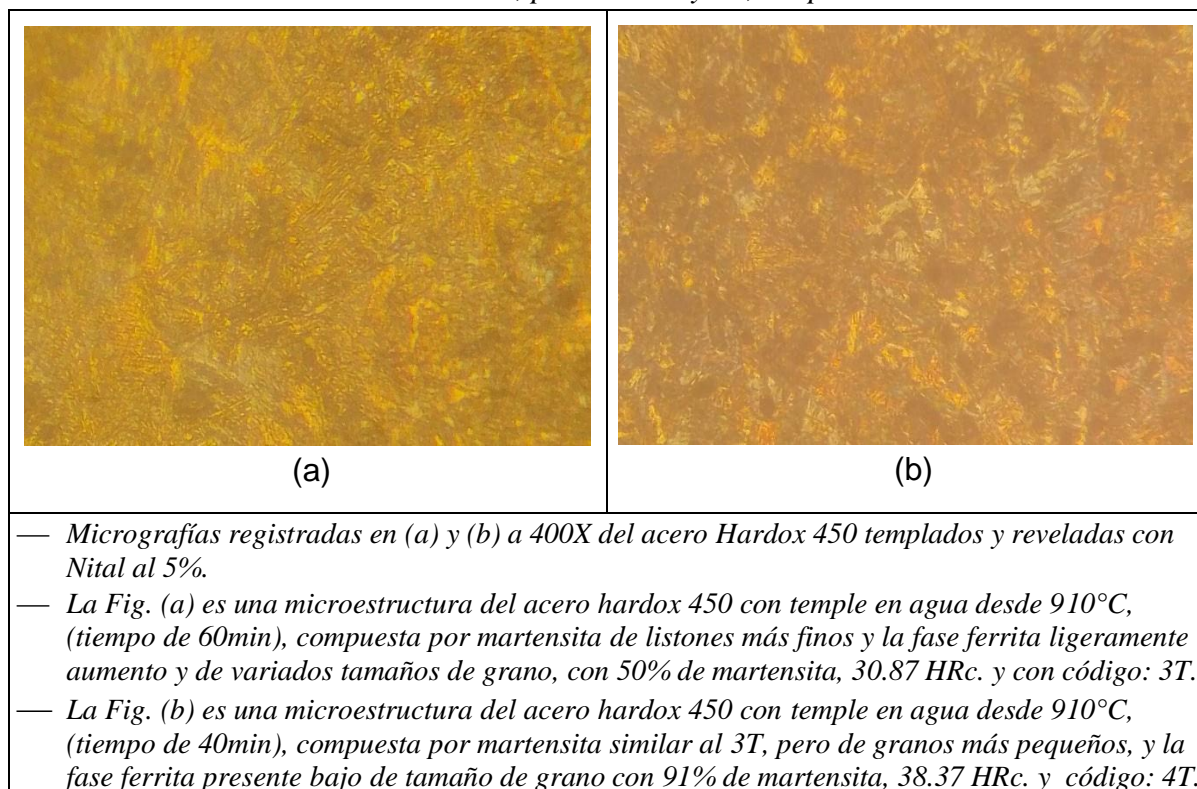
*Microestructuras del acero Hardox 450, probetas 1T y 2T, temple a 950 °C.*



Nota. Elaboración propia con datos experimentales.

**Figura 53**

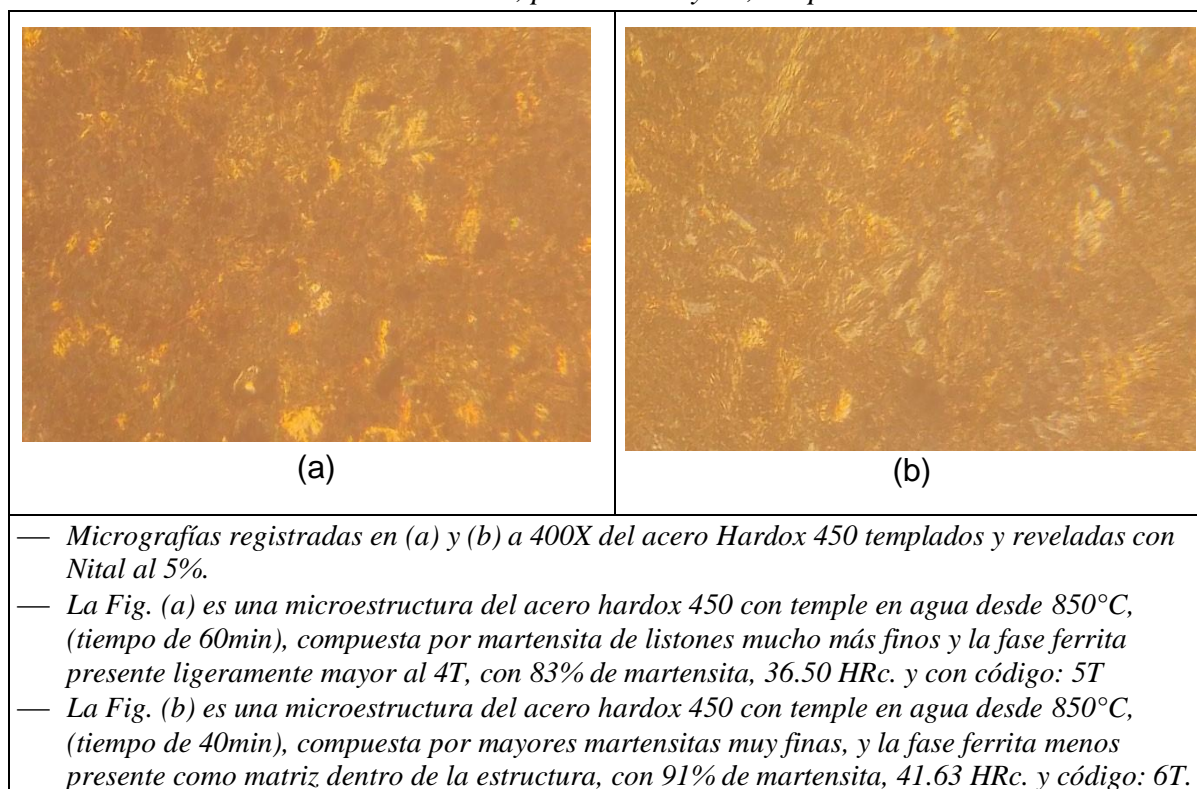
*Microestructuras del acero Hardox 450, probetas 3T y 4T, temple a 910 °C.*



Nota. Elaboración propia con datos experimentales.

**Figura 54**

*Microestructuras del acero Hardox 450, probetas 5T y 6T, temple a 850 °C.*

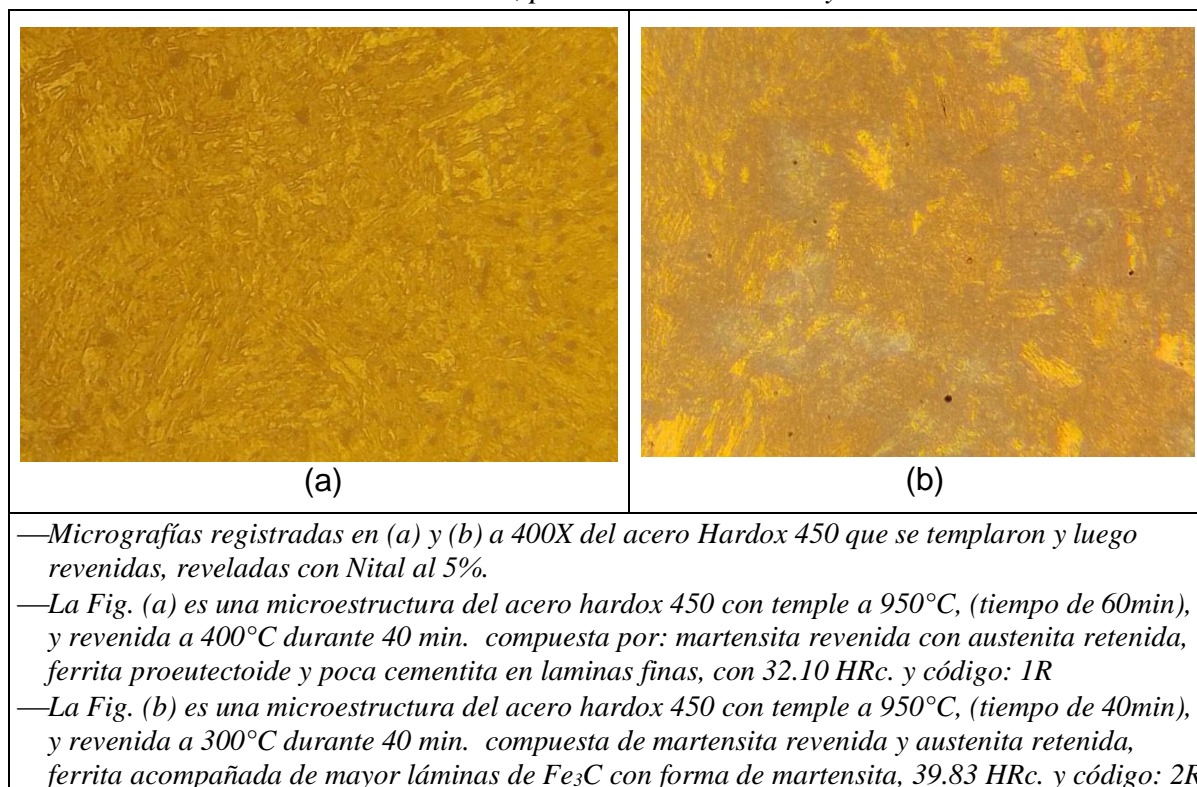


Nota. Elaboración propia con datos experimentales.



**Figura 55**

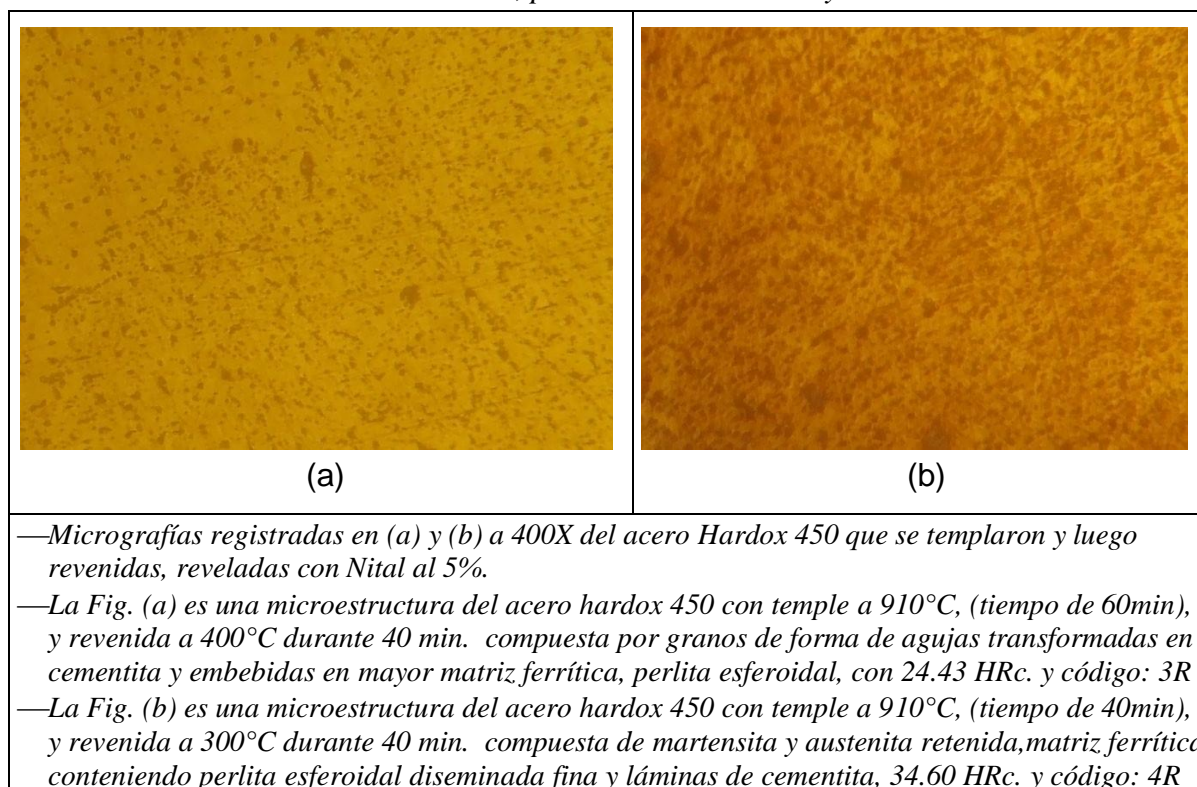
*Microestructuras del acero Hardox 450, probetas revenidas 1R y 2R.*



Nota. Elaboración propia con datos experimentales.

