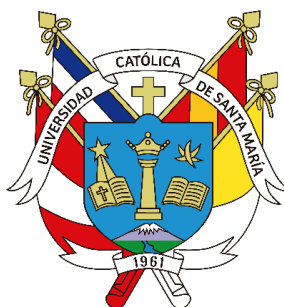


**Universidad Católica de Santa María**  
**Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y**  
**Formales**  
**Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica**  
**Eléctrica y Mecatrónica**



**CARBURACIÓN SUPERFICIAL POR TEMPLE DOBLE DEL ACERO  
8620 PARA LA OBTENCIÓN DE PIEZAS CON ALTA TENACIDAD EN  
EL NÚCLEO**

Tesis presentada por el Bachiller:

**Pérez Aco, Carlos Andrés**

Para optar el título profesional de:

**Ingeniero Mecánico Electricista**

**Asesor: Mg. Castro Valdivia,**

**Jorge Luis**

**Arequipa – Perú**

**2024**

UCSM-ERP

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**  
**INGENIERIA MECANICA ELECTRICA Y MECATRONICA**  
**TITULACIÓN CON TESIS**  
**DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR**

Arequipa, 25 de Junio del 2023

Dictamen: 007756-C-EPIMMEM-2023

Visto el borrador del expediente 007756, presentado por:

1997206721 - PEREZ ACO CARLOS ANDRES

Titulado:

**CARBURACIÓN SUPERFICIAL POR TEMPLE DOBLE DEL ACERO 8620 PARA LA OBTENCIÓN DE  
PIEZAS CON ALTA TENACIDAD EN EL NÚCLEO**

Nuestro dictamen es:

**APROBADO**

29361846 - CHIRE RAMIREZ EMILIO  
DICTAMINADOR



30857994 - GORDILLO ANDIA CARLOS ALBERTO  
DICTAMINADOR



43209234 - ALMIRON BACA JONATHAN JOSEPH  
DICTAMINADOR



# CARBURACIÓN SUPERFICIAL POR TEMPLE DOBLE DEL ACERO 8620 PARA LA OBTENCIÓN DE PIEZAS CON ALTA TENACIDAD EN EL NÚCLEO

## INFORME DE ORIGINALIDAD

16%

INDICE DE SIMILITUD

16%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

8%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://repository.udistrital.edu.co">repository.udistrital.edu.co</a> Fuente de Internet	2%
2	<a href="http://docplayer.es">docplayer.es</a> Fuente de Internet	2%
3	<a href="http://eprints.uanl.mx">eprints.uanl.mx</a> Fuente de Internet	2%
4	<a href="http://1library.co">1library.co</a> Fuente de Internet	2%
5	<a href="http://www.tractermia.com">www.tractermia.com</a> Fuente de Internet	1%
6	<a href="http://repositorio.utp.edu.pe">repositorio.utp.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
7	<a href="http://nrl.northumbria.ac.uk">nrl.northumbria.ac.uk</a> Fuente de Internet	1%
8	<a href="http://www.coursehero.com">www.coursehero.com</a> Fuente de Internet	1%

9	<a href="http://test-systems.es">test-systems.es</a> Fuente de Internet	1 %
10	<a href="http://vsip.info">vsip.info</a> Fuente de Internet	1 %
11	<a href="http://ocw.ehu.eus">ocw.ehu.eus</a> Fuente de Internet	1 %
12	<a href="http://www.buehler.com.es">www.buehler.com.es</a> Fuente de Internet	1 %
13	<a href="http://es.airliquide.com">es.airliquide.com</a> Fuente de Internet	1 %

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias < 1%

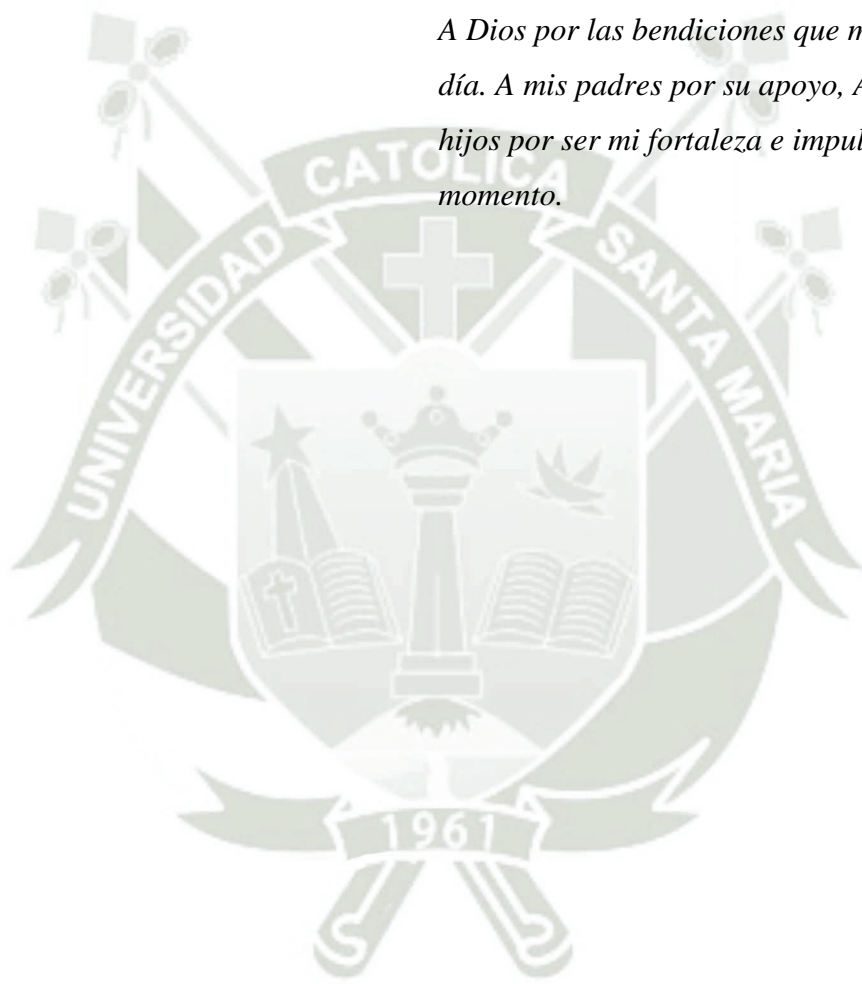
Excluir bibliografía

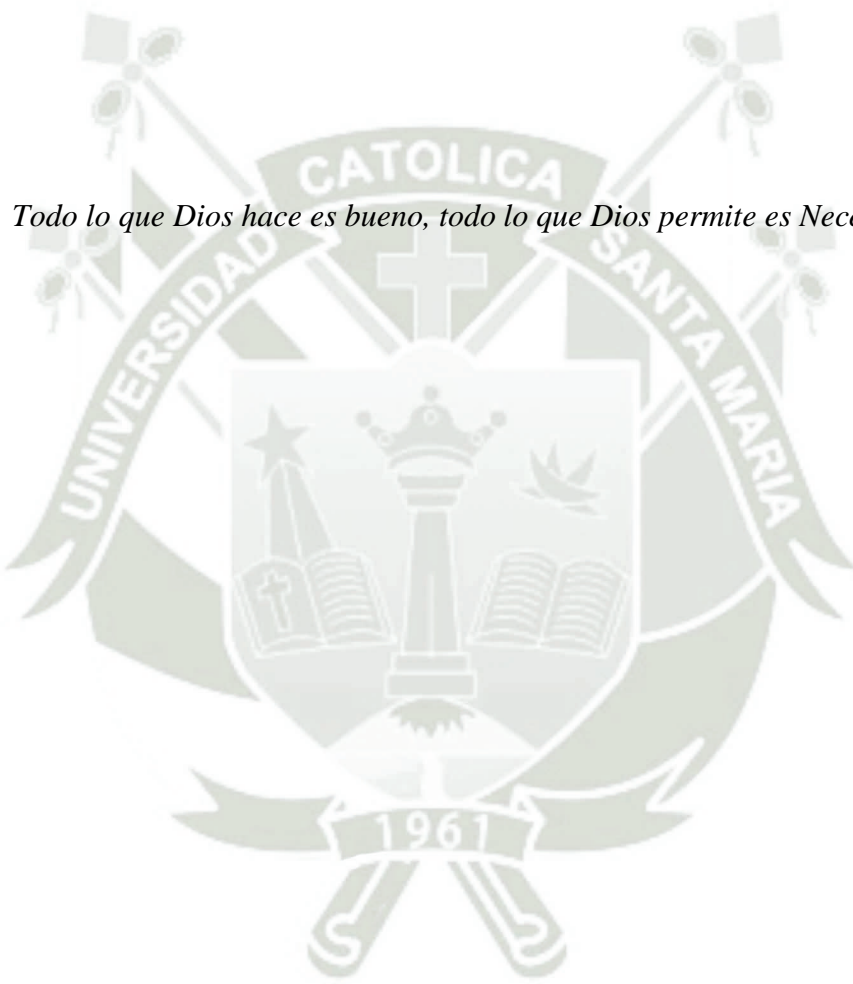
Apagado

## DEDICATORIA

*Dedico*

*A Dios por las bendiciones que me otorga cada día. A mis padres por su apoyo, A mi esposa e hijos por ser mi fortaleza e impulso en todo momento.*





*Todo lo que Dios hace es bueno, todo lo que Dios permite es Necesario*

***Job 2:10***

## RESUMEN

La siguiente Tesis tiene como finalidad realizar un estudio y experimentación sobre la carburación con temple doble para lograr una mejora en cuanto a la resistencia y durabilidad del acero DIN 20 CrNiMo controlando tiempos de calentamiento y enfriamiento.

Lo que lleva a alcanzar piezas con una alta tenacidad en el núcleo y una mayor dureza superficial, se va a realizar un análisis de las variables del proceso sobre las propiedades mecánicas y parámetros de operación que se llevan mediante la relación matemática establecida por la ley de Fick.

Actualmente la industria metalmecánica tiene la necesidad de fabricar componentes, piezas y otros con mejores propiedades, para tener una durabilidad y resistencia mayor a lo convencional y tener un salto de calidad que marque la diferencia.

Para realizar el trabajo, se tiene múltiples probetas de acero DIN 20 CrNiMo las cuales son sometidas al tratamiento de carburación doble, se han realizado pruebas de dureza, ensayo de tracción, ensayo de impacto entre otros. Antes y después del tratamiento para comparar valores y demostrar la mejora de las características que se puede obtener al realizar el ensayo, finalmente se da las conclusiones y recomendaciones de la presente tesis.

**Palabra Clave:** Carburación, acero DIN 20 CrNiMo, Temple

## ABSTRACT

The purpose of the following Thesis is to carry out a study and experimentation on carburizing with double tempering to achieve an improvement in terms of the resistance and durability of DIN 20 CrNiMo steel, controlling heating and cooling times.

What leads to achieve pieces with a high tenacity in the core and a greater surface hardness, an analysis of the process variables will be carried out on the mechanical properties and operating parameters that are carried out by means of the mathematical relationship established by the law of fick.

Currently, the metal-mechanic industry has the need to manufacture components, parts and others with better properties, to have greater durability and resistance than conventional and to have a leap in quality that makes a difference.

To carry out the work, there are multiple DIN 20 CrNiMo steel specimens which are subjected to double carburization treatment, hardness tests, tensile test, impact test, among others, have been carried out. Before and after the treatment to compare values and demonstrate the improvement of the characteristics that can be obtained when carrying out the test, finally the conclusions and recommendations of this thesis are given.

**Key word:** Carburizing, DIN 20 CrNiMo steel, Tempering

## ÍNDICE

**DEDICATORIA**

**RESUMEN**

**ABSTRACT**

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPITULO I</b> .....	2
<b>INFORMACION GENERAL</b> .....	3
<b>1.1 Planteamiento del Problema</b> .....	3
<b>1.2 Objetivos</b> .....	4
<b>1.2.1 Objetivo general</b> .....	4
<b>1.2.2 Objetivos específicos</b> .....	4
<b>1.3 Hipótesis</b> .....	4
<b>1.4 Justificación</b> .....	5
<b>1.5 Variables</b> .....	5
<b>1.5.1 Variables Independientes</b> .....	5
<b>1.5.2 Variables Dependientes</b> .....	5
<b>1.6 Tipo de investigación y limitaciones</b> .....	5
<b>1.6.1 Tipo de investigación</b> .....	5
<b>1.6.2 Recursos físicos</b> .....	6
<b>1.6.3 Recursos Humanos</b> .....	6
<b>1.7 Limitaciones</b> .....	6
<b>1.8 Resultados Esperados</b> .....	8
<b>1.9 Metodología</b> .....	8
<b>1.9.1 Propiedades y composición del Acero 20 CrNiMo 2</b> .....	9
<b>1.10 Marco histórico</b> .....	10
<b>CAPITULO II</b> .....	14
<b>MARCO TEORICO</b> .....	15

2.1	Tratamientos térmicos.....	15
2.2	Hornos de tratamientos térmicos .....	15
2.2.1	Hornos para recocido.....	15
2.3	Tratamientos Térmicos Subcríticos .....	18
2.3.1	Temple .....	19
2.3.2	Recocido .....	19
2.3.3	Revenido .....	20
2.3.4	Normalizado.....	20
2.4	Composición del Acero a Tratar .....	20
2.5	Velocidad de calentamiento y de enfriamiento. ....	21
2.5.1	Velocidad de calentamiento .....	21
2.5.2	Velocidad de enfriamiento.....	21
2.6	Temperatura de mantenimiento y tiempo de permanencia.....	22
2.6.1	Temperatura de mantenimiento .....	22
2.6.2	Tiempo de permanencia.....	22
2.7	Sistemas de identificación de las piezas en los procesos. ....	22
2.8	Sistemas de detección y evaluación de defectos. ....	24
2.8.1	Sistemas de detección .....	24
2.8.2	Evaluación de defectos .....	25
2.8.2.1	Tensiones Residuales .....	25
2.9	Tratamientos termoquímicos.....	26
2.9.1	Cianuración.....	26
2.9.2	Carburación.....	27
2.9.3	Carburización o Cementación.....	27
2.9.4	Nitruración.....	28
2.10	Difusión de sólidos .....	29
2.10.1	Difusión por vacantes.....	29
2.10.2	Difusión intersticial .....	30
2.11	Leyes de Fick.....	30
2.11.1	Primera ley de Fick .....	30

2.11.2	Coeficiente de difusión y de temperatura .....	32
2.11.3	Segunda ley de Fick.....	34
2.12	Normativa y especificaciones técnicas .....	35
2.12.1	Ensayo de tracción según ASTM E8 .....	35
2.12.2	Ensayo de Charpy .....	36
2.12.3	Ensayo de dureza Rockwell con la norma E-10 .....	37
2.12.4	Metalografía.....	38
2.13	Fundamento y objeto.....	39
2.14	Tratamientos isotérmicos Martempering Austempering.....	40
2.14.1	Martempering.....	40
2.14.2	Austempering.....	40
2.15	Variables de control.....	41
2.15.1	Composición del acero a tratar .....	41
2.15.2	Velocidad de calentamiento.....	41
2.15.3	Temperatura de mantenimiento .....	42
2.15.4	Tiempo de permanencia.....	42
CAPITULO III	.....	43
3.1	Procedimiento Experimental .....	44
3.1.1	Determinación del número de probetas necesarias.....	44
3.2	Diseño Experimental .....	44
3.2.1	Variables de Estudio .....	44
3.3	Materiales y equipos .....	46
3.4	Determinación de las temperaturas críticas Ac1, AC3 y Ms.....	47
3.4.1	Aplicación de la Ecuación de Kasatkin .....	47
3.4.2	Aplicación de la Ecuación de Andrews para Ms .....	48
3.4.3	Determinación de temperaturas AC1 y AC3.....	49
3.5	Secuencia de tratamientos térmicos empleados .....	51
3.6	Tratamiento de carburización de las probetas .....	52
3.7	Caracterización macroscópica del acero carburizado .....	53
3.8	Preparación de los agentes carburizantes o cementantes .....	53

3.8.1	Cascara de Huevo.....	54
3.8.2	Carbón.....	54
3.9	Fabricación de la caja metálica y tapa de acero inoxidable.....	57
3.10	Análisis del acero a tratar .....	58
3.11	Análisis Metalográfico del acero a tratar .....	60
3.12	Prueba de dureza de las probetas .....	60
3.13	Ensayo de tracción.....	64
3.14	Ensayo de impacto .....	65
3.15	Primer Temple .....	67
3.16	Segundo Temple.....	69
3.17	Análisis Metalográfico.....	71
CAPITULO IV .....		77
4.1	Resultados Obtenidos .....	78
4.1.1	Durezas Obtenidas .....	78
4.1.2	Resultados del ensayo de tracción (Norma ASTM E8/E8M) .....	81
4.1.3	Resultados Ensayo de impacto .....	81
4.1.4	Resultados de la Metalografía:.....	84
4.2	Resultados difusión de carbono.....	86
CAPITULO V .....		91
5.1	CONCLUSIONES .....	92
5.2	RECOMENDACIONES O SUGERENCIAS .....	94
REFERENCIA .....		95

