



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

**CARACTERIZACIÓN METALGRÁFICA, EVALUACIÓN DE PROPIEDADES  
MECÁNICAS DEL ACERO M303, COMPARACIÓN Y SUSTITUCIÓN ENTRE LOS  
ACEROS 17-4PH Y AISI 420.**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO MECÁNICO**

**AUTORES:**

**JUAN JOSÉ ROJAS VISTÍN**

**BRYAN ISRAEL ROSERO BOLAÑOS**

Riobamba – Ecuador

2022



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**

**CARRERA MECÁNICA**

**CARACTERIZACIÓN METALGRÁFICA, EVALUACIÓN DE  
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO M303,  
COMPARACIÓN Y SUSTITUCIÓN ENTRE LOS ACEROS 17-4PH  
Y AISI 420.**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO MECÁNICO**

**AUTORES: JUAN JOSE ROJAS VISTIN**

**BRYAN ISRAEL ROSERO BOLAÑOS**

**DIRECTOR: Ing. CARLOS OSWALDO SERRANO AGUIAR**

Riobamba – Ecuador

2022

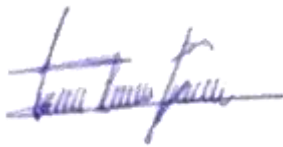
© 2022, Juan José Rojas Vistín; Bryan Israel Rosero Bolaños

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

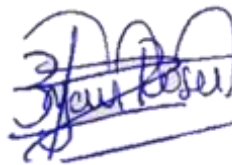
Nosotros, Juan José Rojas Vistín; Bryan Israel Rosero Bolaños, declaramos que el presente Trabajo de Integración Curricular es de nuestra autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 05 de diciembre de 2022



**Juan José Rojas Vistín**  
**060431864-2**



**Bryan Israel Rosero Bolaños**  
**180439290-8**

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

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto Técnico, “**CARACTERIZACIÓN METALOGRÁFICA, EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO M303, COMPARACIÓN Y SUSTITUCIÓN ENTRE LOS ACEROS 17-4PH Y AISI 420**”, realizado por el señor: **JUAN JOSE ROJAS VISTIN** y el señor **BRYAN ISRAEL ROSERO BOLAÑOS**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Msc. Edwin Fernando Viteri Núñez <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>		2022/12/05
Ing. MSc. Carlos Oswaldo Serrano Aguiar <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		2022/12/05
Ing. Jorge Sebastián Buñay Guamán <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>		2022/12/05

## **DEDICATORIA**

A mis padres por creer siempre en mí, dedico este trabajo en especial a mi madre Esperanza, quien es la persona que más admiro y por su ejemplo de vida.

**Israel**

Dedicado a mis padres que son mi ejemplo y a mi hermana que es mi motor, quienes han sido un pilar fundamental en todo este camino, que me han sabido levantar cada vez que lo necesitaba a ellos todo mi esfuerzo y dedicación, y a Dios que siempre me supo guiar y a darme fuerzas.

**Juan**

## **AGRADECIMIENTO**

Gracias a mis padres, mis hermanos, quienes con su apoyo incondicional hicieron que esta meta se concluya. Las diferentes personas que me brindaron su ayuda en el desarrollo de mi investigación. A la carrera de mecánica, quien con su arduo trabajo transmitió el conocimiento durante los distintos niveles.

**Israel**

Gracias a Dios por permitirme vivir este maravilloso momento, a toda mi familia sin excepción por su apoyo incondicional para llegar a cumplir este sueño y a cada una de las personas que influyeron en mi durante este trayecto, un agradecimiento especial al Ing. Carlos Serrano y al Ing. Jorge Buñay por ser los mentores de este trabajo de titulación.

**Juan**

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	¡Error! Marcador no definido.
ÍNDICE DE ANEXOS.....	¡Error! Marcador no definido.
RESUMEN	
.....	¡Error!
Marcador no definido.	ix
SUMMARY .....	¡Error! Marcador no definido.
INTRODUCCIÓN .....	¡Error! Marcador no definido.

## CAPÍTULO 1

1	DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....	2
1.1	Antecedentes .....	2
1.2	Delimitación.....	4
1.2.1	<i>Delimitación espacial</i> .....	4
1.2.2	<i>Delimitación sectorial</i> .....	4
1.3	Formulación del problema .....	4
1.4	Objetivos .....	4
1.4.1	<i>Objetivo general</i> .....	4
1.4.2	<i>Objetivos específicos</i> .....	4

## CAPÍTULO II

2	MARCO TEÓRICO .....	6
2.1	Metalografía .....	6
2.2	Procedimiento metalográfico .....	6
2.2.1	<i>Corte</i> .....	6
2.2.2	<i>Desbaste</i> .....	7
2.2.3	<i>Pulido</i> .....	8
2.3	Ataque Químico.....	9
2.4	Examen microscópico .....	11
2.4.1	<i>Microscopio metalográfico</i> .....	11
2.5	Microscopio electrónico de barrido (sem).....	13
2.5.1	<i>Principio de funcionamiento</i> .....	13



<b>2.6</b>	<b>Espectrometría de masa .....</b>	<b>14</b>
<b>2.7</b>	<b>Inclusiones No metálicas.....</b>	<b>15</b>
<b>2.7.1</b>	<b><i>Clasificación de las inclusiones no metálicas .....</i></b>	<b>16</b>
<b>2.7.2</b>	<b><i>Inclusiones no metálicas Endógenas .....</i></b>	<b>16</b>
<b>2.7.3</b>	<b><i>Clasificación inclusiones no metálicas Endógenas. ....</i></b>	<b>16</b>
<b>2.7.4</b>	<b><i>Inclusiones no metálicas Exógenas.....</i></b>	<b>17</b>
<b>2.7.5</b>	<b><i>Métodos de evaluación del contenido de inclusiones no metálicas en Aceros.....</i></b>	<b>17</b>
<b>2.7.5.1</b>	<b><i>Método macroscópico .....</i></b>	<b>17</b>
<b>2.7.5.2</b>	<b><i>Método Microscópico .....</i></b>	<b>18</b>
<b>2.7.6</b>	<b><i>Tipos de inclusiones de acuerdo con la norma ASTM E45.....</i></b>	<b>18</b>
<b>2.8</b>	<b>Tamaño de grano .....</b>	<b>19</b>
<b>2.9</b>	<b>Aceros.....</b>	<b>20</b>
<b>2.9.1</b>	<b><i>Clasificación del acero .....</i></b>	<b>21</b>
<b>2.9.1.1</b>	<b><i>Aceros al carbono .....</i></b>	<b>21</b>
<b>2.9.1.2</b>	<b><i>Aceros aleados .....</i></b>	<b>21</b>
<b>2.9.1.3</b>	<b><i>Aceros de baja aleación ultrarresistente .....</i></b>	<b>21</b>
<b>2.9.1.4</b>	<b><i>Aceros inoxidables .....</i></b>	<b>21</b>
<b>2.9.1.5</b>	<b><i>Aceros de herramientas .....</i></b>	<b>22</b>
<b>2.9.2</b>	<b><i>Componentes principales del acero .....</i></b>	<b>22</b>
<b>2.9.2.1</b>	<b><i>Hierro (Fe).....</i></b>	<b>22</b>
<b>2.9.2.2</b>	<b><i>Carbono (C).....</i></b>	<b>23</b>
<b>2.10</b>	<b><i>Fases de los aceros .....</i></b>	<b>23</b>
<b>2.10.1</b>	<b><i>Austenita .....</i></b>	<b>24</b>
<b>2.10.2</b>	<b><i>Ferrita .....</i></b>	<b>25</b>
<b>2.10.3</b>	<b><i>Perlita .....</i></b>	<b>25</b>
<b>2.10.4</b>	<b><i>Cementita.....</i></b>	<b>26</b>
<b>2.10.5</b>	<b><i>Bainita .....</i></b>	<b>26</b>
<b>2.10.6</b>	<b><i>Martensita.....</i></b>	<b>27</b>
<b>2.11</b>	<b>Aceros m303 .....</b>	<b>28</b>
<b>2.11.1</b>	<b><i>Características .....</i></b>	<b>28</b>
<b>2.11.2</b>	<b><i>Composición Química .....</i></b>	<b>29</b>
<b>2.11.3</b>	<b><i>Propiedades Físicas.....</i></b>	<b>29</b>
<b>2.11.4</b>	<b><i>Aplicaciones.....</i></b>	<b>29</b>
<b>2.12</b>	<b>Aleación 17-4PH.....</b>	<b>30</b>
<b>2.12.1</b>	<b><i>Composición Química .....</i></b>	<b>30</b>
<b>2.12.2</b>	<b><i>Propiedades Físicas.....</i></b>	<b>31</b>

2.12.3	<i>Aplicaciones</i> .....	31
2.13	<b>Acero AISI 420</b> .....	31
2.13.1	<i>Composición química</i> .....	32
2.13.2	<i>Propiedades Físicas</i> .....	32
2.13.3	<i>Aplicaciones</i> .....	32
2.14	<b>Dureza</b> .....	32
2.14.1	<i>Ensayo de dureza Brinell</i> .....	33
2.14.2	<i>Ensayo de Dureza Rockwell</i> .....	33
2.15	<b>Ensayo de tracción</b> .....	34
2.15.1	<i>Resultados del ensayo</i> .....	37
2.16	<b>Ensayo de tenacidad</b> .....	37
2.16.1	<i>Influencia del radio de la entalla</i> .....	38
2.17	<b>Torsión</b> .....	38
2.17.1	<i>Angulo de Giro</i> .....	39
2.18	<b>Fatiga</b> .....	40
2.18.1	<i>Etapas de la fatiga</i> .....	40

### CAPÍTULO III

3	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	42
3.1	<b>Análisis de la composición química - Espectrometría</b> .....	42
3.1.1	<i>Ensayo de espectrometría según la norma ASTM E 415</i> .....	43
3.1.2	<i>Procedimiento del ensayo</i> .....	44
3.1.2.1	<i>Corte</i> .....	44
3.1.2.2	<i>Pulido</i> .....	45
3.2.2.2	<i>Colocación de la probeta sobre el espectrómetro</i> .....	45
3.1.2.3	<i>Marcado de la huella</i> .....	45
3.2	<b>Análisis metalográfico</b> .....	45
3.2.1.1	<i>Identificación</i> .....	48
3.2.1.2	<i>Desbaste</i> .....	48
3.2.1.3	<i>Pulido</i> .....	49
3.2.1.4	<i>Limpieza</i> .....	49
3.2.1.5	<i>Ataque químico</i> .....	50
3.2.2	<i>Obtención de micrografías</i> .....	50
3.3	<b>Análisis de inclusiones</b> .....	51
3.3.1	<i>Preparación de probetas</i> .....	52

3.4	Cálculo del tamaño de grano.....	53
3.4.1	<i>Método de Intercepción</i> .....	53
3.5	Dureza Rockwell .....	54
3.5.1	<i>Preparación de la probeta</i> .....	56
3.5.2	<i>Selección de la escala del indentador</i> .....	56
3.6	Dureza Brinell .....	57
3.6.1	<i>Preparación de la probeta</i> .....	58
3.6.2	<i>Selección de la carga por aplicar</i> .....	58
3.6.3	<i>Aplicación de la carga</i> .....	60
3.6.4	<i>Cálculo de dureza Brinell</i> .....	61
3.7	Ensayos de tracción y tenacidad. ....	61
3.7.1	<i>Muestras</i> .....	61
3.7.2	<i>Generalidades e identificación</i> .....	61
3.7.3	<i>Condiciones ambientales</i> .....	62
3.7.4	<i>Ensayo de tracción material base</i> .....	62
3.7.5	<i>Ensayo de impacto</i> .....	65
3.8	Simulación Ensayo de Fatiga .....	67
3.8.1	<i>Curvas S-N</i> .....	68
3.9	Simulación Ensayo de Torsión.....	71

## CAPÍTULO IV

4	RESULTADOS.....	74
4.1	Calibración del espectrómetro .....	74
4.2	Ensayo de Espectrometría.....	76
4.2.1	<i>Acero AISI 420</i> .....	76
4.2.2	<i>Acero M303</i> .....	77
4.2.3	<i>Acero 17-4Ph</i> .....	78
4.2.4	<i>Microestructura M303</i> .....	80
4.2.5	<i>Microestructura AISI 420</i> .....	82
4.2.6	<i>Microestructura 17-4 PH</i> .....	85
4.3	EDS.....	87
4.3.1	<i>EDS del acero M303</i> .....	87
4.3.1.	<i>EDS del acero AISI 420</i> .....	88
4.3.2.	<i>EDS acero 17-4PH</i> .....	90
4.4	Tamaño de grano de la austenita.....	91

4.3.2	<i>Acero M303</i> .....	92
4.4.1	<i>Acero 17-4PH</i> .....	93
4.4.2	<i>Acero AISI 420</i> .....	94
4.4	<b>Análisis de inclusiones</b> .....	96
4.4.1	<i>Inclusiones acero 17-4PH</i> .....	99
4.4.2	<i>Efecto de las inclusiones sobre las propiedades mecánicas.</i> .....	100
4.5	<b>Dureza</b> .....	101
4.5.1	<b>Rockwell</b> .....	101
4.5.1.1	<i>Acero M303</i> .....	101
4.5.1.2	<i>Acero AISI 420</i> .....	102
4.5.1.3	<i>Acero 17-4PH</i> .....	102
4.5.2	<b>Brinell</b> .....	103
4.5.2.1	<i>Acero M303</i> .....	103
4.5.2.2	<i>Acero 17-4PH</i> .....	104
4.5.2.3	<i>Acero AISI 420</i> .....	104
4.6	<b>Tracción</b> .....	104
4.6.1	<i>Acero M303</i> .....	105
4.6.1	<i>Acero 17-4PH</i> .....	105
4.6.2	<i>Acero AISI 420</i> .....	106
4.7	<b>Impacto</b> .....	108
4.7.1	<i>Acero M303</i> .....	109
4.7.2	<i>Acero 17-4PH</i> .....	109
4.7.3	<i>Acero AISI 420</i> .....	109
4.8	<b>Resultados simulación Fatiga</b> .....	110
4.9	<b>Cálculo de Fatiga teórica</b> .....	114
4.10	<b>Resultados simulación Torsión</b> .....	120
4.11	<b>Cálculo de Torsión teórica</b> .....	124
<b>CONCLUSIONES</b> .....		129
<b>RECOMENDACIONES</b> .....		131
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		
<b>ANEXOS</b>		

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-2:</b> Tabla de principales ataques químicos .....	9
<b>Tabla 2-2:</b> Comparación entre las características de los Microscopios Óptico y Electrónico ...	14
<b>Tabla 3-2:</b> Tipos de inclusión de acuerdo a la Norma ASTM E45 .....	18
<b>Tabla 4-2:</b> Clasificación del acero por su composición química .....	22
<b>Tabla 5-2:</b> Composición química del acero M303 .....	29
<b>Tabla 6-2:</b> Propiedades físicas del acero M303 .....	29
<b>Tabla 7-2:</b> Composición química de la aleación 17-4PH.....	30
<b>Tabla 8-2:</b> Propiedades físicas de la aleación 17-4PH .....	31
<b>Tabla 9-2:</b> Composición química del acero AISI 420.....	32
<b>Tabla 10-2:</b> Propiedades físicas del acero AISI 420 .....	32
<b>Tabla 1-3:</b> Características del espectrómetro de chispa .....	43
<b>Tabla 2-3:</b> Características del Microscopio JSM – IT100.....	46
<b>Tabla 3-3:</b> Características del Microscopio ECLIPSE E200.....	46
<b>Tabla 4-3:</b> Dimensiones de las probetas.....	48
<b>Tabla 5-3:</b> Denominaciones de especímenes por ensayo .....	48
<b>Tabla 6-3:</b> Contenido de ataque químico .....	50
<b>Tabla 7-3:</b> Severidad de las inclusiones .....	53
<b>Tabla 8-3:</b> Escalas para diferentes tipos durezas.....	56
<b>Tabla 9-3:</b> Tolerancias aplicación de fuerza .....	57
<b>Tabla 10-3:</b> Datos iniciales para el ensayo de dureza .....	57
<b>Tabla 11-3:</b> Valores que relacionan la carga y diámetro de esfera .....	58
<b>Tabla 12-3:</b> Espesores mínimos de probeta .....	59
<b>Tabla 13-3:</b> Valores de $F/D^2$ para materiales representativos .....	59
<b>Tabla 14-3:</b> Tolerancias en el diámetro de esferas.....	59
<b>Tabla 15-3:</b> Identificación de las muestras .....	61
<b>Tabla 16-3:</b> Características de la maquina Universal Tinius Olsen .....	63
<b>Tabla 17-3:</b> Características de las probetas de tracción .....	64
<b>Tabla 18-3:</b> Características del Pendulo Charpy .....	65
<b>Tabla 19-3:</b> Condiciones generales del péndulo Charpy.....	65
<b>Tabla 20-3:</b> Medidas de las probetas para el ensayo Charpy .....	67
<b>Tabla 1-4:</b> Microestructura M303 .....	80
<b>Tabla 2-4:</b> Microestructura AISI 420.....	82
<b>Tabla 3-4:</b> Microestructura 17-4 PH .....	85