**Figura 56**

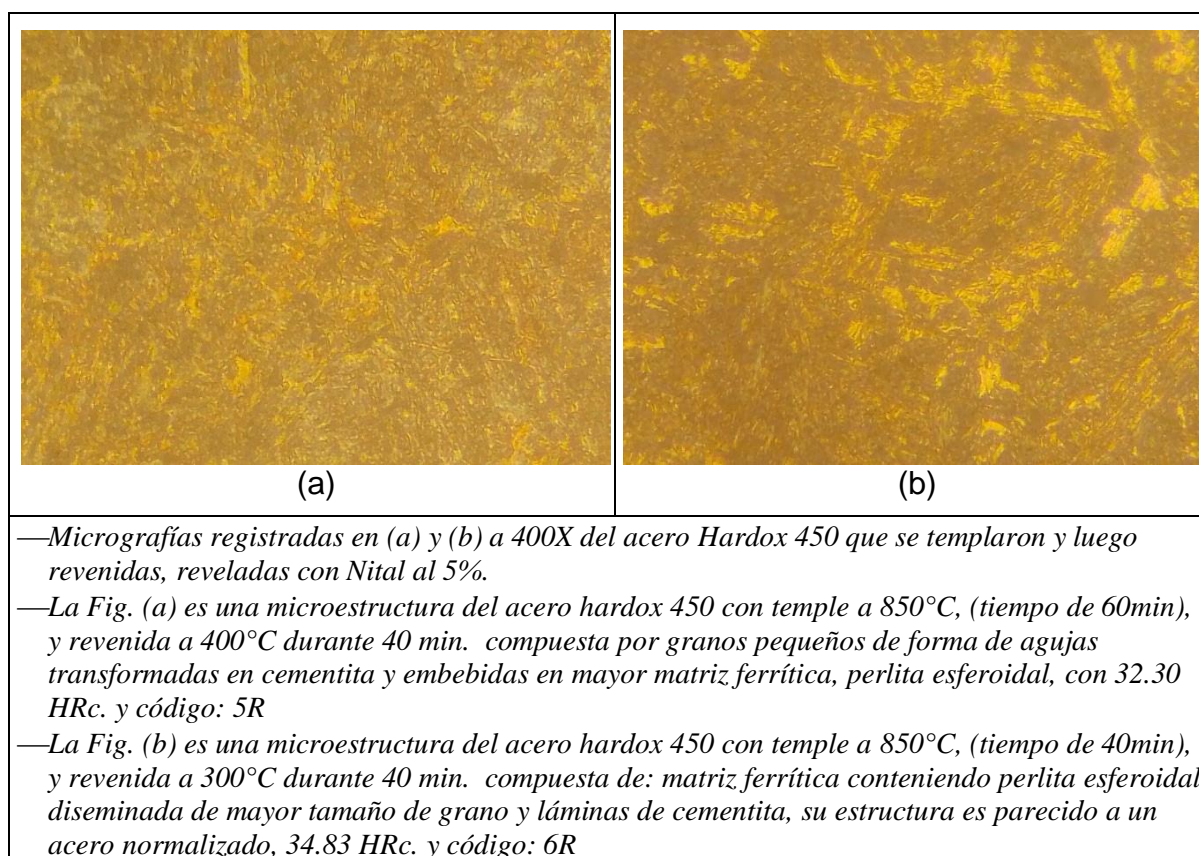
*Microestructuras del acero Hardox 450, probetas revenidas 3R y 4R.*



Nota. Elaboración propia con datos experimentales.

**Figura 57**

*Microestructuras del acero Hardox 450, probetas revenidas 5R y 6R.*



Nota. Elaboración propia con datos experimentales.

## CAPÍTULO VI ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1. Dureza del material testigo.

El acero Hardox 450 en estado de suministro según la tabla 6 indica su valor de dureza entre los límites de 45 y 50 HRc y al confrontar con la dureza del testigo obtenidas y presentadas en la tabla 7 del testigo Hardox 450 para el presente estudio de investigación, se registra una dureza media en promedio de 45.7 HRc de dureza, con lo que concuerda con las especificaciones del acero hardox 450 en estado de adquisición de la empresa fabricante sueca SSAB de este acero Hardox 450. Cada elemento aleante contribuye a ciertas propiedades mecánicas específicas del acero, como dureza, resistencia al impacto y a la tracción.

### 6.2. Análisis metalográfico del material testigo.

En cuanto a la microestructura del acero en estudio, en el caso del testigo en estado de suministro del proveedor, ver figura 51, se muestra una distribución estructural de manera uniforme con presencia de 99% de martensita templada en paquete. La morfología de la martensita para este tipo de acero de baja aleación y por tener bajo contenido de carbono (0.183% máximo), se presenta en forma de listones con diferentes orientaciones y se encuentran empaquetados microscópicamente en granos finos. La presencia de los listones de martensita, genera una alta distorsión y conforma regiones de altas densidades de dislocación lo que induce a una gran dureza del material.

### 6.3. Dureza en probetas templadas.

En la tabla 11 se muestra las mediciones de dureza del proceso de temple en agua en función de las variables temperatura y tiempo de austenización del material. Se observa que, para cada par de probetas a temperaturas superiores a la temperatura crítica superior  $A_{c3}$  y para tiempos de tratamiento de 60 min, los valores de la dureza en cada caso, son menores que los



correspondientes a tiempos de tratamiento de 40 minutos. La diferencia de durezas está influenciada por la temperatura y tiempo de austenización del tratamiento térmico de este acero. Se encontró que las durezas de las probetas templadas (dureza más alta 43.53 HRC) son menores a la dureza del material testigo (45.7 HRC), esto se infiere al efectuar comparación de las durezas entre las tablas 7 y 8 respectivamente del testigo y probetas sometidas a tratamiento térmico de temple del acero hardox 450.

**Tabla 11**

*Dureza obtenida en el temple del Hardox 450.*

Código de probeta (N°)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Dureza promedio (HRC)
1T	950	60	38.63
2T		40	43.53
3T	910	60	30.87
4T		40	38.37
5T	850	60	36.50
6T		40	41.63

Nota. Elaboración propia con datos experimentales.

#### **6.4. Análisis metalográfico de temple.**

En micrografías de las muestras sometidas al proceso de temple a temperaturas de 950, 910 y 850 °C con tiempos de austenización de 60 y 40 min para cada temperatura, ver figuras 52, 53 y 54; se observa que, para tiempos de tratamiento de 60 min, la presencia de martensita es menor que para los tratamientos de 40 min, lo que implica una menor y mayor dureza del material tratado. Lo manifestado se corrobora con lo representado y mostrado en la tabla 8. Asimismo, la presencia de la martensita en forma de listones con diferentes orientaciones y empaquetados microscópicamente en granos finos se debe a la temperatura de inicio de

transformación de la martensita Ms (418 °C) lo cual está determinado por el contenido de aleantes del Hardox 450. A mayor tiempo de calentamiento, mayor será la evolución de la dimensión del grano austenítico y que durante el templado además de la martensita, se presentará cierta cantidad de austenita retenida, lo cual ofrecerá una disminución en la dureza; por el contrario, sí el tiempo de tratamiento es menor, será menor el tamaño de grano austenítico; por tanto, la dureza será mayor y se ampliará por la presencia de la martensita finas o gruesa que se presentan en micrografías y en algunos la ferrita se presenta en menor cantidad.

### 6.5. Dureza en probetas revenidas.

La tabla 11, presenta durezas conseguidas en el proceso de revenido enfriadas al aire.

**Tabla 12**

*Dureza obtenida después del revenido del Hardox 450.*

Código de probeta (N°)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Dureza promedio (HRC)
1R	400	40	32.10
2R	300	40	39.83
3R	400	40	24.43
4R	300	40	34.60
5R	400	40	32.30
6R	300	40	34.83

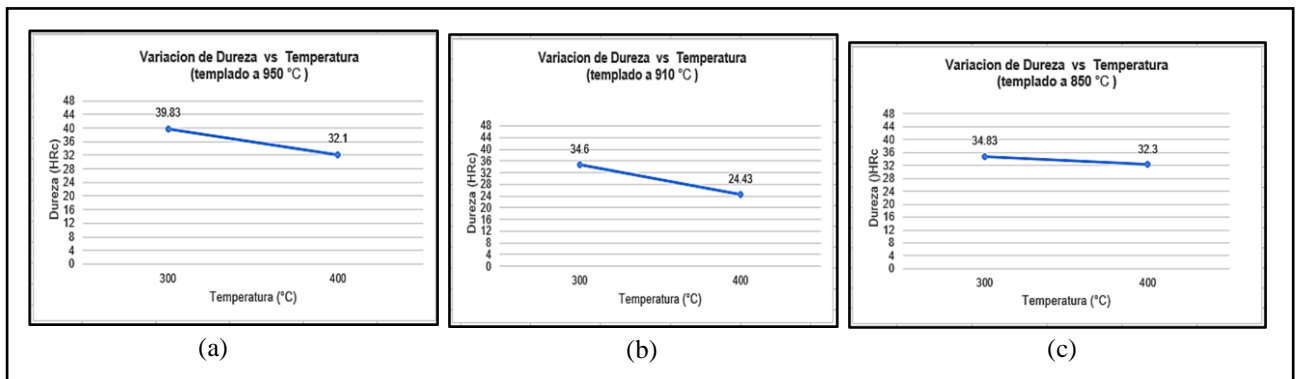
*Nota. Elaboración propia. (Probetas 1R y 2R, provenientes del temple a 950 °C, Probetas 3R y 4R, provenientes del temple a 910 °C, Probetas 5R y 6R, provenientes del temple a 850 °C.)*

Los valores de las durezas de cada par de probetas revenidas, indican que para un tiempo de 40 minutos y a temperaturas de 400 °C, dichos valores son menores en relación a las durezas de las probetas revenidas a 300 °C durante 40 minutos De la tabla 12 se aprecia que a mayor

Temperatura de revenido se aprecia menor dureza al observar los pares de probetas revenidas (300 y 400 °C). Por otra parte, al comparar la dureza del material testigo (tablas 7) con las durezas de las probetas revenidas (tabla 12) se encuentra que en la dureza de las probetas revenidas bajo muy notoriamente en comparación con la testigo. Esto se infiere, porque los valores comparados considerando la dureza del testigo de 45.7 HRc y con un valor más alto de dureza de las probetas revenidas que es de 39.83 HRc resulta que bajo en 5.87 HRc de dureza, entonces este acero es muy sensible a la temperatura por los resultados de durezas bajas obtenidos en este acero.

### Figura 58

*Diagrama de revenido (Dureza vs Temperatura del Hardox 450)*



En la figura 58 (a) se muestra el grafico de revenido del acero Hardox 450 templado a 950 °C, donde a 300 °C revenido tiene una dureza de 39.83 HRc y a 400 °C tiene una dureza de 32.10 HRc, lo cual indica que baja la dureza a mayor temperatura de revenido.

En la figura 58 (b) se muestra el grafico de revenido del acero Hardox 450 templado a 910 °C, donde a 300 °C revenido tiene una dureza de 34.60 HRc y a 400 °C revenido tiene una dureza de 24.43 HRc, lo cual indica que baja la dureza a mayor temperatura de revenido.

En la figura 58 (c) se muestra el grafico de revenido del acero Hardox 450 templado a 850 °C, donde a 300 °C revenido tiene una dureza de 34.83 HRc y a 400 °C revenido tiene una dureza de 32.30 HRc, lo cual indica que baja la dureza a mayor temperatura de revenido.

## **6.6. Análisis metalográfico de revenido.**

En las figuras 55, 56 y 57, se representan las micrografías de las muestras de Hardox 450 sometidas al proceso de revenido a temperaturas de 300 y 400 °C con un tiempo constante de 40 minutos. La morfología de la martensita revenida a 300 °C consta de cierta cantidad de pequeños listones martensíticos descompuestos en partículas finas de cementita precipitada alrededor de los listones dentro de una matriz ferrítica, esto se debe a la difusión del carbono a lugares de menor energía y mayor estabilidad como en el caso de las dislocaciones producidas en el revenido. A la temperatura de 400 °C, las partículas de cementita aumentan relativamente su tamaño y tienden a coalescer para formar pequeñas partículas esferoidales, esta tendencia continuará a mayores temperaturas y tiempos de revenido. La diferencia de durezas de cada par de probetas revenidas está influenciada por la temperatura de descomposición de la martensita inicial en ferrita y cementita, es decir que, a mayor temperatura, mayor será la descomposición de la martensita y a menor temperatura de revenido, menor será la descomposición de la martensita; por tanto, la dureza de la martensita revenida a mayor temperatura disminuye respecto a la dureza obtenida a menor temperatura de revenido, así mismo hay presencia también de perlita esferoidal y laminas finas de cementita embebidos en la matriz ferrítica.