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> <i>Horno de Convección Natural</i> .....	16
<b>Figura 2</b> <i>Horno de convección con ventilador</i> .....	16
<b>Figura 3</b> <i>Horno de banco de alta temperatura</i> .....	17
<b>Figura 4</b> <i>Difusión en la primera Ley de Fick</i> .....	31
<b>Figura 5</b> <i>Gradiente de Concentración</i> .....	32
<b>Figura 6</b> <i>Dimensiones de probeta del ensayo de tracción</i> .....	35
<b>Figura 7</b> <i>Parámetros para la norma ASTM E8/E8M – 09</i> .....	36
<b>Figura 8</b> <i>Dimensiones de probeta del ensayo de Charpy</i> .....	37
<b>Figura 9</b> <i>Diagrama de relación de variables a seguir en el experimento</i> .....	45
<b>Figura 10</b> <i>Diagrama general de flujo secuencia de la experimentación (elaboración propia)</i> .....	51
<b>Figura 11</b> <i>Tamiz ASTM E-11 número 4</i> .....	54
<b>Figura 12</b> <i>Cáscara de huevo molida en el mortero</i> .....	54
<b>Figura 13</b> <i>Tamiz ASTM E-11 número 6</i> .....	55
<b>Figura 14</b> <i>Carbón molido pasado por la malla N° 6</i> .....	55
<b>Figura 15</b> <i>Mezcla de cáscara de huevo molido junto con el carbón vegetal</i> ...	56
<b>Figura 16</b> <i>Horno mufla de la Universidad Católica Santa María</i> .....	57
<b>Figura 17</b> <i>Modelo de la caja cementante</i> .....	57
<b>Figura 18</b> <i>Caja cementante a utilizar en el proceso. Los parámetros longitudinales son: 15 cm x 15 cm x 10 cm</i> .....	58
<b>Figura 19</b> <i>Micrografía de la probeta patrón (D-01)</i> .....	60
<b>Figura 20</b> <i>Máquina de dureza rockwell</i> .....	61
<b>Figura 21</b> <i>Identador de diamante</i> .....	61
<b>Figura 22</b> <i>Probeta centrada para realizar el ensayo</i> .....	62
<b>Figura 23</b> <i>Huellas de indentador en la muestra patrón</i> .....	62
<b>Figura 24</b> <i>Probetas con las huellas del ensayo de dureza Rockwell C</i> .....	63
<b>Figura 25</b> <i>Gráfica Deformación por tracción vs Esfuerzo de Tracción</i> .....	65
<b>Figura 26</b> <i>Foto del tipo de rotura probeta T-01</i> .....	67

<b>Figura 27</b>	<i>Colocación de las piezas al horno para realizar el primer temple ..</i>	68
<b>Figura 28</b>	<i>Enfriamiento de las piezas en aceite agitado .....</i>	68
<b>Figura 29</b>	<i>Repetición del procedimiento de un temple .....</i>	69
<b>Figura 30</b>	<i>Se enfrían las piezas previamente calentadas en aceite agitado .....</i>	69
<b>Figura 31</b>	<i>Colocación de las piezas con un temple dentro del horno .....</i>	70
<b>Figura 32</b>	<i>Enfriamiento de las piezas con dos temple .....</i>	70
<b>Figura 33</b>	<i>Profetas enumeradas con las que se realiza los procedimientos .....</i>	71
<b>Figura 34</b>	<i>Lijas 60, 100, 240, 400, 600, 1000 usadas para pulir probetas. ....</i>	72
<b>Figura 35</b>	<i>Pulido manual de la probeta con lija 60 .....</i>	72
<b>Figura 36</b>	<i>Pulido manual de la probeta con lija 1000 .....</i>	72
<b>Figura 37</b>	<i>Pulidora Metalográfica .....</i>	73
<b>Figura 38</b>	<i>Alúmina .....</i>	73
<b>Figura 39</b>	<i>Puliendo las probetas con ayuda del pulidor y la alúmina .....</i>	73
<b>Figura 40</b>	<i>Resultado de brillo espejo en la probeta .....</i>	74
<b>Figura 41</b>	<i>Materiales para el atacado químico de la superficie de las probetas</i>	74
<b>Figura 42</b>	<i>Atacado químico de la probeta con Nital al 3%.....</i>	75
<b>Figura 43</b>	<i>Limpiando la superficie de la probeta con alcohol y agua .....</i>	75
<b>Figura 44</b>	<i>Microscopio Óptico para metalografía .....</i>	76
<b>Figura 45</b>	<i>Foto de probetas en las que se realiza el ensayo.....</i>	81
<b>Figura 46</b>	<i>Foto del tipo de rotura de la probeta T-02 .....</i>	82
<b>Figura 47</b>	<i>Foto del tipo de rotura de la probeta T-03 .....</i>	83
<b>Figura 48</b>	<i>Foto del tipo de rotura de la probeta T-04 .....</i>	83
<b>Figura 49</b>	<i>Foto del tipo de rotura de la probeta T-05 .....</i>	84
<b>Figura 50</b>	<i>Micrografía de la probeta cementada (D-02) .....</i>	84
<b>Figura 51</b>	<i>Micrografía de la probeta cementada + 2 temple (D-04).....</i>	85
<b>Figura 52</b>	<i>Micrografía de la probeta cementada + 2 temple + revenido (D-05)</i>	85
<b>Figura 53</b>	<i>Espesor de capa difundida VS tiempo .....</i>	90

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	Propiedades mecánicas .....	9
<b>Tabla 2</b>	Propiedades físicas.....	9
<b>Tabla 3</b>	Codificación de las probetas para el análisis metalográfico .....	23
<b>Tabla 4</b>	Codificación de las probetas para el ensayo de Dureza Rockwell .....	23
<b>Tabla 5</b>	Codificación de las probetas para el ensayo de tracción .....	23
<b>Tabla 6</b>	Codificación de las probetas para el ensayo de Impacto Charpy .....	24
<b>Tabla 7</b>	Escalas comunes en pruebas Rockwell y Rockwell Superficial.....	38
<b>Tabla 8</b>	Determinación de cantidad de probetas .....	44
<b>Tabla 9</b>	Materiales a utilizar .....	46
<b>Tabla 10</b>	Equipos a utilizar .....	47
<b>Tabla 11</b>	Tabla de tamices estándar USA .....	56
<b>Tabla 12</b>	Composición del acero DIN 20 CrNiMo 2-2 (1.6523).....	59
<b>Tabla 13</b>	Medición de la dureza HRC de la probeta D-01.....	63
<b>Tabla 14</b>	Medición de la energía de impacto de la probeta T-01 .....	66
<b>Tabla 15</b>	Medición de la dureza HRC de la probeta D-02 en el núcleo .....	78
<b>Tabla 16</b>	Medición de la dureza HRC de la probeta D-02 en el borde.....	78
<b>Tabla 17</b>	Medición de la dureza HRC de la probeta D- 03en el núcleo .....	79
<b>Tabla 18</b>	Medición de la dureza HRC de la probeta D-03 en el borde.....	79
<b>Tabla 19</b>	Medición de la dureza HRC de la probeta D-04 en el núcleo .....	79
<b>Tabla 20</b>	Medición de la dureza HRC de la probeta D-04 en el borde.....	80
<b>Tabla 21</b>	Medición de la dureza HRC de la probeta D-05 en el núcleo .....	80
<b>Tabla 22</b>	Medición de la dureza HRC de la probeta D-05 en el borde.....	80
<b>Tabla 23</b>	Medición de la energía de impacto de la probeta T-02 .....	81
<b>Tabla 24</b>	Medición de la energía de impacto de la probeta T-03 .....	82
<b>Tabla 25</b>	Medición de la energía de impacto de la probeta T-04 .....	83
<b>Tabla 26</b>	Medición de la energía de impacto de la probeta T-05 .....	83
<b>Tabla 27</b>	<i>Tabulación de difusión de data .....</i>	86
<b>Tabla 28</b>	<i>Datos para la difusión de carbono a 925°C.....</i>	86
<b>Tabla 29</b>	<i>Datos para la difusión de carbono a 950°C.....</i>	87
<b>Tabla 30</b>	<i>Tabulación de valores de la función error. ....</i>	88
<b>Tabla 31</b>	<i>Tabulación de valores de la función error para 900°C .....</i>	88
<b>Tabla 32</b>	<i>Tabulación de valores de la función error para 925°C .....</i>	89

## INTRODUCCIÓN

Este proyecto se hizo debido a la necesidad de la industria metalmecánica, ya que muchas de las piezas metálicas fabricadas en la actualidad requieren de un tratamiento térmico para mejorar o modificar alguna de sus propiedades y realizar el trabajo para el que están diseñadas cada una de las piezas. La carburación es un proceso termoquímico en el que se añade carbono a la superficie de una pieza de acero por difusión, cambiando su composición, e impregnando la superficie y luego tratándola térmicamente. Su importancia radica en que endurece la superficie del material sin cambiar su núcleo, dando como resultado piezas resistentes a la fatiga, mientras que la superficie del acero tiene una mayor concentración de carbono y una mejor resistencia al desgaste.

En esta experimentación se hace la carburación superficial por temple doble del acero DIN 20 CrNiMo y un análisis del efecto de las principales variables del proceso de difusión sobre sus propiedades mecánicas. La determinación de los parámetros de operación (temperatura y tiempo de carburación) a nivel de laboratorio se determinará mediante cálculo utilizando la relación matemática establecida por la ley de Fick.



# CAPITULO I

## INFORMACION GENERAL

**1.1 Planteamiento del Problema**

Los aceros destinados a la carburación superficial tienen contenidos de carbono generalmente inferiores a 0,25 %, y mediante el tratamiento termoquímico de carburación se consigue una capa superficial con 0,70 % a 1,10 % de carbono.

En la carburación convencional un temple posterior confiere a esa capa superficial niveles de dureza superiores a 60 HRC, manteniendo en el núcleo una relativa tenacidad.

En el presente trabajo se aplicará un temple doble que consistirá en un enfriamiento más o menos lento de las piezas desde la temperatura de cementación hasta la temperatura ambiente, seguidamente se calentará a la temperatura de temple de núcleo y se enfriará en diferentes medios para optimizar los resultados. Seguidamente, se calentará de nuevo a la temperatura de temple de la capa, más baja que la anterior, enfriándose de nuevo en el medio más adecuado.

Para el cálculo del número de probetas se hará uso de un diseño experimental para así obtener datos y resultados verídicos y confiables.

Las propiedades mecánicas a determinar en la realización del temple doble serán la resistencia a la tracción, dureza y cambios microestructurales en las diferentes secuencias que se aplicará el tratamiento del acero 20 CrNiMo 2 2. Esto conlleva a plantearse la siguiente pregunta ¿Será posible que aumentando un temple adicional al acero 20 CrNiMo 2 2, después de su carburización, conseguir la obtención de piezas con alta tenacidad en el núcleo y buena dureza superficial, todo ello para contribuir al desarrollo tecnológico de las operaciones conjuntas de tratamientos termofísicos y termoquímicos?

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general

Refinar el grano en el núcleo y superficie para mejorar propiedades respecto a la tenacidad y resistencia a la tracción mediante un doble temple en aceite a temperatura críticas entre Ac1, AC3 y Ms luego del carburizado en un acero 20 CrNiMo 2 2.

### 1.2.2 Objetivos específicos

1. Determinar las propiedades mecánicas del acero 20 CrNiMo 2 2, antes y después de la secuencia de tratamientos térmicos aplicados.
2. Proporcionar protocolos de experimentación para nuevas secuencias de tratamientos termoquímicos y termofísicos combinados que permitan obtener nuevos valores de propiedades mejoradas y optimizadas en aceros aleados.
3. Construir un módulo de experimentación de tratamientos termoquímicos.

## 1.3 Hipótesis

Es posible refinar el grano en el núcleo como en la superficie del acero acero 20 CrNiMo 2 2 para obtener propiedades superiores en tenacidad y resistencia a la tracción mediante un procedimiento de temple doble.

## 1.4 Justificación

Este proyecto se realiza con la finalidad de mejorar la resistencia y durabilidad del acero DIN 20 CrNiMo 2 2 (1.6523), optimizar los parámetros de tratamiento térmico de cementación y mejorar la calidad del producto final.

## 1.5 Variables

### 1.5.1 Variables Independientes

- Carburación a través del temple doble mediante temperaturas críticas.

### 1.5.2 Variables Dependientes

- Mejora de la tenacidad y Resistencia a la tracción.
- Porcentaje de carbono Superficial obtenido posterior a ensayos

## 1.6 Tipo de investigación y limitaciones

### 1.6.1 Tipo de investigación

La investigación es experimental ya que consiste en la manipulación varias variables como son la velocidad de calentamiento, temperatura de mantenimiento y tiempo de permanencia evaluadas en condiciones rigurosamente controladas, para poder lograr refinar el grano tanto en el núcleo como en la superficie, para así verificar la mejora de propiedades respecto a la tenacidad en el núcleo y resistencia a la tracción.

### **1.6.2 Recursos físicos**

Los materiales que se utilizarán serán 3 barras de acero 20 CrNiMo 2 2 (AISI/SAE 8620) las cuales fueron seccionadas en probetas normalizadas según sea el caso de la etapa que se esté realizando las pruebas y ensayos a las cuales se les hará el tratamiento térmico ya mencionado, este acero fue obtenido de la empresa BÖHLER, también se utilizará aceite para motor SAE 20W-50 para poder hacer el temple, Carbón vegetal de Huarango y cáscara de huevo, que sirven para hacer la cementación. Los principales equipos utilizados fueron una Máquina universal para el ensayo de tracción que está ubicada en las instalaciones del Instituto Superior Tecnológico SENATI, Equipo de Ensayo Charpy JB-W300A-TIMEGROUP INC el cual se encuentra en la Universidad Católica Santa María, se utilizó un Microscopio óptico Universidad Católica Santa María y el Durómetro Rockwell JJC334-Eligibility HBRVU-187.5 de la Universidad Católica Santa María por último un Horno Mufla instalado en el Instituto Superior Tecnológico Honorio Delgado Espinoza. Se utilizó herramientas, aparatos e instrumentos auxiliares según las operaciones y procesos realizados.

### **1.6.3 Recursos Humanos**

Investigador responsable y Asesor metodológico, se contó con el apoyo de laboratoristas de las instalaciones mencionadas en las instituciones ya señaladas

## **1.7 Limitaciones**

La investigación de tratamientos térmicos de cementación puede tener varias limitaciones, algunas de las posibles limitaciones que se pueden encontrar en esta investigación de este tipo:

Disponibilidad de muestras: Para llevar a cabo una investigación de tratamientos térmicos de cementación, es necesario contar con muestras representativas que permitan realizar los ensayos necesarios. La obtención de estas muestras puede ser difícil o costosa, especialmente si se trata de piezas de gran tamaño o complejas.

Equipamiento especializado: Los tratamientos térmicos de cementación requieren el uso de equipos especializados, como hornos de alta temperatura, que pueden resultar costosos y difíciles de mantener. Esto puede limitar la capacidad de los investigadores para llevar a cabo ciertos experimentos o para replicar los resultados obtenidos en otros entornos.

Variabilidad de los resultados: Los tratamientos térmicos de cementación pueden ser sensibles a muchos factores, incluyendo la composición del material, la temperatura, el tiempo de exposición y la velocidad de enfriamiento. Esto puede generar una gran variabilidad en los resultados, lo que dificulta la interpretación de los datos y la identificación de patrones o tendencias.

Tiempo y costo: Los tratamientos térmicos de cementación pueden requerir largos tiempos de exposición y enfriamiento, lo que puede aumentar el tiempo necesario para realizar los experimentos y reducir la capacidad de los investigadores para llevar a cabo un gran número de pruebas. Además, los equipos especializados necesarios pueden ser costosos de adquirir y mantener, lo que puede limitar la cantidad de experimentos que se pueden realizar.

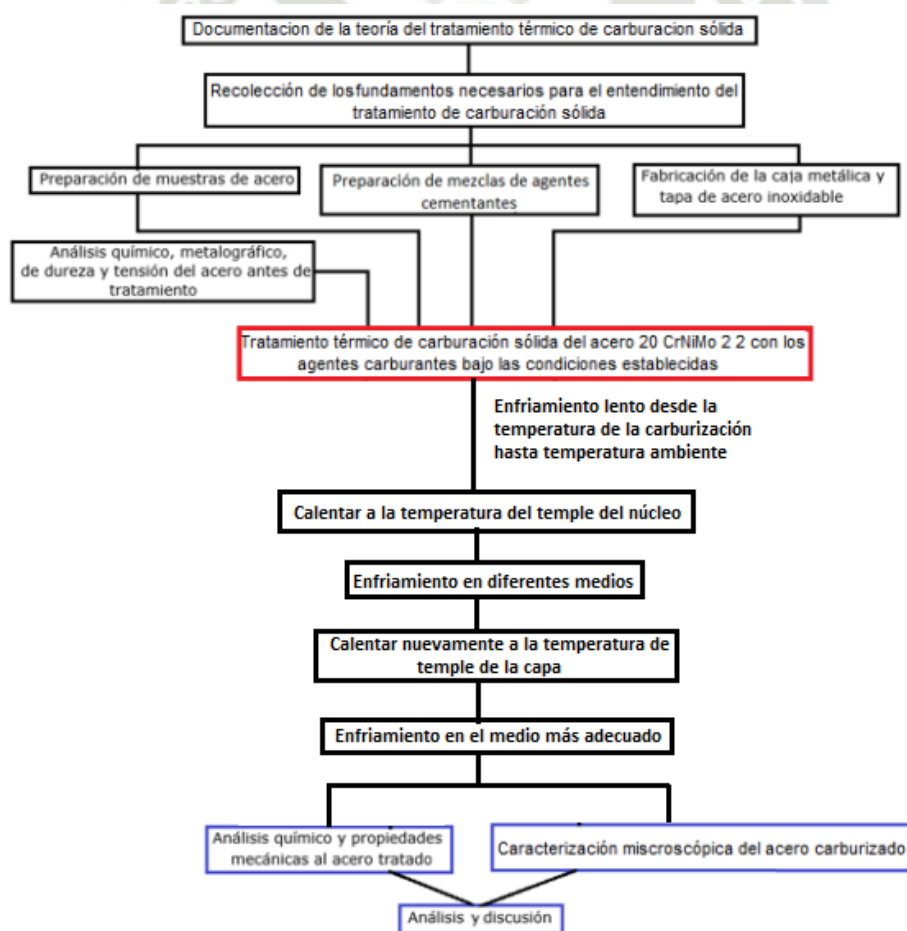
Es importante que los investigadores reconozcan y aborden estas limitaciones para garantizar la validez y relevancia de sus resultados.