<b>Tabla 4-4:</b> Datos de la composición química del segmento analizado en el acero M303 mediante la prueba EDS .....	88
<b>Tabla 5-4:</b> Datos de la composición química del segmento analizado en el acero AISI 420 mediante la prueba EDS.....	89
<b>Tabla 6-4:</b> Datos de la composición química del segmento analizado en el acero 17-4PH mediante la prueba EDS .....	91
<b>Tabla 7-4:</b> Inclusiones acero M303.....	96
<b>Tabla 8-4:</b> Inclusiones acero M303.....	97
<b>Tabla 8-4:</b> Inclusiones acero AISI 420 .....	98
<b>Tabla 9-4:</b> Inclusiones acero 17-4 PH.....	99
<b>Tabla 10-4:</b> Resumen de inclusiones presentes en los materiales .....	100
<b>Tabla 11-4:</b> Datos de dureza Rockwell del acero M303 .....	101
<b>Tabla 12-4:</b> Datos de dureza Rockwell del acero 17-4PH .....	102
<b>Tabla 13-4:</b> Calculo de dureza Brinell del acero M303 .....	103
<b>Tabla 14-4:</b> Calculo de dureza Brinell del acero 17-4PH .....	104
<b>Tabla 15-4:</b> Calculo de dureza Brinell del acero AISI 420 .....	104
<b>Tabla 16-4:</b> Ensayo de tracción del acero M303.....	105
<b>Tabla 17-4:</b> Ensayo de tracción del acero 17-4PH.....	105
<b>Tabla 18-4:</b> Ensayo de tracción del acero AISI 420 .....	106
<b>Tabla 19-4:</b> Resultados obtenidos del ensayo de impacto CVN del acero M303 .....	109
<b>Tabla 20-4:</b> Resultados obtenidos del ensayo de impacto CVN del acero 17-4PH .....	109
<b>Tabla 21-4:</b> Resultados obtenidos del ensayo de impacto CVN del acero AISI 420.....	109
<b>Tabla 24-4:</b> Resumen de resultados del ensayo de impacto.....	109
<b>Tabla 22-4:</b> Resultados fatiga M303- ANSYS.....	111
<b>Tabla 23-4:</b> Resultados fatiga 17-4 PH- ANSYS.....	112
<b>Tabla 24-4:</b> Resultados fatiga AISI 420- ANSYS .....	113
<b>Tabla 25-4:</b> Calculo del momento en la probeta a diferentes cargas .....	116
<b>Tabla 26-4:</b> Calculo del esfuerzo (Mpa) .....	117
<b>Tabla 27-4:</b> Resultados teóricos obtenidos de Números de ciclos .....	118
<b>Tabla 28-4:</b> Calculo del porcentaje de error a partir de vida finita .....	119
<b>Tabla 29-4:</b> Resultados ensayo torsión acero M303 .....	121
<b>Tabla 30-4:</b> Resultados ensayo torsión acero 17-4PH .....	122
<b>Tabla 31-4:</b> Resultados ensayo torsión acero AISI 20 .....	124
<b>Tabla 32-4:</b> Resultados teóricos obtenidos Angulo de torsión.....	125
<b>Tabla 33-4:</b> Calculo del porcentaje de error de la deformación.....	126
<b>Tabla 34-4:</b> Calculo del Esfuerzo cortante.....	127

**Tabla 35-4:** Resumen de las propiedades de cada material..... 127

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1-2:</b> Corte con sierra cinta o con arco con segueta.....	7
<b>Ilustración 2-2:</b> Discos de corte y cortadora de muestras.....	7
<b>Ilustración 3-2:</b> Banco para desbaste de probetas.....	8
<b>Ilustración 4-2:</b> Pulidora metalográfica.....	9
<b>Ilustración 5-2:</b> Microscopio metalográfico.....	11
<b>Ilustración 6-2:</b> Principio del microscopio metalográfico.....	12
<b>Ilustración 7-2:</b> Microscopio electrónico de barrido.....	13
<b>Ilustración 8-2:</b> Inclusiones no metálicas.....	16
<b>Ilustración 9-2:</b> Inclusiones no metálicas endógenas.....	16
<b>Ilustración 10-2:</b> Tamaño de grano ASTM E-112.....	20
<b>Ilustración 11-2:</b> Diagrama Hierro-Carbono.....	24
<b>Ilustración 12-2:</b> Microestructura de la austenita.....	25
<b>Ilustración 13-2:</b> Microestructura de la ferrita.....	25
<b>Ilustración 14-2:</b> Microestructura de la perlita.....	26
<b>Ilustración 15-2:</b> Microestructura del cementita.....	26
<b>Ilustración 16-2:</b> Microestructura de la Bainita.....	27
<b>Ilustración 17-2:</b> Microestructura de la martensita.....	28
<b>Ilustración 18-2:</b> Ensayo dureza Rockwell.....	34
<b>Ilustración 19-2:</b> Máquina Universal (ensayos de tracción).....	35
<b>Ilustración 20-2:</b> Grafica esfuerzo vs deformación.....	35
<b>Ilustración 21-2:</b> Péndulo Charpy.....	38
<b>Ilustración 22-2:</b> Máquina de ensayos de Torsión serie NJS-Z.....	39
<b>Ilustración 23-2:</b> Fases de falla por fatiga.....	41
<b>Ilustración 1-3:</b> Procedimiento de ensayo de espectrometría.....	44
<b>Ilustración 2-3:</b> Procedimiento del ensayo metalográfico.....	47
<b>Ilustración 3-3:</b> Desbaste de las diferentes probetas en el laboratorio de Materiales de la ESPOCH.....	49
<b>Ilustración 4-3:</b> Etapa de Pulido.....	49
<b>Ilustración 5-3:</b> Probetas atacadas químicamente con VILLELA.....	50
<b>Ilustración 6-3:</b> Microscopio Electrónico de Barrido.....	51
<b>Ilustración 7-3:</b> Procedimiento para el análisis de inclusiones.....	52
<b>Ilustración 8-3:</b> Proceso de cálculo de dureza.....	55
<b>Ilustración 9-3:</b> Probeta para ensayo de tracción.....	64



<b>Ilustración 10-3:</b> Dimensiones de probetas para ensayo de tracción.....	64
<b>Ilustración 11-3:</b> Probeta para ensayo de tenacidad .....	66
<b>Ilustración 12-3:</b> Dimensiones de probetas para ensayo de tenacidad .....	67
<b>Ilustración 13-3:</b> Dimensiones de probetas para ensayo de tenacidad .....	67
<b>Ilustración 14-3:</b> Propiedad del material .....	68
<b>Ilustración 15-3:</b> Curva S-N .....	68
<b>Ilustración 16-3:</b> Pre proceso Mallado .....	69
<b>Ilustración 17-3:</b> Calidad mallado .....	69
<b>Ilustración 18-3:</b> Generaron como tetraedros, cuadriláteros .....	70
<b>Ilustración 19-3:</b> Condición de borde.....	70
<b>Ilustración 20-3:</b> Esfuerzo de Von Misses .....	71
<b>Ilustración 21-3-:</b> Esfuerzo de Von Misses .....	71
<b>Ilustración 22-3:</b> Simulación del ensayo de torsión .....	71
<b>Ilustración 23-3:</b> Simulación del pre proceso mallado .....	72
<b>Ilustración 24-3:</b> Simulación de condición del borde.....	72
<b>Ilustración 1-4:</b> Valores permisibles del espectrómetro. ....	74
<b>Ilustración 2-4:</b> Composición química obtenido en base al ensayo de espectrometría al acero de calibración.....	76
<b>Ilustración 3-4:</b> Diagrama de Schaeffler .....	79
<b>Ilustración 4-4:</b> Probetas con superficie tipo espejo.....	80
<b>Ilustración 5-4:</b> Microestructura del acero M303 para la realización de la prueba EDS.....	87
<b>Ilustración 6-4:</b> Diagrama de la prueba EDS del acero M303.....	87
<b>Ilustración 7-4-:</b> Microestructura del acero AISI 420 para la realización de la prueba EDS ....	88
<b>Ilustración 8-4-:</b> Diagrama de la prueba EDS del acero AISI 420 .....	89
<b>Ilustración 9-4-:</b> Microestructura del acero 17-4PH para la realización de la prueba EDS .....	90
<b>Ilustración 10-4-:</b> Diagrama de la prueba EDS del acero 17-4PH .....	90
<b>Ilustración 11-4-:</b> Microestructura del acero M303 a 40x tomada en el microscopio óptico Nikon. ....	91
<b>Ilustración 12-4-:</b> Microestructura del acero 17-4PH a 40x tomada en el microscopio óptico Nikon.....	93
<b>Ilustración 13-4:</b> Microestructura del acero M303 a 40x tomada en el microscopio óptico Nikon .....	94
<b>Ilustración 61-4-:</b> Representación del tamaño de grano de los aceros .....	96
<b>Ilustración 14-4-:</b> Dureza Rockwell .....	103
<b>Ilustración 15-4-:</b> Dureza Brinell .....	104
<b>Ilustración 16-4:</b> Curva Esfuerzo – Deformación para el acero M303.....	105

<b>Ilustración 17-4:</b> Curva Esfuerzo – Deformación para el acero 17-4PH .....	106
<b>Ilustración 18-4:</b> Curva Esfuerzo – Deformación para el acero AISI 420 .....	107
<b>Ilustración 19-4:</b> Representación del límite de fluencia y resistencia a la tracción de cada material.....	108
<b>Ilustración 68-4:</b> Representación del módulo de Young de cada material. ....	108
<b>Ilustración 20-4:</b> Curva Esfuerzo – Deformación para el acero M303.....	110
<b>Ilustración 21-4:</b> Curva S-N acero M303 .....	112
<b>Ilustración 22-4:</b> Curva S-N acero 17-4PH .....	113
<b>Ilustración 23-4:</b> Curva S-N acero AISI 420.....	114
<b>Ilustración 24-4:</b> Esfuerzo completamente invertido .....	115
<b>Ilustración 25-4:</b> Sistema de fuerzas .....	116
<b>Ilustración 26-4:</b> Par equivalente.....	116
<b>Ilustración 27-4:</b> Valores de deformación ANSYS.....	120
<b>Ilustración 28-4:</b> Esfuerzo cortante .....	120
<b>Ilustración 29-4:</b> Factor de seguridad.....	121
<b>Ilustración 30-4:</b> Curva Momento-Deformación acero M303 .....	122
<b>Ilustración 31-4:</b> Curva Momento-Deformación acero 17-4PH .....	123
<b>Ilustración 32-4:</b> Curva Momento-Deformación acero AISI 420 .....	124
<b>Ilustración 33-4:</b> Sistema viga empotrada en el extremo .....	125

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** DIAGRAMA DE PROCESO DE CARACTERIZACIÓN DE ACEROS M303, AISI 420 Y 17-4PH

**ANEXO B:** MONTAJE DE LA MUESTRA PARA ENSAYO DE TRACCIÓN.

**ANEXO C:** MUESTRAS 17-4PH DESPUÉS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN

**ANEXO D:** MUESTRAS AISI-420 DESPUÉS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN

**ANEXO E:** MUESTRAS M303 DESPUÉS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN

**ANEXO F:** MONTAJE DE LA MUESTRA PARA ENSAYO DE IMPACTO.

**ANEXO G:** MUESTRAS 17-4PH DESPUÉS DEL ENSAYO DE IMPACTO.

**ANEXO H:** MUESTRAS AISI-420 DESPUÉS DEL ENSAYO DE IMPACTO

**ANEXO I:** MUESTRAS M303 DESPUÉS DEL ENSAYO DE IMPACTO.

## RESUMEN

En la actualidad, la aplicación del acero inoxidable en la industria va en aumento debido a sus prestaciones y propiedades características; estos materiales son de alta demanda en el mercado ecuatoriano pero debido a su escasez se estudia la posibilidad que estos puedan ser reemplazados. El presente Trabajo de Integración Curricular tuvo como objetivo caracterizar la metalografía, evaluar y comparar las propiedades mecánicas de los aceros inoxidables M303, 17-4PH, AISI 420, garantizando su sustitución en el mercado. Se desarrollaron ensayos destructivos y no destructivos; se inició con el ensayo de espectrometría con lo cual se verificó que los aceros de estudio poseen un contenido de carbono y cromo dentro de los rangos permisibles y característicos de los aceros inoxidables. Se obtuvo micrografías de los aceros en estudio y se identificó que la micrografía en los tres aceros presentó martensita y ferrita; composición característica del acero inoxidable. Se realizó el análisis de inclusiones los acero 17-4PH y AISI 420 observando que las inclusiones en las muestras de los aceros M303, AISI 420 y 17-4Ph son de tamaño pequeño no son consideradas como puntos de inicio de fatiga, ruptura o fallo repentino en el material. Finalmente, las propiedades de los aceros en estudio poseen las propiedades necesarias para reemplazar la funcionalidad del acero M303, con lo cual se garantiza la sustitución del acero M303 por los aceros AISI 420 y 17-4Ph. Se puede concluir que el acero 17 – 4Ph es el más idóneo que cumple con características mecánicas similares o iguales al M303, se recomienda sustituir al acero M303 por el acero 17 – 4Ph y realizar ensayos físicos de torsión, fatiga para futuros estudios.

**Palabras clave:** <ACERO M303> <CARACTERIZACIÓN METALGRÁFICA >  
<ESPECTROMETRÍA > <INCLUSIONES > <PROPIEDADES MECÁNICAS >

0229-DRBA-UPT-2023



## SUMMARY

Currently, the application of stainless steel in industry is increasing due to its features and characteristic properties. These materials are in high demand in the ecuadorian market, but due to their scarcity, the possibility that they can be replaced is being studied. The objective of this Curricular Integration Work was to characterize the metallography, evaluate and compare the mechanical properties of stainless steels M303, 17-4PH, AISI 420, guaranteeing their substitution in the market. Destructive and non-destructive tests were developed. It began with the spectrometry test, with which it was verified that the study steels have a carbon and chromium content within the permissible and characteristic ranges of stainless steels. Micrographs of study steels were obtained and it was identified that the micrographs in the three steels showed martensite and ferrite; a characteristic composition of stainless steel. The analysis of inclusions to the 17-4PH and AISI 420 steels was carried out, observing that the inclusions in the samples of the M303, AISI 420 and 17-4Ph steels are small in size and are not considered as starting points of fatigue, rupture or sudden material failure. Finally, the properties of study steels have the necessary properties to replace the functionality of the M303 steel, which guarantees the replacement of the M303 steel by the AISI 420 and 17-4Ph steels. It can be concluded that 17 – 4Ph steel is the most suitable that meets similar or equal mechanical characteristics to M303. It is recommended to replace M303 steel with 17 – 4Ph steel and perform torsion and fatigue physical tests for future studies.

**Keywords:** <METALLOGRAPHIC CHARACTERIZATION> <STAINLESS STEEL>  
<SPECTROMETRY> <INCLUSIONS ANALYSIS> <MECHANICAL PROPERTIES>



**Lic. Sandra Paulina Porrás Pumalema**  
C.I. 0603357062

## INTRODUCCIÓN

Todos los materiales empleados en la cotidianidad poseen diversas propiedades físicas, químicas, sensoriales, etc.; las mismas que varían de acuerdo con la naturaleza de sus componentes y son quienes definen su aplicabilidad. El acero es un material ampliamente utilizado en aplicaciones ingenieriles como: elementos de refuerzo, máquinas o estructuras; por lo cual, es importante estudiar sus propiedades para conocer su compatibilidad con otros materiales y extender su campo de aplicación. Por tal motivo, el presente Trabajo de Integración Curricular tiene como objetivo realizar la caracterización metalográfica de los aceros inoxidable M303, 17-4PH y AISI 420; para evaluar y comparar sus propiedades mecánicas.

En cuanto a los aceros inoxidables, estos tienen como propiedades comunes la elevada resistencia a agentes abrasivos, su resistencia y ductilidad; las mismas que varían en función a sus componentes químicos y estructuras metalográficas. El acero M303 se caracteriza por ser martensítico templado y tener elevada tenacidad, resistencia al desgaste y a la corrosión. Es ampliamente usado en la fabricación de herramientas de alta presión para inyección de moldes de plástico, de sujeción y sistemas de climatización. A nivel general, no se cuenta con amplios estudios de caracterización metalográfica y en Ecuador, no existe basta disponibilidad comercial de este acero por lo que las empresas industriales tienen inconvenientes al momento de su adquisición. Por ende, debido a la falta de oferta de este material en el mercado es importante comparar propiedades mecánicas de otros aceros que brinden las mismas prestaciones que el M303 y que permitan sustituirlo de forma más rápida sin la necesidad de tener que esperar un tiempo para su importación.

La resistencia del acero M303 según el catálogo del proveedor tiene un valor de propiedades mecánicas características del acero M303 En el presente estudio, se analizarán y se contrastarán las propiedades mecánicas del acero 17-4PH y el AISI 420, con el fin de verificar si sus propiedades pueden compensar los requerimientos del acero M303. El acero 17-4 corresponde a la familia de los aceros inoxidables martensíticos endurecidos por envejecimiento con excelente resistencia a la corrosión, tensión y dureza; sus propiedades permiten que este sea utilizado como un material sustituto de otros aceros inoxidables; mientras que, el acero AISI 420 es también un acero martensítico con resistencia leve a ambientes corrosivos, pero con baja resistencia a la dureza y desgaste.

## CAPÍTULO I

### 1 DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

En la actualidad, el acero inoxidable tiene una infinidad de aplicaciones en el mundo industrial por lo que su uso exige de una alta demanda en el mercado. En Ecuador, varios sectores productivos requieren dotarse de herramientas fabricadas en materiales específicos según su aplicación, pero tienen la desventaja de no contar siempre con materia prima en el país. Por este motivo, se han visto obligados a importar material lo que resulta un desaprovechamiento de recursos y tiempo. El presente estudio tiene como objetivo caracterizar el acero M303 mediante el análisis metalográfico y la evaluación de sus propiedades mecánicas, para contrastarlas con las propiedades presentadas por los aceros 17-4PH y AISI 420; y con ello determinar si estos aceros pueden reemplazar al M303 para facilitar su sustitución y el aprovechamiento de recursos. En el capítulo I, se realizará la evaluación de resultados previos obtenidos para las propiedades del acero M303 además se especificará el alcance teórico – práctico propuesto en la presente investigación.