## **6.7. Discusión de los resultados**

### **6.7.1. Estrategias de análisis de resultados**

Se evaluarán la dureza del acero HARDOX 450, después de los tratamientos térmicos de temple y revenido, por lo tanto, se determinarán los parámetros operativos, es decir se encuentran las condiciones más adecuadas de las variables para un análisis estadístico por diseño de bloques de la prueba de hipótesis de los datos experimentales recabados. La discusión de los resultados de durezas y registró de microestructuras se tiene:

### **A- Dureza de probetas templadas-revenidas.**

De acuerdo al análisis de los datos de valores de dureza de la probeta testigo (tabla 7) y de las probetas templadas (tabla 8) y revenidas (tabla 9), se aprecia que la dureza del testigo es de 45.7 HRc y al ser sometidas a templado las probetas de este acero a temperaturas de austenización de 850, 910 y 950 °C y en cada una de esas temperaturas se mantuvo dos probetas a diferentes tiempos de austenización (40 y 60 min.), bajo las dureza de estas probetas templadas de acero hardox 450 y recogiendo el valor más alto de la dureza de una probeta templada, se tiene 43.53 HRc y comparando este valor con el testigo se nota que bajo en 2.17 HRc de dureza. Por otra parte, comparando la dureza del testigo con pares de probetas revenidas a 300 y 400 °C y tiempo constante para todas de 40 min, se tuvo una muy marcada disminución en las durezas, así el valor más alto de dureza obtenida después del revenido fue de 39.83 HRc de dureza, indicando una caída notable de 5. 83 HRc de dureza. Esto indica que este acero es muy sensible a cambios de temperatura expuestos.

### **B- Metalografía de probetas templadas-revenidas**

La microestructura observada del testigo, muestra martensita de grano fino y distribuida su estructura de manera uniforme con presencia de 99% de martensita templada en paquete. La morfología de la martensita para este tipo de acero de baja aleación y por tener bajo contenido de carbono (0.183% máximo), se presenta en forma de listones con diferentes orientaciones. Las probetas templadas tienen menor dureza que el testigo porque presentan disminución en porcentaje de martensita (98%) comparada con el testigo como se aprecia en la tabla 10. A mayor tiempo de calentamiento, mayor será la evolución de la dimensión del grano austenítico y que durante el templado además de la martensita, se presentará cierta cantidad de austenita retenida, lo cual ofrecerá una disminución en la dureza; por el contrario, sí el tiempo de tratamiento es menor, será menor el tamaño de grano austenítico; por tanto, la dureza será mayor y se ampliará por la presencia de la martensita. En cuanto a la microestructura de las probetas revenidas se tiene

menor dureza porque cantidades pequeñas de listones martensíticos son descompuestos en partículas finas de cementita precipitada alrededor de los listones dentro de una matriz ferrítica en mayor proporción, esto se debe a la difusión del carbono a los lugares de menor energía y mayor estabilidad. Las partículas de cementita aumentan relativamente su tamaño y tienden a coalescer para formar pequeñas partículas esferoidales, esta tendencia continuará a mayores temperaturas y tiempos de revenido.

Para verificar las hipótesis planteadas posteriormente con los datos capturados de la dureza de templado y revenido, se sometió a análisis de resultados experimentales mediante los diseños experimentales de bloque. Ahora, se caracteriza en forma genérica la secuencia efectuada para alcanzar una función matemática y determine la vinculación existente entre los factores de entrada y las variables de respuesta y determinar significancia positiva o negativa.

#### **Experimento de templado y revenido.**

Recolección inicial de datos experimentales de templado y revenido con la intención de evaluar la consecuencia que los componentes tienen en las variables de respuesta. Para el templado se usan diseños experimentales de bloque de  $3 \times 2$  para dos factores. Y para el revenido se utilizaron diseños de experimentos con un solo factor y en ambos casos se analizaron por diferentes procedimientos estadísticos la calidad de los datos recogidos.

#### **Exploración de la región de búsqueda.**

Después que se obtuvo la relación estadística, normalmente a partir de la regresión por mínimos cuadrados, se realiza cambios en los valores de los factores indagando el ámbito de exploración.

#### **Consiguiendo valores óptimos de los niveles de los factores.**

Inferido la función matemática expresada en ecuación de regresión con partes polinomiales, se continúa usando algoritmos de optimización no lineal y que faciliten hallar valores del factor temperatura y tiempo para maximizar la dureza.

### 6.7.1.1. Prueba de hipótesis

#### A) Hipótesis de investigación

HG: La temperatura y tiempo del tratamiento térmico de temple y revenido influye negativamente en la resistencia a la dureza del acero HARDOX 450.

#### B) Hipótesis estadística

Para la temperatura:

$H_0: \mu_T = 0$  (La temperatura no es significativa)

$H_A: \mu_T > 0$  (La temperatura es significativa)

Para el tiempo:

$H_0: \mu_t = 0$  (El tiempo no es significativa)

$H_A: \mu_t > 0$  (El tiempo es significativa)

### 6.7.1.2. Variables de proceso

El diseño de bloques con tres replicas consta de tomar 2 variables independientes importantes para el estudio de la correlación que existe en el proceso de templado, y una variable en el proceso de revenido y propósito es evaluar el grado de influencia de cada uno de las variables en el proceso. El templado y revenido se vio como caja negra, con el propósito optimizar la dureza del acero HARDOX 450. los diseños de bloques son los más recomendables en esta etapa.

#### A) Variables del proceso de templado

La dureza es la variable dependiente y la temperatura de templado junto al tiempo de templado son variables independientes, el diseño factorial de bloque con tres replicas consta de tomar 2 variables independientes y 1 variable dependiente (ver figura 58), es importante para el estudio de la correlación que existe entre estas, y encontrar el grado de influencia para el proceso de

templado. La Tabla 13 muestra los niveles que asumen las variables estudiadas en el proceso de templado.

**Tabla 13.**

*Variables involucradas en el proceso de templado*

VARIABLE		(-)	(-)	(-)
A	X1: Temperatura de templado (°C)	850	910	950
B	X2: Tiempo de templado (min.)	40		60
	Y1: Dureza (RHC)	--	--	--

Nota. *Elaboración propia*

**Figura 58**

*Variables involucradas en el proceso de templado*



Nota. *Elaboración propia*

## B) Variables del proceso de revenido

Para la prueba de revenido se trató 2 niveles, y las características de las variables se aprecian en la tabla 14, y se nota que genera un diseño de una sola variable.

**Tabla 14**

*Variables involucradas en el proceso de revenido*

VARIABLE		(-)	(-)
A	X2: Temperatura de templado (°C)	300	400
--	Y2: Dureza (RHC)	--	--

Nota. *Elaboración propia*



## Figura 60

*Variables involucradas en el proceso de revenido.*



Nota. *Elaboración propia*

Es evidente que los efectos principales de la temperatura caen dentro del análisis de resultados. Otro modo de efectuar el análisis de los efectos de estas variables de entrada es por el análisis de varianza representado en la figura 60, que confirma resultados válidos que permiten modelar los datos recogidos durante la experimentación.

### A) Variable dependiente

- Dureza

### B) Variables independientes

- Temperatura de temple
- Tiempo de temple
- Temperatura de revenido

#### 6.7.1.3. Acondicionamiento de los datos experimentales

Se determinó que el diseño de bloques fuera en dos secuencias para tener confianza en el reporte experimental. Asimismo, se requirió horno automático, con el que se logró realizar el ensayo de tratamiento térmico y recopilar data de lo experimentado para estadísticamente conseguir resultados óptimos y alcanzar durezas respectivas como resultado del experimento de temple y revenido realizado al Hardox 450.

Con lo planteado anteriormente, se ingresará la información al software Minitab, que es un software de apoyo en el análisis estadístico del diseño de experimentos. Se tuvo en cuenta la información clara de las variables del proceso de la presente investigación.

### A) Resultados del proceso de templado

La matriz codificada para el diseño de bloques es alcanzada en la tabla 15. La matriz tiene datos de las variables de temperatura y tiempo de templado en un modelo de 3x2 con tres replicas

**Tabla 15**

*Datos de dureza después del templado*

TEMPERATURA (°C)	TIEMPO (min)	
	40	60
850	41.2	34.8
	40.8	37.0
	42.9	37.7
910	37.3	22.8
	38.4	32.8
	39.4	37.0
950	42.1	38.8
	46.9	41.1
	41.6	36.0

*Nota. Elaboración propia*

### B) Resultados del proceso de revenido

La Tabla 16, 17 y 18 muestran los valores temperatura de revenido y sus durezas obtenidas respectivamente después de efectuar las corridas experimentales. La tabla está integrada de 2 corridas, cada corrida respectiva de 3 réplicas para calcular la varianza del error experimental.

**B1) Revenido cuando el temple fue 850 °C****Tabla 16***Datos de la dureza después del revenido (se templo a 850 °C)*

TEMPER. DE REVENIDO	TRATAMIENTO			PROBETA
	1	2	3	
300	29.5	37.9	37.1	6
400	28.5	34.6	33.8	5

*Nota. Elaboración propia***B2) Revenido cuando el temple fue 910 °C****Tabla 17***Datos de la dureza después del revenido (templo a 910 °C)*

TEMPER. DE REVENIDO	TRATAMIENTO			PROBETA
	1	2	3	
300	31.8	36.9	35.1	4
400	20.3	25.2	27.8	3

*Nota. Fuente: Elaboración propia***B3) Revenido cuando el temple fue 950 °C**

Para la implementación y ejecución del diseño de experimentos se tomó en cuenta los datos del temple y revenido, estas fueron de respaldo porque se apreciaron las variables que incidieron en el proceso, por consiguiente, se usó el software Minitab y al manejar al azar por el modelo mostrado en el software Minitab se interpretaron distintas variables de proceso, considerando que la variable de respuesta en estudio fue la dureza Rockwell C (HRc)

**Tabla 18**

Datos de la dureza después del revenido (templo a 950 °C)

TEMPER. DE REVENIDO	TRATAMIENTO			PROBETA
	1	2	3	
300	39.8	39.7	40.0	2
400	30.0	33.0	33.3	1

Nota. Fuente: Elaboración propia

### 6.7.2. Primera etapa: Modelo de primer orden para el proceso de templado

Los diseños de bloques fueron aplicados para separar y comprender los componentes de temperatura y tiempo y cómo influyeron en el presente experimento. Los bloques fueron considerados de modo que los cambios dentro del bloque sea la más óptima. Para el experimento se usó el software Minitab. Se usaron tres respuestas para el ejemplo que menor logra conseguir una mayor respuesta.

#### 6.7.2.1. Análisis de varianza

Esta secuencia donde se resuelve la variación total en un conglomerado de variables en estudio en sus variantes de las partes específicas, se encuentra relacionadas con factores que afectan a variables tomadas en cuenta. El desagregado de la variabilidad total en partes integrantes se expresa por la expresión siguiente:

$$SC_{total} = SC_{efectos} + SC_{error}$$

Donde:  $SC_{total}$  = Suma total de los cuadrados de la variabilidad total

$SC_{efectos}$  = Suma de los cuadrados la variabilidad de los efectos (tratamientos).

$SC_{error}$  = Suma de cuadrados variabilidad por el error aleatorio.

La suma de cuadrados de los efectos principales e interacciones se estima mediante las siguientes relaciones:

$$CM_A = \frac{SC_A}{a - 1}$$

$$CM_B = \frac{SC_B}{b - 1}$$

$$CM_E = \frac{SC_E}{(a - 1)(b - 1)}$$

Donde:

$SM_{total}$  = Suma total de los cuadrados **medios** de la variabilidad total

$SM_{efectos}$  = Suma de los cuadrados **medios de** la variabilidad de los efectos

$SE_{error}$  = Suma de cuadrados **del** error aleatorio.

Primero calculamos la prueba de distribución estadística de Fisher (F) y valoramos realizando el análisis de varianza, con el resultado de la valoración de los efectos sobre los errores, expresada por la expresión:

$$F_0 = \frac{MS_{Efectos}}{MS_{Error}}$$

El valor estadístico de prueba resultante de la aplicación de la expresión anterior, se debe comparar con un valor tabular de F (que se encuentran en tablas), La significancia de los efectos de las variables independientes (efectos principales), interacciones entre las variables independientes (efectos de interacción) se proyectan mediante el estadístico de prueba  $F_0$ . Los GL (ver tabla 19) indican que proporción de data usa ese término, la valoración de la variabilidad de los efectos de los parámetros” se resume en la siguiente tabla:

**Tabla 19**

*Total, de grados de libertad del modelo factorial en el proceso de templado*

<b>Factor de variabilidad</b>	<b>Grados de libertad</b>	
	<b>Formula</b>	<b>Valor</b>
A (Temperatura)	$(a-1)$	2
B (Tiempo)	$(b-1)$	1
AB	$(a-1)*(b-1)$	2
ERROR	$a*b*(n-1)$	12
<b>TOTAL</b>	<b>N-1</b>	<b>17</b>

*Nota. Elaboración propia*

Los grados de libertad para la prueba de ANOVA vienen a ser el número de datos que son libres de variar al calcular cada uno de los indicadores de ANOVA y son concedidos bajo las siguientes valoraciones. Los grados de libertad para  $SM_{total}$  es el número total pruebas experimentales menos la unidad. Los grados de libertad para  $SM_{error}$  se obtiene por la resta de los grados de libertad de  $SM_{total}$  menos los grados de libertad de la  $SM_{efectos}$ , de las interacciones.