## 1.8 Resultados Esperados

Al haberle aplicado al acero 20 CrNiMo 2 2 doble temple en aceite a temperaturas críticas después de hacerle el carburizado, se logró refinar el grano tanto en el núcleo como en la superficie, para así obtener la mejora de propiedades respecto a la tenacidad en el núcleo y resistencia a la tracción.

## 1.9 Metodología

La metodología aplicada en esta investigación fue cuantitativa debido a que el objetivo es recolectar datos y analizarlos para aplicarlos a los objetivos anteriormente mencionados.



### 1.9.1 Propiedades y composición del Acero 20 CrNiMo 2

Tabla 1

#### Propiedades mecánicas

Propiedades mecánicas	
Resistencia a la tracción	550-650 MPa
Límite elástico	370-420 MPa
Alargamiento	15-20%
Dureza	150-170 Brinell

Tabla 2

#### Propiedades físicas

Propiedades físicas	
Densidad	7,84 g/cm <sup>3</sup>
Coefficiente de expansión térmica	12,1 $\mu\text{m/m}^\circ\text{C}$
Conductividad térmica	41,9 W/mK
Conductividad eléctrica	12,9 MS/m

El acero 20CrNiMo2 2 es un acero de alta aleación, lo que significa que contiene una cantidad significativa de otros elementos, además de hierro y carbono. La combinación de níquel, cromo y molibdeno en la aleación proporciona una mayor resistencia y dureza, mientras que el manganeso mejora la tenacidad y la ductilidad. La adición de silicio ayuda a mejorar la resistencia a la oxidación y la corrosión.

En general, el acero 20CrNiMo22 es una aleación de alta calidad y alta resistencia que se utiliza comúnmente en aplicaciones donde se requiere una gran resistencia mecánica y una buena resistencia a la fatiga, como en engranajes, ejes y piezas de transmisión.

### 1.10 Marco histórico

Se realizó una revisión extensa a investigación respecto a nuestro tema, haciendo énfasis en los resultados obtenidos en la cementación del acero 20CrNiMo 2 2 (AISI/SAE 8620) con solo un temple.

Es así como Cesar Antonio Paltán Zhingre, Jorge Fajardo, Carrasquero Rodriguez y Lopez Lopez en su investigación EVALUACIÓN DEL ENDURECIMIENTO POR CEMENTACIÓN SÓLIDA DE LOS ACEROS SAE 8620 Y SAE 1018, Paltán Zhingre , Fajardo., Carrasquero Rodriguez , & López López (2015) nos anticipan que en el proceso de cementación en conjunto con un activador en estado sólido como es el carbón vegetal se presentó una mejor difusión del carbono, obteniendo elevados valores de dureza. Mostrando en sus resultados un valor  $R^2$  de  $0.97 \pm 0.05$ , logrando así predecir los valores de dureza que se alcanzarán en los aceros cementados en función de la profundidad que alcance la difusión del carbono.

Además, en la investigación de Paulo de Tarso Bida Gomes, Julio Ricardo Barreto Cruz, Emerson Giovani Rabelo y Miguel Mattar Neto “NORMALIZING TREATMENT INFLUENCE ON THE FORGED STEEL SAE 8620 FRACTURE PROPERTIES”, Vida Gomes, Barreto Cruz, Rabelo, & Neto (2005) , nos informa que en cuanto a las propiedades de fractura del acero en condiciones neutras y sin tratamientos térmicos aplicados, se tendrá un alto nivel de fragilidad, en cambio después de ser sometido a alguno de estos surge un aumento de la tenacidad del material.

Según, Khani Sanji, Ghasemi Banadkouki, Mashreghi, & Moshrefifas (2012) en su investigación EFECTO DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE TEMPLE Y

REVENIDO SIMPLE Y DOBLE SOBRE LA MICROESTRUCTURA Y LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO AISI 4140, resaltan que la microestructura gruesa de los aceros al carbono simples ferríticos/perlíticos laminados en caliente desarrollados convencionalmente a menudo hace que sea imposible obtener al mismo tiempo una buena ductilidad, tenacidad y alta resistencia.

Así como también, las propiedades mecánicas de los aceros de baja aleación se pueden mejorar mediante refinamiento de grano austenítico. El refinamiento de la microestructura mejora tanto la fuerza como la tenacidad.

Mientras que Jian Liu, Hao Yun , Tao Zhou, Chenghao Song, Kai Zhang, (2014), en su investigación “EFECTO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE DOBLE TEMPLE Y REVENIDO SOBRE LA MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN NUEVO ACERO 5CR PROCESADO MEDIANTE COLADA POR ELECTROESCORIA”, innovaron con la premisa que, un tratamiento térmico convencional consistente en el temple a alta temperatura con templado a alta temperatura por encima de 600°C, para conseguir una buena combinación de resistencia y tenacidad.

Sin embargo, la alta temperatura de enfriamiento puede conducir a un aumento del tamaño de grano de la austenita, lo que es perjudicial para la estabilidad microestructural, por eso se propuso que en el acero martensítico, el refinamiento de microestructura, como el grano de austenita anterior, el paquete martensítico.

Según David Eduardo Castillo Gutiérrez, Irma Inírida Angarita Moncaleano, Rodolfo Rodríguez Baracaldo (2018); en su investigación sobre CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL Y MECÁNICA DE ACEROS DE FASE DUAL (FERRITA-

## MARTENSITA), OBTENIDOS MEDIANTE PROCESOS TÉRMICOS Y TERMOMECAÑICOS

Este artículo aborda los tratamientos térmicos y termomecánicos utilizados para obtener aceros bifásicos (ferrítico-martensítico) a partir de la modificación microestructural de aceros SAE 8620 de bajo contenido en carbono. La austenita se transforma en martensita. La tensión máxima es donde se presenta la mayor diferencia entre los aceros, y esto refleja las diferentes capacidades de endurecimiento de las regiones plásticas del material, a menor contenido de carbono indica menor resistencia mecánica, en cambio a mayor contenido de carbono se obtienen esfuerzos máximos y de fluencia más elevados. El material tratado tiene una mayor capacidad de absorción de energía de impacto, y el material tiene el potencial de restaurar la microestructura, homogeneizar el tamaño de grano y eliminar la falta de homogeneidad producida por la fabricación, lo que permite que el acero detenga la transformación estructural posterior de la fase crítica de Inter endurecimiento y una buena condición, lo que se requiere de la investigación.

Analizando la investigación de Jainer Santiago Piñeros Torres Y William Hernando Porras Moreno (2016), sobre el ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA CEMENTACION EN EL TRATAMIENTO TÉRMICO DE TEMPLE DESDE TEMPERATURAS INTERCRÍTICAS Y REVENIDO EN UN ACERO AISI/SAE 8620, se obtuvo un acero con mejores propiedades mecánicas para diversas aplicaciones industriales. La cementación a 930 °C durante 4 h aumentó la dureza y la resistencia del material en aproximadamente 50% durante la misma secuencia de tratamientos, pero sin cementar. La dureza y la resistencia última a la tracción aumentaron en todas las secuencias de tratamiento térmico realizadas. El

enfriamiento adicional a los 5, 10 y 15 min aumentó la resistencia máxima a la tracción debido a la transformación martensítica y disminuyó la dureza debido al aumento de ferrita en la muestra. Las mejores propiedades se obtienen mediante procedimientos de carburación, temple y recocido de 10 minutos, que son ventajosos en el campo industrial, ya que para lograrlo se buscan materiales con alta resistencia última a la tracción y baja deformación plástica.





## MARCO TEORICO

### 2.1 Tratamientos térmicos

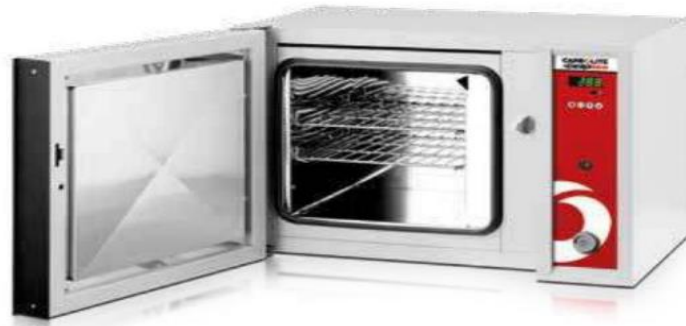
El tratamiento térmico es el proceso controlado de calentamiento y enfriamiento de materiales para mejorar sus propiedades mecánicas, físicas y químicas. El tratamiento térmico se usa comúnmente en la industria metalúrgica y en la fabricación de productos metálicos como acero, aluminio, cobre y titanio. El uso del tratamiento térmico permite adquirir las más diversas propiedades del acero y sus aleaciones, así como de muchos otros metales. Por lo tanto, dicho procesamiento es de suma importancia en las diferentes etapas de fabricación de la industria moderna. El tratamiento térmico tiene como objetivo endurecer o ablandar, eliminar las consecuencias del mecanizado, cambiar la estructura cristalina o cambiar todas o parte de las propiedades mecánicas de un material.

### 2.2 Hornos de tratamientos térmicos

#### 2.2.1 Hornos para recocido

##### 2.2.1.1 Hornos de Convección Natural

En este tipo de hornos la circulación del aire depende de la convección natural. El flujo de aire lento resultante es preferible, por ejemplo, para procesos que involucran polvos que pueden verse perturbados por la convección del ventilador o donde existe el riesgo de contaminación cruzada.



**Figura 1** *Horno de Convección Natural*

- Temperatura máxima de funcionamiento de 300°C
- Controlador PID R38
- Revestimiento de acero inoxidable químicamente resistente
- Dos estantes de alambre niquelados y cromados
- Cumple con el estándar de seguridad BS EN 61010-2-010:2003

#### 2.2.1.2 Hornos de convección con ventilador

La convección del ventilador proporciona una mayor uniformidad de temperatura y tasas de recuperación más rápidas que la convección natural.



**Figura 2** *Horno de convección con ventilador*

- Temperaturas máximas de funcionamiento de 300°C o 250°C.
- Ventilador de convección para calentamiento recuperación rápidos y excelente uniformidad.
- Revestimiento de acero inoxidable químicamente resistente.
- Cumple con la norma de seguridad BS E N 6 1010-2-010:2003

### 2.2.1.3 Hornos de Banco de Alta Temperatura

Este horno tiene la característica de trabajar a altas temperaturas de 400°C, 500°C y 600°C.



**Figura 3** Horno de banco de alta temperatura

- Aislamiento de baja masa térmica para una respuesta rápida y eficiencia energética.
- Apto para funcionamiento continuo.
- Exterior resistente al desgaste, recubierto de zinc y recubierto de epoxi poliéster al horno.
- Dos estantes multiposición.

#### 2.2.1.4 Hornos de cementación a baja presión (CBP)

La baja presión facilita los intercambios entre la atmósfera reactiva del horno y la superficie de las piezas a tratar. No hay riesgo de calentamiento superficial de las piezas, porque existe el contacto entre la pieza y los líquidos de temple convencionales. Además, los resultados obtenidos tienen una mayor reproducibilidad.

El equipo debe ser capaz de soportar presiones de trabajo que van desde un vacío primario (10-3 mbar) hasta 20 bares o más. (Air Liquide)

### 2.3 Tratamientos Térmicos Subcríticos

El acero está expuesto a diversos factores que hacen deteriorar al material lo que resulta un problema en la industria de la fabricación de diversas piezas metálicas.

El tratamiento térmico a temperaturas intercríticas es la forma más sencilla de mejorar las propiedades en aleaciones de bajo contenido de carbono (menos de 0,2%) a aceros de microestructura de doble fase con una combinación superior de resistencia a la tracción y ductilidad. Esto implica el enfriamiento desde una temperatura adecuada en el rango intercrítico entre Ac1 y Ac3. En este tratamiento intercrítico la fase de austenita se transforma en martensita dándose una estructura de ferrita-martensita en lugar de la convencional microestructura ferrita-perlita. (Avner,1966, p.29)

Este material se utiliza, generalmente, para la fabricación de ejes ranurados, pasadores de pistón, bujes, piñón es para cajas de transmisión de automotores, cigüeñales, barras de torsión, cuerpos de válvulas, herramientas manuales, tornillos, tuercas, tornillos sin fin, engranajes para reductores, pasadores, collares de cojinetes, cojinetes para motores, discos excéntricos, entre otros; la presencia de níquel y molibdeno en el acero AISI 8620 juega un

papel definitivo en el balance de todas las propiedades que presenta este material al término de algún tratamiento que se le dé. (Sisa, 2013)

### **2.3.1 Temple**

Es un tratamiento térmico mediante el cual se da el enfriamiento acelerado del acero que es previamente calentado. Esto se logra luego de ser sumergido el metal en aceite, agua, agua con sal, o aire comprimido.

Los tipos de temple son: ordinario o directo, escalonado, martempering y austempering. El procedimiento a seguir empieza por el calentamiento de la pieza de forma lenta hasta la temperatura de austenización, para ello se deberá de tener en cuenta el tiempo de calentamiento basados en ecuaciones de transferencia de calor, luego se pasará a transcurrir el tiempo de sostenimiento, finalizado este tiempo se llevará a cabo la etapa de enfriamiento en el medio previamente seleccionado. (Patiño & Rosero, 2016)

### **2.3.2 Recocido**

El Recocido es un tratamiento térmico donde el objetivo es ablandar el acero logrando la eliminación de tensiones internas, aumentando así la ductilidad del material, reduciendo a su vez la dureza. Algunos tipos de recocido son: isotérmico, de regeneración, de proceso, homogeneización, de globalización o esferoidización y para la eliminación de esfuerzos. El procedimiento a seguir empieza por el calentamiento de la pieza, el tiempo de permanencia en el horno será entre una media hora o una hora por pulgada de espesor, luego se deja enfriar lentamente dentro del horno concluyendo cuando se alcanza la temperatura ambiente. (Díaz Merino, 2019)

### **2.3.3 Revenido**

Es un tratamiento post-tratamiento térmico superficial, a su vez también se puede realizar en núcleos que presentan una microestructura martensítica, de esta manera se busca que el material sea más tenaz ya que se alivian las tensiones dentro de la pieza, esto tendrá como consecuencia la reducción de dureza. El procedimiento a seguir se da mediante un calentamiento lento de la pieza hasta una temperatura inferior a la del AC1, luego, su posterior enfriamiento será al aire libre, y en algunas ocasiones en agua o aceite. (Soriano Reyes, 2022)

### **2.3.4 Normalizado**

Este es un tratamiento térmico final que se encarga principalmente de aumentar la dureza, uniformizar el tamaño de grano y eliminar las tensiones internas de piezas que han sido previamente forjadas, laminadas, mecanizadas o fundidas. El procedimiento empieza con un calentamiento por encima de la temperatura crítica superior, posteriormente la pieza será enfriada. (Instituto Politécnico) (Granada Molina & Escola Yacelga, 2020)

## **2.4 Composición del Acero a Tratar**

La composición química de los materiales ferrosos está constituida principalmente por hierro, seguida del carbono y otros metales que caracterizan al material de manera muy particular.

Los aceros para cementación como el acero AISI 8620 contienen un bajo contenido de carbono, que luego de ser sometidos a dicho tratamiento térmico ayuda a que la pieza confiere una alta dureza en la superficie.

El acero AISI 8620 fue obtenido de la empresa BOHLER en la ciudad de Lima, la composición del acero está explícita en la ficha técnica brindada por la empresa visualizada en el ANEXO 1.

## **2.5 Velocidad de calentamiento y de enfriamiento.**

### **2.5.1 Velocidad de calentamiento**

Este debe de ser lo suficientemente lento para no perjudicar a la pieza creando tensiones superficiales. (Flores Logroño, 2011)

La velocidad de calentamiento influye en todos los procesos de austenización, ya que mientras más lento sea el proceso menor tamaño de grano obtendrá la superficie de la pieza, a menor tamaño de grano tendrá mayor dureza la superficie. Es así como el tamaño de grano tendrá influencia en las propiedades mecánicas del acero como; resistencia a la tracción, dureza, tenacidad, desgaste, resistencia impacto, entre otras.

La velocidad recomendada para que un acero AISI 8620 llegue a 925°C (Temperatura de austenización) es recomendable por cada 25 mm de espesor subir 15°C/min. (Flores Logroño, 2011)

### **2.5.2 Velocidad de enfriamiento**

Esta influye significativamente en la calidad, microestructura y comportamiento a la corrosión del metal donde se desarrolla la difusión (Rico & Hernández, 2015)

## **2.6 Temperatura de mantenimiento y tiempo de permanencia.**

### **2.6.1 Temperatura de mantenimiento**

Dicha temperatura tendrá que permanecer por encima de AC3, que usualmente está entre un rango de 880 - 925°C. Esta temperatura nos va a permitir difundir el carbono en la red cristalina del hierro, y así alcanzar el límite de saturación de la austenita, dando posibilidades a que se forme una capa constituida casi en su totalidad de carbono. (Capítulo 12 - Metalografía y tratamiento térmico)

### **2.6.2 Tiempo de permanencia**

Es el tiempo que permanecerá la pieza a la temperatura máxima dentro del horno para conseguir una temperatura uniforme en toda la pieza de manera transversal. El tiempo empezará a transcurrir cuando toda la pieza ya se encuentre a la misma temperatura. Se debe de tener en cuenta no pasar del tiempo requerido para que el tamaño del grano no tenga un crecimiento indeseable. (Flores Logroño, 2011)

## **2.7 Sistemas de identificación de las piezas en los procesos.**

En el proceso hemos utilizado el sistema de identificación el cual inicia con la letra principal del proceso, seguido del número de ensayo realizado.