#### 1.1 Antecedentes

En los últimos 150 años, los metalúrgicos han aprendido a fabricar varios tipos de acero y aleaciones controlando su rendimiento y produciéndolo en masa con altos niveles de calidad, no es hasta que en el siglo XIX. Quillet fue la primera persona en producir y explorar, metalúrgica y mecánicamente los aceros inoxidables en las composiciones principales: austeníticos, ferríticos y martensíticos. Además, determinó que poseen una excelente resistencia a la corrosión de los aceros aleados al cromo por lo cual consiguieron un considerable consumo en la industria al introducir el acero inoxidable. Sus aplicaciones se extienden hacia la industria química, petroquímica, energía, plantas de gases de combustión e industria alimentaria, en transporte, en la construcción, en ingeniería civil y petrolera (Bastón, N, 2018).

La caracterización metalográfica de un acero es importante debido a que permite el reconocimiento de las propiedades mecánicas de los materiales metálicos. El acero M303 posee excelentes propiedades de resistencia mecánica, dureza y maquinabilidad, en comparación con otros aceros austeníticos. En cuanto a la resistencia a la corrosión, el contenido de azufre en estos aceros la disminuyen por lo que requiere ser combinado con otros elementos para mejorar esta propiedad sin afectar las propiedades mecánicas características. Según el estudio denominado *“Investigation of possibility for reducing AISI 303 stainless steel pitting corrosion by*

*microalloying with boron or zirconium*”, se determinó que al añadir boro o circonio en la composición del acero M303 presenta mayor intensidad de la corrosión por picaduras de acero inoxidable, además, concluyeron que una mayor concentración de NaCl produce a un incremento de corrosión por picaduras en todas las muestras analizadas (Farzet & Derviš, 2014, p.43).

El acero inoxidable austenítico M303 se utiliza en diversas aplicaciones ingenieriles y de mecanizado en la industria, especialmente en aquellas en las que la resistencia a la corrosión es relevante. Sin embargo, este material es susceptible a daños producidos en la superficie como: la ocurrencia de transformaciones de fase durante la fabricación o incluso durante el uso, debido a que presentan una elevada capacidad de cambio de fase durante la fabricación e incluso por el elevado endurecimiento de trabajo. En el trabajo denominado *“Analysis of abrasion mechanisms in the AISI 303 stainless steel: Effect of deformed layer”* se estudió el comportamiento mecánico del acero AISI 303 mediante pruebas de rayado tomando en cuenta la presencia de inclusiones de sulfuro de manganeso; de estos estudios, se concluyó que la tendencia a la disminución de la masa cuando se considera la capa endurecida por la deformación y que la superficie endurecida por deformación aumentó la resistencia del material frente al rayado (Seriacopi et al., 2016).

En el trabajo denominado *“Metallography and Microstructures of Stainless Steels and Maraging Steels”*, se han observado varios tipos de sulfuros en grados austeníticos cuyo contenido de manganeso es bajo. Debido a esto, los sulfuros de manganeso en grados austeníticos desulfurados tipos 203 - 303 son bastante duros y de baja maquinabilidad. Además, la austenita en estos grados es metaestable y la martensita se forma al momento de enfriar los especímenes con geometría hexagonal compacta no magnética y martensita cúbica centrada en el cuerpo (bcc) magnética. Esto ha mostrado que la composición influye en la resistencia del acero M303. Debido a que los grados austeníticos se endurecen rápidamente, el corte y el esmerilado deben ejecutarse con cuidado para minimizar la deformación en este tipo de acero. De esto, concluyeron que los grados martensíticos de alta dureza con cantidades sustanciales de carburo y cromo sin disolver, son difíciles de pulir (Vander & Lucas, 2004, p.685).

A. Akhiate, E. Braud, D. Thibault y M. Brochu de la Escuela Politécnica de Montreal y del Instituto de Investigación Hidráulica de Québec, en el año 2014, abordaron sobre los efectos del contenido de carbono y tratamiento térmico sobre la microestructura del acero inoxidable martensítico en placas que fueron normalizadas, templadas al aire y revenidas a 550 y 610 °C, observándose que independientemente de la condición de revenido, la dureza y resistencia del material es mayor en el acero con más alto contenido de carbono mientras que la dureza decrece con el incremento de la temperatura y tiempo de sostenimiento de revenido (Auz, J, 2011).



## **1.2 Delimitación**

### ***1.2.1 Delimitación espacial***

El presente proyecto está delimitado espacialmente a un nivel provincial, el cual se llevó a cabo con la autorización de la Empresa Sertecpet S.A., para la producción de las probetas de ensayos destructivos en el campamento base ubicado en el Cantón Francisco de Orellana, Provincia de Orellana, mientras que la investigación se complementará con la información teórica realizada en la Facultad de Ingeniería Mecánica, detallando el laboratorio de ingeniería de materiales de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ubicada en la provincia de Chimborazo

### ***1.2.2 Delimitación sectorial***

La presente investigación tendrá aplicación en los sectores productivos de la empresa Sertecpet S.A, dedicada a la generación de soluciones integrales para el sector energético y en el desarrollo tecnológico e industrial en áreas estratégicas del país, como la industria petrolera.

## **1.3 Formulación del problema**

Actualmente en el sector industrial de nuestro país existe poca información acerca de los aceros martensíticos M303, 17-4PH y AISI 420, debido a la falta de información de propiedades mecánicas y composiciones químicas del acero M303 empleado en componentes mecánicos de la bomba Jet Claw, piezas mecánicas y demás accesorios, se ha impulsado el desarrollo de este tema debido al desabastecimiento de este acero en el país en específico en la planta de producción de la empresa SERTECPET S.A. originado por la guerra que se vive en el mundo se busca sustituir este material por un acero de similares o mejores características mecánicas por los aceros 17-4PH o AISI420.

## **1.4 Objetivos**

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

Caracterizar metalográficamente, evaluar las propiedades mecánicas del acero m303, comparar y sustituir entre los aceros 17-4PH y AISI 420

### ***1.4.2 Objetivos específicos***

- Estudiar las normas establecidas para realizar los ensayos de tracción, dureza y tenacidad.
- Obtener las probetas para los ensayos de tracción, tenacidad y dureza según las normas correspondientes

- Analizar la incidencia del tamaño de grano e inclusiones en las propiedades mecánicas.
- Realizar los ensayos de tracción, tenacidad y dureza para la evaluar las propiedades mecánicas de los aceros.
- Contrastar la metalografía obtenida para el acero M303 con la de los aceros 17-4PH y AISI 420, para validar su sustitución mediante la evaluación de sus propiedades mecánicas.
- Realizar la simulación de los ensayos de fatiga y torsión en ANSYS

## CAPITULO II

### 2 MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se realiza la fundamentación teórica de las variables en estudio, partiendo desde la definición básica de metalografía, procedimiento, propiedades mecánicas características de los aceros (M303, AISI 420, 17-4PH), micrografías, fases constituyentes y aplicaciones de estos aceros en la industria.

#### 2.1 Metalografía

La metalografía es el estudio de las características microscópicas y estructurales de metales o aleaciones, cuya técnica permite determinar microestructuras, inclusiones, tratamientos térmicos y hallar la presencia de material fundido, forjado y laminado. Se puede visualizar la distribución de fases de las aleaciones constituyentes e inclusiones no metálicas, la presencia de segregaciones y otras irregularidades, permite determinar el tamaño de grano, forma y distribución de sus fases que tienen un gran efecto sobre las propiedades mecánicas de los materiales y podrá predecir su comportamiento esperado (Díaz, 2019: pp. 130).

#### 2.2 Procedimiento metalográfico

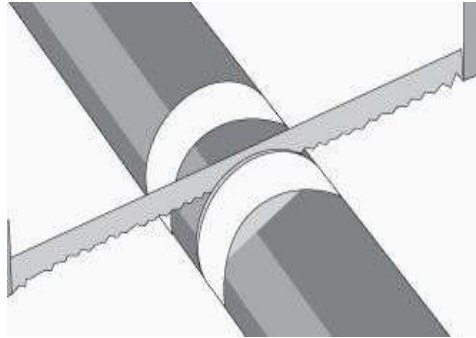
El análisis metalográfico tiene por objetivo investigar los constituyentes y estructuras de los metales o aleaciones por medio de un microscopio óptico de luz o electrónico de barrido. Este procedimiento es estandarizado por la norma ASTM E3 “*Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*”, quien brinda los detalles y condiciones necesarias para el test. En este documento se indica: la selección de los especímenes (dimensiones, geometría), las etapas de su preparación, limpieza, y procedimientos especiales.

##### 2.2.1 Corte

Este es el primer paso en la preparación metalográfica para obtener una muestra representativa, la muestra seleccionada debe ser característica del metal en estudio y debe cumplir con el propósito para el cual se realiza el análisis metalográfico, no se debe cortar en un plano perpendicular a la dirección de laminación si se va a estudiar la microestructura del material (Marín, 2019).

El corte con sierra produce duras condiciones de trabajo en frío y cortar de esta manera da como resultado superficies irregulares con irregularidades en su superficie excesivos, lo que toma más

tiempo para aplicar técnicas de preparación de muestras. Normalmente, este tipo de corte se utiliza para extraer muestras de bloques muy grandes, para luego realizar el corte abrasivo según los requisitos necesarios (García & Arenas, 2017).



**Ilustración 1-2:** Corte con sierra cinta o con arco con seguenta

Fuente: García & Arenas, 2017



**Ilustración 2-2:** Discos de corte y cortadora de muestras

Fuente: García & Arenas, 2017

El corte de disco es el más utilizado debido a que la superficie resultante es suave y la velocidad de corte es rápida. Los discos de corte abrasivos están hechos de granos abrasivos, como óxido de aluminio o carburo de silicio, adheridos a caucho u otros materiales. Los discos con aglomerante de caucho se usan comúnmente para el corte en húmedo; los discos resinosos se usan para el corte en seco

### 2.2.2 *Desbaste*

El proceso de lijado, también conocido como proceso de desbaste, está diseñado para lograr una superficie plana y semipulida en la zona metálica en estudio. Se utiliza papel de lija compuesto

de carburo de silicio de grano reducido para obtener una superficie plana y sin marcas en los extremos. La segunda etapa de preparación de la muestra se inicia con un medio de lija y agua, para lo cual se deberá presionar la muestra contra la lija, primero en una dirección hasta que se vean rayas uniformes en esa dirección, y luego verticalmente hasta que desaparezcan las rayas anteriores, después de esto, se pasa a la siguiente lija de grano más fino para eliminar gradualmente los rayones y hacerlos más finos hasta que la muestra esté lista para el pulido espejo, se utilizaran varios calibres de lija regular empezando desde la 240, 320, 400, 600 1000, 1200 y 1500, alrededor de 4 a 6 horas por cada tipo de lija ya que se trata de aceros inoxidable (Marín, 2019).



**Ilustración 3-2:** Banco para desbaste de probetas

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

### **2.2.3 Pulido**

El pulido espejo es el último paso en el proceso de preparación metalográfica, su propósito es eliminar los rayones del pulido y obtener una superficie perfectamente plana y reflectante, lista para el grabado y la microscopía.

Para pulir, se debe utilizar una almohadilla o paño de billar y una sustancia acuosa de partículas abrasivas, en nuestro caso alúmina (Óxido de aluminio) el cual funciona como un abrasivo que remueve material por contacto entre el paño y la probeta, con un flujo de agua mucho menor que el utilizado en el lijado, solo para evitar que el pulimento se seque por completo, normalmente se utiliza una velocidad de 450 a 1000 rpm dependiendo la necesidad del material (Reyna, 2022).



**Ilustración 4-2:** Pulidora metalográfica

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

### 2.3 Ataque Químico

El ataque químico que permite realizar un aumento del contraste entre las fases y microconstituyentes de la aleación, de modo que se pueda efectuar una observación y un análisis metalográfico con resultados de calidad, incluye probar la estructura del metal o aleaciones, este tipo de ataque consiste en sumergir la muestra metalográfica en algún tipo de reactivo, o pasándolo con un algodón empapado con los reactivos en la superficie de la muestra haciéndolos reaccionar a diferentes velocidades, luego se procede a enjuagarlo bien con agua, alcohol o éter y realizar un secado con corriente de aire (Díaz, 2019).

En la Tabla 1-2 se muestran los principales tipos de ataques químicos y sus usos.

**Tabla 1-2:** Tabla de principales ataques químicos

ALEACIÓN	REACTIVO	CONDICIONES	CARACTERÍSTICAS
	100 ml alcohol etílico 96% 1-10 ml ácido nítrico (NITAL)	Segundos a minutos	Utilizable para aceros al carbono, aceros aleados y fundición gris. Las segregaciones pueden producir un ataque irregular

<b>ACEROS</b>	100ml alcohol etílico 2-4gr ácido pírico (PICRAL)	Segundos a minutos	Reactivo para todo tipo de aceros con o sin tratamiento térmico
	100ml alcohol etílico 96% 20ml ácido clorhídrico	5 a 10 minutos	Distinguir entre martensita cubica y tetragonal Aceros al Ni
	1 gr acido pírico 5ml ácido clorhidrico 100ml etanol (VILELLA)	Segundos a minutos	Aceros inoxidables con alto contenido de Cr Aceros moldeados al Cr-Ni
<b>COBRE</b>	100-200ml de alcohol etílico 20-50ml ácido clorhídrico 5-10gr cloruro férrico	Segundos a minutos	Cobre y todos los tipos de cuproaleaciones Contrasta el grano
	80ml agua destilada 5ml ácido sulfúrico 10gr Dicromato potásico	3 a 30 segundos Inmediatamente luego de su uso añadir dos gotas de ácido clorhídrico	Cobre y todos los tipos de cuproaleaciones Se puede usar después del reactivo anterior
<b>TITANIO</b>	92ml agua destilada +6ml HF + 2ml HNO3 (Reactivo de Krolls)		Aleaciones de titanio
<b>ALUMINIO</b>	190ml de agua destilada 5-10 ml de ácido nítrico 3-6ml de ácido clorhídrico 2-4 ml de ácido fluorhídrico	10 a 30 segundos	Para la mayoría de las aleaciones de aluminio, excepto las que tengan gran contenido de silicio
	100ml de agua destilada 1-2 gr hidróxido sódico	5 a 10 segundos a 50C	Aluminio puro, Cu-Al, Zn-Al, Mg-Si-Al
<b>NIQUEL</b>	20-100ml de agua destilada 2-25ml ácido clorhídrico 5-8gr cloruro férrico	5 a 6 segundos	Aleaciones Ni-Fe, Ni-Cu, Ni-Ag

Fuente: Diaz.F, 2020

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

## 2.4 Examen microscópico

Se lo realiza a través de un microscopio que es un instrumento que permite observar objetos que son demasiado pequeños para observar a simple vista. El tipo más común es el microscopio óptico que contiene dos o más lentes que adquieren una imagen ampliada de objetos, actuando a través de la refracción (Díaz, F, 2020).

### 2.4.1 *Microscopio metalográfico*

Los microscopios metalográficos pueden observar metales y componentes electrónicos en estudio con una mayor resolución de imagen que permite la observación de cristales metálicos, segregaciones producidas por el tratamiento mecánico durante el proceso de fundición. Según la finalidad de uso, existen muchas variedades según el tipo de uso, objetivo, ocular, aumento máximo permitido, enfoque. La diferencia entre un microscopio metalográfico y un microscopio óptico es que el microscopio metalográfico permite observar la luz reflejada en la superficie de la probeta de ensayo, mientras que en óptica se observa la luz al atravesar la muestra (Trejo, 2017).



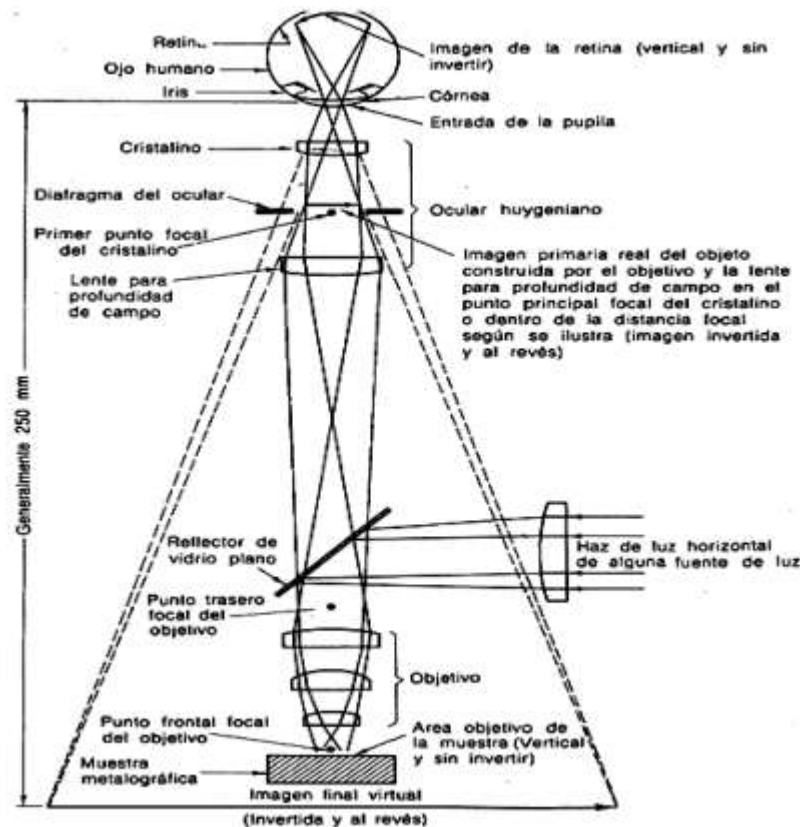
**Ilustración 5-2:** Microscopio metalográfico

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

Su funcionamiento se basa en la reflexión de un haz horizontal de una fuente de luz, la reflexión se produce, a través del reflector de vidrio plano, hacia abajo, a través del objetivo del Microscopio sobre la superficie de la muestra. Parte de esta luz incidente de la superficie de la muestra se ampliará a medida que pasa a través del sistema de lentes inferior, alcanzando el objetivo y continúe a través del reflector de vidrio plano.