La tabla 20, indica los resultados del análisis de la varianza (ANOVA) para comparar la media de dos (temperatura y tiempo) y determinar si existen diferencias significativas. Se muestra en la tabla 19 los resultados consolidados del análisis anova para obtener el valor-p de las variables tratadas de temperaturas (850, 910 y 950 °C ) y tiempos (40 y 60 min.) del experimento.

**Tabla 20***Anova del proceso de templado*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Modelo	5	291.291	58.258	4.79	0.012
Lineal	3	285.083	95.028	7.82	0.004
TEMPERATURA	2	131.374	65.687	5.40	0.021
TIEMPO	1	153.709	153.709	12.64	0.004
Interacciones de 2 términos	2	6.208	3.104	0.26	0.779
TEMPERATURA*TIEMPO	2	6.208	3.104	0.26	0.779
Error	12	145.873	12.156		
Total	17	437.164			

Nota. *Elaboración propia*

El valor F (Fisher) permitió genéricamente apreciar la cantidad de grupos estadísticos que existen en el modelo y que se aprecian en los efectos principales y las interacciones de estos efectos. El cambio entre factores es mucho más grande que los cambios dentro de cada factor. Observando los resultados del valor-p en la tabla 19, se aprecia que muestran un resultado de  $P < 0,05$  para las variables de temperatura y tiempo, entonces rechazamos la hipótesis nula ( $H_0$ ) y por lo tanto aceptamos la hipótesis alterna ( $H_A$ ) y de que los datos son significativos. Lo que nos indica que la temperatura y el tiempo si influye en la dureza por el tratamiento de temple (el valor 0,05 se refiere al nivel de significancia). Lo que se concluye que tiene gran significancia la temperatura y el tiempo sobre la variable de respuesta dureza, el caso de los demás efectos e interacciones se concluye que no tienen incidencia en el modelo, así en la interacción de las variables temperatura\*tiempo (T\*t) de la tabla 19 se aprecia que el valor-p es un resultado de  $P > 0,05$ , lo cual indica que no es significativo esta interacción en el modelo.

### 6.7.2.2. Ecuación de regresión para el proceso de templado

Si Dureza =  $Y = f(A, B)$

Entonces:  $Y = \mu + (\alpha)i + (\beta)j + (\alpha\beta)ij + (\alpha\beta\gamma)ijk + \epsilon_{ijk}$

$\mu$  = media general de los experimentos.

$\alpha i$  = efecto debido del  $i$ -ésimo nivel del factor de temp. de templado (Factor A).

$\beta j$  = efecto del  $j$ -ésimo nivel del factor del tiempo de templado (Factor B).

$\alpha\beta ij$  = representa el efecto de la interacción de la combinación  $ij$ .

$\epsilon_{ij}$  = Error aleatorio que, se supone, sigue una distribución normal con  $\mu = 0$

y  $\sigma^2$  = constante, además que son independientes entre sí.

$$\begin{aligned} \text{DUREZA (Yest)} &= 38.256 + 0.81 T_{850} - 3.64 T_{910} + 2.83 T_{950} \\ &+ 2.922 t_{40} - 2.922 t_{60} - 0.36 T*t_{850 40} \\ &+ 0.36 T*t_{850 60} + 0.83 T*t_{910 40} \\ &- 0.83 T*t_{910 60} - 0.47 T*t_{950 40} \\ &+ 0.47 T*t_{950 60} \end{aligned}$$

Reemplazando los valores codificados T (temperatura) y t (tiempo) en la expresión matemática se tienen valores estimados (Yest) para luego realizar la evaluación de la expresión matemática. En la expresión matemática de la DUREZA (Y) si incrementamos en una unidad a la temperatura (T) en 850 °C, se incrementará la dureza en 0.81 unidades y si incrementamos en una unidad a la temperatura (T) en 950 °C, se incrementará la dureza en 2.83 unidades, entonces la temperatura es significativamente positiva, ósea la temperatura influye positivamente en la dureza en el temple del acero. ahora si incrementamos en una unidad el tiempo (t) en 40 minutos, se incrementará la dureza en +2.922 unidades y si incrementamos en una unidad el tiempo (t) en 60 minutos, disminuirá la dureza en -2.922 unidades, entonces el tiempo es significativamente negativo, ósea el tiempo influye negativamente en la dureza en el temple del acero (T = temperatura (°C); t = tiempo (min) )



### 6.7.2.3. Coeficiente de correlación

El cálculo del coeficiente de determinación  $R^2$ , para este modelo de regresión natural, se tiene por medio del paquete MINITAB 19 y su valor muestra la bondad del ajuste y son las siguientes:

R-Cuadrado = 66.63%

R-Cuadrado (ajustado) = 52.73%

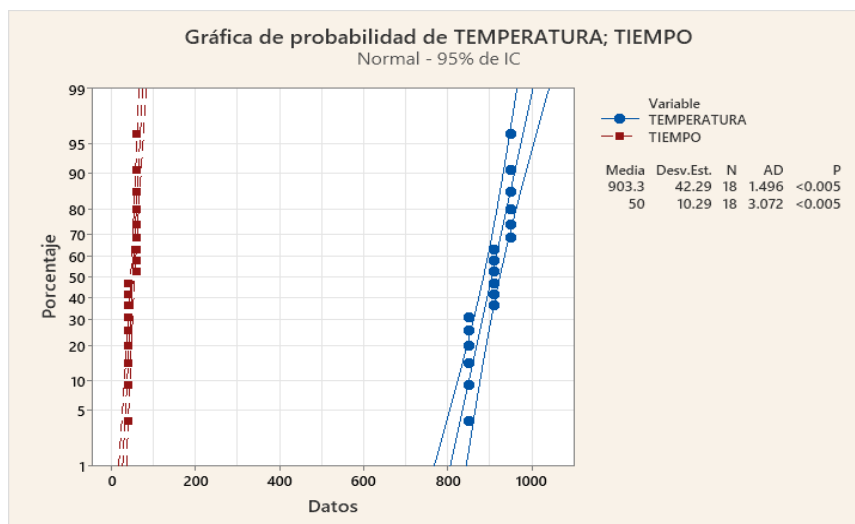
El resultado obtenido es 66.63 % de ajuste, el ajuste del modelo es adecuada, y se puede usar para obtener respuestas de la variable dependiente y consolidar la hipótesis de investigación.

### 6.7.2.4. Grafica de probabilidad normal

En el siguiente gráfico de probabilidad de temperatura y tiempo (ver figura 61), podemos verificar que la información viene de una población normalmente distribuida. Y como el P-valor es menor a 0.05 entonces los datos obtenidos durante el templado si pertenece a una población normalmente distribuida y podemos efectuar los análisis de datos en el diseño experimental.

#### Figura 61

*Distribución de datos experimentales de temperatura y tiempo*



Nota. *Elaboración propia*

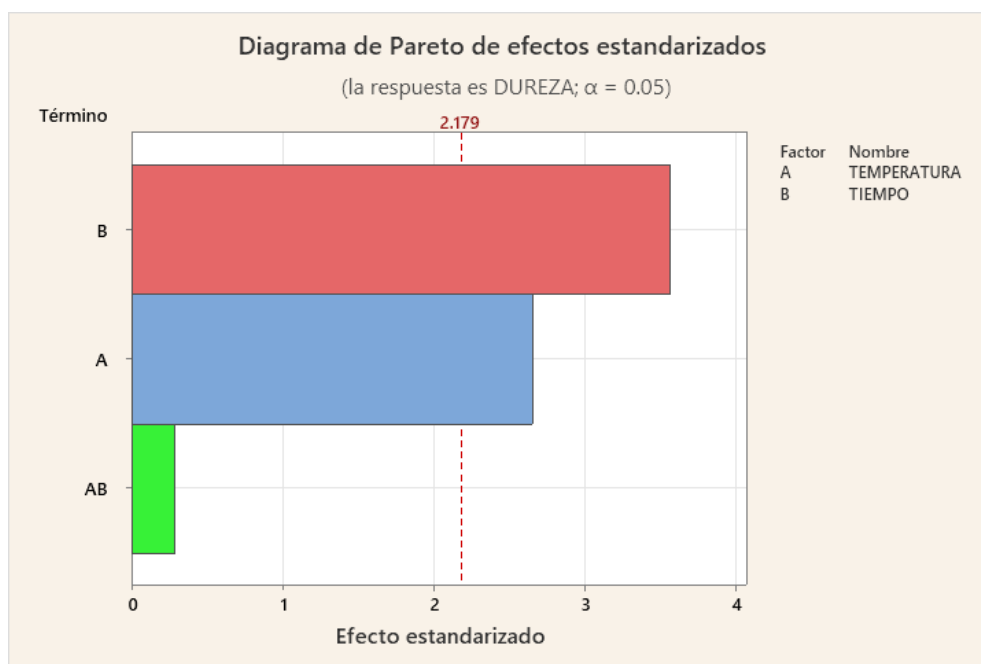
### 6.7.2.5. Diagrama de Pareto

Según el diagrama de Pareto (ver Figura 62) los mayores efectos se dan con la temperatura y el tiempo, seguida por la interacción de la temperatura y el tiempo.

El diagrama de Pareto muestra de modo muy claro los factores significativos que superan la línea de color rojo, por lo que es necesario mejorar el modelo depurando los factores no significantes, se recomienda no considerar para efectos de los análisis la interacción del tiempo\*temperatura por no ser significativa.

#### Figura 62

*Diagrama de Pareto estandarizado del proceso de templado*



Nota. *Elaboración propia*

El diagrama de Pareto nos indica las variables con mayor influencia en el proceso que en este caso son: temperatura y tiempo. En esta gráfica los efectos significativos provienen de los factores tiempo y temperatura puesto que sobrepasan la línea vertical de color rojo llamada línea de referencia, que tiene un valor de 2.179.

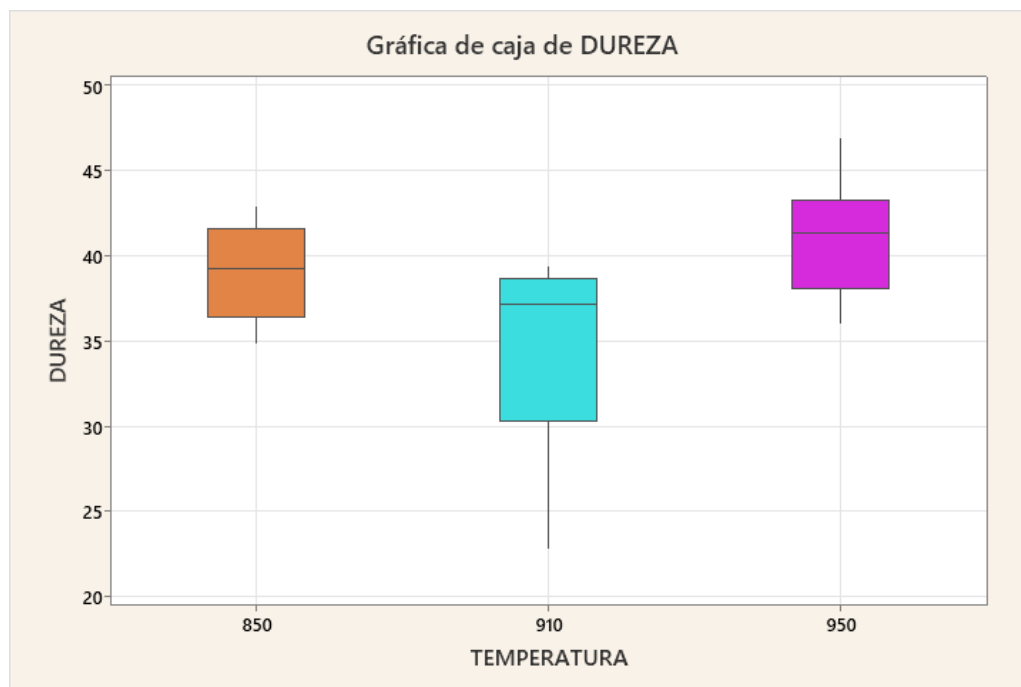
Un diagrama de Pareto es una representación de la información de mayor a menor relevancia, obtenidos en este caso del tratamiento térmico del Hardox 450. Es una basada en el principio

de Pareto el cual nos indica entre los grupos 80-20, donde el 80 % de las consecuencias provienen del 20 % de las causas.