**Tabla 3**

*Codificación de las probetas para el análisis metalográfico*

<b>Código</b>	<b>Tratamiento térmico</b>
D – 01	Probeta patrón de acero AISI 8620
D – 02	Probeta cementada de acero AISI 8620
D – 03	Probeta cementada + 1 temple de acero AISI 8620
D – 04	Probeta cementada + 2 temple de acero AISI 8620
D – 05	Probeta cementada + 2 temple + revenido de acero AISI 8620

**Tabla 4**

*Codificación de las probetas para el ensayo de Dureza Rockwell*

<b>Código</b>	<b>Tratamiento térmico</b>
D – 01	Probeta patrón de acero AISI 8620
D – 02	Probeta cementada de acero AISI 8620
D – 03	Probeta cementada + 1 temple de acero AISI 8620
D – 04	Probeta cementada + 2 temple de acero AISI 8620
D – 05	Probeta cementada + 2 temple + revenido de acero AISI 8620

**Tabla 5**

*Codificación de las probetas para el ensayo de tracción*

<b>Código</b>	<b>Tratamiento térmico</b>
R – 01	Probeta patrón de acero AISI 8620
R – 02	Probeta cementada de acero AISI 8620
R - 03	Probeta cementada + 1 temple de acero AISI 8620
R - 04	Probeta cementada + 2 temple de acero AISI 8620
R - 05	Probeta cementada + 2 temple + revenido de acero AISI 8620

**Tabla 6***Codificación de las probetas para el ensayo de Impacto Charpy*

Código	Tratamiento térmico
T – 01	Probeta patrón de acero AISI 8620
T – 02	Probeta cementada de acero AISI 8620
T – 03	Probeta cementada + 1 temple de acero AISI 8620
T – 04	Probeta cementada + 2 temple de acero AISI 8620
T – 05	Probeta cementada + 2 temple + revenido de acero AISI 8620

## 2.8 Sistemas de detección y evaluación de defectos.

### 2.8.1 Sistemas de detección

#### 2.8.1.1 Difracción de Rayos X

La difracción de rayos X es una técnica que consiste en la dispersión coherente del haz de rayos X por parte de la materia, esto permite sondear distancias interplanares (=tensión residual) en materiales cristalinos.

La tecnología de difracción de rayos X proporciona datos confiables e inigualables para la evaluación del control de calidad.

#### 2.8.1.2 Difracción de neutrones

Esta técnica mide la deformación elástica mediante la ley de Bragg y calcula la tensión con la ley de Hooke junto con el módulo elástico (E) y la relación de Poisson ( $\nu$ ). La difracción de neutrones para la medición de la tensión residual no está muy extendida ni es fácilmente accesible debido a los costosos difractómetros estacionarios para la generación de neutrones.

## 2.8.2 *Evaluación de defectos*

### 2.8.2.1 Tensiones Residuales

Surgen como consecuencia del enfriamiento no uniforme de la superficie y el núcleo de la pieza, se denominan tensiones térmicas. Las que se producen como consecuencia de la transformación martensítica, son tensiones estructurales.

Esta distribución desigual de las temperaturas en la sección de la pieza, va acompañada del cambio irregular de volumen. Las capas superficiales se contraen más rápidamente que las internas; sin embargo, esta compresión se ve dificultada por las capas internas, lo que conduce a que en las capas superficiales se formen tensiones temporales de tracción.

Estas tensiones pueden producir fisuras, bajan la resistencia a la fatiga del acero. Por esta razón debe tratarse de disminuir las tensiones estructurales, las que serán tanto mayores cuanto más alta es la temperatura de temple y la velocidad de enfriamiento.

### 2.8.2.2 Falta de Dureza

Los aceros correctamente cementados no son marcados por la lima, esto es porque poseen durezas superficiales superiores 60 Rockwell-C. Cualquier disminución de este valor será debido a un temple incorrecto, a falta de agente cementante o a puntos blandos, causados por la falta de limpieza de la pieza.

### 2.8.2.3 Falta de Penetración

Se debe al mal control de las variables del proceso (tiempo y temperatura)

#### 2.8.2.4 Deformaciones

Son inherentes a enfriamientos rápidos, Para aliviarlas se pueden emplear enfriamientos escalonados tipo Martempering. (Capítulo 10 - Metalografía y tratamientos térmicos)

#### 2.8.2.5 Método de difracción de sincrotrón

La difracción de sincrotrón es una versión de mayor energía de la difracción de rayos X. Es posible utilizar la difracción de sincrotrón para componentes con geometrías complejas, pero normalmente el tamaño del componente es limitado. (Test Systems) (ENAC : Laboratorio de medida de tensiones residuales)

### 2.9 Tratamientos termoquímicos

#### 2.9.1 *Cianuración*

El rango de temperatura para este método es de 750 a 950 °C. El acero se coloca en una solución que consiste en cianuro de sodio, así como cloruro y carbonato de sodio. El enfriamiento por inmersión directamente del baño de cianuro da una profundidad uniforme de 0,25 mm por hora de tratamiento. Posteriormente, estas piezas deben ser templadas. Se une colocando las piezas en un baño de mezcla de sales fundidas para que el carbón se difunda desde el baño hacia el interior del metal. De esta forma, se crean capas más profundas con mayor contenido de carbono y menor contenido de nitrógeno.

En la cianuración, la proporción de nitrógeno y carbono en la superficie dura extrema producida por un baño de cianuro depende de la composición y de la temperatura del baño. Hay disponible una variedad de mezclas de baño de cianuro. Este proceso es especialmente

útil para piezas que requieren partes exteriores muy duras y delgadas, como tornillos, piñones, tuercas y pernos. (Federación de enseñanza de CC.OO. de Andalucía, 2011)

### **2.9.2 Carburación**

La carbonitruración es un proceso de cementación en el que el acero se calienta en una atmósfera gaseosa con una composición en la que se absorben tanto el carbono como el nitrógeno. El término carbonitruración es engañoso ya que implica un proceso de nitruración mejorado. De hecho, la carbonitruración es una variación de la carburación, y el término nitrocarburación sería más descriptivo. Este proceso también se conoce como cianuración seca y cianuración por gas.

La atmósfera utilizada para la carbonitruración normalmente incluye una mezcla de gas portador, gas de enriquecimiento y gas amoníaco. El gas portador suele ser una mezcla de nitrógeno, hidrógeno y monóxido de carbono producido en un generador endotérmico, como la carburización de gas.

El gas portador se suministra al horno bajo presión positiva para evitar la infiltración de aire y actúa como un gas inerte para el gas activo, lo que facilita el control del proceso. El gas enriquecido, normalmente propano o gas natural, es la principal fuente de carbono añadido a la superficie. A la temperatura del horno, el amoníaco agregado ( $\text{NH}_2$ ) se disocia para proporcionar nitrógeno a la superficie del acero. (Bernal Avalos, 1994)

### **2.9.3 Carburización o Cementación**

Este proceso consiste principalmente en aumentar la concentración de carbono en la superficie del acero dulce. Para ello se debe considerar la atmósfera de calentamiento y enfriamiento en la que se encuentra el metal. Como resultado, después de aumentar el

contenido de carbono en la región periférica, además de la resistencia al desgaste y la buena tenacidad del núcleo, también aumenta la dureza de la superficie del acero.

Técnicamente, este proceso requiere un producto combustible que en este caso es el carbon y un activador como silicato de calcio que se calienta a la temperatura adecuada por difusión del material.

Para la cementación en medios sólidos, las piezas limpias y libres de óxidos se colocan en la mezcla de cementación, dentro de cajas de láminas de acero inoxidable soldadas y selladas. La caja se coloca luego al horno de cementación, y se mantienen ahí durante varias horas a una temperatura entre 900 °C y 950 °C aproximadamente por 8 horas hasta obtener la profundidad deseada de la capa de difusión.

La mezcla de cementación se puede utilizar carbón vegetal de huarango finalmente pulverizado, con un 20 % a 30 % de alguno de los siguientes carbonatos: carbonato de bario ( $BaCO_3$ ), carbonato de sodio ( $Na_2CO_3$ ) o carbonato de potasio ( $K_2CO_3$ ) Actúa como catalizador y ayuda a liberar el carbono en estado elemental, necesario para la cementación. Para sellar la tapa de la caja de cemento se puede utilizar una masilla hecha de arena de fundición, para que no deje entrar oxígeno a la caja cementadora y obtengamos buenos resultados. (Instituto Politécnico)

#### **2.9.4 Nitruración**

Al igual que el proceso de cementación, la nitruración está diseñada para endurecer la superficie. Sin embargo, lo hace en mayor medida porque añade nitrógeno a la composición de la superficie de la pieza. En este método, el acero se calienta a una temperatura entre 400 y 525°C en una corriente de amoníaco que contiene nitrógeno. Recomendado para aceros

aleados con cromo, vanadio, aluminio, tungsteno y molibdeno, ya que estos elementos forman nitruros estables a las temperaturas de proceso, y son los nitruros los que dan dureza a la superficie. (Ingenio y conciencia , 2022)

## 2.10 Difusión de sólidos

La difusión puede ser resumida como el transporte o movimiento de materia que hay dentro de otra materia. Esto se va a dar gracias a las gradientes de composición y temperatura que se encuentran dentro de la materia. El proceso se llevará a cabo desde la zona más caliente a las fría, hasta que las temperaturas se encuentren en equilibrio térmico. Pueden también afectar otras variables del sistema.

La difusión se va a poder llevar a cabo mediante dos métodos: Difusión por vacantes y por difusión intersticial.

### 2.10.1 *Difusión por vacantes.*

Las vacantes son una imperfección de la red cristalina, que permiten que se realice la difusión ya que expresan un vacío o hueco en la red cristalina.

(Miren & Monasterios, 2018), indican que la difusión por vacantes tiene lugar cuando un átomo pasa de una posición reticular a una posición contigua que estaba vacante. Denominada también difusión sustitucional. Además, la mayoría de metales cuando alcanzan la temperatura de fusión tienen un porcentaje de vacantes  $\sim 0,01\%$ : es decir, hay una vacante por cada 10.000 posiciones de red ocupadas.

### ***2.10.2 Difusión intersticial***

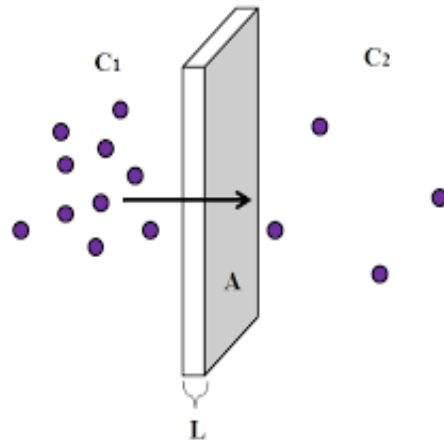
Se trata del movimiento de átomos de pequeño tamaño, tan pequeños como para caber en los huecos que quedan en las redes cristalinas. Habitualmente se trata de átomos de: H, C, N y O.

## **2.11 Leyes de Fick**

La difusión es el movimiento de los átomos de un material. Los átomos se mueven de manera simultánea, intentando disminuir las diferencias de concentración y producir una composición uniforme y homogénea. Muchas manipulaciones de materiales requieren el movimiento de átomos. El tratamiento térmico de los metales requiere difusión para esto vamos a tratar sobre la importancia de la primera y segunda ley de Fick. (Bernal Avalos, 1994)

### ***2.11.1 Primera ley de Fick***

La velocidad a la que los átomos se difunden a través de un material se puede medir mediante el flujo  $J$ , que se define como el número de átomos que pasan a través de un plano de superficie unitario por unidad de tiempo.



**Figura 4** Difusión en la primera Ley de Fick

$$J = \frac{M}{A \cdot t} = \frac{1}{A} \cdot \frac{dM}{dt}$$

**Donde:**

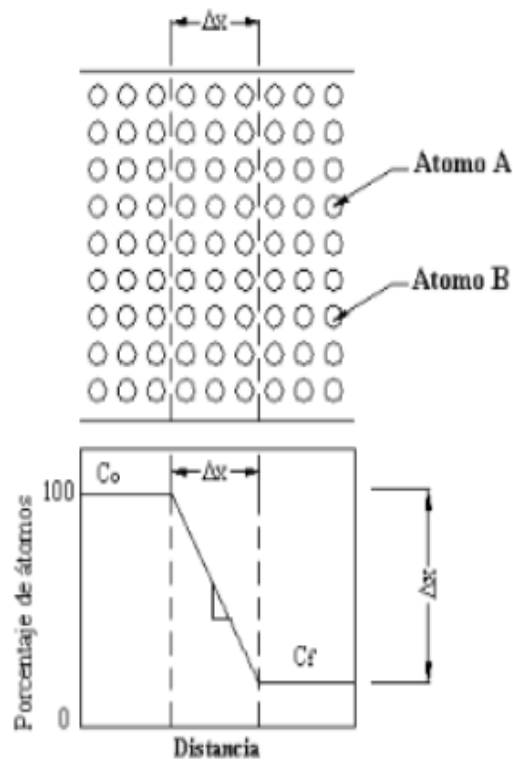
- J = Flujo de átomos
- M=Cantidad de átomos que atraviesan un área dado
- A= Área transversal que atraviesan los átomos
- t= Tiempo de medida

La primera ley de Fick determina el flujo neto de átomos, el flujo durante la difusión se define como el número de átomos que pasan a través de un plano por unidad de área por unidad de tiempo. (Diaz del Castillo Rodriguez, 2007)

#### 2.11.1.1 Gradiente de concentración

La gradiente de concentración muestra cómo cambia la composición de un material con la distancia;  $\Delta c$  es la diferencia de concentración sobre la distancia  $\Delta x$ . El gradiente de

concentración del soluto es la fuerza impulsora del proceso de difusión, Existe difusión porque hay un gradiente de concentración. (Diaz del Castillo Rodriguez, 2007).



**Figura 5** *Gradiente de Concentración*

### 2.11.2 *Coefficiente de difusión y de temperatura*

El coeficiente de difusión  $D$  depende de la temperatura según la ecuación de Arrhenius.

$$D = D_0 e^{\left(\frac{-Q}{RT}\right)}$$

**Donde:**

- $Q$  = energía de activación para la difusión Cal/mol
- $R$  = constante de gas ideal = 1.987 Cal / mol° C
- $T$  = temperatura absoluta [°K]
- $D_0$  = constante, debido a la constante de red y la frecuencia de vibración atómica [cm<sup>2</sup>/s]

A medida que aumenta la temperatura del material, también aumenta el coeficiente de difusión atómica y la densidad de flujo magnético. A temperaturas más altas, la energía térmica proporcionada a los átomos que se difunden les permite superar la barrera de activación y moverse más fácilmente a otras ubicaciones en la red cristalina.

Por lo tanto, el tratamiento térmico de los metales se realiza a altas temperaturas, y los átomos se mueven rápidamente a altas temperaturas para completar la reacción o alcanzar un estado de equilibrio. (Díaz del Castillo Rodríguez, 2007)

#### 2.11.2.1 Tiempo de difusión

En la difusión masiva, los átomos se mueven a través del cristal de un nodo a otro, o de un intersticial a otro. Debido a los átomos circundantes, la energía de activación es grande y la tasa de difusión es relativamente baja.

Sin embargo, los átomos pueden difundirse a lo largo de los límites de grano, interfaces y superficies de los materiales. Debido al pobre empaquetamiento de los átomos en los límites de grano, los átomos se difunden más fácilmente a través de los límites de grano. La energía de activación es menor porque los átomos se mueven más fácilmente a través de los límites de grano desordenados. La difusión superficial es más fácil porque hay menos obstáculos. Por lo tanto, la energía de activación para el límite de grano y la difusión

superficial es menor y el coeficiente de difusión es mayor. (Díaz del Castillo Rodríguez, 2007)

### ***2.11.3 Segunda ley de Fick***

La segunda ley de Fick describe la difusión dinámica de los átomos expresada como una ecuación diferencial:

$$\frac{dC}{dX} = D \frac{d^2c}{dx^2}$$

La solución de la primera ley de Fick nos permite calcular la concentración de la muestra cerca de la superficie del material en función del tiempo y la distancia, siempre que el coeficiente de difusión  $D$  permanezca constante y la concentración de átomos que se difunden en la superficie del material y dentro del material permanece constante. Una de las consecuencias de la segunda ley de Fick es que se puede obtener el mismo perfil de concentración bajo diferentes condiciones. Esto permite determinar el efecto de la temperatura sobre el tiempo requerido para completar el tratamiento térmico. (Díaz del Castillo Rodríguez, 2007)

El tamaño de grano de la austenita es el factor determinante de la calidad del acero, cualquier acero fundido, es decir, todo el acero en barras o piezas hechas de piezas fundidas se comporta a su manera. Las piezas o herramientas fabricadas con ciertas fundiciones de acero están sujetas a una textura áspera después del enfriamiento y, a menudo, son quebradizas, mientras que las piezas fabricadas con otras piezas fundidas de grano fino son muy duraderas. El tamaño de grano del acero austenítico cambia con el aumento de la temperatura y la duración del calentamiento.

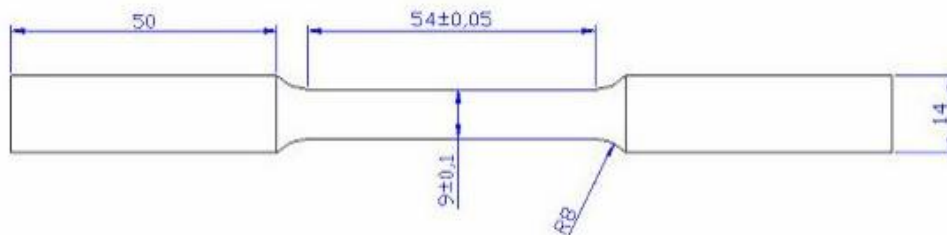
## 2.12 Normativa y especificaciones técnicas

### 2.12.1 Ensayo de tracción según ASTM E8

La norma ASTM E8, que describe la prueba de tracción uniaxial de metales a temperatura ambiente para especímenes cilíndricos, se utilizará para la prueba de tracción realizada en la investigación.