En un sistema óptico compuesto, se combinan los aumentos de dos lentes o sistemas de lentes. Ambos son convergentes y se colocan al final de un tubo recto con un eje óptico común: el llamado objetivo, que se encuentra cerca del objeto que se observa, y el llamado ocular, que se encuentra cerca del ojo. Las imágenes resultantes son virtuales e invertidas., el aumento total de este dispositivo óptico es el producto de la ampliación de la primera lente y la segunda lente (Trejo, 2017).



**Ilustración 6-2:** Principio del microscopio metalográfico

Fuente: Trejo, 2017

Los microscopios utilizados en metalografía se caracterizan por tener un sistema de iluminación por reflexión, su plato es movable, y en algunos casos la muestra es movable.

El microscopio metalográfico consta de cuatro partes:

- Sistema de iluminación: una lámpara y un colimador para enfocar la luz y para concentrar los rayos en el sistema objetivo.
- Sistema objetivo: consta de múltiples lentes, un diafragma de entrada de luz o Diafragma de apertura y diafragma de campo.

- Sistema de oculares: hay prismas y lentes reflectantes en el tubo ocular
- Sistema de fotografía: tiene varias lentes y un reflector que posee un vidrio despolido para proyectar la imagen antes de tomar la foto.

## 2.5 Microscopio electrónico de barrido (sem)

La técnica SEM (Scanning Electron Microscopy) se realiza en microscopios electrónicos, las imágenes de microscopía electrónica de barrido se obtienen a partir de la señal emitida por la muestra y se generan a medida que el haz de electrones se mueve sobre una parte de la superficie. Este escaneo se realiza sobre una pequeña línea rectangular la resolución define la calidad de cualquier microscopio y puede definirse como la dimensión más pequeña que puede detectar. La resolución se especifica en unidades de tamaño, nanómetros (nm) o angstroms (Å), conocidas ( $1\text{Å}=0.1\text{nm}$ ). Una mejor resolución corresponde a un valor más pequeño para esa dimensión (Cargua, 2019).

### 2.5.1 Principio de funcionamiento

Los electrones son creados por el efecto termoiónico en un filamento, que a su vez es el cátodo, generalmente hecho de tungsteno, estos electrones son acelerados por un campo eléctrico en un sistema de vacío, por lo que todos los electrones obtienen la misma longitud de onda  $\lambda$ . Se dice que la longitud de onda relevante es  $0,037\text{ Å}$  para un voltaje de  $100\text{ [kV]}$ , se pueden obtener longitudes de onda más finas si se aumenta la energía, y la técnica SEM que utiliza electrones secundarios de baja energía ( $<50\text{ eV}$ ) emitidos desde la superficie puede producir imágenes nítidas. Si la muestra no es un conductor de carga, se puede aplicar una fina capa de un metal conductor, como el oro para facilitar la emisión de electrones desde la superficie del material.



**Ilustración 7-2:** Microscopio electrónico de barrido

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

Se debe tomar en cuenta algunas consideraciones en la infraestructura del equipo y lugar de instalación.

- Fuente de alimentación estable
- Sistema de vacío
- Sistema de refrigeración
- Piso sin vibraciones
- Habitación libre de campos magnéticos y eléctricos ambientales (Cargua, 2019).

En la tabla 2-2 se muestra una comparación entre las principales características y diferencias de los Microscopios Óptico y Electrónico

**Tabla 2-2:** Comparación entre las características de los Microscopios Óptico y Electrónico

<b>Características</b>	<b>Óptico</b>	<b>Electrónico</b>
Haz luminoso	Haz de luz	Haz de electrones
Longitud de onda	7500 Å (visibles)	0,086 Å (20 kV)
	2000 Å (ultravioleta)	0,037 Å (1000 kV)
Medio	Atmósfera	Vacío
Lente	Cristal	Electroestáticos
Poder de resolución	2000 Å	3 Å
Aumento	Hasta 2000x	Hasta 1 000 000x
Enfoque	Mecánico	Eléctrico
La muestra requiere de un tratamiento previo	No siempre	Siempre
Imagen producida en color	Si	No

Fuente: Diaz, 2020

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

## 2.6 Espectrometría de masa

Con el fin de cuantificar la composición química de cada uno de los elementos presentes en cada acero inoxidable se procede a aplicar la técnica de espectrometría a cada muestra. La espectrometría de emisión óptica de chispa (OES), se basa en cuantificar los diferentes elementos químicos que conforma un material metálico basándose en el principio de descomponer la luz producida por una chispa eléctrica en diferentes longitudes de onda, para finalmente convertir

estos impulsos en corriente eléctrica y poder presentar los resultados como valores porcentuales en el computador

## **2.7 Inclusiones No metálicas**

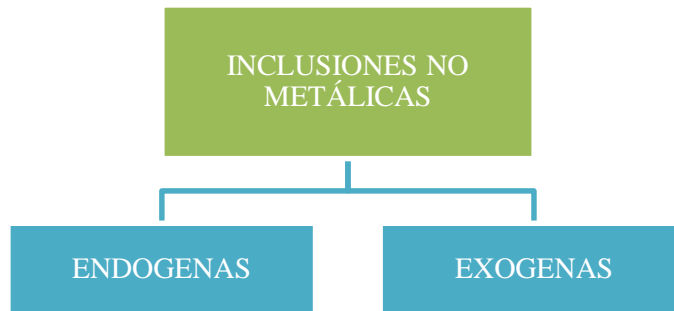
Las inclusiones no metálicas son compuestos de metales y no metales que existen en aceros y aleaciones. Estas inclusiones son microscópicas tienen un tamaño menor o igual a 300  $\mu\text{m}$ , compuestas principalmente de productos de desoxidación y pueden aparecer cerca de la capa superficial inferior, en la zona de sedimentación de la muestra y en la superficie superior

Existen varias razones para la aparición de inclusiones no metálicas como:

1. Inclusiones residuales no metálicas, como óxidos, sulfuros, formados en la colada de los aceros
2. Producidos por la mezcla de materiales fundidos.
3. La existencia de inclusiones no metálicas es inevitable para el acero. Las inclusiones no metálicas generalmente no se consideran defectos

Las inclusiones no metálicas indican que los aceros con la misma composición química y estructura pueden tener diferentes propiedades mecánicas y por lo tanto su aplicación o propiedades serán diferentes. El efecto de las inclusiones no metálicas sobre la calidad del acero está determinado por su cantidad, composición química, forma y distribución.

### 2.7.1 Clasificación de las inclusiones no metálicas



**Ilustración 8-2:** Inclusiones no metálicas

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

### 2.7.2 Inclusiones no metálicas Endógenas

Las inclusiones endógenas son el resultado de reacciones fisicoquímicas que tienen lugar en el acero o precipitación cuando superan el límite de solubilidad, mediante la precipitación de óxidos, sulfuros, oxisulfuros, nitruros, carburos y otras sustancias en aceros líquidos o sólidos formados en el resultado de los cambios de temperatura.

Suelen estar compuestos por óxidos y sulfuros, y se caracterizan por su pequeño tamaño. Las reacciones que los forman pueden ser inducidas por adición al acero o simplemente por cambios en la solubilidad durante el calentamiento y enfriamiento del acero.

### 2.7.3 Clasificación inclusiones no metálicas Endógenas.



**Ilustración 9-2:** Inclusiones no metálicas endógenas

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

**Primarias:** Se forma durante la desoxidación del acero. Estas inclusiones tienden a agruparse y escurrirse fácilmente del líquido.

**Secundarias:** Se forma por la agregación de inclusiones formadas en la primera desoxidación e inclusiones modificadas por metales alcalinos (Ca, Mg, Ba) durante la colada continua.

**Terciarias:** Se forma durante el enfriamiento en la región interdendrítica del acero, antes de llegar al liquidus. Por lo general, vienen en tamaños extremadamente pequeños, por lo que a menudo permanecen retenidas en el sólido.

**Cuaternarias:** Se forma durante el enfriamiento de un metal en la región bifásica del mismo, es decir, entre la fase liquidus-solidus y por debajo de la temperatura de solidus.

#### **2.7.4 Inclusiones no metálicas Exógenas**

Las inclusiones no metálicas exógenas resultan de la unión mecánica de escoria, refractario u otros materiales en contacto con el baño metálico. Las inclusiones no metálicas exógenas también pueden ser productos de la Re oxidación del acero, la presencia de tales inclusiones se puede evitar tomando las medidas apropiadas durante la operación de fundición del acero.

Estas inclusiones suelen ser de gran tamaño, aunque no necesariamente por su tamaño se consideraría una inclusión exógena, tienen formas irregulares y estructuras complejas, aparecen esporádicamente y su ubicación preferencial es de acuerdo al proceso de solidificación.

Según las clasificaciones encontradas en la literatura científica, las inclusiones exógenas son mayores de 20 micras y las inclusiones endógenas son menores de 20 micras.

#### **2.7.5 Métodos de evaluación del contenido de inclusiones no metálicas en Aceros**

Existen varios métodos para determinar el contenido de inclusiones no metálicas en el acero. Estos métodos pueden ser macroscópicos y microscópicos, según el tipo de acero y las propiedades a evaluar.

##### **2.7.5.1 Método macroscópico**

Estos métodos incluyen pruebas de macroataque, fractura e inspección de partículas magnéticas. Estos métodos evalúan áreas de superficie más grandes que los métodos microscópicos, por lo que la inspección es visual o de bajo aumento.

Este método es adecuado para detectar grandes inclusiones que puedan aparecer en el acero.

### 2.7.5.2 Método Microscópico

En este método, las inclusiones se asignan a una clase en función de la similitud morfológica. Las inclusiones se caracterizan por su tamaño, forma, concentración y distribución, más que por su composición química exacta.

Los métodos microscópicos solo se utilizan para caracterizar las inclusiones endógenas y no pueden determinar el contenido de las inclusiones exógenas, ni determinar el contenido de carburo, carbonitruro, nitruro, boruro o fases intermetálicas.

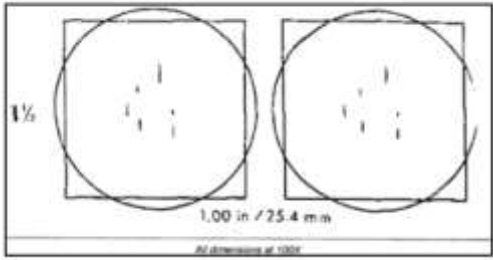
Debido a su aparición esporádica ya lo impredecible de su distribución, los resultados de las pruebas de ambos métodos se pueden utilizar para identificar materiales.

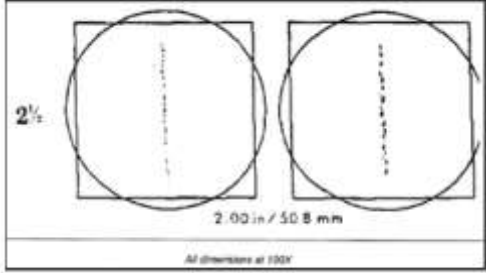
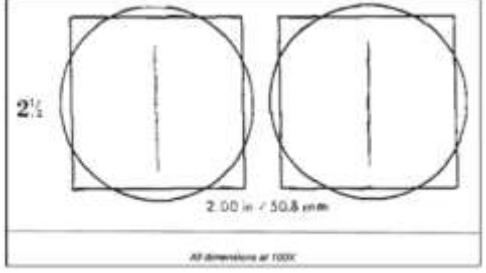
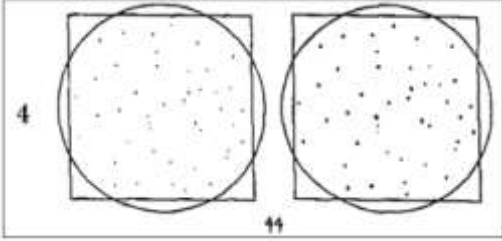
Los criterios de elegibilidad para la evaluación de datos proporcionados por estos métodos pueden basarse en estándares internacionales para lo cual se utilizará la norma ASTM E45 (Gamboa & Quispe, 2009).

### 2.7.6 Tipos de inclusiones de acuerdo con la norma ASTM E45

Según la norma ASTM E45 clasifica las inclusiones no metálicas en:

**Tabla 3-2:** Tipos de inclusión de acuerdo a la Norma ASTM E45

SEGÚN SU MORFOLOGÍA	TIPOS DE INCLUSIÓN	FIGURA
SULFUROS: Forman cadenas largas de inclusiones	TIPO A	

<p>ALUMINA: Este tipo de inclusiones está formado por cadenas discontinuas, tienen un desfase menor a 15um y una separación menor a 40um</p>	<p>TIPO B</p>	
<p>SILICATOS: Está formado por cadenas solidas de inclusiones en el sentido de laminación del material</p>	<p>TIPO C</p>	
<p>OXIDOS GLOBULARES: Este tipo de inclusiones no son tan alargadas y no forman cadenas, estas dispersas por toda la muestra</p>	<p>TIPO D</p>	

Fuente: Diaz, 2020

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

## 2.8 Tamaño de grano

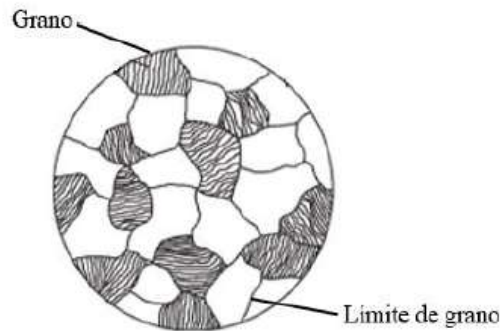
El tamaño de grano del acero depende directamente de la tasa de enfriamiento del acero, ya que la tasa de crecimiento del grano depende de la tasa de nucleación presente, que a su vez depende de la tasa de enfriamiento. El tamaño del grano también está relacionado con el número de núcleos formados, por lo que cuando el número de núcleos es grande, el tamaño del grano será pequeño, y si el número de núcleos es pequeño, el tamaño del grano será grande.

Cuando existe un enfriamiento rápido se produce una formación de gran cantidad de núcleos, lo que resulta en un espacio insuficiente para que crezca el cristal, lo que resulta en la formación de pequeños granos. Por el contrario, al enfriarse lentamente, se forman pocos núcleos, dejando mucho espacio para que avancen las dendritas o los cristales. Los materiales de grano fino tienen alta tenacidad y dureza en comparación con los materiales de grano grueso.



La norma empleada para determinar el tamaño de grano es la ASTM E-112 la cual detalla breves conceptos:

- Grano: Es un monocristal que forma parte de una estructura cristalina con diferente orientación, pero con la misma configuración atómica que un material policristalino.
- Límite de grano: Es una estructura estrecha formada por granos individuales con núcleos distintos.



**Ilustración 10-2:** Tamaño de grano ASTM E-112

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

Las propiedades mecánicas son sensibles a los cambios en su tamaño de grano, y controlar el crecimiento de grano ayudará a mejorar algunas propiedades como: dureza, resistencia a la fatiga, impacto y tracción, incluso beneficiará el proceso de mecanizado debido a que el mecanizado en desbaste es favorable a la presencia de granos gruesos, mientras que el mecanizado de acabado superficial se beneficia de la presencia de granos finos, el tamaño de grano tiene una mayor influencia en el comportamiento en las propiedades que están en la primera etapa de deformación, que pasa a ser el límite elástico, debido a que existe una mayor interacción de granos finos en su estructura o una interacción de granos gruesos. (Lanas & Proaño, 2011)

## 2.9 Aceros

El acero es una aleación de hierro y carbono con un contenido de carbono entre 0,008% y 2%. Las propiedades físicas del acero y su comportamiento a diferentes temperaturas dependen ante todo de la cantidad de carbono y su distribución. Antes del tratamiento térmico, la mayoría de los aceros son una mezcla de ferrita, perlita y cementita. La ferrita blanda y dúctil es hierro con pequeñas cantidades de carbono y otros elementos en solución. La cementita es un compuesto de hierro con un 6,67% de carbono, muy duro y quebradizo. La perlita es una mezcla de ferrita y cementita con una composición específica y estructura característica, sus propiedades físicas son intermedias entre sus dos componentes. La resistencia y la dureza del acero sin tratar

térmicamente dependen de la proporción de estos tres componentes. Cuanto mayor es el contenido en carbono de un acero, menor es la cantidad de ferrita y mayor la de perlita: cuando el acero tiene un 0,8% de carbono, está compuesto de perlita. El acero con cantidades de carbono mayores es una mezcla de perlita y cementita (García & Arenas, 2017)

### **2.9.1 Clasificación del acero**

El acero se divide en cinco categorías según su aplicación: acero al carbono, acero aleado, acero de baja aleación de alta resistencia, acero inoxidable y acero para herramientas.

#### **2.9.1.1 Aceros al carbono**

El 90% del acero es carbono, estos aceros contienen cantidades variables de carbono, con menos del 1,65 % de manganeso y alrededor del 0,6 % de silicio. Con este acero se fabrican máquinas, carrocerías, estructuras de edificios, horquillas, percheros, etc.