### 6.7.2.6. Grafica de caja respecto a la temperatura

**Figura 63**

*Diagrama de caja para la dureza - temperatura*



*Nota. Elaboración propia*

La Figura 63, nos muestra que las cajas a 850°C y a 950 °C tienden a la normalidad y la de 910 °C esta sesgada hacia abajo, se determina que este factor incide en la variable de respuesta DUREZA, es la temperatura de 950 °C

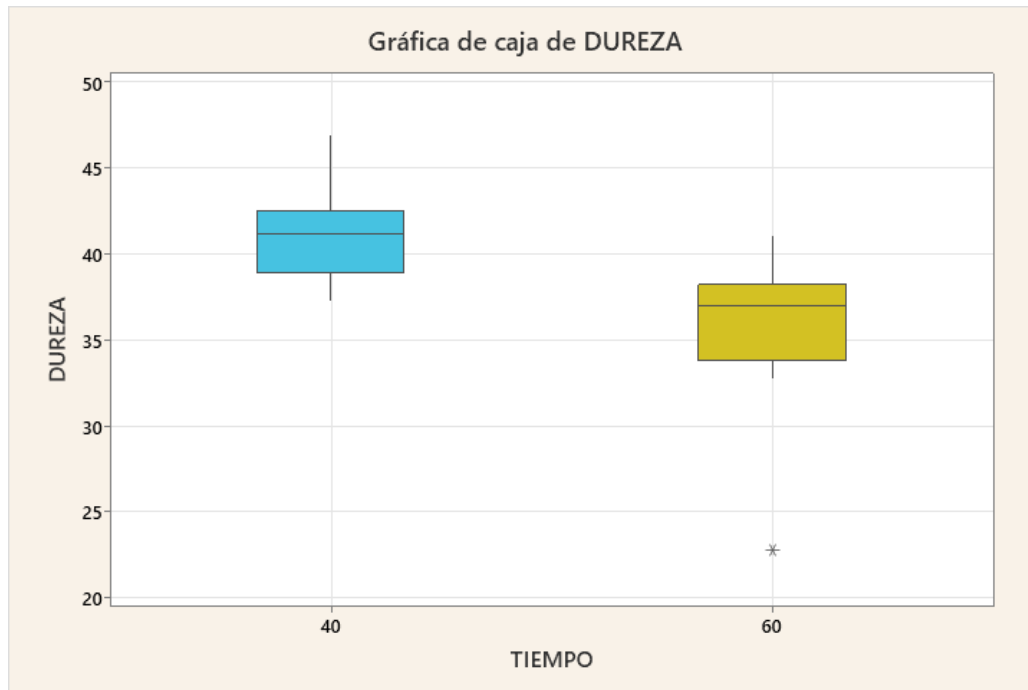
### 6.7.2.7. Grafica de caja respecto al tiempo

La figura 64 es un modo apropiado para mostrar visualmente grupos de datos numéricos de la dureza respecto al tiempo de revenido a través de sus cuartiles. Las líneas que se extienden

paralelas a las cajas se conocen como «bigotes», y se observa que no hay mucha variabilidad fuera de los cuartiles superior e inferior.

### Figura 64

*Diagrama de caja de la dureza - tiempo*



Nota. *Elaboración propia*

#### 6.7.2.8. Grafica de efectos.

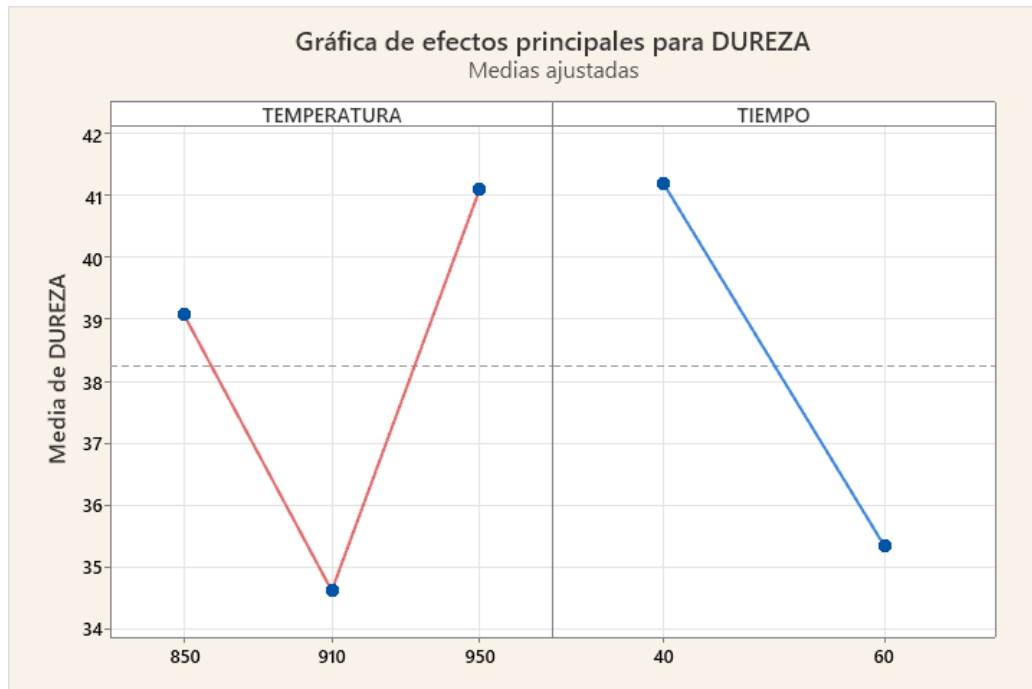
La gráfica de los efectos principales, la figura 65, indica que la temperatura afecta positivamente y el tiempo negativamente esto en la dureza. (las rectas correspondientes tienen pendientes que aseveran lo indicado), La Figura 65 indica la gráfica de los efectos de interacción para las dos variables, determinado por el Software Minitab.

El grafico de efectos para el proceso de templado nos indica que existe mayor efecto con la variable temperatura y es positiva, así mismo se aprecia que el valor de la dureza desciende en 910 °C y luego se incrementa el valor de la dureza en 950 °C, considerando extremos se aprecia que el valor de la dureza se incrementa. Por otra parte, con el tiempo el efecto es negativo,

pero bastante pronunciado, como se aprecia en la figura 65, el valor de la dureza desciende notoriamente en 60 minutos respecto a 40 minutos.

**Figura 65**

*Grafica de efectos de temperatura – tiempo para la dureza*



Nota. *Elaboración propia*

### 6.7.2.9. Optimización de la dureza.

La estrategia planteada determina la dureza máxima alcanzada por el procedimiento de templado con las variables más influyentes temperatura y tiempo, luego utiliza el método de la máxima pendiente en base al modelo determinado para aproximarse a la región deseada (máxima dureza), y finalmente utiliza un modelo de primer orden para optimizar. La tabla 21, nos muestra, con los resultados experimentales obtenidos se halla una dureza de 43.53 RHC templado a la temperatura de 950 °C durante 40 minutos.

**Tabla 21***Optimización de la dureza del proceso de templado*

<b>Solución</b>	<b>TEMPERATURA</b>	<b>TIEMPO</b>	<b>DUREZA Ajuste</b>	<b>Deseabilidad compuesta</b>
1	950	40	43.5333	0.860304

Nota. *Elaboración propia***6.7.3. Segunda etapa: Modelo de primer orden para el proceso de revenido.**

La metodología de los experimentos con un solo factor pertenece a un grupo de técnicas empleadas para estudios empíricos de la correlación entre una variable dependiente (dureza) y otra variable independiente (temperatura). Estos métodos se emplearon para absolver interrogantes como:

¿Cómo, dentro de una región de interés, una variable incide en una respuesta determinada?

¿Qué situación de la variable de control, permitirán adquirir una producción que retribuya a la vez la especificación deseada?

¿Qué valores de la variable de control originan un máximo (o un mínimo) en una sentencia determinada?

Empleando la misma conducción para la evaluación del modelo matemático de primer orden se realiza la evaluación para el modelo matemático de segundo orden. Los diseños con un solo factor son estimados por los modelos matemáticos de primer orden:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_i \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, a ; j = 1, 2, \dots, b ; k = 1, 2, \dots, n$$

- Donde:
- $\mu$  = *media general de los experimentos.*
- $\alpha_i$  = *efecto debido del i – esimo factor de tipo de levadura (factor A).*
- *i – esimo factor del tipo de levadura*
- $\varepsilon_i$  = *error alatorio de los tratamientos para todos i.*

### 6.7.3.1. Análisis de varianza

Según los datos obtenidos existen diferencias significativas entre las temperaturas y la dureza, llegando a la verificación de las hipótesis de investigación por las pruebas en laboratorio.

- Los cálculos realizados usando los diseños experimentales factoriales con 1 variable y con 3 réplicas se ajustaron satisfactoriamente a las pruebas de laboratorio realizadas, podemos visualizarlo con los resultados obtenidos.
- Los resultados obtenidos se ajustaron satisfactoriamente a las pruebas de laboratorio realizado dando valores óptimos para obtener durezas satisfactorias.

En las tablas 22, 23 y 24, se muestra los resultados del análisis de la varianza que permite verificar la hipótesis nula de que las medias de las poblaciones son iguales, frente a la hipótesis alternativa de que una población es diferente de la otra. Par el caso de revenido a 300 y 400 °C de las probetas de acero HARDOX 450 previamente templadas a 850, 910 y 950 °C.

**Tabla 22**

*Anova del proceso de revenido para las probetas templadas a 850 °C*

<b>Anova para probetas templadas a 850 °C y revenidas a 300 °C y 400 °C durante 40 min</b>					
<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
TEMPERATURA	1	19.082	19.0817	22.02	0.009
Error	4	3.467	0.8667		
Total	5	22.548			

Nota. *Elaboración propia*

**Tabla 23**

*Anova del proceso de revenido para las probetas templadas a 910 °C*

<b>Anova para probetas templadas a 910 °C y revenidas a 300 °C y 400 °C durante 40 min</b>					
<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
TEMPERATURA	1	155.04	155.04	14.63	0.019
Error	4	42.39	10.60		
Total	5	197.43			

Nota. *Elaboración propia*

**Tabla 24**

*Anova del proceso de revenido para las probetas templadas a 950 °C*

<b>Anova para probetas templadas a 950 °C y revenidas a 300 °C y 400 °C durante 40 min</b>					
<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
TEMPERATURA	1	89.707	89.707	53.50	0.002
Error	4	6.707	1.677		
Total	5	96.413			

Nota. *Elaboración propia*

Observando los resultados del valor-p en las tablas 22, 23 y 24, se aprecia que muestran un resultado de  $P < 0,05$ , entonces rechazamos la hipótesis nula ( $H_0$ ) y por lo tanto aceptamos la hipótesis ( $H_A$ ) alterna y de que los datos son significativos. Lo que nos indica que el tiempo si influye en la dureza por el tratamiento de revenido (el valor 0,05 se refiere al nivel de significancia).

### **6.7.3.2. Modelo de la ecuación de regresión**

Empleando el mismo procedimiento para la evaluación del modelo matemático de primer orden de templado, se realiza la evaluación para el modelo matemático de primer orden para el revenido.



El modelo presenta un  $R$  (*ajustado*), este hace alusión al coeficiente de determinación, que significa que el modelo que tiene variable de respuesta la dureza esta explicado en dicho porcentaje por la temperatura de revenido y sus efectos sobre esta. Por consiguiente, es un porcentaje el cual es confiable y permite obtener información significativa para la toma de decisiones sobre el proceso.

Las tablas 25, 26 y 27 muestran los análisis de regresión y correlación de las variables temperatura y resistencia a la dureza, se observa que el ajuste lineal es adecuado y la ecuación de la recta también lo es y usar esta ecuación con el fin de hacer inferencias respecto de la relación entre ambas cantidades. El valor-p indica que es significativo la temperatura y por ello influye en la dureza, pero el modelo matemático indica que es una significancia negativa e influye negativamente por el modelo matemático de las tres ecuaciones encontradas para el revenido, así por ejemplo en la tabla 25 en su modelo matemático de dureza (Y), si incrementamos en una unidad la temperatura (T) en 300 °C, se incrementara la dureza en 5.08 unidades, pero si se aumenta en una unidad la temperatura (T) en 400 °C, disminuirá en -1.783 unidades la dureza del revenido

**Tabla 25**

*Correlación y regresión del proceso de revenido para probetas templadas a 850 °C*

<b>Modelo para probetas templadas a 850 °C y revenidas a 300 °C y 400 °C durante 40 min</b>			
<b>S</b>	<b>R-cuadrado</b>	<b>R-cuadrado (ajustado)</b>	<b>R-cuadrado (pred)</b>
0.930949	84.63%	80.78%	65.41%
$Dureza (Y) = 35.383 + 1.783 T_{300} - 1.783 T_{400}$			

Nota. *Elaboración propia*

**Tabla 26**

*Correlación y regresión del proceso de revenido para probetas templadas a 910 °C*

<b>Modelo para probetas templadas a 910 °C y revenidas a 300 °C y 400 °C durante 40 min</b>			
<b>S</b>	<b>R-cuadrado</b>	<b>R-cuadrado(ajustado)</b>	<b>R-cuadrado (pred)</b>
3.25525	78.53%	73.16%	51.69%
<b>Dureza (Y) = 29.52 + 5.08 T_300 - 5.08 T_400</b>			

Nota. *Elaboración propia*

**Tabla 27**

*Correlación y regresión del proceso de revenido para probetas templadas a 950 °C*

<b>Modelo para probetas templadas a 950 °C y revenidas a 300 °C y 400 °C durante 40 min</b>			
<b>S</b>	<b>R-cuadrado</b>	<b>R-cuadrado(ajustado)</b>	<b>R-cuadrado (pred)</b>
1.29486	93.04%	91.30%	84.35%
<b>Dureza = 35.967 + 3.867 T_300 - 3.867 T_400</b>			