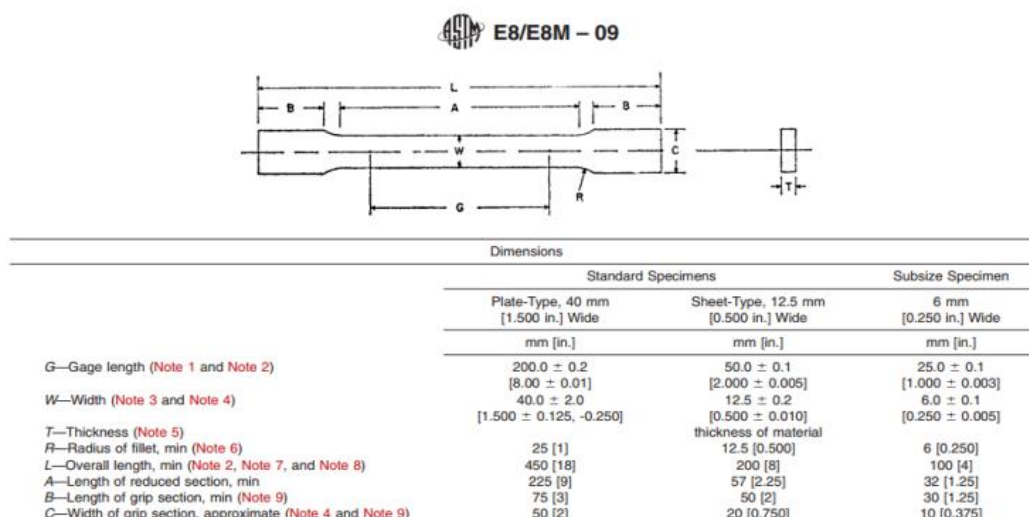
Se realizaron ensayos de tracción en la máquina universal del Instituto Superior Tecnológico SENATI, de las cuales se obtuvieron datos como límite elástico, esfuerzo de tracción, esfuerzo de tracción, elongación, reducción de área y coeficiente de endurecimiento por deformación.

Las dimensiones y la geometría de las probetas de ensayo de tracción se muestran en la siguiente figura.



**Figura 6** Dimensiones de probeta del ensayo de tracción

Fuente: (International Standards Worldwide, 2015)



**Figura 7** Parámetros para la norma ASTM E8/E8M – 09

*Fuente:* (UNAL, 2011)

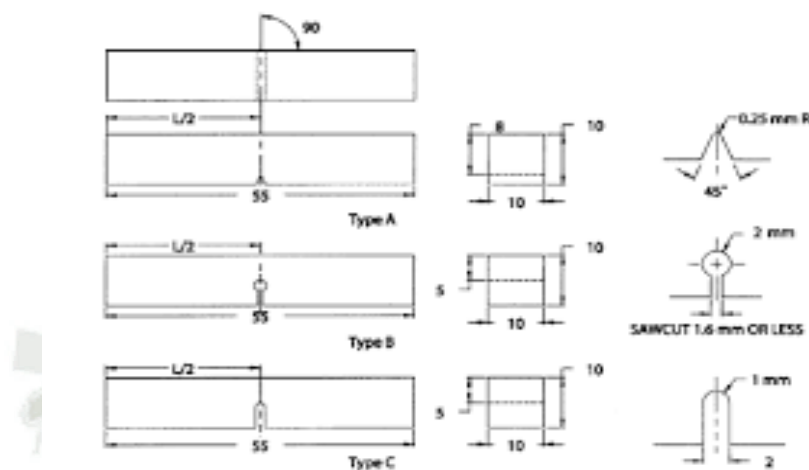
### 2.12.2 Ensayo de Charpy

Se utilizará la norma ASTM E23 que describe la prueba de impacto de indentación Charpy para metales. La prueba consiste en hacer muescas en una muestra de metal con un péndulo. Se comprobará la resistencia o fragilidad de los metales. En esta prueba por impacto, se aplica una sola fuerza de carga grande a una muestra de metal, lo que genera una tensión multiaxial. El propósito de la prueba es predecir con precisión la probabilidad de fractura frágil.

Dimensiones de la probeta:

- Longitud: 55 mm
- Ancho: 8 mm
- Espesor: 10 mm

La entalla en V está situada en el centro de la probeta y tiene un ángulo de apertura de 45°.



**Figura 8** Dimensiones de probeta del ensayo de Charpy

Fuente: (Buenaño Barreno, 2012)

### 2.12.3 Ensayo de dureza Rockwell con la norma E-10

La norma internacional E-10 define el procedimiento para realizar la prueba de dureza Rockwell, el principio de la prueba es la indentación con punta de diamante en el caso de Rockwell C, esta norma en particular controla el equipo utilizado para esta prueba, sus requisitos y estandarización.

La forma y tamaño de la muestra no está estandarizada, pero el espesor de la muestra es de al menos 10 veces la profundidad de la huella, y el ancho mínimo debe ser igual o mayor a 2,5 veces la distancia desde el centro de la probeta. El tipo más común de indentación es la conicidad de diamante de 120 grados que se usa para probar acero

endurecido y carburos. La prueba de materiales más blandos generalmente se realiza con bolas de carburo de tungsteno de 1/16 de pulgada de diámetro. y 1/2 pulgada.

Los valores altos indican materiales más duros como el acero templado o el carburo de tungsteno. Pueden tener valores de HRC superiores a 70 HRC. En la prueba de Rockwell, la fuerza se puede aplicar con un sistema de carga de circuito cerrado o un sistema tradicional de peso propio.

**Tabla 7***Escalas comunes en pruebas Rockwell y Rockwell Superficial*

Escala	Carga menor (kgr)	Carga mayor (kgr)	Penetrador
HRA	10	60	Diamante
HRC	10	100	Bola de 1/16"
HRC	10	150	Diamante
HR15N	3	15	Diamante
HR30N	3	30	Diamante
HR45N	3	45	Diamante

*Fuente:* (Buehler)

#### **2.12.4 Metalografía**

##### **2.12.4.1 ASTM E3**

La metalografía investiga la estructura interna de los materiales metálicos utilizando métodos de microscopía óptica y electrónica. El objetivo es ocuparse de la composición, el procesamiento y las microestructuras de los metales. También le preocupa el espesor y la uniformidad de los recubrimientos metálicos, los efectos de la corrosión en la microestructura

y los efectos de los procesos de endurecimiento, como la carburación y la nitración en la microestructura.

#### 2.12.4.2 ASTM E-407

Es un método de ataque una probeta de metal para revelar su estructura. A escala microscópica, los metales se componen de muchos granos de varias formas y tamaños. Los elementos de aleación en los metales a veces se descomponen en partículas microscópicas de varias formas. Esta microestructura se puede probar mediante ensamblaje, disección y pulido de acuerdo con ASTM E3, Especifica la química de grabado generalmente ácido y los pasos necesarios para revelar la microestructura de varios tipos de metales. Las diferencias en la microestructura son importantes porque pueden ayudar a determinar si el metal ha sido afectado por productos químicos agresivos, tiene una superficie más blanda o más dura, está deformado, soldado incorrectamente o sobrecalentado. Los resultados microestructurales se presentan con sus imágenes junto con las leyendas de las implicaciones estructurales. (Diseño y construcción de una desbastadora metalografica bajo norma ASTM E-1, 2007)

#### 2.13 Fundamento y objeto

En el presente documento se tiene como objeto realizar el mejoramiento de las propiedades mecánicas del Acero DIN CrNiMo 2-2 (1.6523) mediante la carburación superficial a partir de dos temple. Obteniendo así piezas con alta tenacidad en el núcleo, y con alta dureza en la superficie.

## **2.14 Tratamientos isotérmicos Martempering Austempering**

El martempering y austempering son tratamientos isotérmicos que se le aplican a los aceros, para mejorar sus características como la tenacidad y resistencia al desgaste, con una reducción fundamental de las tensiones del temple común, una mínima distorsión, buena ductilidad sin peligro de agrietamiento. Se trata de mejorar la calidad de los aceros y aleaciones para obtener partes con más grandes rendimientos en los procesos productivos se debe conservar la pieza de trabajo a una temperatura fija a lo largo de un tiempo de tiempo suficiente para la formación de la bainita. (Paulo, 2022)

### **2.14.1 Martempering**

El procedimiento es la austenización completa del acero calentándolo por encima de la temperatura crítica durante un tiempo suficiente, seguido de enfriamiento en un medio líquido caliente por ejemplo en sales fundidas o aceite a una temperatura inferior a la martensita. El material debe permanecer en el baño de agua caliente el tiempo suficiente para que todo el acero se equilibre a la temperatura del baño de agua caliente y se uniforme, y luego se enfríe a temperatura ambiente. De esta forma, la formación de martensita se produce de manera uniforme en todo el cuerpo de acero, evitando así la formación de tensiones residuales excesivas. La microestructura de este material endurecido es austenita retenida y martensita menos deformada en comparación con el material endurecido por etapas. (Patiño & Rosero, 2016)

### **2.14.2 Austempering**

El objetivo principal del templado austempering es aumentar la flexibilidad y la resistencia al impacto, así como altos valores de dureza. Dos temperaturas son importantes

para el proceso de endurecimiento ferroso: primero, el acero se calienta para mantenerlo en el rango de austenización (por encima de 900°C) y luego se mantiene hasta que toda su masa alcanza esa temperatura. Segundo: templar en baño de sal a temperatura constante de 270°C a 400°C, que es el tiempo necesario para la transformación en fase bainita, y finalmente enfriar a temperatura ambiente. La velocidad de enfriamiento depende del tipo de acero y en todos los casos del tamaño y espesor de la pieza de trabajo. (Gomez Muños & Coy Sierra, 2015)

## **2.15 Variables de control**

### **2.15.1 Composición del acero a tratar**

La composición química de los materiales ferrosos está constituida principalmente por hierro, seguida del carbono y otros metales que caracterizan al material de manera muy particular.

Los aceros para cementación como el acero AISI 8620 contienen un bajo contenido de carbono, que luego de ser sometidos a dicho tratamiento térmico ayuda a que la pieza confiere una alta dureza en la superficie.

El acero AISI 8620 fue obtenido de la empresa BÖULER en la ciudad de Lima, la composición del acero está explícita en la ficha técnica brindada por la empresa visualizada en el ANEXO 1.

### **2.15.2 Velocidad de calentamiento**

Este debe de ser lo suficientemente lento para no perjudicar a la pieza creando tensiones superficiales. (Flores Logroño, 2011)

La velocidad de calentamiento influye en todos los procesos de austenización, ya que mientras más lento sea el proceso menor tamaño de grano obtendrá la superficie de la pieza, a menor tamaño de grano tendrá mayor dureza la superficie. Es así como el tamaño de grano tendrá influencia en las propiedades mecánicas del acero como; resistencia a la tracción, dureza, tenacidad, desgaste, resistencia impacto, entre otras.

La velocidad recomendada para que un acero AISI 8620 llegue a  $925^{\circ}\text{C}$  (Temperatura de austenización) es recomendable por cada 25 mm de espesor subir  $15^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . (Flores Logroño, 2011)

### ***2.15.3 Temperatura de mantenimiento***

Dicha temperatura tendrá que permanecer por encima de  $A_{C3}$ , que usualmente está entre un rango de  $880 - 925^{\circ}\text{C}$ . Esta temperatura nos va a permitir difundir el carbono en la red cristalina del hierro, y así alcanzar el límite de saturación de la austenita, dando posibilidades a que se forme una capa constituida casi en su totalidad de carbono. (Capítulo 12 - Metalografía y tratamiento térmico)

### ***2.15.4 Tiempo de permanencia***

Es el tiempo que permanecerá la pieza a la temperatura máxima dentro del horno para conseguir una temperatura uniforme en toda la pieza de manera transversal. El tiempo empezará a transcurrir cuando toda la pieza ya se encuentre a la misma temperatura. Se debe de tener en cuenta no pasar del tiempo requerido para que el tamaño del grano no tenga un crecimiento indeseable. (Flores Logroño, 2011)



## **CAPITULO III**

### 3.1 Procedimiento Experimental

#### 3.1.1 Determinación del número de probetas necesarias

Se tiene un total de 20 probetas que se dividen de la siguiente manera para poder llevar todos los ensayos requeridos.

**Tabla 8**

*Determinación de cantidad de probetas*

	<b>Tracción</b>	<b>Charpy</b>	<b>Dureza</b>	<b>Metalografía</b>
Patrón	1	1	1	1
Cementada	1	1	1	1
Cementada + 1 temple	1	1	1	1
Cementada + 2 temple	1	1	1	1
Cementada +2 temple + revenido	1	1	1	1
Replicas	2	2	2	2
TOTAL PROBETAS	5	5	5	5
TOTAL DE ENSAYOS	8	8	8	8

### 3.2 Diseño Experimental

#### 3.2.1 Variables de Estudio

##### 3.2.1.1 Variables Independientes.

##### 3.2.1.1.1 Estructuras de Partida (X1).

Las probetas fueron sometidas a tres diferentes tratamientos térmicos, con la finalidad de implementar dureza en el acero estudiado.

Por lo tanto, los tres niveles de la variable X1 se consiguieron partiendo de la estructura estándar (cementada) con los siguientes tratamientos: un temple, doble temple y revenido.

### 3.2.1.1.2 Tratamientos Térmicos (X2).

La combinación de tratamientos aplicados en la muestra se consigue partiendo de la estructura estándar (cementada) , los cuales se efectuarán de la siguiente manera.

- Cementación + 1 temple
- Cementación + 2 temples
- Cementación + 2 temples + revenido

### 3.2.1.2 Variables Dependientes

- Propiedades de Tracción (Y1)
- Tenacidad al Impacto (Y2)
- Dureza (Y3)



**Figura 9** Diagrama de relación de variables a seguir en el experimento

### 3.3 Materiales y equipos

**Tabla 9***Materiales a utilizar*

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>
Barras de acero AISI/SAE 8620	3 barras de 1 m * 2"
Aceite para motor SAE 20W-50	3.78 litros
Carbón vegetal de huarango	1.5 kilos
Cáscara de huevo	1.5 kilos
Lijas número 80, 40 ,100, 1000, 2000	4 láminas por cada número de lija
Alúmina	1.5 litros
Nital	200 ml
Arcilla Refractaria	2 kilos
Malla para tamizado N°4	01 malla
Malla para tamizado N°6	01 malla
Caja cementadora	Fabricación propia a base de Acero INOX
Abrazadera de pinza de crisol de acero inoxidable	1
Vernier	1
Guantes de protección térmica	Un par
Zapatos de seguridad	Un par
Mandil de laboratorio	1

**Tabla 10***Equipos a utilizar*

<b>Equipos</b>	<b>Lugar de desarrollo</b>
Máquina universal	SENATI
Equipo de Ensayo Charpy JB-W300A-TIMEGROUP INC	Universidad Católica Santa María
Microscopio óptico	Universidad Católica Santa María
Durómetro Rockwell JJC334-Eligibility-HBRVU-187.5	Universidad Católica Santa María
Pulidora	Universidad Católica Santa María
Balanza analítica	Universidad Católica Santa María
Horno Mufla	Instituto Superior Tecnológico Honorio Delgado

### **3.4 Determinación de las temperaturas críticas Ac1, AC3 y Ms**

#### **3.4.1 Aplicación de la Ecuación de Kasatkin**

Para aplicar la ecuación de Kasatkin a la investigación, primero, se necesitan medidas precisas de la densidad de la cementación y la resistencia a la compresión de la probeta metálica. Estos datos se pueden obtener mediante ensayos de laboratorio. Luego, se puede utilizar la fórmula para estimar la cementación y comparar los resultados con las estimaciones obtenidas mediante otros métodos.

La ecuación se puede expresar de la siguiente:

$$R = K \times C^n$$

Donde:

R: Resistencia a la compresión de la probeta

C: Densidad de la cementación

K: Constante de proporcionalidad

n: Exponente que depende de las características de la cementación

Sin embargo, es importante tener en cuenta que la ecuación de Kasatkin fue originalmente desarrollada para estimar la cementación de probetas de suelo y que puede ser menos precisa para probetas metálicas. Por lo tanto, es importante utilizar una variedad de métodos y herramientas para estimar la cementación de las probetas metálicas y comparar los resultados obtenidos para garantizar la precisión y fiabilidad de las estimaciones.

### ***3.4.2 Aplicación de la Ecuación de Andrews para Ms***

La ecuación de Andrews se puede utilizar para predecir el comienzo de la formación de martensita en un material, conocido como el punto Ms. Este punto es importante porque la formación de martensita puede tener un impacto significativo en las propiedades mecánicas de un material.

El tipo de acero va a determinar la velocidad necesaria para la formación de martensita, esto dependerá de la cantidad y concentración de elementos aleantes, debido a que los elementos de aleación, antes de producirse las transformaciones, están homogéneamente distribuidos en la austenita, pero cuando ésta se transforma en ferrita, perlita o bainita, estos deben redistribuirse y desplazarse por difusión.