#### **2.9.1.2 Aceros aleados**

Estos aceros están compuestos por elementos como vanadio, molibdeno, en determinadas proporciones, además de contener mayor cantidad de manganeso, silicio y cobre que los aceros al carbono. Estos aceros se utilizan para fabricar engranajes, ejes, cuchillos y más.

#### **2.9.1.3 Aceros de baja aleación ultrarresistente**

Estos aceros son más baratos que los aceros convencionales porque contienen material de aleación menos costoso, sin embargo, están especialmente tratados para darles una resistencia eléctrica mucho mayor que el acero al carbono. Este material se utiliza para fabricar furgonetas porque es más duradero y tiene paredes más finas y por tanto mayor capacidad de carga. Además, debido a su menor peso, también pueden llevar más peso, también se utiliza para hacer estructuras de edificios.

#### **2.9.1.4 Aceros inoxidables**

Estos aceros contienen níquel y más del 15% de cromo que los hacen resistentes a la oxidación. Algunos aceros inoxidables son muy duros, mientras que otros son muy resistentes a la corrosión y pueden mantener esa resistencia durante largos periodos de tiempo en temperaturas extremas. Debido a su brillo, los arquitectos lo utilizaron mucho con fines decorativos.

### 2.9.1.5 Aceros de herramientas

Estos aceros se emplean para fabricar herramientas, cabezales de corte y modelado de máquinas. Contiene wolframio, molibdeno y otros elementos de aleación que le proporcionan una alta resistencia, dureza y durabilidad.

**Tabla 4-2:** Clasificación del acero por su composición química

Acero	Composición	Aplicación
Acero de bajo carbono	Hasta 0,3% de carbono	Acero de construcción Fácil de soldar Perfiles y barras estructurales
Acero de medio carbono	Hasta 0,7% de carbono	Partes de maquinarias, ejes, engranajes, cigüeñales
Aceros de alto carbono	Hasta 1,7 % de carbono	Resortes, troqueles, herramientas de corte, engranajes
Aceros de baja aleación	Fe + 0,2C 0,8Mn 1Cr 2Ni	Aceros estructurales de alta resistencia Recipientes a presión
Aceros de alta aleación	Fe + 0,1C 0,5Mn 18Cr 8Ni	Aceros inoxidables, para altas temperaturas y medios de corrosión

Fuente: García & Arenas, 2017

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

## 2.9.2 Componentes principales del acero

En el acero, como en todas las aleaciones, existe evidencia de que la presencia de elementos químicos aleantes, dependiendo de su concentración, pueden cambiar sus propiedades, haciendo que este material sea más fácil de adaptar a las necesidades requeridas por la industria, tales como: resistencia al desgaste y a la corrosión, elasticidad, deformación, etc.

### 2.9.2.1 Hierro (Fe)

El hierro es el principal constituyente del acero, se encuentra en abundancia en la corteza terrestre, en estado sólido es policristalino, como todos los metales, es decir tiene muchos cristales unidos en sus límites, un cristal es un arreglo ordenado de átomos mejor representados como esferas en contacto entre sí, estos cristales están dispuestos en planos que se penetran entre sí de una manera

específica. Para el hierro, la disposición de la red se visualiza mejor con un cubo unitario con ocho átomos de hierro en las esquinas.

El hierro cuenta con una característica muy importante y al tratarse de un metal alotrópico puede variar su estructura cristalina, para el acero existen dos formas cristalinas de hierro: la cubica centrada en el cuerpo (bcc) y cubica centrada en la cara (fcc). Es importante que los lados del cubo centrado en la cara, o las distancias entre las redes vecinas en la disposición fcc, sean aproximadamente un 25% más grandes que en la disposición bcc; Esto significa que hay más espacio en el fcc que en la estructura bcc para mantener átomos de elementos aleantes en una solución sólida (Callister & Rethwisch, 2016, pp. 48-50)

### 2.9.2.2 *Carbono (C)*

Es uno de los elementos aleantes no metálicos de mayor influencia en los aceros, el porcentaje de carbono presente en los materiales puede variar las propiedades mecánicas de este material, en las aleaciones el acero se encuentra de 3 formas:

- 1) Disuelto, en el hierro alfa y delta
- 2) Combinado, con el hierro y formando el cementita
- 3) En forma libre, más conocido como grafito, pero una vez combinado con el hierro se encuentra en aplicaciones mecánicas

Al igual que el hierro el carbono también presenta formas alotrópicas, producto de las distintas hibridaciones de los átomos de carbono, estas formas son: grafito, diamante, grafeno y carbino, siendo el grafito la forma más suave y barata en el mercado

## **2.10 Fases de los aceros**

En el acero, el carbono suele unirse o disolverse en forma de cementita y rara vez en forma de grafito. Esta es la razón por la que solo se utiliza el diagrama de equilibrio metaestable hierro-carbono para estudiar los aceros.

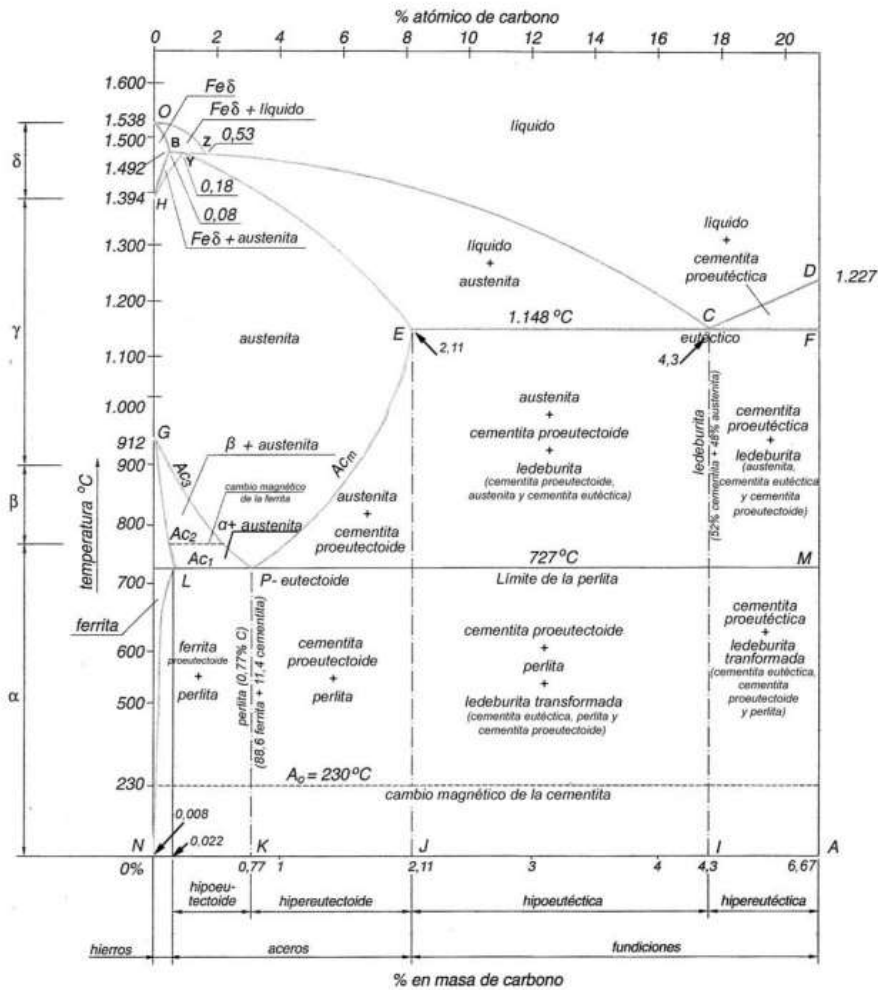


Diagrama hierro-carbono. Zonas, puntos y líneas más significativas

## Ilustración 11-2: Diagrama Hierro-Carbono

Fuente: García & Arenas, 2017

### 2.10.1 Austenita

Definida como una solución sólida de carbono en hierro gamma. Solo es estable por encima de los 723° C, a temperaturas más bajas se convierte en ferrita y cementita a través de reacciones eutéctoides. La austenita solo puede ocurrir en aceros austeníticos a temperatura ambiente, donde la austenita es estable a temperatura ambiente. Es deformable como el hierro gamma, no es muy duro, es muy resistente al desgaste, es magnético, es el componente más denso del acero y no es atacado por reactivos. La resistencia de la austenita retenida a temperatura ambiente está entre 800 y 1000 N/mm<sup>2</sup> y el alargamiento está entre 20 y 25% (Gutiérrez & Méndez, 2017).

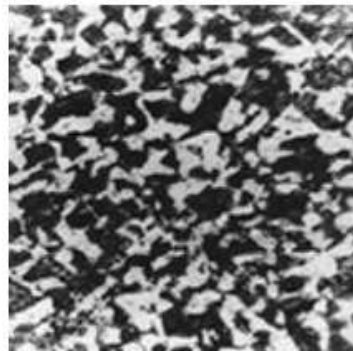


**Ilustración 12-2:** Microestructura de la austenita

**Fuente:** Gutiérrez & Méndez, 2017

### 2.10.2 *Ferrita*

Esta composición se forma a partir de una solución sólida de carbono intercalada en hierro alfa. Es el componente más blando del acero, pero el más tenaz y dúctil, con una resistencia a la tracción de 2800 N/mm<sup>2</sup> y un alargamiento del 35%. Su máxima solubilidad es de 0,008%. También mantiene otros elementos en el acero en forma de impurezas o elementos de aleación como Si, P, Ni, Cr, Cu. La ferrita está presente en el acero hipo eutectoide como componente y se mezcla con cementita para formar parte de la perlita. Si el contenido de carbono del acero es muy bajo, su estructura consiste casi en su totalidad en granos de ferrita, cuyos límites se revelan fácilmente bajo el microscopio después de grabar con ácido nítrico diluido (Gutiérrez & Méndez, 2017).



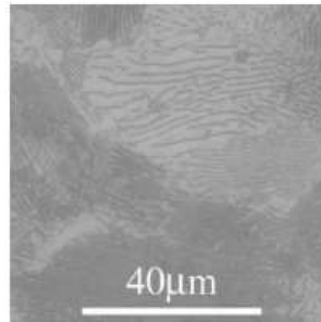
**Ilustración 13-2:** Microestructura de la ferrita.

**Fuente:** Gutiérrez & Méndez, 2017

### 2.10.3 *Pperlita*

Está formada por una mezcla eutectoide bifásica de ferrita y cementita, y su composición es del 0,80%, y se forma a 723°C. Su estructura está compuesta por láminas alternas de ferrita y cementita, cuyo espesor de la ferrita es mayor que el del cementita, que permanece en relieve tras ser atacada por el ácido nítrico, por lo que se observan al microscopio fundidas sobre una lámina

de ferrita como se revela por sombras. La perlita es más dura y resistente que la ferrita, pero más blanda y dúctil que el cementita. Se presenta en forma laminar, reticular y globular (Gutiérrez & Méndez, 2017).

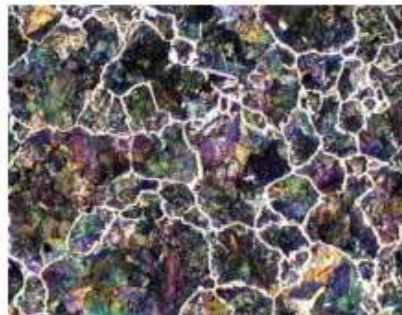


**Ilustración 14-2:** Microestructura de la perlita.

**Fuente:** Gutiérrez & Méndez, 2017

#### **2.10.4 Cementita**

Es un componente que se encuentra en fundiciones y aceros, es un carburo de hierro, de fórmula molecular  $Fe_3C$ , cristalizado en el sistema ortorrómbico. Es muy quebradizo y duro, con una dureza Vickers de más de 840, y es muy resistente a la fricción en fundiciones de servicio pesado. Es ferromagnético a bajas temperaturas y pierde esta propiedad a  $212^{\circ}C$ . Se puede presentar en forma reticular, laminar y globular (Gutiérrez & Méndez, 2017).



**Ilustración 15-2:** Microestructura del cementita.

**Fuente:** Gutiérrez & Méndez, 2017

#### **2.10.5 Bainita**

Es un componente obtenido durante la transformación isotérmica de la austenita en un baño de enfriamiento a temperatura entre  $250$  y  $500^{\circ}C$ . Se distinguen dos tipos de estructuras: la Bainita superior se forma a  $500-580^{\circ}C$ , tiene una apariencia dendrítica y consiste en una matriz ferrítica que contiene carburos, la Bainita inferior se forma a  $250-400^{\circ}C$  y tiene una apariencia similar a

la martensita, que consiste en agujas alargadas de ferrita que contienen láminas de carburo. La Bainita tiene un rango de dureza de 40 a 60 HRc (Gutiérrez & Méndez, 2017).



**Ilustración 16-2:** Microestructura de la Bainita

**Fuente:** Gutiérrez & Méndez, 2017

#### **2.10.6 Martensita**

Es una solución sólida, intersticial, sobresaturada de carbono en hierro alfa. Es un componente estructural endurecido de acero con una microestructura en forma de agujas que se cruzan. Los átomos de hierro son iguales a los de ferrita en el vértice. Los átomos de carbono se ubican en la superficie y las aristas, presentando así una red distorsionada. Esta distorsión de la red es responsable de la dureza de la martensita. Tiene una red cuádruple, sus características mecánicas son que la resistencia a la tracción está entre 170-250 Kg/mm<sup>2</sup>, la dureza HRc está entre 50-60, el alargamiento es de 0,5% y es magnético. En los aceros de bajo y medio carbono la martensita se encuentra en forma de listones o agujas agrupadas en dirección paralela, a medida que el porcentaje de carbono se incrementa los listones empiezan a tener distintas orientaciones y aparece una martensita mixta en forma de agujas y placas, cuando el contenido de carbono es alto la martensita se encuentra en forma de placas, la morfología de la martensita afecta a la deformación del material, la martensita de listones provoca una fractura tipo frágil y tiene que ver directamente con la dureza que tienen los materiales de estructura martensítica. (Gutiérrez & Méndez, 2017).





**Ilustración 17-2:** Microestructura de la martensita

**Fuente:** Gutiérrez & Méndez, 2017

Es importante saber que dentro de la morfología de la martensita existe cierta cantidad de austenita retenida, esto se debe a una transformación incompleta de la austenita en martensita, la misma que se queda acumulada alrededor de las agujas de martensita y esta puede alterar las propiedades de su microestructura

## **2.11 Acero m303**

M303 es un acero al cromo martensítico resistente a la corrosión que ofrece una excelente dureza, resistencia a la corrosión y al desgaste. Se caracteriza por una mejor maquinabilidad y capacidad de pulido (Bohler, 2020).

### **2.11.1 Características**

- Muy alta tenacidad y ductilidad
- Buena resistencia al desgaste
- Muy buena maquinabilidad
- Buena estabilidad dimensional
- Muy buena capacidad de pulido
- Muy alta resistencia a la corrosión
- No es necesario un tratamiento térmico
- Pretemplado

### 2.11.2 Composición Química

**Tabla 5-2:** Composición química del acero M303

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
0,27	0,30	0,65	14,50	1,00	0,85

Fuente: Bohler , 2020

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

### 2.11.3 Propiedades Físicas

**Tabla 6-2:** Propiedades físicas del acero M303

<b>Propiedades Físicas a 20°C / 68°F</b>						
<b>Densidad</b>	7,72 – 0,28	Kg/dm <sup>3</sup> – lb/in <sup>3</sup>				
<b>Conductividad térmica</b>	22,8 – 13,17	W/(m.K) – BTU(IT)ft/hr/ft <sup>2</sup> /F				
<b>Calor específico</b>	460 – 109,87	J/(kg.K) – BTU(IT) lb/F				
<b>Resistencia eléctrica específica</b>	0,595 – 0,001	Ohm.mm <sup>2</sup> – 10 <sup>3</sup> ksi				
<b>Módulo de elasticidad</b>	218 – 31,62	10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> – 10 <sup>3</sup> ksi				
<b>Expansión térmica</b>						
<b>Temperatura</b>	100 - 212	200-392	300 - 572	400 - 752	500 – 932	600 - 1112
<b>Expansión térmica (10<sup>-6</sup>m//m.K) – 10<sup>-6</sup>inch/(inch.F)</b>	10,5 – 5,833	10.83 – 6.017	11.11 – 6.172	11.39 – 6.328	11.75 – 6.528	12.1 – 6.722

Fuente: Bohler , 2020

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

### 2.11.4 Aplicaciones

- Moldeo por soplado.
- Lentes de cámara Componentes para pantallas.
- Componentes para procesamiento de alimentos y alimentación animal.
- Herramientas de perforación y componentes.
- Industria electrónica.
- Extrusión.
- Industria de procesamiento de alimentos.
- Forja (caliente/sementalmente)
- Componentes generales para ingeniería mecánica
- Sistemas de canal caliente
- Moldeo por inyección
- Lámparas/lentes para automoción

- Otros componentes
- Embalaje
- Extrusión de plástico
- Bombas y componentes de alta presión
- Tornillos y barriles
- Piezas estándar (moldes, placas, pasadores, punzones)
- Portaherramientas (fresado, taladrado, torneado y mandriles)
- Herramientas de registro

## 2.12 Aleación 17-4PH

Es un acero tipo cromo-níquel-cobre martensítico de endurecimiento por precipitación, acero inoxidable con una adición de niobio, el acero 17-4PH combina alta fuerza y dureza con buena resistencia a la corrosión (Management, 2021).