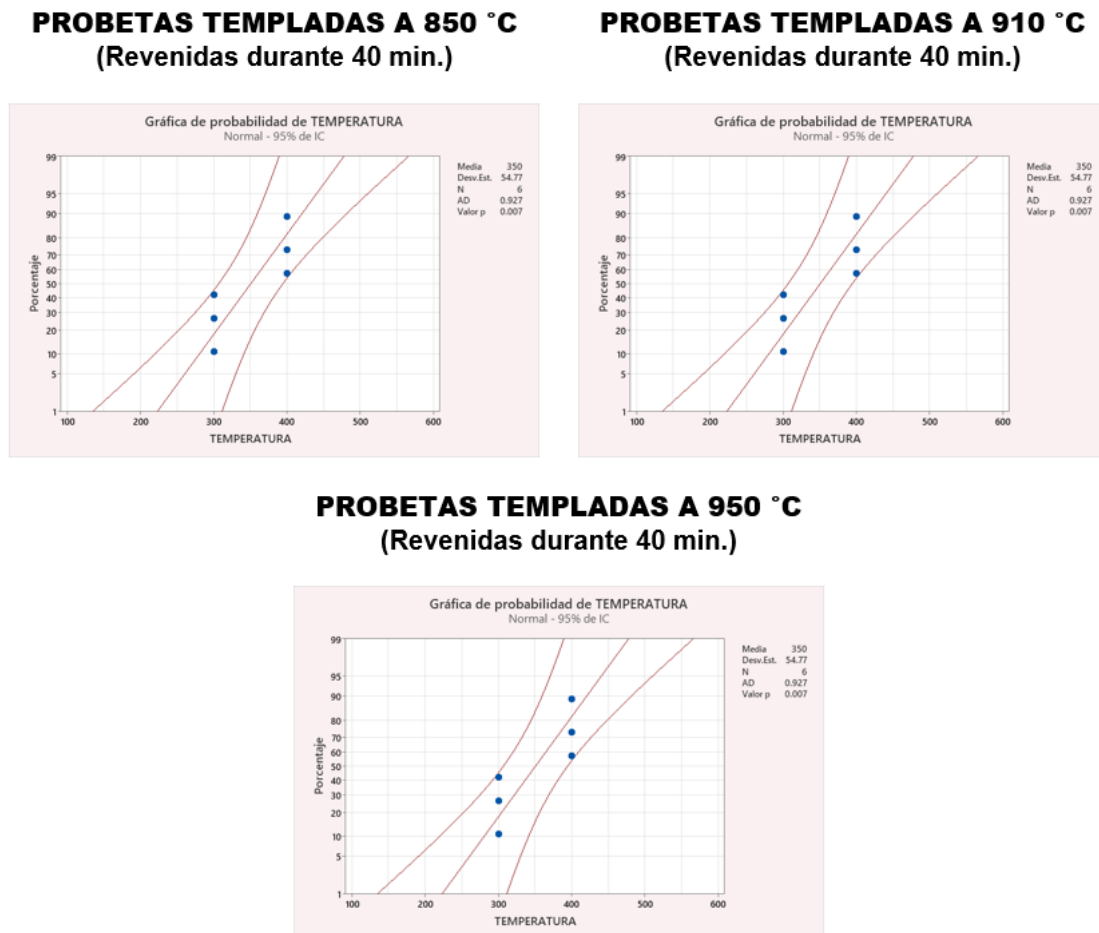
Nota. *Elaboración propia*

### **6.7.3.3. Grafica de probabilidad normal**

La figura 66 confirma, que la desviación de los datos del modelo sigue una distribución normal, porque forman como una campana los datos, entonces inferimos por la gráfica que estos cumplen con el criterio de normalidad. Así mismo los datos distribuidos reflejan una línea recta, corroborando que los datos son normales y que no hay grupo estadístico que influya en el modelo, de este modo explica el comportamiento que muestra la variable respuesta.

Figura 66

Distribución de datos experimentales de temperatura en el proceso de revenido



Nota. *Elaboración propia*

#### 6.7.3.4. Grafica de caja respecto a la temperatura

La figura 67 permite observar si existen eficiencias en el modelo determinado, esto teniendo en cuenta las cajas muestra ausencia de punto atípico por lo tanto la varianza toma valore validos ya que se da la relación entre las variables y que ha permitido obtener regresiones y correlaciones adecuadas.

**Figura 67**

*Grafica de cajas para la temperatura y la dureza*

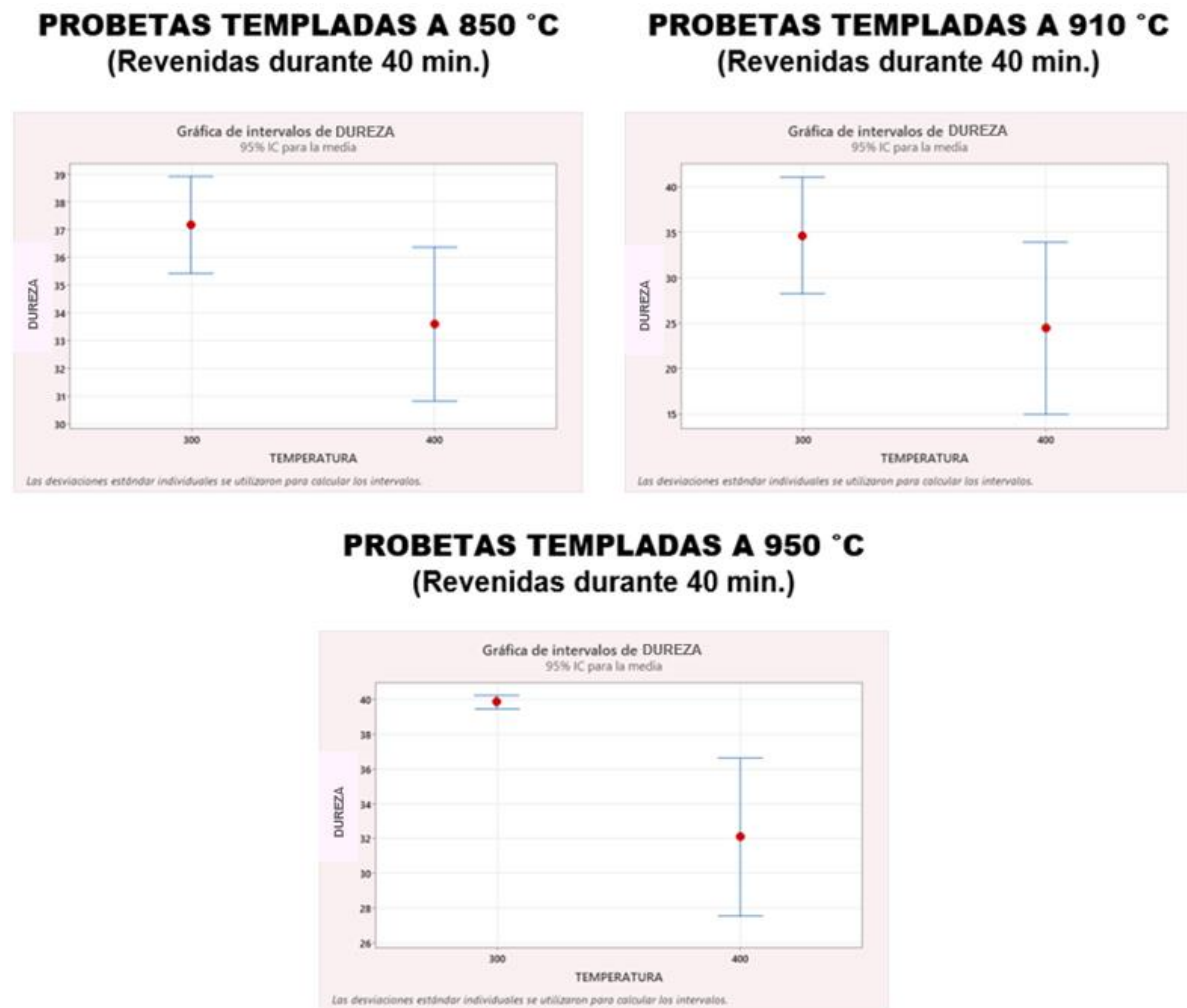


Nota. *Elaboración propia*

### 6.7.3.5. Grafica de intervalos respecto a la temperatura

Figura 68

Grafica de intervalos para el proceso de revenido



Nota. Elaboración propia

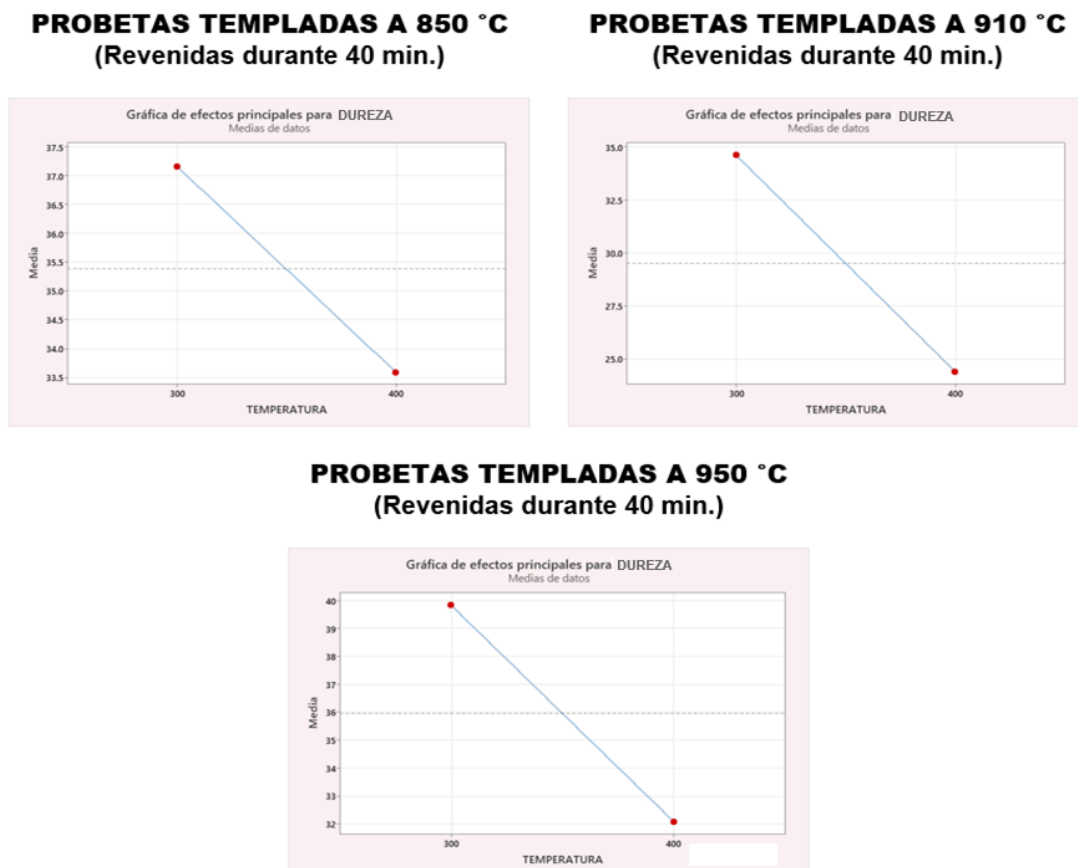
La figura 68 evidencia que existe variación mínima entre los datos experimentales en función de la variable de respuesta DUREZA. Sin embargo, también se observa, también se observan las medias y los rangos que toma la DUREZA en función de la temperatura.

### 6.7.3.6. Grafica de efectos.

Para evaluar cuantitativamente cuánto afectan las temperaturas independientes sobre la respuesta se determina los efectos definido como la diferencia entre los valores medios de las respuestas cuando en los tratamientos respectivos la variable independiente se encuentra en su nivel inferior, y cuando se encuentra en su superior (ver figura 69), La forma más práctica de determinar los efectos principales y los efectos de interacciones sobre la variable respuesta es mediante Minitab y se obtiene las siguientes figuras:

**Figura 69**

*Grafica de efectos para el proceso de revenido*



Nota. *Elaboración propia*

#### **6.7.4. Validez de la hipótesis y comparación con otras investigaciones**

El método de Superficie de Respuesta, luego del tratamiento estadístico y de la Validación experimental, optimizó los parámetros temperatura y tiempo, demostrando la concurrencia con los métodos aplicados por otros experimentos que necesariamente necesitaban de la optimización individual de cada parámetro y luego hacer las combinaciones pertinentes que obligan a un mayor número de experimentos.

La optimización es la respuesta de todas las interacciones de las variables dadas, para encontrar que la hipótesis propuesta sea valedera se realizó las pruebas con los factores según los diseños experimentales propuestos.

Tomas (2019) en sus estudios encuentra que el calor del proceso de soldadura influye en la variación de la dureza del acero anti desgaste Hardox, la que es confirma con las pruebas experimentales de templeado y revenido del presente estudio.

Gallina et. al. (2022) determinó que la reducción de la dureza Hardox fue más significativa tanto en el proceso de temple como en el de revenido mostrando dureza superior a la del material original.