Existen muchas ecuaciones para predecir el comienzo de la formación de martensita ( $M_s$ ), una de las más conocidas es la ecuación de Andrews, expresada según los aleantes del acero se considera lo siguiente:

$$M_s (^\circ C) = 539 - 423 (\%C) - 30.4(\%Mn) - 17.7(\%Ni) - 12.1(\%Cr) - 7.5(\%Mo)$$

Aplicando esta ecuación a la composición del acero estudiado, tendríamos lo siguiente:

$$M_s (^\circ C) = 539 - 423 (0.20) - 30.4(0.80) - 17.7(0.55) - 12.1(0.50) - 7.5(0.2)$$

$$M_s (^\circ C) = 412.8$$

### 3.4.3 Determinación de temperaturas $AC1$ y $AC3$

Andrews determinó una ecuación para calcular las temperaturas a la cuales se llevaría a cabo la transformación de austenita. Se propone que dicha temperatura de transformación dependerá de la composición química y los elementos aleantes presentes en el acero. A continuación, se determina la temperatura de inicio de la fase austenita ( $Ac1$ ) y la temperatura a la cual finaliza la transformación ( $Ac3$ )

(Platl, Leitner, Turk, & Schnitzer, 2020)

$$A_{C1}(^\circ C) = 723 - 10.7(\%Mo) - 16.9(\%Ni) + 29.1(\%Si) + 16.9(\%Cr) + 290(\%As) - 7.5(\%Mo)$$

$$A_{C1}(^\circ C) = 723 - 10.7(0.80) - 16.9(0.55) + 29.1(0.30) + 16.9(0.50) - 7.5(0.20)$$

$$A_{C1}(^\circ C) = 720.825$$

$$A_{C3}(^{\circ}C) = 910 - 203 \left( \%C^{\frac{1}{2}} \right) - 15.2(\%Ni) + 44.7(\%Si) + 104(\%V) + 31.5(\%Mo) \\ + 13.1(\%W)$$

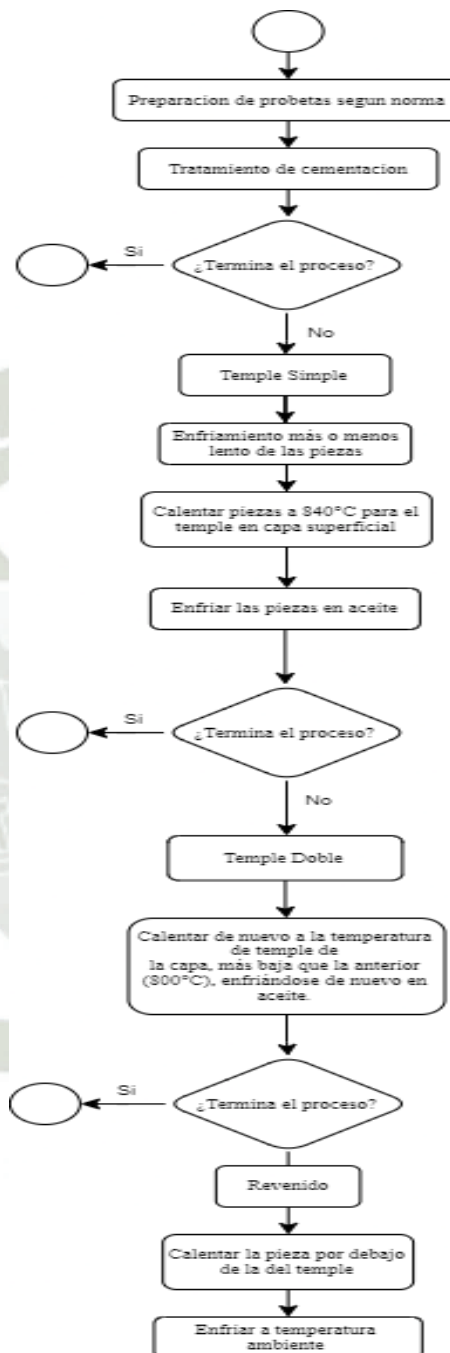
$$A_{C3}(^{\circ}C) = 910 - 203 \left( 0.20^{\frac{1}{2}} \right) - 15.2(0.55) + 44.7(0.30) + 31.5(0.20)$$

$$A_{C3}(^{\circ}C) = 830.565$$

(ALVARADO, 2010)



### 3.5 Secuencia de tratamientos térmicos empleados



**Figura 10** Diagrama general de flujo secuencia de la experimentación (elaboración propia)

### 3.6 Tratamiento de carburización de las probetas

El tratamiento de carburización de probetas se refiere a un proceso de tratamiento térmico que se utiliza para añadir carbono a la superficie de una probeta de acero. Este proceso se realiza para mejorar la resistencia a la abrasión, a la fatiga y a la corrosión en la superficie de la probeta.

Los pasos básicos para llevar a cabo un tratamiento de carburización de probetas incluyen:

- Preparación de la superficie de la probeta: La probeta debe ser limpiada y lijada para remover la suciedad, la oxidación y otros contaminantes que puedan afectar la adherencia del carbono a la superficie.
- Tratamiento térmico: La probeta se coloca en un horno con un ambiente controlado de carbono y se somete a un tratamiento térmico a una temperatura específica durante un tiempo determinado. El objetivo es añadir carbono a la superficie de la probeta y crear una capa dura y resistente.
- Enfriamiento controlado: Después del tratamiento térmico, la probeta se enfría de manera controlada para evitar la formación de tensiones internas y mejorar la resistencia a la fractura.
- Verificación de la dureza: Después del tratamiento, la dureza de la superficie de la probeta se mide para verificar que se ha alcanzado el nivel deseado de dureza.

### 3.7 Caracterización macroscópica del acero carburizado

La caracterización macroscópica del acero carburizado implica la evaluación de las propiedades y características del material a un nivel visible. Algunas de las características que se pueden evaluar incluyen:

- **Distribución de la carburación:** La distribución uniforme de la carburación en la superficie de la probeta es un indicador de la calidad del tratamiento.
- **Grosor de la capa de carburación:** El grosor de la capa de carburación se puede medir para verificar que se ha alcanzado el nivel deseado de carburación.
- **Dureza superficial:** La dureza superficial se puede medir para evaluar la resistencia mecánica de la superficie carburada.
- **Microestructura:** La microestructura de la superficie carburada puede evaluarse mediante microscopía óptica o electrónica para verificar la presencia de estructuras duras y uniformes.
- **Propiedades mecánicas:** Las propiedades mecánicas de la superficie carburada, como la resistencia a la tracción y la resistencia a la fractura, pueden evaluarse mediante ensayos mecánicos estándar.

### 3.8 Preparación de los agentes carburizantes o cementantes

Para la correcta preparación de los componentes dentro de la caja cementante utilizaremos el carbón vegetal de Huarango y cáscara de huevo que actúa como activador en reemplazo del Carbonato de Calcio que es usualmente utilizado en estos procesos.

El porcentaje de la cáscara de huevo será el 50% del peso del carbón. Teniendo en cuenta que se tiene un volumen teórico de  $2\,250\text{ cm}^3$ .

### 3.8.1 *Cáscara de Huevo*

Este material posee más densidad y dureza, las partículas pasaron por el tamiz número

5



**Figura 11** Tamiz ASTM E-11 número 4



**Figura 12** Cáscara de huevo molida en el mortero

### 3.8.2 *Carbón*

Al tratarse de un material con baja densidad las partículas pasaron por el tamiz número

6



**Figura 13** Tamiz ASTM E-11 número 6



**Figura 14** Carbón molido pasado por la malla N° 6

Al introducir Átomos de C, N, S en la superficie del Acero este afecta únicamente la composición Química. Donde se gana dureza en el exterior pero no se afecta el núcleo, es caso nuestro utilizamos Carbón para este objetivo.



**Figura 15** Mezcla de cáscara de huevo molido junto con el carbón vegetal

Se utiliza cáscara de huevo porque el carbón que se obtiene cuenta con pocos contaminantes, llega a ser limpio comparándolo con madera u otros materiales.

**Tabla 11**

*Tabla de tamices estándar USA*

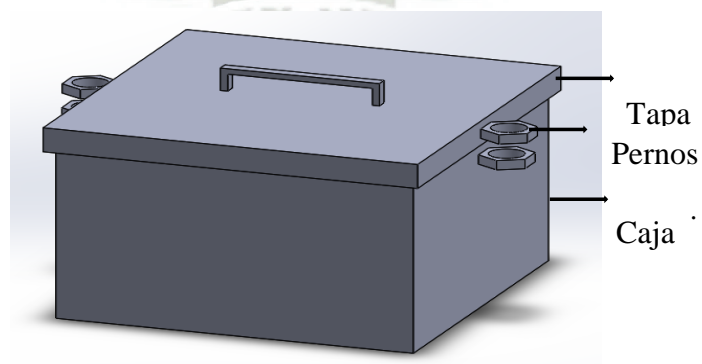
Numero o Tamaño del Tamiz	Abertura del Tamiz	
	Estándar (mm)	Alternativo (in.)
¼ pulg.	6.3 mm	0.250
No. 3-1/2	5.6 mm	0.223
No. 4	4.75 mm	0.187
No. 5	4.00 mm	0.157
No. 6	3.35 mm	0.132

### 3.9 Fabricación de la caja metálica y tapa de acero inoxidable

La caja de cementación fue diseñada dimensionalmente para el Horno Mufla



**Figura 16** Horno mufla de la Universidad Católica Santa María



**Figura 17** Modelo de la caja cementante



**Figura 18** Caja cementante a utilizar en el proceso. Los parámetros longitudinales son: 15 cm x 15 cm x 10 cm

### 3.10 Análisis del acero a tratar

La caracterización macroscópica del acero carburizado implica la evaluación de las propiedades y características del material a un nivel visible. Algunas de las características que se pueden evaluar incluyen:

- Distribución de la carburación: La distribución uniforme de la carburación en la superficie de la probeta es un indicador de la calidad del tratamiento.
- Grosor de la capa de carburación: El grosor de la capa de carburación se puede medir para verificar que se ha alcanzado el nivel deseado de carburación.
- Dureza superficial: La dureza superficial se puede medir para evaluar la resistencia mecánica de la superficie carburada.

- Microestructura: La microestructura de la superficie carburada puede evaluarse mediante microscopía óptica o electrónica para verificar la presencia de estructuras duras y uniformes.
- Propiedades mecánicas: Las propiedades mecánicas de la superficie carburada, como la resistencia a la tracción y la resistencia a la fractura, pueden evaluarse mediante ensayos mecánicos estándar.

Es importante destacar que la caracterización macroscópica es solo un aspecto de la evaluación del acero carburizado. Además de la evaluación macroscópica, es necesario realizar también una caracterización microscópica y de propiedades mecánicas para obtener una comprensión completa de las características y propiedades del material

El acero elegido para trabajar fue DIN 20 CrNiMo 2-2 (1.6523), este acero se caracteriza por ser viable para tratamientos de cementación

Este material se utiliza en una amplia gama de aplicaciones industriales para componentes livianos a medianas cargas, que requieren una alta resistencia al desgaste de la superficie a una buena resistencia núcleo y resistencia impacta.

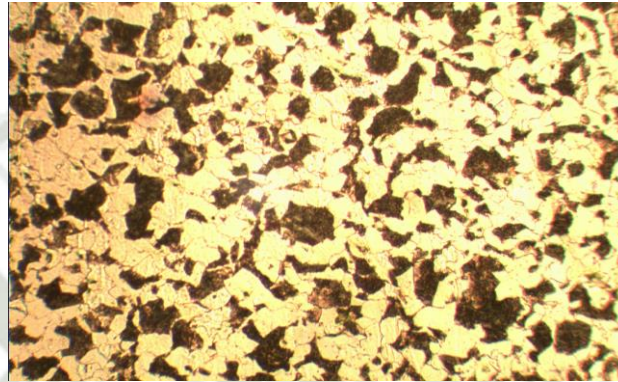
**Tabla 12**

*Composición del acero DIN 20 CrNiMo 2-2 (1.6523)*

DIN 20 CrNiMo 2-2 (1.6523)	
C	0.18-0.23%
Mn	0.70-0.90%
Si	0.20-0.35%
Ni	0.40-0.70%

Cr	0.40-0.60%
Mo	0.15-0.25%

### 3.11 Análisis Metalográfico del acero a tratar



**Figura 19** *Micrografía de la probeta patrón (D-01)*

**Nota:** D – 01, Nos referimos a la Primera Probeta

### 3.12 Prueba de dureza de las probetas

Para este ensayo de dureza Rockwell, se utilizó el Durómetro ROCKWELL Superficial Digital DRMS-45, el penetrador en este caso es de cono esférico con punta de diamante con un ángulo de  $120^\circ$  y un radio de punta de 0,2 mm el procedimiento empleado para llevar a cabo este ensayo es el siguiente:

1. Se colocó el indentador en la posición correspondiente



**Figura 20** *Máquina de dureza rockwell*

2. Después de encender la máquina y calibrar a dureza rottweiler C, se colocó la probeta en la plataforma de trabajo.



**Figura 21** *Identador de diamante*

3. Con el cabestrante se aproximó la probeta hasta que hizo contacto con el indentador. Después de que el durómetro dio el aviso que finalizó la penetración, se repite en diferentes puntos de la base de la probeta.



**Figura 22** *Probeta centrada para realizar el ensayo*

4. Finalmente se retira la probeta y se toman datos y se repite con las probetas cementadas y templadas.



**Figura 23** *Huellas de indentador en la muestra patrón*



**Figura 24** *Probetas con las huellas del ensayo de dureza Rockwell C*

**Tabla 13**

*Medición de la dureza HRC de la probeta D-01*

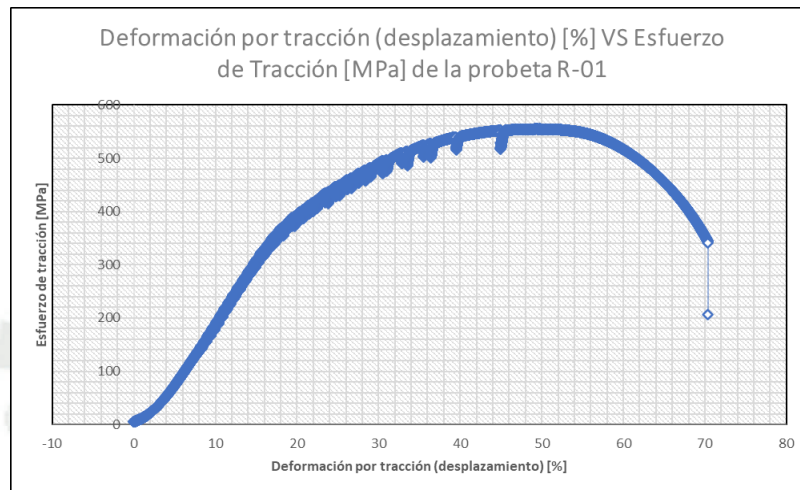
Número de medición	Dureza HRC
1	13.4
2	10.4
3	13.6
4	13.4
5	12.2
Promedio	12.6

### 3.13 Ensayo de tracción

Para realizar el ensayo de tracción se siguió los siguientes pasos:

- **Preparación de la muestra:** Se mecaniza la probeta según la norma aplicada
- **Instalación de la muestra:** La muestra se sujeta firmemente en la máquina de ensayo, asegurándose de que no se deforme antes del ensayo.
- **Configuración de la máquina de ensayo:** Se establecen los parámetros de ensayo, incluyendo la velocidad de carga, la longitud de la muestra y la dirección de la fuerza de tracción.
- **Aplicación de la carga:** Se aplica una fuerza de tracción a la muestra hasta alcanzar el límite de resistencia.
- **Medición de la deformación:** Se miden las deformaciones en la muestra durante el ensayo
- **Análisis de los resultados:** Se evalúan los resultados del ensayo, incluyendo la deformación, la fuerza y la relación entre ellas.
- **Reporte de los resultados:** Se documentan y reportan los resultados del ensayo, incluyendo las conclusiones y las recomendaciones para futuros ensayos.

Es importante seguir cuidadosamente los procedimientos y las recomendaciones del fabricante de la máquina de ensayo y de las normas aplicables para garantizar la precisión y la fiabilidad de los resultados del ensayo de tracción.



**Figura 25** Gráfica Deformación por tracción vs Esfuerzo de Tracción

### 3.14 Ensayo de impacto

Pasos a seguir:

1. Primero realizaremos el encendido del equipo y calibración de este.



**Figura 26** Equipo de ensayo de Impacto Charpy

2. Ya calibrado el equipo se coloca la pieza en el equipo para realizar el ensayo
3. Previamente a la realización del ensayo se deben de realizar el pesado de la pieza y medir los parámetros longitudinales.



**Figura 27** *Pesado de la probeta de impacto*

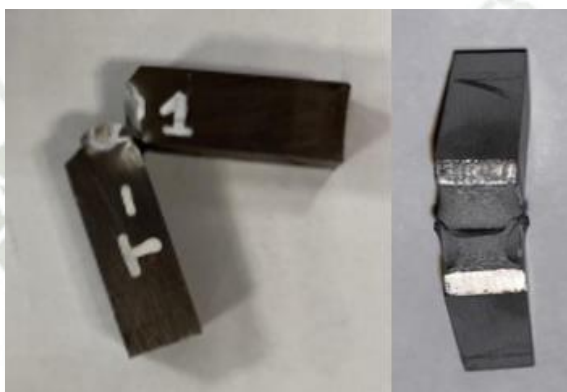
4. Se deja caer el péndulo para poder medir la energía de impacto sobre la probeta
5. Realizamos la medición de la energía absorbida

**Tabla 14**

*Medición de la energía de impacto de la probeta T-01*

Parámetros	Medición
------------	----------

Masa	41.37 gr.
Dimensiones	55mm x 10 mm x 10mm
Energía de absorción	0.1 J



**Figura 28** Foto del tipo de rotura probeta T-01

### 3.15 Primer Temple

1. Se colocan las piezas a calentar en el horno a una temperatura de 840°C durante 30 minutos.



**Figura 29** Colocación de las piezas al horno para realizar el primer temple

2. Inmediatamente se coloca las piezas a enfriar en aceite agitado

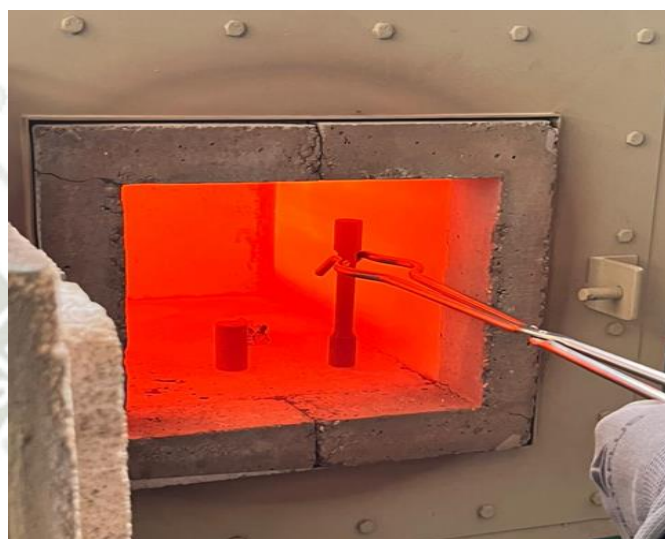


**Figura 30** Enfriamiento de las piezas en aceite agitado

3. Luego se deposita en un lugar que no tenga contacto con el aire para que se complete el enfriamiento

### 3.16 Segundo Temple

1. Se colocan las piezas a calentar en el horno a una temperatura de  $840^{\circ}\text{C}$  durante 30 minutos.



**Figura 31** *Repetición del procedimiento de un temple*

2. Inmediatamente se coloca las piezas a enfriar en aceite.



**Figura 32** *Se enfrían las piezas previamente calentadas en aceite agitado*

3. Una vez secas las piezas, estas se colocan nuevamente al horno a  $800^{\circ}\text{C}$  durante 30 minutos



**Figura 33** Colocación de las piezas con un temple dentro del horno

4. Inmediatamente se coloca las piezas a enfriar en aceite.



**Figura 34** Enfriamiento de las piezas con dos temples

5. Luego se deposita en un lugar que no tenga contacto con el aire para que se complete el enfriamiento.
6. Por último se realiza el revenido de la pieza a 230°C

### 3.17 Análisis Metalográfico.

Pasos a seguir:

1. Selección de probetas tratadas térmicamente y codificarlas.



**Figura 35** Profetas enumeradas con las que se realiza los procedimientos

2. Preparar la superficie con lija 60 hasta 1000



**Figura 36** Lijas 60, 100, 240, 400, 600, 1000 usadas para pulir probetas.



**Figura 37** Pulido manual de la probeta con lija 60



**Figura 38** Pulido manual de la probeta con lija 1000

3. Con la ayuda de una pulidora, pulir las probetas con alúmina hasta obtener brillo espejo.





**Figura 42** Resultado de brillo espejo en la probeta

4. Atacar químicamente las probetas con Nital al 3% durante 15 segundos, luego rociar alcohol sobre la superficie, enjuagar con agua y secar las probetas sin ocasionar rayas.