La aleación se suministra en la condición de recocido en solución, no debería ser usado a temperaturas superiores a 572 °F (300 °C) o para servicio criogénico. Las propiedades mecánicas pueden ser obtenidas sometiendo la aleación a tratamientos térmicos de endurecimiento por envejecimiento. Calor tratamiento en el rango de 900 °F (482 °C) produce la fuerza más alta.

La resistencia a la corrosión de la aleación 17-4PH es comparable a 304 acero inoxidable en la mayoría de los entornos, y es generalmente superior a los 400 serie aceros inoxidables, se usa en aplicaciones donde la combinación de moderada resistencia a la corrosión y se requiere una resistencia alta (Akca, 2015).

La aleación 17-4PH se puede soldar fácilmente y procesado por tienda estándar prácticas de fabricación.

### 2.12.1 Composición Química

**Tabla 7-2:** Composición química de la aleación 17-4PH

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>S</b>	<b>Ni</b>	<b>P</b>	<b>Cu</b>	<b>Ta + Nb</b>
0,04	0,5	0,4	15,5	0,005	4,5	0,02	3,5	0,3

Fuente: Akca , 2015

Realizado por: Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

### 2.12.2 Propiedades Físicas

**Tabla 8-2:** Propiedades físicas de la aleación 17-4PH

<b>Propiedades Físicas a 20°C / 68°F</b>		
<b>Densidad</b>	7,75 – 0,28	g/cm <sup>3</sup> – lb/in <sup>3</sup>
<b>Conductividad térmica</b>	18,3 – 10,6	W/(m.K) – BTU(IT)ft/hr/ft <sup>2</sup> /F
<b>Calor específico</b>	460 – 0,11	J/(kg.C) – BTU(IT) lb/F
<b>Resistencia eléctrica específica</b>	75 – 29,5	Ohm.mm <sup>2</sup> – 10 <sup>3</sup> ksi
<b>Módulo de elasticidad</b>	196 – 28,5	10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> – 10 <sup>3</sup> ksi

Fuente: Akca , 2015

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

### 2.12.3 Aplicaciones

- Aeroespacial — estructural y partes
- Biomédica: herramientas manuales
- Procesamiento químico
- Equipos de procesamiento de alimentos
- Válvulas de compuerta
- Componentes mecánicos
- Procesamiento y almacenamiento de desechos nucleares
- Producción de petróleo y gas: láminas, plataformas de cubierta para helicópteros, etc.
- Pulpa y papel - fábrica de papel
- equipo

### 2.13 Acero AISI 420

El acero inoxidable grado 420 es un acero con alto contenido de carbono con un contenido mínimo de cromo del 12 %. Como cualquier otro acero inoxidable, el grado 420 también se puede endurecer mediante tratamiento térmico. Ofrece buena ductilidad en su estado recocido y excelentes propiedades de resistencia a la corrosión cuando el metal está pulido, rectificado superficialmente o endurecido. Este grado tiene la dureza más alta, 50HRC, entre todos los grados de acero inoxidable con un 12 % de cromo (Sheet, 2020).

Los grados de acero inoxidable que son similares a los aceros inoxidables de grado 420 incluyen aceros martensíticos como las otras versiones de grado 420, que tienen vanadio, azufre y

molibdeno en su composición, y la serie de grado 440. El grado no estándar 420C tiene un contenido de carbono que es un poco más alto que el del grado 420.

Los aceros inoxidable martensíticos son aquellos de gran dureza y alto contenido en carbono. Estos aceros generalmente se fabrican utilizando métodos que requieren tratamientos de endurecimiento y revenido. Las condiciones de operación de los aceros martensíticos se ven afectadas por la pérdida de resistencia del material a altas temperaturas y la disminución de la ductilidad a temperaturas negativas.

### 2.13.1 Composición química

**Tabla 9-2:** Composición química del acero AISI 420

Grado		C	Mn	Si	P	S	Cr
420	Min	0,39	-	0,66	0,02	-	12,0
	Max	-	1	1	0,040	0,03	14,0

Fuente: Sheet , 2020

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

### 2.13.2 Propiedades Físicas

**Tabla 10-2:** Propiedades físicas del acero AISI 420

Propiedades Físicas a 20°C / 68°F		
Densidad	7800	Kg/m <sup>3</sup>
Conductividad térmica	24,9	W/(m.K)
Calor específico	460	J/(kg.K)
Resistencia eléctrica específica	550	nOhm.m
Módulo de elasticidad	200	10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup>

Fuente: Sheet , 2020

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

### 2.13.3 Aplicaciones

Las aplicaciones clave de los aceros inoxidable de grado 420 incluyen:

- Cuchillas de corte
- Válvulas de aguja
- equipo quirúrgico
- Cuchillería

## 2.14 Dureza

En el congreso de la asociación Internacional para el ensayo de materiales realizado en Paris en 1900, el profesor sueco J.A. Brinell propuso su método para determinar la dureza de los metales.

Este consiste en aplicar y comprimir progresivamente sobre una superficie plana y lisa del material a ensayar una bola de acero muy duro manteniendo la presión durante un cierto tiempo para que produzca una impresión o hueco en forma de casquete esférico. Después se mide el diámetro de la huella con un pequeño microscopio de mano y se halla la dureza Brinell dividiendo la carga que ha actuado sobre la bola por la superficie de la huella. Esta superficie se calcula en función del diámetro de la huella producida. Para mayor comodidad existen tablas que señalan la dureza que corresponde a cada uno de los diferentes diámetros de las huellas desde 2mm hasta 6mm.

#### **2.14.1 Ensayo de dureza Brinell**

En el ensayo de dureza Brinell el penetrador es una bola de acero extraduro de diámetro D, que se apoya sobre la probeta a estudiar; ejerciendo sobre la misma una fuerza p durante un tiempo t dado, aparece una huella de diámetro d sobre el metal, la dureza Brinell viene definida por:

$$HBN = P/S \quad (1)$$

Siendo S la superficie de la huella, casquete esférico, P se expresa en Kg fuerza y S en mm<sup>2</sup>. También puede expresarse de la siguiente manera:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2)$$

Donde:

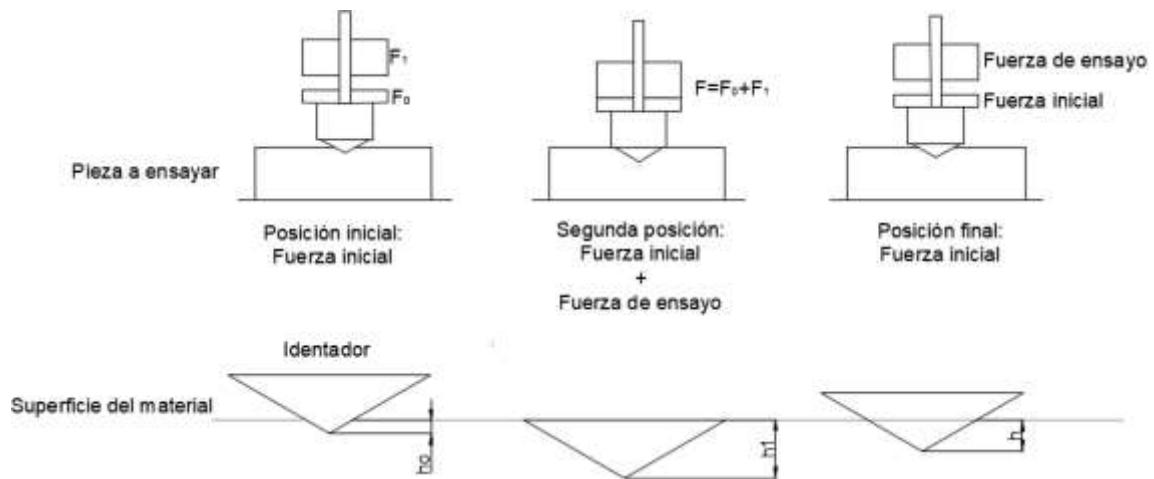
P: carga aplicada en kgf

D: diámetro de la bola del indentador en mm d:

diámetro medio de la huella en mm

#### **2.14.2 Ensayo de Dureza Rockwell**

La medición de dureza por el método Rockwell gana amplia aceptación debido a la facilidad de realización y el pequeño tamaño de la impresión producida durante el ensayo. El método se basa en la medición de la profundidad de penetración de una determinada herramienta bajo la acción de una carga prefijada. El número de dureza Rockwell (HR) se mide en unidades convencionales y es igual al tamaño de la penetración sobre cargas determinadas. El método puede utilizar diferentes penetradores siendo estas esferas de acero templado de diferentes diámetros o conos de diamante. Una determinada combinación constituye una escalera de medición, caracterizada como A, B, C, etc. Y siendo la dureza un numero arbitrario será necesario indicar en que escala fue obtenida (HRA, HRB, HRC, etc.).



**Ilustración 18-2:** Ensayo dureza Rockwell

Fuente: Gutiérrez & Méndez, 2017

La carga total  $P$  es aplicada sobre el penetrador en dos etapas: una previa  $P_0$  y una posterior  $P_1$  tal que:

$$P = P_0 + P_1 \quad (3)$$

Inicialmente el cono penetra en la superficie una cantidad  $h_0$  sobre la acción de la carga  $P_0$  que se mantendrá hasta el final del ensayo. Esta penetración inicial permite eliminar la influencia de las condiciones superficiales. A continuación, se aplica la carga  $P_1$  y la penetración se acentúa. Finalmente, la carga  $P_1$  es retirada y la profundidad  $h$  restante determina el número de dureza HR. La escala de los instrumentos de lectura empleados en las máquinas está invertida para permitir una lectura directa. En los certificados de calidad es común utilizar la escala HRB donde el cono de diamante es reemplazado por una esfera de  $1/16''$  y la carga  $P_1$  vale 100 Kgf. En casos de materiales muy finos donde la carga de 100 Kgf es muy elevada, pudiendo inclusive perforar la muestra, e utilizada la escala Vickers con una carga de 10 Kgf y luego efectuada la transformación a la escala HRB utilizando tablas de conversión adecuadas (Santos, 2018: pp. 73-80)

### 2.15 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción de un material consiste en someter a una probeta normalizada a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de esta. Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente. Las velocidades de deformación en un ensayo de tensión suelen ser muy pequeñas (Santos, 2018: pp. 73-80).

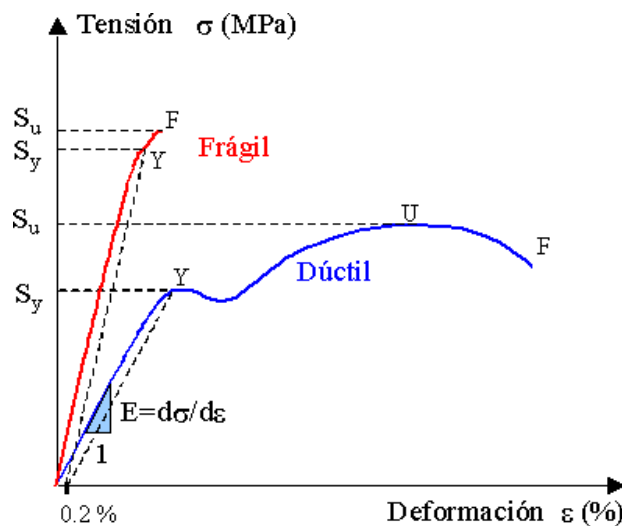


**Ilustración 19-2:** Maquina Universal (ensayos de tracción)

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

En un ensayo de tracción pueden determinarse diversas características de los materiales elásticos:

**Módulo de elasticidad o Módulo de Young**, es el resultado de dividir la tensión por la deformación unitaria, dentro de la región elástica de un diagrama esfuerzo-deformación (Aparicio. G, & Ciaccia. M, 2017).



**Ilustración 20-2:** Grafica esfuerzo vs deformación

Fuente: (Pérez, 2016, p. 1)



En la ilustración 20-2 se puede observar los siguientes puntos característicos:

- **Y** Límite de fluencia: zona límite en la que el material deja la zona elástica y empieza a deformarse plásticamente.
- **U** Resistencia a la tracción: indica la tensión máxima que puede soportar el material antes de llegar a la fractura.
- **F** Límite de rotura: punto en el que el material se fractura
- **S<sub>y</sub>** Límite de fluencia: tensión que soporta el material durante el ensayo
- **S<sub>u</sub>** Límite de rotura: tensión al momento de producirse la fractura

**Coefficiente de Poisson**, cuantifica la razón entre el alargamiento longitudinal y el acortamiento de las longitudes transversales a la dirección de la fuerza.

**Límite de proporcionalidad**: valor de la tensión por debajo de la cual el alargamiento es proporcional a la carga aplicada.

**Límite de fluencia o límite elástico aparente**: valor de la tensión que soporta la probeta en el momento de producirse el fenómeno de la cedencia o fluencia. Este fenómeno tiene lugar en la zona de transición entre las deformaciones elásticas y plásticas y se caracteriza por un rápido incremento de la deformación sin aumento apreciable de la carga aplicada (Aparicio, Armas & Ciaccia, 2007).

**Límite elástico (límite elástico convencional o práctico)**: valor de la tensión a la que se produce un alargamiento prefijado de antemano (0,2%, 0,1%, etc.) en función del extensómetro empleado. Es la máxima tensión aplicable sin que se produzcan deformaciones permanentes en el material.

**Carga de rotura o resistencia a tracción**: carga máxima resistida por la probeta dividida por la sección inicial de la probeta.

**Alargamiento de rotura**: incremento de longitud que ha sufrido la probeta. Se mide entre dos puntos cuya posición está normalizada y se expresa en tanto por ciento.

**Longitud calibrada**: es la longitud inicial de la parte de una probeta sobre la que se determina la deformación unitaria o el cambio de longitud y el alargamiento (este último se mide con un extensómetro).

**Reducción de área y estricción**: La reducción de área de la sección transversal es la diferencia entre el valor del área transversal inicial de una probeta de tensión y el área de su sección transversal mínima después de la prueba. En el rango elástico de tensiones y deformaciones en

área se reduce en una proporción dada por el módulo de Poisson. Para un sólido lineal e isótropo, en un ensayo de tracción convencional, dicha reducción viene dada por (Aparicio. G, & Ciaccia. M, 2017):

$$A = A_o \left(1 - \nu \frac{\sigma}{E}\right)^2 \quad (4)$$

### 2.15.1 Resultados del ensayo

Límite de elasticidad ( $\sigma_E$  y  $\sigma_Y$ )

Módulo de Young (E)

Resistencia a la tracción ( $\sigma_R$ )

Resistencia a la rotura ( $\sigma_U$ )

Alargamiento de rotura (A)

Mayor alargamiento plástico alcanzado por la probeta. Se mide en tanto por ciento.

$$A(\%) = \frac{L_F - L_o}{L_o} \cdot 100 \quad (5)$$

Siendo  $L_F$  la longitud de la probeta después del ensayo.

Estricción de rotura (Z)

Disminución de sección que se produce después de la rotura. Se mide en tanto por ciento.

(Aparicio & Ciaccia, 2007: pp. 57-63)

$$Z(\%) = \frac{S_o - S_F}{S_o} \cdot 100 \quad (6)$$

## 2.16 Ensayo de tenacidad

La máquina de ensayo de impacto Charpy está acoplada a un ordenador mediante una tarjeta de adquisición de datos, a través de la cual es posible registrar las curvas fuerza-tiempo generadas durante los ensayos, y a su vez permite obtener el valor de la energía absorbida por los materiales en el proceso de fractura. Las probetas usadas en nuestros experimentos tienen forma de paralelepípedos con una sección transversal de 1x1 cm<sup>2</sup> y 8 cm de longitud. Las entallas realizadas a las probetas tienen una profundidad de 3 mm y el radio de estas es variable. Las probetas con entalla deben colocarse en el soporte S, de forma tal que el lado de la entalla quede opuesto a la cara de la probeta que estaría directamente expuesta al impacto del péndulo (Ortega. Y, 2016).



**Ilustración 21-2:** Péndulo Charpy

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

### **2.16.1** *Influencia del radio de la entalla*

Las entallas provocadas por un mecanizado, fabricación o diseño deficientes ocasionan una concentración de esfuerzos en zonas localizadas de los materiales. Por otra parte, la fractura comienza en los sitios donde la concentración de tensiones es mayor. Es por ello por lo que las entallas o grietas presentes en un material conllevan un aumento en fragilidad. La intensidad del esfuerzo en el extremo de una grieta depende tanto de las tensiones aplicadas como de la geometría y dimensiones de dicha grieta. La distribución de esfuerzos en el entorno de una entalla aumenta a medida que se acerca al extremo de la misma, y por otra parte, la mayor concentración de esfuerzos está localizada en el extremo de las entallas más aguzadas (las que tienen un radio menor. En este apartado se quiere demostrar esa relación, a través de la energía absorbida por las probetas en el proceso de fractura. (Ortega, 2016) .

### **2.17** **Torsión**

El propósito de la máquina de torsión es realizar pruebas de torsión en diversos materiales, para lo cual se utilizan probetas estandarizadas. Además, incluye un sistema de medición que determina el ángulo de giro como momento o par generado durante el ensayo. El principio de funcionamiento de la máquina de ensayo de torsión es muy simple ya que su función principal es transmitir el par proporcionado por la fuente de alimentación a la muestra a ensayar, para que pueda deformarse angularmente hasta romperse.

La máquina de torsión tiene dos cabezales, uno móvil y otro fijo, la muestra se coloca en las mordazas de los dos cabezales para que tengan un buen agarre y evitar que la muestra se deslice

con respecto a los dientes de la mandíbula produciendo una deformación angular hasta provocar una fractura en la probeta.