## CONCLUSIONES

1. Al incrementarse la temperatura de 850°C a 950°C durante el austenizado, se tiene mayor presencia de austenita lo que beneficia mayor presencia de martensita durante el temple, por ello se tiene un incremento en la dureza, tal como muestran los resultados experimentales de 41.63 HRc a 850°C y 43.550 a 950°C. Por otra parte, durante el tratamiento térmico de templado, la variable temperatura afecta positivamente a la dureza. Según los análisis de Anova (tabla 20) para esta variable temperatura se obtiene un valor-p = 0.021, que es menor al nivel de significancia de 0.05. lo que corrobora que es significativa y por el modelo matemático de dureza (pág. 103) es significancia positiva, entonces influye positivamente la temperatura en el proceso de temple.
2. A mayor tiempo de austenización, después del templado, se tiene mayor presencia de austenita retenida, por tanto, la resistencia a la dureza disminuye y esto se observa al comparar la dureza de dos probetas templadas a una misma temperatura (950°C) se tiene una dureza de 43.53HRc a 40 minutos austenizados y la otra dureza es de 38.63 HRc a 60 minutos austenizados. Esto es confirmado por los análisis de datos, indicado en la tabla de Anova (tabla 20) para la variable tiempo se obtiene un valor-p = 0.004 que es menor al nivel de significancia de 0.05. lo que corrobora que es significativa y por el modelo matemático de dureza (pág. 103) es significancia negativa, entonces influye negativamente el tiempo en el proceso de temple.
3. Los resultados experimentales indican, que la diferencia de durezas en cada par de probetas revenidas está influenciada por la descomposición de la martensita inicial en ferrita como matriz y cementita junto perlita esferoidal embebida, Por tanto, a mayor temperatura de revenido la descomposición de la martensita se incrementa y a menor temperatura de revenido menor es la descomposición de la martensita; entonces se



infiere que la dureza del material revenido disminuye con el incremento de temperatura, así las durezas de dos probetas templadas a 950°C dan una de ellas una dureza de 39.83 HRc revenidas a 300°C y la otra una dureza menor de 32.10 HRc revenidas a 400°C. Estas aseveraciones, son respaldadas por los resultados del análisis de Anova, al obtenerse el valor-p para la variable tiempo (tablas:22,23 y24) en los tres bloques de probetas evaluadas del revenido muestran un resultado de  $P < 0,05$  y los datos entonces son significativos para la dureza. Lo que nos indica que el tiempo si influye en la dureza por el tratamiento térmico de revenido y por modelo matemático (tablas:25,26 y27) hallado para el revenido es significativamente negativo y por lo tanto el tiempo influye negativamente en la dureza en el tratamiento térmico de revenido y este acero Hardox 450 es muy sensible a la temperatura.

## RECOMENDACIONES

- Al emplear este acero hardox 450 en los procesos de manufactura, construcción y operatividad, se debe tener precauciones frente a exposiciones térmicas, debido a que este acero demostró que es muy sensible a la temperatura.
- Se recomienda seguir investigando con diferentes dimensiones de probetas y en otros medios de enfriamientos, así como caracterizar la microestructura por microscopía electrónica, con el fin de ampliar la investigación en este tipo de aceros especiales,
- Se recomienda que la escuela profesional de ingeniería metalurgia, difunda a los técnicos e industria de la manufactura y construcción, sobre las bondades, limitaciones y características metalúrgicas de los aceros especiales y comercial, como el hardox por sus diversos productos que se distribuyen en el país.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aleman Montaña, R. B. (2014) Evaluación del proceso de endurecimiento superficial de un acero sae: 1020 mediante carbonización sólida y posterior temple y revenido [Universidad Nacional de San Agustín]
- <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-nacional-de-san-agustin-de-arequipa/metalurgia-fisica-1/scribdvpdfscom-cementacion/42789520>
- Allauca P., R. F. (2011). *Influencia De La Microestructura Sobre Las Propiedades Mecánicas En Varillas De Acero* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/1401>
- Argomedo B., E. (2016). *Influencia del tiempo y temperatura de revenido en la dureza y resistencia al desgaste abrasivo del acero para herramientas al choque AISI S1* [Universidad Nacional de Trujillo]. In *UNT* (Vol. 1, Issue None). <https://docplayer.es/78729913-Universidad-nacional-de-trujillo.html>
- Armas M., S. A., & Sevillano C., C. E. (2015). *Desarrollo microestructural, tamaño de grano y dureza transversal de la union de soldadura mediante el proceso gmaw del acero hardox 450, a diferente temperatura de precalentamiento* [Universidad Nacional de Trujillo]. In *UNT* (Vol. 1, Issue None). <https://comimsa.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1022/52>
- ASM International. (1998). *ASM Metals Handbook, Heat Treating Volume IV*. The Materials Information Company.
- Belzunce, F. J. (2001). *Aceros y Fundiciones: Estructuras transformaciones tratamientos termicos y aplicaciones*. <https://es.scribd.com/document/374137548/Aceros-y-Fundiciones-pdf>.
- Białobrzaska, B., Jasiński, R., Konat, Ł., & Szczepański, Ł. (2021). *Analysis of the properties of hardox extreme steel and possibilities of its applications in machinery*. *Metals*, *11*(1), 1–19. <https://doi.org/10.3390/met11010162>
- Bueno, E. (2013). *La investigación científica: Teoría y metodología*. (1era. Ed.). Universidad Autónoma de Zacatecas. Ed. UAZ.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2016). *Ciencia e ingeniería de materiales*. In E. Reverté (Ed.), *Materials & Design* (Vol. 12, Issue 1). <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0261306991901019>

- Chuquimarca P., F. K., & garces M., J. (2015). *Estudio de la austenita retenida en el acero inoxidable bajo condiciones experimentales de soldadura y tratamientos térmicos* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]  
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/13811/1/15T00726.PDF>
- Dayana, A. D. (2016). *Principios generales de los tratamientos termicos de los aceros*.  
<https://es.scribd.com/document/323081310/Principios-Generales-de-Los-TTT>
- Díaz Del Castillo, F. (2015). *Tecnología de Materiales*. Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México-UNAM.
- Gallina, B., Biehl, L. V., Medeiros, J. L. B., Souza, J. de, & Rossini, E. G. (2022). *Estudo Dos Efeitos Do Tratamento Térmico Nos Aços Hardox® 500 E Strenx® 700*. *Ciência e Engenharia de Materiais: princípios e fundamentos em pesquisa*, 131–142.  
<https://doi.org/10.37885/220609102>
- Gorni, A. A. (2019). *Steel forming and heat treatment handbook* (Número December, p. 226). Socorro SP Brazil.[www.gorni.eng.br](http://www.gorni.eng.br), [https://www.gorni.eng.br/e/Gorni\\_SFHTHandbook.pdf](https://www.gorni.eng.br/e/Gorni_SFHTHandbook.pdf).
- Gutiérrez H. & De la Vara Román (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. Ed. Mc Graw Hill. México.
- Hernández, R., & Mendoza, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (1era ed.). McGraw Hill Education.
- Hernández, V. S. (2019). *Análisis de la soldabilidad y propiedades mecánicas de una plancha de acero anti abrasivo grado 450 mediante el proceso GMAW*. Escuela Politécnica Nacional.
- Ingeniería Industrial. (2008). *Tratamientos Térmicos - Protocolo Curso de Materiales*. In *Laboratorio de Producción* (p. 22). Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Litoral, E. S. P. del. (n.d.). *Los aceros*. <https://www.coursehero.com/file/82660467/LOS-ACEROSdocx/>
- Miranda, L. y Medina, E. (2015). *Investigando en ingeniería*, Ed. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Perú.
- Montgomery D. & Runger G. (2013). *Probabilidad y Estadística aplicadas a la ingeniería*. Ed. Limusa Wiley, 2da. edición. Mexico.
- Ñaupas, H., Valdivia, M. R., Palacios, J. J., & Romero, H. E. (2018). *Metodología de la investigación. Cuantitativa-Cualitativa y Redacción de la Tesis* (5ta ed.). Ediciones de la U.
- Pinzon, W. A., & Ramos R., G. (2017). *Análisis de las propiedades mecánicas de tensión*,

*tenacidad y dureza de un acero sae 1045 mediante los procesos de tratamiento termico de temple, criogenia y revenizado. In (vol. 1). Distrital francisco José de caldas.*

Plata, U. N. D. LA. (2017). *Tipos de acero según su composición de carbono Reconocer* (p. 12).

<https://unlp.edu.ar/frontend/media/73/27873/03be3424af308bf57bee6ac2aa169171.pdf>

Perico, N. R., Galarza, E., Díaz, M. L., Arévalo, H. M., & Perico M. (2020). *Guía práctica de investigación en ingeniería* (1° ed.). Bogotá: Corporación Universitaria Minuto de Dios. Obtenido de <https://tinyurl.com/bib99959>.

Reed-Hill, R. E. (1971). Principios de Metalurgia Física. In C. E. C. S.A. (Ed.), *Mexico* (Segunda Ed). <https://laboratoriodeforja2.wordpress.com/>

Smith, William F.; Hashemi, J. (2006). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*. (McGRAW-HILL (ed.); 4° Edition).

Soldadura hardox, Ssab 1 (2016). [https://www.ssab.com/search#q=weldhardox&sort=relevancy&f:tags=\[d07fd89d68c8461788f85efbd672adfd\]%0Ahttp://docplayer.es/45854224-Soldadura-hardox-soldadura-hardox.html](https://www.ssab.com/search#q=weldhardox&sort=relevancy&f:tags=[d07fd89d68c8461788f85efbd672adfd]%0Ahttp://docplayer.es/45854224-Soldadura-hardox-soldadura-hardox.html)

SSAB. (2023a). *Certificado del Departamento de inspección de calidad* (Vol. 1, Número 1, p. 1).

SSAB. (2023b). *Hardox ® 450 Chapa - Data Sheet 168* (Vol. 43, p. 2).

SSAB.<https://www.ssab.com/en>

Taylor & Francis Group. (2007). *Steel Heat Treatment Handbook* (G. Totten (ed.); 2° Edición).

Thomas, E. V. (2019). *Investigación y análisis sobre la influencia del proceso de soldadura en las propiedades mecánicas de los aceros antidesgaste HARDOX*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

Ulewicz R, Mazur M, Bokůvka O (2013) Estructura y propiedades mecánicas de los aceros de grano fino. *Periodo Polytech Transp Eng* 41(2):111-115. <https://doi.org/10.3311/PPtr.7110>

Vélez Chavira, J. A. (2016). *Reducción del defecto de falta de fusión en soldadura para el proceso gmaw en acero hardox 450 en la fabricación de cajas para camión* (Issue August).

Vélez, J. A. (2016). *Reducción del defecto de falta de fusión en soldadura para el proceso*

*GMAW en acero Hardox 450 en la fabricación de cajas para camión.* Corporación

Mexicana de Investigación en Materiales.



WordPress.com. (2022). *Ciencia de materiales aplicada a la forja.*

<https://laboratoriodeforja2.wordpress.com/>

**ANEXOS**

## Anexo 1

Ficha técnica del acero Hardox 450 del proveedor de la empresa FIRME SAC (*Certificado de Inspección del Fabricante SSAB*)

SSAB										SSAB EMEA AB, SE-781 84 BORLÅNGE, Sweden A01									
Inspection certificate EN 10 204 - 3.1 A02		Issuing department Quality inspection A05		Purchaser order no 8608 A07			Our order no 327161-3 A08		Invoice no 3391162 A19		Certificate no and date 21250983 2023-03-13 A03								
Purchaser A11 18502 SSAB SWEDISH STEEL ACEROS DE CHILE LTDA GUACOLDA 2152 QUILICURA SANTIAGO SANTIAGO CHILE 8710055		Product Hot rolled sheets B01			Marking Manufacturer, MATERIAL ID B06			Customer marks B15											
Quantity B06 24		Dimensions [mm] T 6 W 1500 L 6000 B09-B11,B14			Weight [kg] 10300 B12		Deliv. Cond. B04		Internal code B16										
Consignee SSAB SWEDISH STEEL ACEROS DE CHILE LTDA GUACOLDA 2152 QUILICURA SANTIAGO SANTIAGO CHILE 8710055 A06					Standard/rules SSAB Steel grade Hardox 450 B02														
MATERIAL ID 62-5376-742755-01 , 62-5376-742755-02 , 62-5376-742755-03 , 62-5376-742755-04 B07																			
Chemical composition C71-C92										Carbon equivalent etc C93-C99									
Heat no 62-5376	C .183	Si .18	Mn 1.28	P .011	S .001	Cr .25	Ni .14	Mo .04	V .01	Ti .01	Cu .01	Al .035	Nb .001	B .0013	N .002	CEV .47	CEV = C + Mn/6 + (Ni + Cu)/15 + (Cr + Mo + V)/5		
Testtype C04	Millcode C00	Specimen position C01	Direction C02	Treatment B05	Specimen type C10	Temp [degr C] C03	Test results												
Hardness test	IBN393	Longitudinal	Delivery condition				C32 HB Ave 448												
Production time: 2023-03-08																			
Customer article no: ITM03158																			
This certificate is produced with EDP and valid without signature Z02					Z04					Z01					 www.hardox.com				
Material Testing/ H Leu / M Modig Eriksson / V Esbelani / M Stolpe					It is hereby certified that the material described above complies with the requirements of the order.														