**Figura 43** Materiales para el ataque químico de la superficie de las probetas



**Figura 44** *Atacado químico de la probeta con Nital al 3%*



**Figura 45** *Limpiando la superficie de la probeta con alcohol y agua*

5. Realizar la metalografía de las probetas mediante el microscopio óptico.



**Figura 46** *Microscopio Óptico para metalografía*

## CAPITULO IV



## 4.1 Resultados Obtenidos

### 4.1.1 Durezas Obtenidas

**Tabla 15**

*Medición de la dureza HRC de la probeta D-02 en el núcleo*

Número de medición	Dureza HRC
1	21.0
2	21.8
3	21.9
4	21.6
5	23.1
Promedio	21.88

**Tabla 16**

*Medición de la dureza HRC de la probeta D-02 en el borde*

Número de medición	Dureza HRC
1	36.2
2	36.6
3	37.9
4	36.0
5	35.8
Promedio	36.5

**Tabla 17**

*Medición de la dureza HRC de la probeta D- 03 en el núcleo*

Número de medición	Dureza HRC
1	44.6
2	42.9
3	43.6
4	44.8
5	43.4
Promedio	43.86

**Tabla 18**

*Medición de la dureza HRC de la probeta D-03 en el borde*

Número de medición	Dureza HRC
1	60.4
2	60.8
3	62.0
4	62.7
5	61.6
Promedio	61.5

**Tabla 19**

*Medición de la dureza HRC de la probeta D-04 en el núcleo*

Número de medición	Dureza HRC
1	47.7
2	47.7
3	46.9
4	46.7
5	47.0
Promedio	47.2

**Tabla 20**

*Medición de la dureza HRC de la probeta D-04 en el borde*

Número de medición	Dureza HRC
1	59.2
2	58.1
3	59.5
4	56.9
5	58.7
Promedio	58.48

**Tabla 21**

*Medición de la dureza HRC de la probeta D-05 en el núcleo*

Número de medición	Dureza HRC
1	50.3
2	51.4
3	50.6
4	53.2
5	52.8
Promedio	51.66

**Tabla 22**

*Medición de la dureza HRC de la probeta D-05 en el borde*

Número de medición	Dureza HRC
1	65.6
2	60.9
3	61.4
4	58.9
5	61.3
Promedio	61.62

#### 4.1.2 Resultados del ensayo de tracción (Norma ASTM E8/E8M)

Se obtuvieron los siguientes resultados en la probeta R – 02 hasta la R – 05, en lo que se refiere a un ensayo de tracción con Norma ASTM E8 / E8M.



**Figura 47** Foto de probetas en las que se realiza el ensayo

**Tabla 23**

*Resultados de Tracción*

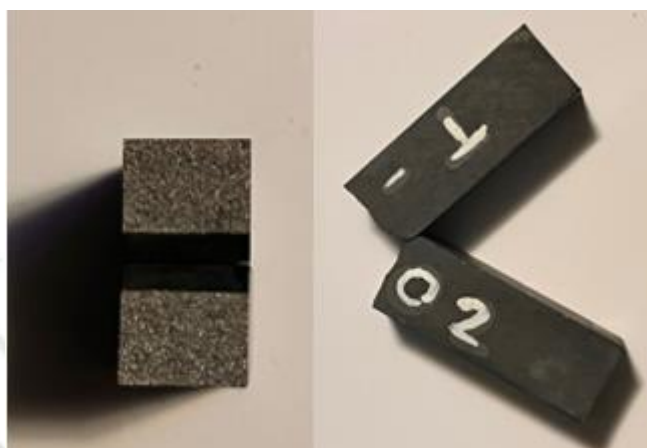
Probeta R-02	784 MPa
Probeta R-03	820 MPa
Probeta R-04	925 MPa
Probeta R-05	1030 MPa

#### 4.1.3 Resultados Ensayo de impacto

**Tabla 24**

*Medición de la energía de impacto de la probeta T-02*

Parámetros	Medición
Masa	41.44 gr.
Dimensiones	55mm x 10 mm x 10mm
Energía de absorción	3.2 J



**Figura 48** Foto del tipo de rotura de la probeta T-02

**Tabla 25**

*Medición de la energía de impacto de la probeta T-03*

Parámetros	Medición
Masa	41.45 gr.
Dimensiones	55mm x 10 mm x 10mm
Energía de absorción	3.3 J

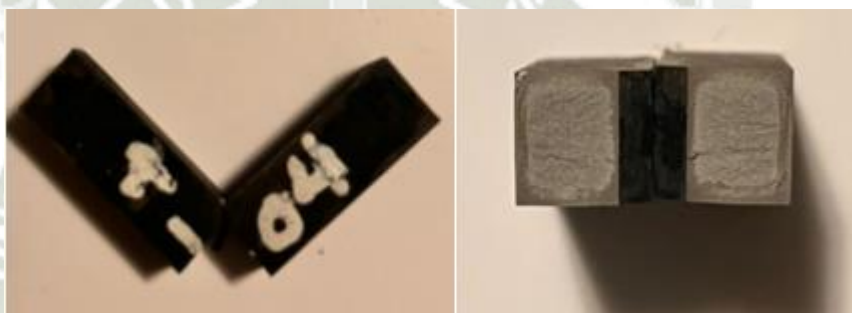


**Figura 49** Foto del tipo de rotura de la probeta T-03

**Tabla 26**

*Medición de la energía de impacto de la probeta T-04*

Parámetros	Medición
Masa	41.67 gr.
Dimensiones	55mm x 10 mm x 10mm
Energía de absorción	4.7 J



**Figura 50** Foto del tipo de rotura de la probeta T-04

**Tabla 27**

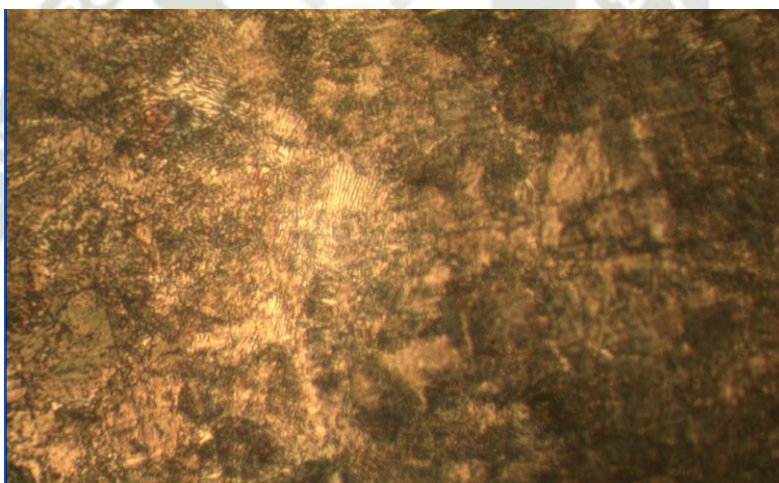
*Medición de la energía de impacto de la probeta T-05*

Parámetros	Medición
Masa	41.57 gr.
Dimensiones	55mm x 10 mm x 10mm
Energía de absorción	4.4 J

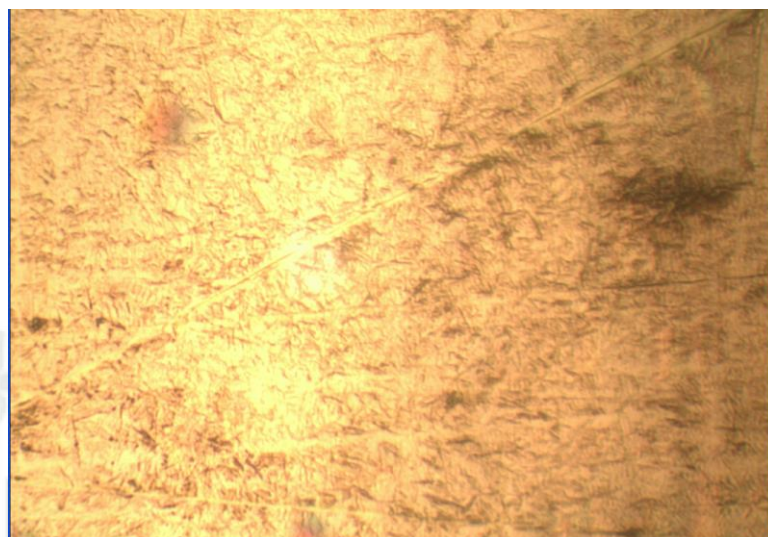


**Figura 51** Foto del tipo de rotura de la probeta T-05

#### 4.1.4 Resultados de la Metalografía:



**Figura 52** Micrografía de la probeta cementada (D-02)



**Figura 53** *Micrografía de la probeta cementada + 2 temple (D-04)*



**Figura 54** *Micrografía de la probeta cementada + 2 temple + revenido (D-05)*

## 4.2 Resultados difusión de carbono

**Tabla 28**

*Tabulación de difusión de data*

Difusión de especies	Metal Anfitrión	Do (m <sup>2</sup> /s)	Energía de Activación Q <sub>d</sub>		Valores Calculados	
			KJ/mol	eV/atom	T (°C)	D (m <sup>2</sup> /s)
Fe	α-Fe	2.8x10 <sup>-4</sup>	251	2.60	500	3.0x10 <sup>-21</sup>
	(BCC)				900	1.8x10 <sup>-15</sup>
Fe	γ – Fe	5.0x10 <sup>-5</sup>	284	2.94	900	3.0x10 <sup>-21</sup>
	(BCC)				1100	1.8x10 <sup>-15</sup>
C	α-Fe	6.2x10 <sup>-7</sup>	80	0.83	500	2.4x10 <sup>-12</sup>
					900	1.7x10 <sup>-10</sup>
C	γ – Fe	2.3x10 <sup>-5</sup>	148	1.53	900	5.9x10 <sup>-12</sup>
					1100	5.3x10 <sup>-11</sup>

Los datos que consideraremos son:

$$D_0 = 2.3 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Q_d = 148\,000 \text{ J/mol}$$

$$R = 8.314$$

**Tabla 29**

*Datos para la difusión de carbono a 925°C*

Co	0.18
R (J/mol*k)	8.314
Q (J/mol)	148 000
Do (m <sup>2</sup> /s)	2.3*10 <sup>-5</sup>
T (°K)	1198

Cs	1.45
Cx	0.4

**Tabla 30**

*Datos para la difusión de carbono a 950°C*

Co	0.18
R (J/mol*k)	8.314
Q (J/mol)	148 000
Do (m <sup>2</sup> /s)	2.3*10 <sup>-5</sup>
T (°K)	1223
Cs	1.5
Cx	0.4

Reemplazamos en la siguiente ecuación para poder determinar el coeficiente de difusión (D):

$$\text{Para } 900^{\circ}\text{C} \rightarrow D = D_0 e^{\left(\frac{-Q}{RT}\right)} = 5.9010 E - 12$$

$$\text{Para } 925^{\circ}\text{C} \rightarrow D = D_0 e^{\left(\frac{-Q}{RT}\right)} = 8.0996E - 12$$

$$\text{Para } 950^{\circ}\text{C} \rightarrow D = D_0 e^{\left(\frac{-Q}{RT}\right)} = 1.0974 E - 11$$

Interpolamos los valores que tenemos con ayuda de la segunda Ley de Fick:

$$\frac{Cx - Co}{Cs - Co} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

$$\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) = 1 - \frac{Cx - Co}{Cs - Co}$$

$$\text{Para } 900^{\circ}\text{C} \rightarrow \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) = 1 - \frac{0.4 - 1.8}{1.39 - 1.8} \rightarrow 0.8114754$$

$$\text{Para } 925^{\circ}\text{C} \rightarrow \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) = 1 - \frac{0.4 - 1.8}{1.45 - 1.8} \rightarrow 0.8203125$$

$$\text{Para } 925^{\circ}\text{C} \rightarrow \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) = 1 - \frac{0.4 - 1.8}{1.45 - 1.8} \rightarrow 0.8270676$$

Además, junto con la siguiente tabla se determinará el erf (z) para nuestra composición

**Tabla 31**

*Tabulación de valores de la función error.*

Z	erf(z)	Z	erf(z)	Z	erf(z)
0	0	0.55	0.5633	1.3	0.934
0.025	0.0282	0.6	0.6039	1.4	0.9523
0.05	0.0564	0.65	0.642	1.5	0.9661
0.1	0.1125	0.7	0.6778	1.6	0.9763
0.15	0.168	0.75	0.7112	1.7	0.9838
0.2	0.2227	0.8	0.7421	1.8	0.9891
0.25	0.2763	0.85	0.7707	1.9	0.9928
0.3	0.3286	0.9	0.797	2	0.9953
0.35	0.3794	0.95	0.8209	2.2	0.9981
0.4	0.4284	1	0.8427	2.4	0.9993
0.45	0.4755	1.1	0.8802	2.6	0.9998
0.5	0.5205	1.2	0.9103	2.8	0.9999

*Fuente:* ASM Handbook, Volume 4A, Steel Heat Treating Fundamentals and Processes J. Dossett and G.E. Totten, editors.

**Tabla 32**

*Tabulación de valores de la función error para 900°C*

0.9	0.7970
0.93028	0.81147541
0.95	0.8209

**Tabla 333**

*Tabulación de valores de la función error para 925°C*

0.9	0.7970
0.94877	0.8203125
0.95	0.8209

**Tabla 34**

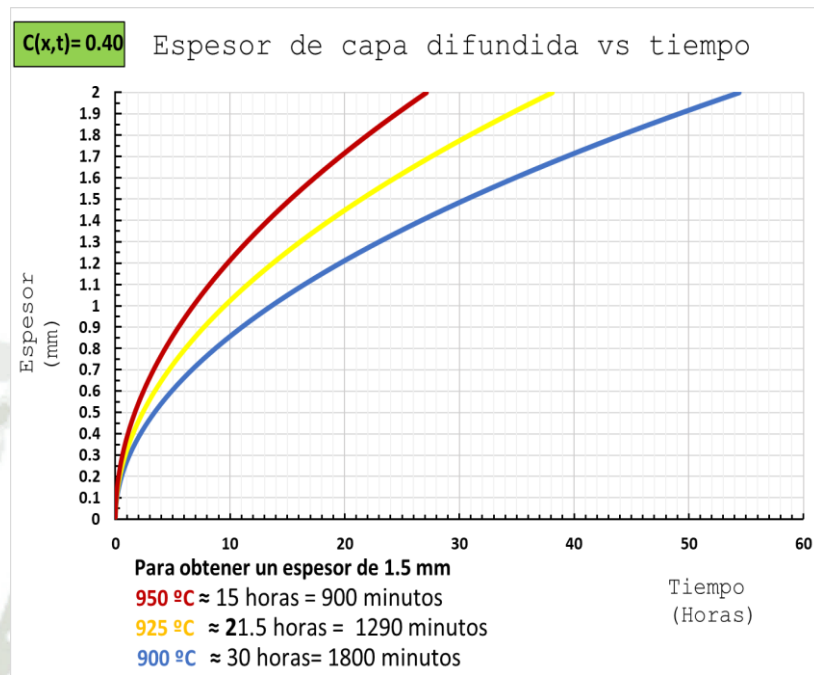
*Tabulación de valores de la función error para 950°C*

0.9	0.7970
0.96579	0.827067669
0.95	0.8209

Por último, aplicaremos la segunda Ley de Fick, reemplazando nuestro Cx en la temperatura que propuesta y obteniendo un determinado tiempo.

$$\frac{Cx - Co}{Cs - Co} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

Consecuentemente se obtuvo la siguiente gráfica:



**Figura 55** *Espesor de capa difundida VS tiempo*



## CAPITULO V

## 5.1 CONCLUSIONES

- Se ha demostrado que el temple doble consiste en un enfriamiento controlado pausado de las piezas desde la temperatura de cementación hasta la temperatura ambiente, seguidamente se calientan a la temperatura de temple de núcleo y se enfrían en el medio idóneo (agua, aceite o sales fundidas). A continuación, se calientan de nuevo a la temperatura de temple de la capa, más baja que la anterior, enfriándose de nuevo en el medio más adecuado según el tipo de acero. Ese debe ser el protocolo a seguir para tener éxito en obtener piezas carburizadas o cementadas con alta tenacidad en el núcleo.
- El tamaño de grano y microestructura del núcleo de la pieza se han refinado luego de realizar los ensayos, esto debido a que se tuvo las probetas periodos prolongados con temperaturas elevadas. Se concluye entonces que la cementación efectuada en el acero fue eficaz porque mejoro la tenacidad y resistencia comprobada por los ensayos aplicados.
- Se obtuvo un acero cementado, menos susceptible a la deformación plástica y a la fractura por fatiga. Es decir, podemos inferir que reduce o limita el nivel de distorsión de piezas con formas complejas.
- Dentro de los métodos que se tiene para calentar no se ha optado por los tradiciones como fraguas y sopletes por que no se logra un calentamiento uniforme y controlado por diversas condiciones de los mismos equipos y medio en el que se realiza.
- Se utilizó horno convencional porque es lo más utilizado y conocido dentro de la industria, nos proporciona un ambiente controlado como las temperaturas con la que se trabajaran. De la misma forma podría ser muy útil realizar el estudio y pruebas en

un horno de inducción ya que nos brinda eficiencia energética, rapidez, un control de temperatura mayor, es ecológico y controlable frente a otros métodos entre las principales ventajas, sería de gran utilidad realizar un futuro ensayo por este método para comparar ambos y ver que tantos beneficios se tiene uno frente a otro.