**Ilustración 22-2:** Máquina de ensayos de Torsión serie NJS-Z

Fuente: (UNITEDTEST, 2020)

La fórmula para obtener el esfuerzo de torsión máximo en el límite elástico es:

$$\tau_{max} = \frac{T \cdot c}{J} \quad (7)$$

Dónde:

$\tau_{máx}$  = Esfuerzo cortante máximo en el eje (MPa)

$T$  = Par de torsión aplicado (N · mm)

$c$  = Radio exterior del eje (mm)

$J$  = Momento polar de inercia (mm<sup>4</sup>)

Para la sección transversal circular sólida el momento polar de inercia se calcula con la siguiente expresión:

$$J = \frac{\pi}{2} c^4 \quad (8)$$

Y para una sección transversal circular hueca de radio interior  $c_1$  y radio exterior  $c_2$  se tiene la siguiente expresión:

$$J = \frac{\pi}{2} (c_2^4 - c_1^4) \quad (9)$$

### 2.17.1 *Angulo de Giro*

El ángulo de giro  $\phi$  es proporcional al par de torsión  $T$  aplicado al eje y se lo puede definir con la siguiente expresión:

$$\theta = \frac{T \cdot L}{GJ} \quad (10)$$

Donde:

$\phi$  = Ángulo de giro (rad)

$T$  = Par de torsión aplicado (N · mm)

$L$  = Longitud del eje (mm)

$G$  = Módulo cortante para el material (MPa)

$J$  = Momento polar de inercia (mm<sup>4</sup>)

El objetivo del ensayo de torsión es determinar el Módulo de elasticidad cortante o Módulo de rigidez  $G$ , el cual se obtiene de la ecuación anterior

## **2.18 Fatiga**

La fatiga es el proceso por el cual un material se degrada bajo una carga cíclica de valor inferior a los capaces de fallar por tracción. Durante este proceso se forman grietas, y si se dan las condiciones adecuadas, las grietas seguirán creciendo hasta que la pieza se rompa después de aplicar un número suficiente de ciclos. Los componentes de la máquina a menudo fallan bajo estrés repetido o fluctuaciones; sin embargo, un análisis más detallado muestra que el esfuerzo máximo real es menor que la resistencia última del material y, a menudo, menor que el límite elástico.

<http://dSPACE.espace.edu.ec/bitstream/123456789/11527/1/15T00711.pdf>

### **2.18.1 Etapas de la fatiga**

- Etapa 1, las grietas pueden ocurrir en cualquier punto del material, pero generalmente alrededor de las fuentes de concentración de tensiones y superficies externas donde las fluctuaciones son más altas. Hay muchas razones para la aparición de grietas estas pueden ser por: defectos estructurales del material, ralladuras.

- Etapa 2, algunas o todas las grietas se desarrollan por efecto de las cargas. En general, las grietas son finas y difíciles de detectar, incluso cuando están lo suficientemente cerca como para causar la rotura de la pieza.

- Etapa 3, el elemento continúa degradándose debido al crecimiento de grietas, lo que da como resultado que la sección transversal del elemento se reduzca hasta el punto en que no pueda resistir más carga, lo que provoca una falla por fatiga.



**Ilustración 23-2:** Fases de falla por fatiga

Fuente: (Suarez, 2017)

Para establecer la resistencia del material a la carga cíclica, las probetas se someten a fuerzas repetidas de la magnitud especificada y los ciclos hasta que se calcula la falla. El equipo de prueba de fatiga más utilizado es la máquina de viga rotativa de alta velocidad R. R. Moore, en esta máquina, la pieza de prueba se somete a flexión simplemente aplicando una carga repetitiva.

## CAPÍTULO III

### 3 MARCO METODOLÓGICO

En base a la fundamentación teórica, en el presente capítulo se realizará la descripción del procedimiento de caracterización metalográfica para los aceros M303, AISI 420 y 17-4PH, el procedimiento para la obtención de micrografías, el procedimiento para el cálculo y obtención de las propiedades mecánicas para su posterior simulación con un ensayo de fatiga realizados en ANSYS. En el ANEXO A, se presenta el diagrama de procesos a seguir.

Para evaluar las propiedades mecánicas, químicas y metalográficas de los aceros M303, AISI 420 y 17-4PH, se realizará una serie de ensayos destructivos y no destructivos; con los cuales, se aprobará la sustitución de los aceros alternos por el acero M303. Para corroborar resultados, se realizará:

- Ensayo de Espectrometría
- Análisis metalográfico
- Análisis de inclusiones
- Análisis de tamaño de grano
- Ensayos destructivos

#### 3.1 Análisis de la composición química - Espectrometría

Para el ensayo se utiliza el espectrómetro de chispa Bruker ION Q2, este instrumento permite determinar con precisión la composición química de los aceros inoxidables en estudio, mediante la emisión atómica de chispa, su análisis es cualitativo y cuantitativo.

Dependiendo del tipo de espectro que emita el elemento químico detectado, el equipo automáticamente refleja el tipo de elemento y su porcentaje presente en la composición del material en análisis. Está compuesto de algunos sistemas: electrónico, alimentación de gas, generador de plasma, sistema óptico y plataforma para ubicación de probetas.

**Tabla 1-3** Características del espectrómetro de chispa

Características	ESPECTROMETRO DE CHISPA BRUKER ION Q2	
Generador de fuente	Libre de mantenimiento	
	Frecuencia de 50 a 1000 Hz.	
	Descargas de chispa desde 10 $\mu$ s hasta 2 ms	
Datos Eléctricos	100 a 240 V (50/60 Hz)	
	200 W durante la medida y 50 W en reposo.	
Dimensiones y Peso	Anchura 440 mm (17 inch).	
	Altura 220 mm (9 inch)	
	Profundidad 390 mm (15 inch).	
	Peso ~ 19 kg (~ 42 lbs)	
Rango ambiental	Temperatura 10 - 45 °C (50 - 113 °F)	
	Humedad 10-90%, sin condensación	



Fuente: Diaz, 2020

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

### 3.1.1 *Ensayo de espectrometría según la norma ASTM E 415*

Al igual que el análisis metalográfico, el procedimiento del ensayo de espectrometría para aceros inoxidables dado por la norma ASTM E1086 “*Standard Test Method for Analysis of Austenitic Stainless Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry*” - (*Método de prueba estándar para el análisis de acero inoxidable austenítico por espectrometría de emisión atómica de chispa*).

Aquí, se indica el contenido (cualitativo – cuantitativo) de elementos químicos estándar presentes en la composición como: cobre, fósforo, carbono, azufre, cromo, níquel, molibdeno, manganeso, silicio, cobalto, níquel, fósforo y azufre. Este método de prueba está diseñado para el análisis de muestras de acero inoxidable que tengan una superficie plana o un diámetro mínimo de 13 mm y que sean aptas para evitar el sobrecalentamiento durante la descarga.



### 3.1.2 Procedimiento del ensayo

Durante este procedimiento se realiza el corte, pulido, colocación de la probeta y ensayo de espectrometría de los aceros AISI 420, M303 y 17-4 PH, según como muestra el diagrama de proceso.



**Ilustración 1-3:** Procedimiento de ensayo de espectrometría

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

#### 3.1.2.1 Corte

- Se ha tomado probetas circulares de los tres tipos de aceros inoxidables: AISI 420, M303 Y 17-4PH de acuerdo con la norma ASTM E3, todas con un diámetro de 12 a 25mm.

### 3.1.2.2 Pulido

- Durante la preparación es importante que todas las grasas, aceites, residuos de los cortes deben ser removidos por un solvente orgánico.
- Cualquier metal de revestimiento que interfiera con el grabado de la base de metal debe ser removido.

### 3.2.2.2 Colocación de la probeta sobre el espectrómetro

- Colocar la probeta en la parte superior del plato del espectrómetro con la cara pulida hacia abajo sin dejar descubierto el orificio del electrodo, luego desplazar hacia la varilla de contacto y colocar encima de la probeta en la cara no pulida, con el fin de lograr el arco de chispa.
- Encender el espectrómetro y observar que el proceso siga su curso dentro de los parámetros adecuados, según el instructivo del equipo.
- Realizar experimentaciones sucesivas para contar con una sólida base de datos en donde se determine el margen de precisión que tiene el equipo, en la investigación se realizaron tres ensayos espectrométricos por acero (AISI 420, M303 Y 17-4PH) y se sacó un promedio de datos.
- Revisar que la temperatura de la habitación donde se encuentra el espectrómetro este dentro de un rango de  $23 \pm 5$  °C.

### 3.1.2.3 Marcado de la huella

Dentro del ensayo de espectrometría, el marcado de la huella de carbono radica en su pigmentación la misma que debe presentar una tonalidad gris oscuro cuando es correcto. El número de marcado de huellas según la norma ASTM E415-14 recomienda un mínimo de dos en diferentes zonas de la muestra además la superficie de la muestra no debe presentar porosidades para evitar errores en los datos obtenidos.

## 3.2 Análisis metalográfico

Para realizar el análisis de micrografías se utiliza el microscopio electrónico de barrido JSM – IT100; mientras que, para determinar las inclusiones se utiliza el microscopio ECLIPSE E200. A continuación, se describen las características funcionales del microscopio empleado:

**Tabla 2-3:** Características del Microscopio JSM – IT100

Características	Microscopio JSM – IT100	
Resolución (1 kV)	1,3 nm	
Resolución (20 kV)	0,9 nm	
Tensión	0,01 – 30 kV	
Lente del objetivo	Lente Híbrida	
Movimiento de la muestra	X: 70 mm, Y: 50 mm, Z: de 2 a 41 mm Inclinación: de –5 a 70°, Rotación: 360°	
Componentes	Lente Híbrida	Combina las lentes electrostáticas y permite obtener imágenes de alta resolución espacial
	Motor NEO	Mejora significativamente la operatividad y la precisión de funciones automáticas
	Centro SEM	Interfaz gráfica de operación para los usuarios integra completamente las imágenes de los SEM y los análisis de los EDS
	Filtro IA	Permite obtener imágenes de mayor calidad en tiempo real



Fuente: Businesswire, 2022

Realizado por: Rojas Juan &amp; Rosero Israel, 2022

**Tabla 3-3:** Características del Microscopio ECLIPSE E200

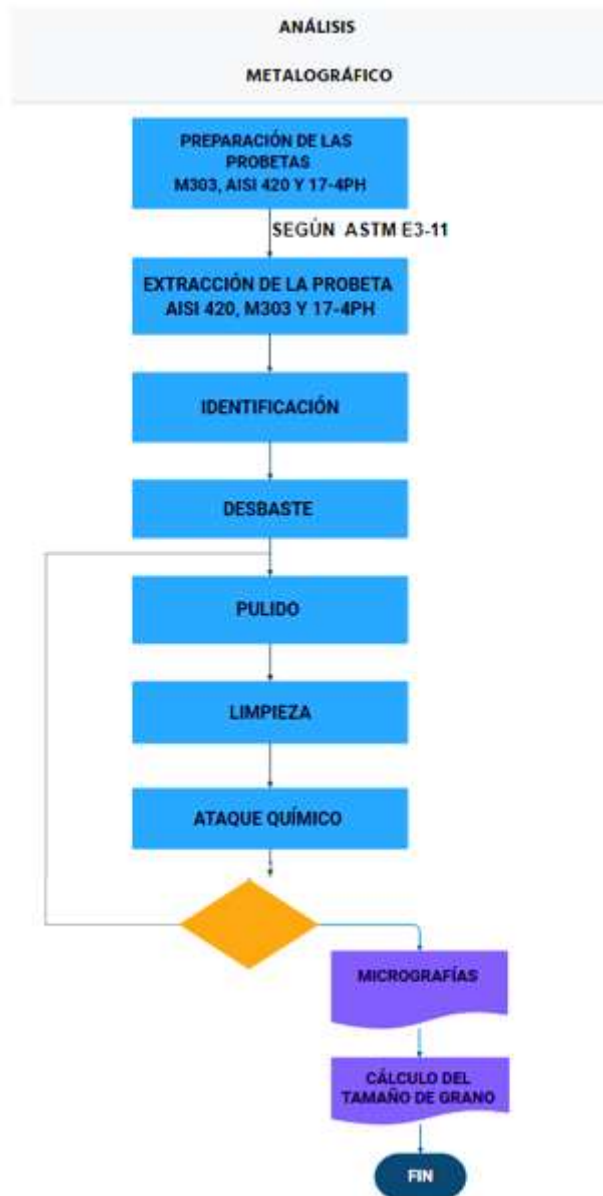
Características	Microscopio ECLIPSE E200	
Naturaleza	Óptico	
Objetivos	4, 10, 20 y 40x	
Movimiento de la muestra	4 posiciones	



Fuente: Nikon, 2022

Realizado por: Rojas Juan &amp; Rosero Israel, 2022

El análisis metalográfico del presente trabajo de investigación se lo realiza bajo lo establecido en la norma ASTM E3-11 “*Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*”, cuyas etapas fueron las mostradas en el siguiente diagrama de procesos:



**Ilustración 2-3:** Procedimiento del ensayo metalográfico

Fuente: Sheet, 2020

### 3.3.1.1 Extracción de Probetas

La selección de las probetas para el examen metalográfico es muy importante, debida a que su interpretación es valiosa. Estas deben ser representativas para el material a caracterizar. Para un estudio de rutina como es el metalográfico, la norma ASTM E3-11 recomienda que se realice el análisis de la zona de mayor revelación de variaciones; por lo cual, para materiales trabajados en frío o en caliente el espécimen debe contar con una sección transversal o longitudinal. Debido a

la facilidad de manipulación se optó por utilizar especímenes cilíndricos obtenidos por corte. Sus dimensiones se muestran en la Tabla 4-3.

**Tabla 4-3:** Dimensiones de las probetas

MATERIAL	DIMENSIONES	
	Diámetro	altura
M303	25 mm	25 mm
AISI 420		
17-4PH		


Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

Debido a la facilidad de manipulación de la probeta se evitó empastillar el espécimen con baquelita y se trabajó directamente con la obtenida por corte.

### 3.2.1.1 Identificación

Para una mejor identificación de las diferentes probetas o especímenes en operación se opta por realizar un rayado (números romanos) en cada una de las mismas para con ello evitar confusiones y obtener de manera veras y sin equivocaciones los datos, como se muestra en la Tabla 5-3.

**Tabla 5-3:** Denominaciones de especímenes por ensayo

MATERIAL	N° de RAYADURAS	
M303	I	
AISI 420	II	
17-4PH	III	

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

### 3.2.1.2 Desbaste

El proceso de desbaste consta de dos etapas: un lijado grueso y un lijado fino, para esto se utilizó el banco portaliijas que cuenta con una superficie fija en donde se apoya el espécimen y un sistema de dosificación de agua para el retiro constante de impurezas. Se empieza con un lijado grueso (lija N° 200 granos/in<sup>2</sup>) para rectificar la superficie del material y retirar irregularidades originadas por el corte del espécimen siguiendo así con lijas N° (grano/in<sup>2</sup>): 320, 400, 500, 600 y 800; tomando en cuenta que en cada cambio de lija se realizó un giro de 90° de la posición del espécimen. Finalmente, para alcanzar el efecto espejo se utilizó lijas N° (grano/in<sup>2</sup>): 1000, 1200 y 1500.



**Ilustración 3-3:** Desbaste de las diferentes probetas en el laboratorio de Materiales de la ESPOCH

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

### 3.2.1.3 Pulido

Una vez obtenido el efecto espejo de los especímenes, se procede a realizar el pulido final de la cara de análisis, para lo cual, se utiliza un banco de pulido que consta de un disco rotativo de paño sobre quien se colocó los especímenes durante periodos de 10 min, agregando también constantemente pequeñas cantidades de Alúmina de 1 um hasta alcanzar el efecto espejo sin presencia de rayaduras.



**Ilustración 4-3:** Etapa de Pulido

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

### 3.2.1.4 Limpieza

Para obtener resultados óptimos tanto en la realización de micrografías y posterior a al pulido de los especímenes, se les somete a un chorro constante y prolongado de agua para retirar algunas impurezas presentes por la Alumina y el paño utilizados para el pulido, seguido, en la superficie pulida se rosea alcohol y con algodón cuidadosamente se realiza el secado, garantizando así una limpieza optima del material en estudio.

### 3.2.1.5 Ataque químico

Una vez limpia la probeta, se realiza el ataque químico para revelar la microestructura del material. Por tanto, siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM E-407 “*Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*” para aceros inoxidables con alto contenido en cromo, se empleó el reactivo Vilella, con una composición que se muestra en la Tabla 6-3.

**Tabla 6-3:** Contenido de ataque químico

COMPONENTE	CONTENIDO (ml)
Etanol	100 ml
Ácido pícrico	1 gramo
Ácido clorhídrico	5ml

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022



**Ilustración 5-3:** Probetas atacadas químicamente con VILLELA

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

### 3.2.2 Obtención de micrografías

Con la probeta preparada y atacada se procede a ubicar en el microscopio de barrido para determinar las microestructuras de los materiales en estudio, se lo realiza en una cámara de vacío la cual permite que los electrones viajen sin ninguna interrupción, la aceleración de voltaje que maneja el microscopio va desde 5 a 20 kilovoltios (KeV), esta aceleración de voltaje permite dar la penetración de luz del haz de electrones en la muestra y mediante diferentes detectores y con la interacción de los electrones generados con la superficie permite crear imagen de las estructuras presentes en las muestras de cada material, para ello se efectúa un procedimiento sistemático que se describe a continuación:

1. Obtener la superficie pulida (tipo espejo) para una apreciación correcta de las microestructuras en el microscopio.
2. Colocar la probeta en un Stub de aluminio.
3. Colocar la muestra dentro de la cámara del SEM observando que no exista interferencias o restos de otros metales.
4. Generar alto vacío con una presión de  $10^{-5}$  Pa
5. Enfocar manualmente la estructura de interés.
6. Optimizar los parámetros SEM.
7. Corregir astigmatismo, contraste y brillo
8. Adquirir la imagen.