Nota: Ficha técnica del material testigo alcanzada por el proveedor, Empresa FIRME SAC – CUSCO remitido por la Empresa SSAB)



## Anexo 2

## Matriz de consistencia

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y TIEMPO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE TEMPLE Y REVENIDO EN LA RESISTENCIA A LA DUREZA DEL ACERO HARDOX 450				
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES	METODOLOGIA
<b>PG:</b> ¿Influirá la temperatura y el tiempo isotérmico del tratamiento térmico de temple y revenido en el comportamiento de la dureza del acero HARDOX 450?	<b>OG:</b> Determinar la influencia de la temperatura y tiempo isotérmico del tratamiento térmico de temple y revenido en el comportamiento de la dureza del acero HARDOX 450.	<b>HG:</b> La temperatura y tiempo del tratamiento térmico de temple y revenido tiene efecto en la dureza del acero HARDOX 450.	<b>DEPENDIENTE</b>  • Resistencia a la dureza	<b>TIPO DE INVESTIGACION</b> El tipo de investigación es tecnológica. <b>NIVEL DE INVESTIGACION</b> El nivel de investigación será de grado descriptivo y correlacional. <b>DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN</b> El presente trabajo aplica el diseño experimental de tipo regresional y correlacional. <b>POBLACIÓN:</b> Planchas de acero HARDOX 450 de 6m x 1.5m x 6mm de espesor. <b>MUESTRA:</b> De acuerdo al diseño de investigación se analizarán 12 probetas/muestras de medidas en milímetros de 12x12x6 de acero HARDOX 450. <b>TECNICAS DE RECOLECCION DE DATOS</b> Para la medición y recolección de datos del ensayo destructivo de dureza y la determinación de los elementos químicos del acero HARDOX 450, se obtendrán en laboratorios especializados. Esta información será sistematizada, analizada, procesada e interpretada para la obtención pertinente de las conclusiones. Certificado de inspección del fabricante de SSAB de composición química de muestra. <b>EQUIPO, INSTRUMENTOS Y SOFTWARE</b> Se utilizará muflas eléctricas, durómetro digital, termopar de la mufla, cámara y cronometro digital de móvil OPPO A17. Para el análisis estadístico de datos se usará el Software Minitab 19.
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS		
<b>PE1:</b> ¿Influirá la temperatura del tratamiento térmico de templado en agua en el comportamiento de la dureza del acero HARDOX 450?	<b>OE1:</b> Determinar la influencia de la temperatura del tratamiento térmico de templado en agua para evaluar el comportamiento de la dureza del acero HARDOX 450.	<b>HE1:</b> La temperatura del tratamiento térmico de temple en agua influye en la dureza del acero HARDOX 450.	<b>INDEPENDIENTES</b>  • Temperatura de temple • Tiempo de temple • Temperatura de revenido	
<b>PE2:</b> ¿Influirá el tiempo isotérmico del tratamiento térmico de templado en agua en el comportamiento de la dureza del acero HARDOX 450?	<b>OE2:</b> Determinar la influencia del tiempo isotérmico de tratamiento térmico de templado en agua para evaluar el comportamiento de la dureza del acero HARDOX 450.	<b>HE2:</b> El tiempo del tratamiento térmico de temple en agua influye en la dureza del acero HARDOX 450.	<b>INTERVINIENTE</b>  • Temperatura (T) del medio ambiente	
<b>PE3:</b> ¿Influirá la temperatura del tratamiento térmico de revenido en el comportamiento de la dureza del acero HARDOX 450?	<b>OE3:</b> Determinar la influencia de la temperatura del tratamiento térmico de revenido al medio ambiente para evaluar el comportamiento de la dureza del acero HARDOX 450.	<b>HE3:</b> La temperatura del tratamiento térmico de revenido influye en la dureza del acero HARDOX 450.		

*Nota:* Elaboración propia, usando conceptos basadas en (Pinzon & Ramos R., 2017)

## Anexo 3

## Ficha técnica del acero Hardox 450 de la empresa SSAB

**HARDOX®**  
WEAR PLATE

Data sheet 168es Hardox® 450 2021-04-16

Hardox® 450

## Descripción general del producto

El acero resistente a la abrasión más popular, que presenta excelentes propiedades estructurales.

Hardox® 450 es un acero resistente a la abrasión con una dureza nominal de 450 HBW. Hardox® 450 combina una soldabilidad y capacidad de plegado óptima. Los productos se pueden usar en una gran diversidad de componentes y estructuras sometidas al desgaste. Hardox® 450, con 50 puntos extra de dureza Brinell en comparación con nuestra calidad 400, proporciona resistencia contra las indentaciones y la abrasión, presentando una vida útil más larga, y resultando aún más rentable.

## Intervalo de dimensiones

Hardox® 450 está disponible en chapa gruesa en espesores de 3,2 a 130 mm, chapa en espesores de 2,0 a 8,0 mm y en chapa laminada en frío en espesores de 0,8 a 2,1 mm. Para espesores superiores a 80 mm, se recomienda un ancho de 1650 mm. Encontrará información más detallada sobre este aspecto en el programa de dimensiones.

## Propiedades mecánicas

Calidad	Espesor (mm)	Dureza <sup>1)</sup> (HBW)	Tensión de rotura $R_{m}$ (MPa) garantizado	Límite de elasticidad típico (MPa), no garantizado
Hardox® 450 Chapa CR	0.8 - 2.10	425 - 475 <sup>2)</sup>	1370 - 1600	1250
Hardox® 450 Chapa	2.0 - 8.0	425 - 475	-	1250
Hardox® 450 Chapa gruesa	3.2 - 80.0	425 - 475	-	1250
Hardox® 450 Chapa gruesa	80.1 - 103.0	410 - 475	-	1250
Hardox® 450 Chapa gruesa	103.1 - 130.0	390 - 475	-	1250

<sup>1)</sup>Dureza Brinell, HBW, de conformidad con la norma EN ISO 6506-1, en una superficie fresada de entre 0,5 y 3 mm bajo la superficie. Al menos una muestra por cada colada y cada 40 toneladas.

<sup>2)</sup>La prueba de dureza no se realiza ni se garantiza para el material laminado en frío Hardox® 450. El intervalo de dureza es una conversión de la resistencia a la tracción.

El espesor nominal de las chapas suministradas no se desviará más de +/- 15 mm del espesor de la muestra del ensayo empleada para los ensayos de dureza.

La chapa Hardox® está templada. La dureza mínima del núcleo es del 90 % respecto a la dureza de superficie mínima garantizada.

## Propiedades de impacto

Calidad	Ensayo longitudinal, energía de impacto típica, probeta de ensayo Charpy V 10x10 mm.	Ensayo transversal, energía de impacto garantizada, probeta de ensayo Charpy V 10x10 mm.
Chapa y chapa gruesa Hardox® 450	50 J/ -40 °C	-
Hardox® 450 Tuf <sup>1)</sup>	-	Min. 27 J/ -20 °C <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Ensayo de impacto realizado en espesores  $\times$  6 mm para chapa gruesa y  $\times$  3 para chapa. Para espesores de entre 3 - 11,9 mm, se usan probetas de Charpy V de tamaños inferiores. El valor mínimo especificado es en ese caso proporcional al área transversal de la muestra del ensayo en comparación con una muestra de tamaño estándar (10 x 10 mm). Ensayo de impacto de conformidad con ISO EN 148 por cada colada y grupo de espesor. Media de tres ensayos.

<sup>2)</sup> Valor mínimo único 70% de media especificada.

## Composición química (análisis de colada)

Calidad	C <sup>1)</sup> (max %)	Si <sup>1)</sup> (max %)	Mn <sup>1)</sup> (max %)	P (max %)	S (max %)	Cr <sup>1)</sup> (max %)	Ni <sup>1)</sup> (max %)	Mo <sup>1)</sup> (max %)	B <sup>1)</sup> (max %)
Chapa CR	0.19	0.30	1.50	0.020	0.005	0.10	0.10	0.05	0.004
Chapa y chapa gruesa	0.26	0.70	1.60	0.025	0.010	1.40	1.50	0.60	0.005

El acero es de grano refinado<sup>2)</sup> Sustancias de aleación intencionadas.

## Contenido en carbono equivalente CET (CEV)

Espesor	chapa CR 0.8 - 2.10	chapa 2.0 - 8.0	chapa gruesa 3.2 - 4.9	chapa gruesa 5.0 - 9.9	chapa gruesa 10.0 - 19.9	chapa gruesa 20.0 - 39.9	chapa gruesa 40.0 - 80.0	chapa gruesa 80.1 - 130.0
Máx	0.36 (0.49)	0.35 (0.48)	0.37 (0.48)	0.38 (0.49)	0.39 (0.52)	0.41 (0.60)	0.43 (0.74)	0.41 (0.67)
típ.	0.32 (0.41)	0.26 (0.39)	0.29 (0.39)	0.33 (0.45)	0.36 (0.48)	0.38 (0.56)	0.38 (0.61)	0.39 (0.64)

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}$$

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}$$

**SSAB**

## Tolerancias

Encontrará información detallada en los folletos de SSAB Hardox® Garantées o en [www.ssab.com](http://www.ssab.com).

### Espesor

Tolerancias de conformidad con las garantías de espesor de Hardox®. Las garantías para chapa de Hardox® cumplen los requisitos de la norma EN 10 029, clase A. Las garantías para chapa de Hardox® cumplen los requisitos de 1/2 norma EN 10 051 y EN 10 131 para productos de chapa laminada en frío.

### Longitud y ancho

Conforme con el programa de dimensiones de SSAB. Tolerancias para chapa de conformidad con los estándares para bordes sin tratar de SSAB o tolerancias conformes a la norma EN 10 029 y EN 10 131 para chapa laminada en frío. Tolerancias conformes a la norma EN 10 051 para chapa, tolerancias más estrictas disponibles a petición.

### Forma

Tolerancias de conformidad con la norma EN 10 029 para chapa gruesa y con la norma EN 10 131 para chapa laminada en frío.

### Planicidad

Tolerancias para chapa gruesa de conformidad con las garantías de planicidad de Hardox® clase D, que son más estrictas que las especificadas en la norma EN 10 029. Tolerancias para chapa de conformidad con las garantías de planicidad de Hardox® clase A, que son más estrictas que las especificadas en la norma EN 10 051. Tolerancias para chapa laminada en frío de conformidad con las garantías de planicidad de Hardox® clase B.

### Propiedades de la superficie

De conformidad con la norma EN 10 163-2, clase A subclase 1.

### Plegado

Capacidad de plegado de la chapa de conformidad con la garantía de plegado de Hardox® clase F. Capacidad de plegado de chapa fina de conformidad con la garantía de plegado de Hardox® clase C. Capacidad de plegado de chapa de conformidad con la garantía de plegado de Hardox® clase B.

### Condiciones de entrega

Se suministran en estado templado o templado y revenido. Las chapas gruesas Hardox® 450 se suministran con bordes cizallados o cortados térmicamente y los espesores superiores a 80 mm se suministran con borde sin tratar como opción estándar. Las chapas Hardox® 450 se suministran en estado laminado y con los bordes sin tratar como opción estándar. Las chapas laminadas en frío Hardox® 450 en espesores de 0,80 a 2,10 mm se suministran con la superficie laminada en frío.

Puede encontrar los requisitos de entrega en el folleto de SSAB Hardox® Garantées Reino Unido o en [www.ssab.com](http://www.ssab.com).

### Producción y otras recomendaciones

#### Soldadura, doblado y mecanizado.

Encontrará recomendaciones en los folletos de SSAB en [www.hardox.com](http://www.hardox.com), o puede consultar nuestro soporte técnico, [techsupport@ssab.com](mailto:techsupport@ssab.com).

Hardox® 450 y Hardox® 450 Tuf no se han concebido para aplicarles un tratamiento térmico posterior. Las propiedades mecánicas se deben al proceso de templado y, cuando resulta necesario, un revenido posterior. Las propiedades del producto, en el momento de realizar la entrega, no se conservan si éste se somete a temperaturas superiores a 250 °C.

Se deberán tomar las precauciones de seguridad adecuadas para soldar, cortar, rectificar o hacer otros trabajos con este producto. El granallado, especialmente de las chapas recubiertas de imprimación, puede generar polvo con una elevada concentración de partículas.

### Información y contacto

[www.ssab.com/contact](http://www.ssab.com/contact)

La versión inglesa de este documento será determinante en caso de discrepancia. Es posible que el texto sufra algunos cambios y actualizaciones, por lo que le recomendamos descargar la versión más reciente de este documento en [www.ssab.com](http://www.ssab.com)

SSAB, Sterox, Hardox, Docol, GreenCoat, Toolox, Armcx, Ramor, SSAB Domex, SSAB Laser, Raex y Duroxite son marcas comerciales propiedad del grupo de empresas de SSAB.



Nota: SSAB. (2023b). *Hardox® 450 Chapa - Data Sheet 168* (Vol. 43, p. 2). [SSAB.https://www.ssab.com/en](https://www.ssab.com/en)