## 5.2 RECOMENDACIONES O SUGERENCIAS

- Se sugiere controlar cuidadosamente la temperatura y el tiempo para garantizar una profundidad de capa de carbono uniforme y consistente.
- Es recomendable a partir de los resultados de nuestro estudio dejar de pensar que el temple doble significa una duración prolongada de la austenización o carburación, seguida de un temple suave o un enfriamiento lento fuera de la cámara de calentamiento (como una fase de recocido) y una reaustenización seguida de una fase de temple (enfriamiento).
- Se debería probar la carburización con gas ya que se adapta fácilmente a la producción a gran escala y la operación continua ya que el ambiente está instrumentado y controlado fácilmente. Las piezas pueden ser templadas directamente o bien pueden ser templadas en una operación aparte.
- Usar en las pruebas más intervalos de revenido diferentes a los que se usó en el presente trabajo para verificar si hay una influencia importante en las propiedades del acero DIN 20 CrNiMo 2 2.

## REFERENCIA

**Referencia**

Dossett , J., & Totten, G. E. (s.f.). *ASM Handbook, Volume 4A, Steel Heat Treating Fundamentals and Processes.*

Air Liquide. (s.f.). *Hornos de tratamiento térmico.* Obtenido de <https://es.airliquide.com/soluciones/tratamiento-termico-de-metales/hornos-de-tratamiento-termico>

Alvarado, M. A. (2010). Estudio de la temperatura de transformación ms y microestructura en un acero inoxidable martensítico con 0.12% C, mediante analisis termico. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Bernal Avalos, J. (1994). *Endurecimiento superficial del acero por difusión del carbono en hierro gamma.* Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/76593653.pdf>

Buehler. (s.f.). *Prueba de dureza Rockwell.* Obtenido de <https://www.buehler.com/mx/blog/prueba-de-dureza-rockwell/>

Buenaño Barreno, J. (2012). *Estudio del ensayo de impacto y su incidencia en el comportamiento mecánico del acero AISI 8620 mediante la norma ASTM E 23.* Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/3704/1/Tesis%20I.%20M.%20156%20-%20Buena%20Barreno%20Jackson%20Wilfrido.pdf>

*Capítulo 10 - Metalografía y tratamientos térmicos.* (s.f.). Obtenido de [https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5\\_anio/metalografia/10-Temple\\_y\\_Revenido\\_v2.pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/10-Temple_y_Revenido_v2.pdf)

*Capítulo 12 - Metalografía y tratamiento térmico.* (s.f.). Obtenido de [https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5\\_anio/metalografia/12.\\_Cementacion\\_\(a\)\\_v2.pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/12._Cementacion_(a)_v2.pdf)

Castillo Gutierrez, D. E., Angarita Moncaleano, I. I., & Rodriguez Baracaldo, R. (2018). *Caracterización microestructural y mecánica de aceros de fase dual (ferrita-martensita), obtenidos mediante procesos térmicos y termomecánicos.* Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/327660921\\_Caracterizacion\\_microestructural\\_y\\_mecanica\\_de\\_aceros\\_de\\_fase\\_dual\\_ferrita-martensita\\_obtenidos\\_mediante\\_procesos\\_termicos\\_y\\_termomecnicos](https://www.researchgate.net/publication/327660921_Caracterizacion_microestructural_y_mecanica_de_aceros_de_fase_dual_ferrita-martensita_obtenidos_mediante_procesos_termicos_y_termomecnicos)

Csallister. (2007). *Microstructural consideration on quantitative analysis of thermal treatment: Application to decarburization of steel.* Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/276942565\\_Microstructural\\_consideration\\_on\\_quantitative\\_analysis\\_of\\_thermal\\_treatment\\_Application\\_to\\_decarburization\\_of\\_steel/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/276942565_Microstructural_consideration_on_quantitative_analysis_of_thermal_treatment_Application_to_decarburization_of_steel/figures?lo=1)

Díaz del Castillo Rodríguez, F. (2007). *Endurecimiento superficial del Acero.* Obtenido de [http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina\\_ingenieria/mecanica/mat/mat\\_mec/m6/endurecimiento%20superficial%20del%20acero.pdf](http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/endurecimiento%20superficial%20del%20acero.pdf)

Díaz Merino, G. (2019). *Efecto de los tratamientos de bainitización y nitrocarburoción en sus propiedades mecánicas de dureza e impacto de acero chronit (ASTM - A517) para uso*

- en blindaje.* Obtenido de <https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/13380/D%C3%8DAZ%20MERINO%2C%20GIORDANO%20MART%C3%8DN.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Diseño y construcción de una desbastadora metalografica bajo norma ASTM E-1.* (2007). Obtenido de Norma STM E3: <https://pdfslide.net/documents/norma-astm-e-3-preparacion-metalografia.html?page=5>
- ENAC : Laboratorio de medida de tensiones residuales. (s.f.). *Medida de tensiones residuales.* Obtenido de <https://blogs.upm.es/labstress/tensiones-residuales/>
- Federación de enseñanza de CC.OO. de Andalucía. (2011). *Tratamientos termicos.* Obtenido de <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd8426.pdf>
- Flores Logroño, P. F. (2011). *Estudio del efecto de la velocidad de calentamiento en las propiedades mecánicas de un acero de bajo carbono.* Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2679>
- Gomez Muños, J., & Coy Sierra, A. (2015). *Austempering.* Obtenido de <https://mechanicsenergyymaterials.wordpress.com/2015/11/22/austempering/>
- Granada Molina, J., & Escola Yacelga, S. (2020). *Analisis de la aleación 7075 sometido a tratamiento térmico de normalizado.* Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/23233/1/T-ESPEL-MAI-0692.pdf>
- Ingenio y conciencia .* (2022). Obtenido de <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/sahagun/issue/archive>

- Instituto Politécnico. (s.f.). *Tratamientos térmicos del acero*. Obtenido de <https://rephip.unr.edu.ar/bitstream/handle/2133/3285/5504-14%20Tratamientos%20t%C3%A9rmicos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- International Standards Worldwide. (Noviembre de 2015). *ASTM E8/E8M - 09*. Obtenido de <https://ingmecausta.wordpress.com/2015/11/21/norma-astm-e8e8m/>
- Jian Liu, Hao Yun, Tao Zhou, Chenghao Song, & Kai Zhang. (2014). *Efecto del tratamiento térmico de doble temple y revenido sobre la microestructura y propiedades mecánicas de un nuevo acero 5CR procesado mediante colada por electroescoria*. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2014.09.063> 0921-5093/& 2014 Elsevier B.V. All rights reserved
- Khani Sanji, M., Ghasemi Banadkouki, S., Mashreghi, A., & Moshrefifas. (Diciembre de 2012). *The effect of single and double quenching and tempering heat treatments on the microstructure and mechanical properties of AISI 4140 steel*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.017>
- Medina Fadel, A. (2014). *Evaluación de las variables en el tratamiento de aceros para herramientas*. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/2700/IMmefaamf.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Miren, A., & Monasterios, N. (2018). *Introducción a la ciencia de los materiales y sus propiedades*. País Vasco: Universidad del País Vasco.
- Paltán Zhingre , Fajardo., J., Carrasquero Rodriguez , & López López. (Noviembre de 2015). *EVALUACIÓN DEL ENDURECIMIENTO POR CEMENTACIÓN SÓLIDA DE LOS*

ACEROS SAE 8620 Y SAE 1018. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/341658652\\_Evaluacion\\_del\\_Endurecimiento\\_por\\_Cementacion\\_Solida\\_de\\_los\\_Aceros\\_SAE\\_8620\\_y\\_SAE1018#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/341658652_Evaluacion_del_Endurecimiento_por_Cementacion_Solida_de_los_Aceros_SAE_8620_y_SAE1018#fullTextFileContent)

Patiño, H., & Rosero, B. (Agosto de 2016). *Tratamiento termico de temple, influencia del medio de enfriamiento*. Obtenido de <https://jci.uniautonoma.edu.co/2016/2016-7.pdf>

Paulo. (2022). *Martempering: Limitación de la distorsión de piezas largas o complejas*. Obtenido de <https://www.paulo.com/es/capabilities/procesa/tratamiento-termico/martempering/>

Piñeros Torres, J., & Porras Moreno, W. (2016). *Analisis de la influencia de la cementación en el tratamiento térmico de temple desde temperaturas intercríticas y revenido en un acero AISI/SAE 8620*. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/4788/Pi%c3%b1erosTorresJainerSantiago.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Platl, J., Leitner, H., Turk, C., & Schnitzer, R. (2020). Determination of Martensite Start Temperature of High-Speed Steels Based on Thermodynamic Calculations. *Wiley Online Library*.

Rico, Y., & Hernández, J. (2015). Influencia de la velocidad de enfriamiento sobre la microestructura y comportamiento a la corrosión de recubrimientos Zn-7Al por inmersión en caliente sobre acero. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*.

Soriano Reyes, C. (2022). *Endurecimiento y revenido superficial mediante un haz láser oscilante*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=307061>

Test Systems. (s.f.). *Medición de tensiones residuales*. Obtenido de <https://test-systems.es/medicion-de-tensiones-residuales/>

UNAL. (2011). *Ensayo de tracción bajo la Norma ASTM E8*. Obtenido de [https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/8788/15446916.\\_2011\\_2.pdf?sequence=6&isAllowed=y](https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/8788/15446916._2011_2.pdf?sequence=6&isAllowed=y)

Vida Gomes, P., Barreto Cruz, J., Rabelo, E., & Neto, M. (2005). *Normalizing treatment influence on the forged steel SAE 8620 Fracture Properties*.

<b>ECL</b>	AISI :	8620 / S115
	DIN :	21NiCrMo2 / 18MnCr5
	W N° :	1.8523 / 1.7131

Tipo de aleación : C – Cr – Ni – Mo – Mn- Cu  
 Color de identificación : Azul - Blanco  
 Estado de suministro : Recocido: 207 Brinell

**Aceros de grano fino para cementación de baja aleación. Alta resistencia al desgaste de la capa cementada y buena tenacidad en el núcleo.**

**APLICACIONES:** Piezas pequeñas altamente exigidas en la industria metal mecánica y automotriz. Ejemplo: Engranajes de caja o diferencial, coronas, piñones terminales de dirección, sectores dentados, crucetas, pines de pistón, ejes, etc.

**INSTRUCCIONES PARA EL TRATAMIENTO:**

**Forjado:** 1150 - 850 °C  
**Recocido:** 650 - 700 °C  
**Normalizado:** 850 - 880 °C  
**Cementar:** 900 - 950 °C  
**Temple del núcleo:** 840 - 870 °C  
**Temple de la capa cementada:** 800 - 830 °C  
**Revenido (mínimo 1 hora):** 150 - 210 °C  
**Dureza obtenible en la capa:** 58 - 60 HRC

**PROPIEDADES MECÁNICAS:**

Límite de fluencia: 600 – 680 N/mm<sup>2</sup>  
 Resistencia a la tracción: 1150 N/mm<sup>2</sup>  
 Elongación: 10 - 11 %

**SOLDADURA:**

Electrodo BÖHLER UTP 6020. Antes de soldar se debe precalentar la pieza a 200 – 350 °C, luego distensionar.  
**La capa cementada no es soldable.**

02





STANDARD SPECIFICATION FOR THE WOVEN  
WIRE TEST SIEVE CLOTH AND TEST SIEVES



sales@advantechmfg.com  
(262) 786-1600  
WWW.ADVANTECHMFG.COM

Nominal dimensions and permissible variations for sieve cloth (mesh) for Compliance, Inspection and Calibration grade test sieves

Sieve Designation		Nominal Sieve Opening	± Y Variation for Average Opening	+ X Maximum Variation for Opening	Resulting Maximum Individual Opening	Typical Wire Diameter	Permissible Average Wire Diameter	
U.S. Alternative	Standard						Min	Max
		Millimeters	inches	Millimeters	Millimeters	Millimeters		
5"	125	5.00	3.300	4.06	129.06	8.00	6.8	9.2
4.24"	106	4.24	2.800	3.59	109.59	6.30	5.4	7.2
4"	100	4.00	2.650	3.44	103.44	6.30	5.4	7.2
3-1/2"	90	3.50	2.390	3.18	93.18	6.30	5.4	7.2
3"	75	3.00	2.000	2.78	77.78	6.30	5.4	7.2
2-1/2"	63	2.50	1.690	2.44	65.44	5.60	4.8	6.4
2-1/2"	53	2.12	1.420	2.15	55.15	5.00	4.3	5.8
2"	50	2.00	1.340	2.06	52.06	5.00	4.3	5.8
1-3/4"	45	1.75	1.210	1.91	46.91	4.50	3.8	5.2
1-1/2"	37.5	1.50	1.010	1.67	39.17	4.50	3.8	5.2
1-1/4"	31.5	1.25	0.855	1.47	32.97	4.00	3.4	4.6
1.06"	26.5	1.06	0.722	1.29	27.79	3.55	3.0	4.1
1.00"	25	1.00	0.682	1.24	26.24	3.55	3.0	4.1
7/8"	22.4	0.875	0.613	1.14	23.54	3.55	3.0	4.1
3/4"	19	0.750	0.522	1.01	20.01	3.15	2.7	3.6
5/8"	16	0.625	0.441	0.89	16.89	3.15	2.7	3.6
0.530"	13.2	0.530	0.365	0.78	13.98	2.80	2.4	3.2
1/2"	12.5	0.500	0.346	0.75	13.25	2.50	2.1	2.9
7/16"	11.2	0.438	0.311	0.69	11.89	2.50	2.1	2.9
3/8"	9.5	0.375	0.265	0.61	10.11	2.24	1.9	2.6
5/16"	8	0.312	0.224	0.54	8.54	2.00	1.7	2.3
0.265"	6.7	0.265	0.189	0.48	7.18	1.80	1.5	2.1
1/4"	6.3	0.250	0.178	0.46	6.76	1.80	1.5	2.1
#3.5	5.6	0.223	0.159	0.42	6.02	1.60	1.3	1.9
#4	4.75	0.187	0.135	0.37	5.12	1.60	1.3	1.9
#5	4	0.157	0.114	0.33	4.33	1.40	1.2	1.7
#6	3.35	0.132	0.096	0.29	3.64	1.25	1.06	1.50
#7	2.8	0.110	0.081	0.26	3.06	1.12	0.95	1.30
#8	2.36	0.0937	0.069	0.23	2.59	1.00	0.85	1.15
#10	2	0.0787	0.059	0.20	2.20	0.90	0.77	1.04
#12	1.7	0.0661	0.050	0.18	1.88	0.80	0.68	0.92
#14	1.4	0.0555	0.042	0.16	1.56	0.71	0.60	0.82
#16	1.18	0.0469	0.036	0.140	1.320	0.63	0.54	0.72
#18	1	0.0394	0.030	0.130	1.130	0.560	0.480	0.64
		Micrometers	inches	Micrometers	Micrometers	Micrometers		
#20	850	0.0331	26.2	114	964	0.500	0.43	0.58
#25	710	0.0278	22.2	101	811	0.450	0.38	0.52
#30	600	0.0234	19.0	91	691	0.400	0.34	0.46
#35	500	0.0197	16.2	80	580	0.315	0.27	0.36
#40	425	0.0165	14.0	73	498	0.280	0.24	0.32
#45	355	0.0139	12.0	65	420	0.224	0.19	0.26
#50	300	0.0117	10.4	58	358	0.200	0.17	0.23
#60	250	0.0098	8.9	52	302	0.160	0.13	0.19
#70	212	0.0083	7.8	47	259	0.140	0.12	0.17
#80	180	0.0070	6.8	43	223	0.125	0.106	0.150
#100	150	0.0059	6.0	38	188	0.100	0.085	0.115
#120	125	0.0049	5.2	34	159	0.090	0.077	0.104
#140	106	0.0041	4.7	31	137	0.071	0.060	0.082
#170	90	0.0035	4.2	29	119	0.063	0.054	0.072
#200	75	0.0029	3.7	26	101	0.050	0.043	0.058
#230	63	0.0025	3.4	24	87	0.045	0.038	0.052
#270	53	0.0021	3.1	21	74	0.036	0.031	0.041
#325	45	0.0017	2.8	20	65	0.032	0.027	0.037
#400	38	0.0015	2.6	18	56	0.030	0.024	0.035
#450	32	0.0012	2.4	17	49	0.028	0.023	0.033
#500	25	0.0010	2.2	15	40	0.025	0.021	0.029
#635	20	0.0008	2.1	13	33	0.020	0.017	0.023

Advantech manufactures a variety of sieves with the above wire cloth.  
Additional ASTM, ISO or custom mesh sizes are available upon request.