**Ilustración 6-3:** Microscopio Electrónico de Barrido.  
**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

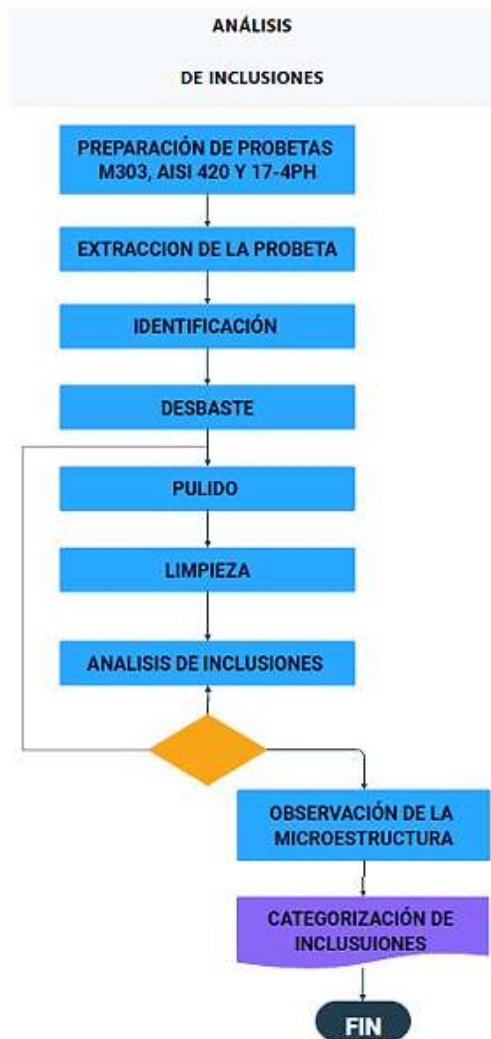
### 3.3.4 Espectroscopia de energía dispersiva (EDS Lineal)

Aquí, se utilizó la espectrometría de dispersión de energía de rayos X, disponible en el microscopio electrónico de barrido. Los EDS permiten identificar los elementos químicos más representativos de la muestra y de sus inclusiones presentes.

### 3.3 Análisis de inclusiones

Para el análisis de inclusiones se utiliza la norma ASTM E45, mediante el uso del microscopio a una ampliación de 100x para lo cual se realiza el procedimiento mostrado en el diagrama.





**Ilustración 7-3:** Procedimiento para el análisis de inclusiones.  
 Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

### 3.3.1 Preparación de probetas

El procedimiento para seguir es idéntico al realizado durante la preparación de la probeta para el análisis metalográfico; razón por la cual, en este apartado únicamente se detalla el procedimiento para el análisis de inclusiones y el tipo al que corresponde cada una de ellas.

1. Se observó la forma y tamaño de las inclusiones en el microscopio óptico para cada uno de los aceros inoxidables.
2. Se identificaron las áreas con mayor número de inclusiones o aquellas que presenten inclusiones más grandes.

3. Se observa el tipo de inclusiones (A, B,C o D) seguido de su severidad de acuerdo a la tabla 7-3, terminando por identificar si es delgada o gruesa la serie.

**Tabla 7-3:** Severidad de las inclusiones

**TABLE 1 Minimum for Severity Level Numbers  
(Methods A, D, and E)<sup>A,5</sup>**

Severity Level	Total Length in One Field at 100X, min, mm (in.)			Number of Inclusions in One Field, min
	Type A	Type B	Type C	Type D <sup>C</sup>
½	3.7 (0.15)	1.7 (0.07)	1.3 (0.07)	1
1	12.7 (0.50)	7.7 (0.30)	7.6 (0.30)	4
1½	26.1 (1.03)	18.4 (0.72)	17.6 (0.69)	9
2	43.6 (1.72)	34.3 (1.35)	32.0 (1.26)	16
2½	64.9 (2.56)	55.5 (2.19)	51.0 (2.01)	25
3	89.0 (3.54)	82.2 (3.24)	74.6 (2.94)	36
3½	118.1 (4.65)	114.7 (4.52)	102.9 (4.05)	49
4	149.8 (5.90)	153.0 (6.02)	135.9 (5.35)	64
4½	189.8 (7.47)	187.3 (7.37)	173.7 (6.84)	81
5	223.0 (8.78)	247.6 (9.75)	216.3 (8.52)	100

Fuente: ASTM E45,2020

### 3.4 Cálculo del tamaño de grano

#### 3.4.1 Método de Intercepción

Para determinar el tamaño de grano mediante el apoyo del método de intercepción, el cual se encuentra establecido en la norma ASTM E112, siendo este método el más utilizado debido a que no requiere marcas para contar los granos, cabe recalcar que este procedimiento es recomendable para granos que se desvían de manera equiaxial uniforme.

Este método de intersección es muy preciso, pero debe aplicarse con mucho cuidado. Para ello, se debe dibujar una línea recta sobre la imagen de la microestructura del material. Hay dos posibilidades de conteo, la primera que se refiere a contar límites de grano y la segunda que es contar los granos. Si el método se usa para granos interceptados, se deben contar los granos que han interceptado completamente la línea y si la línea no intercepta completamente, el grano N es 0,5, si la línea pasa por el grano, N es 1, y si la línea termina dentro de un grano se considera N a 0,5.

Para determinar el tamaño de grano se aplica la siguiente ecuación que establece la norma:

$$G = 10 - 6,644 \log \left( \frac{E}{10} \right) \quad (11)$$

$$E = \frac{\text{longitud de la línea}}{\# \text{ de granos}} \quad (12)$$

Donde:

*G: tamaño de grano ASTM*

*E: division de la longitud de linea entre el # de grano*

Para determinar el tamaño de grano por el método de intercepción se puede considerar mínimo 3 líneas tanto horizontales como verticales que pasen por los límites de grano y un máximo de 5 líneas para las dos direcciones, para el presente estudio se toma como referencia 5 líneas horizontales y 5 líneas verticales.

### **3.5 Dureza Rockwell**

En el ensayo de dureza Rockwell es el método más empleado para medir esta propiedad, en el cual su procedimiento se encuentra estipulado en la norma ASTM E18 para una probeta en donde se realizan como mínimo 3 ensayos, teniendo en cuenta la separación de cada ensayo que debe ser como mínimo  $2 \frac{1}{2} d$  ( $d$ = diámetro del indentador), la carga se debe aplicar durante un tiempo prudente entre 15 y 20 segundos. Este ensayo se basa en la resistencia que oponen los materiales a ser penetrados, se determina la dureza en función de la profundidad de la huella, es por lo que se pueden utilizar diferentes escalas (A, B, C, D, F, H, etc) que provienen de la utilización de distintas combinaciones de indentadores y cargas, lo cual permite ensayar prácticamente cualquier metal o aleación. A continuación, se presenta el procedimiento:



**Ilustración 8-3:** Proceso de cálculo de dureza.

Fuente: Sheet , 2020

**Tabla 8-3:** Escalas para diferentes tipos durezas.

DUREZA	IDENTADOR		CARGA		APLICACIÓN
	TIPO	DIMENSIÓN (in)	Kgf	N	
Rockwell A	Cono	-	60	588,4	Materiales muy duros
Rockwell B	Esfera	1/16	100	981	Latón, aceros de baja resistencia
Rockwell C	Cono	-	150	1471	Aceros de alta resistencia
Rockwell D	Cono	-	100	981	Aceros de alta resistencia
Rockwell E	Esfera	1/8	100	981	Materiales muy blandos
	Esfera	1/16	60	588,4	Aluminio, materiales blandos

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

### 3.5.1 Preparación de la probeta

- La superficie de la probeta de ensayo debe ser plana, pulida y exenta de óxidos y materias extrañas, para que permita determinar con exactitud el diámetro de la impresión.
- La preparación de la probeta de ensayo se realiza sin alterar las condiciones originales del material, evitando calentamientos apreciables o endurecimientos superficiales.
- El espesor de la probeta debe ser, por lo menos, ocho veces la profundidad  $h$  de la impresión. Sobre la cara opuesta de la superficie ensayada no debe aparecer deformación alguna, después de efectuado el ensayo.

### 3.5.2 Selección de la escala del indentador

- Elegir entre los indentadores para metales duros utilizar un cono de diamante de ángulo  $120^\circ$  (grados), y para los semiduros y blandos un indentador con bola de acero (carburo de tungsteno) de  $1/16''$  ó  $1/8''$ , para este estudio se opta por utilizar el indentador de diamante con ángulo de  $120^\circ$ .
- Se escogió una escala C por tratarse de un acero inoxidable duro y por la utilización del

identador de diamante.

### 3.6.3 Aplicación de la carga

- Antes de realizar la aplicación de la carga se encera la máquina, una vez realizado esto la precarga que se da al material es de 100 N (Newtons) y una carga de 1471 N o 150 Kgf, las tolerancias en la aplicación de la fuerza se describe de manera ordenada en la Tabla 9-3:

**Tabla 9-3:** Tolerancias aplicación de fuerza

Load, kgf (N)	Tolerance, kgf (N)
10 (98)	±0.20 (±1.96)
60 (589)	±0.45 (±4.41)
100 (981)	±0.65 (±4.57)
150 (147)	±0.90 (±8.83)
3 (29)	±0.060 (±0.589)
15 (147)	±0.100 (±0.981)
30 (294)	±0.200 (±1.961)
45 (441)	±0.300 (±2.943)

Fuente: ASTM E18,2020

- La lectura se efectúa una vez retirada la carga máxima de ensayo, manteniendo la carga durante un tiempo de 15 a 20 segundos, y se traduce directamente en una escala de dureza Rockwell.
- Repetir en las mismas condiciones hasta obtener un total de 10 indentaciones, para poder tener un promedio de dureza Rockwell.

A continuación, se muestran los parámetros de experimentación empleados en el ensayo.

**Tabla 10-3:** Datos iniciales para el ensayo de dureza

DATOS INICIALES	
PRECARGA	10 Kgf
CARGA	50 Kgf
PATRÓN DE CALIBRACIÓN	46,5 HRC
MEDIDA OBTENIDA	45 HRC
ERROR RELATIVO	3,22%

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

### 3.6 Dureza Brinell

- Mediante la utilización del durómetro, se utiliza un indentador de bola de 2,5 mm de diámetro, en donde de inicio se encera la máquina, seguido se aplica una precarga y por último una carga en un lapso de tiempo que en los pasos siguientes se explica cada uno de ellos.

### 3.6.1 Preparación de la probeta

- La superficie de la probeta de ensayo debe ser plana, pulida y exenta de óxidos y materias extrañas, para que permita determinar con exactitud el diámetro de la impresión.
- La preparación de la probeta de ensayo debe realizarse sin alterar las condiciones originales del material, evitando calentamientos apreciables o endurecimientos superficiales.
- El espesor de la probeta debe ser, por lo menos, ocho veces la profundidad  $h$  de la impresión. Sobre la cara opuesta de la superficie ensayada no debe aparecer deformación alguna, después de efectuado el ensayo.

### 3.6.2 Selección de la carga por aplicar

- Realizar la selección de la carga y diámetro de la esfera a usarse en el ensayo está determinada por dos factores:
  - a) el valor de la relación  $F/D^2$
  - b) el tamaño de la impresión, la cual dará óptima seguridad.
- El valor de  $F/D^2$  dependerá de la naturaleza y dureza del material que debe ensayarse, para lo cual se han adoptado cuatro valores normalizados de  $F/D^2$ , así: 30, 10, 5, 1; la Tabla 11-3 presenta valores que relacionan la carga y el diámetro de la esfera correspondientes a ellos. La Tabla 11-3 se usa para elegir la carga y el diámetro de la esfera más convenientes para realizar el ensayo

**Tabla 11-3:** Valores que relacionan la carga y diámetro de esfera

Diámetro de la esfera (mm)	Carga (kgf)			
	Light Metals $F/D^2=1$	Cu / Al $F/D^2=5$	Cu / Al $F/D^2=10$	Steel / Iron $F/D^2=30$
10	100	500	1000	3000
5	25	125	250	750
2,5	6,25	31,25	62,50	187,50
2	4	20	40	120
1	1	5	10	30

Fuente: ASTM E10,2018

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

- Establecer el mínimo espesor de probeta que debe utilizarse con relación a la dureza del material y la carga empleada, para que la determinación sea confiable.

**Tabla 122-3:** Espesores mínimos de probeta

Espesor Mínimo	Mínima dureza Brinell				
	Carga (kgf)				
mm	3 000	1 500	500	250	187,50
1,6	600	300	100	50	38
2	480	240	80	40	30
2,5	384	192	64	32	24
3,15	305	152	51	25	19
4	240	120	40	20	-
5	192	81	32	16	-
6,3	152	76	25	-	-
8	120	60	20	-	-
10	96	48	16	-	-

Fuente: ASTM E10,2018

Realizado por: Rojas Juan &amp; Rosero Israel, 2022

- El valor de  $F/D^2$  usado estará de acuerdo con la especificación del material, sin embargo, en la Tabla 13-3 se establecen valores para los materiales más representativos.

**Tabla 13-3:** Valores de  $F/D^2$  para materiales representativos

Material	Dureza Brinellaproximada	Relación $F/D^2$
<b>Aceros y fundición de hierro</b>	Alrededor de 100	30
<b>Cobre, aleaciones de cobre y aluminio</b>	30 a 200	10
<b>Aluminio</b>	15 a 100	5
<b>Plomo, estaño y otras aleaciones</b>	3 a 20	1

Fuente: ASTM E10,2018

Realizado por: Rojas Juan &amp; Rosero Israel, 2022

- Usar esferas con diámetros de 1; 2; 2,5; 5 y 10 milímetros cuyas tolerancias están establecidas en la Tabla 14-3.

**Tabla 14-3:** Tolerancias en el diámetro de esferas

Diámetro de esfera	Tolerancia
M	mm



m	
10	±0,0045
5	±0,004
2,5	±0,0035
2	±0,0035
1	±0,0035
Las tolerancias corresponden al grupo 6 del sistema ISO de ajustes y tolerancias (INEN59).	

Fuente: ASTM E10,2018

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

- Realizar el ensayo a temperaturas ambientales entre 0° y 40°C, cuando se considere necesario realizar del ensayo bajo condiciones controladas, éste deberá llevarse a cabo a una temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  en climas moderados, y  $27 \pm 2^\circ\text{C}$  en climas tropicales.
- Colocar la probeta de ensayo sobre un soporte rígido. Las superficies de contacto deben estar limpias y libres de materias extrañas (aceite, óxido, polvo, etc). La probeta debe apoyarse perfectamente sobre el soporte, de manera que no ocurran desplazamientos.
- Durante todo el ensayo, el aparato debe estar protegido contra vibraciones o choques.

### 3.6.3 Aplicación de la carga

- Por regla general, la distancia del centro de la impresión al borde de la probeta debe ser lo menos 2,5 veces el diámetro de la impresión y la distancia entre los centros de dos impresiones adyacentes por lo menos cuatro veces el diámetro de la impresión.
- El ensayo deberá realizarse de modo que se evite cualquier factor que pueda alterar el resultado del ensayo (como pandeo en los bordes o distorsión de la probeta).
- Colocar la esfera en contacto con la superficie de la probeta y aplicar la carga normalmente a esta superficie en forma gradual y sin choques ni vibraciones, hasta alcanzar la de ensayo.
- Mantener la carga por espacio de 10 a 15 segundos.
- Sobre cada impresión, medir dos diámetros perpendiculares entre sí y tomar el valor medio de estas medidas.
- Para que el ensayo sea válido, el diámetro medio de la impresión será:  $0,25 D < d < 0,50 D$ .
- Para medir el diámetro de la impresión se usará un microscopio u otro instrumento apropiado, capaz de garantizar una lectura con una precisión de  $\pm 0,25 \%$ .
- Se puede emplear cualquier método que permita una mejor medición del diámetro de la huella, siempre que no afecte a la misma.

- El número de mediciones para un ensayo de precisión nunca será inferior a tres. Cuando un valores muy diferente a los otros, debe ser descartado y tomado una nueva medición.

### 3.6.4 Cálculo de dureza Brinell

Siguiendo este procedimiento ordenado y sistemático se realiza el cálculo de una dureza para en el capítulo posterior mostrar los resultados totales obtenidos para cada material en estudio.

Se aplica la ecuación 13:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (13)$$

Con los siguientes datos: P= 187,5 Kg, D= 2,5 mm, d= 0,8925 mm.

Reemplazando en la ecuación:

$$HB = \frac{2 * 187,5}{\pi * 2,5(2,5 - \sqrt{2,5^2 - 0,8925^2})} = 289,83$$

Este cálculo se aplica para cada una de las mediciones de diámetros en los diferentes materiales para posterior a ello sacar un promedio y determinar la dureza Brinell.

## 3.7 Ensayos de tracción y tenacidad.

### 3.7.1 Muestras


En base a lo estipulado en la norma ASTM E8 se puede ensayar de mínimo 3 y máximo 5 probetas, se opta por tomar en total doce (12) probetas circulares de acero para ensayo de tracción, las cuales están divididas en 4 para cada material y la norma ASTM E23 establece 3 probetas acogiendo así un total de nueve (9) probetas metálicas para ensayo de impacto Charpy, divididas en 3 por cada material.

### 3.7.2 Generalidades e identificación

En la Tabla 15-3 se muestra la identificación de las muestras a ser ensayadas:

**Tabla 15-3:** Identificación de las muestras

Ensayo	Id. cliente	Id. LAEV	Probetas
Tracción	M303 (T1-T4)	M22.050.09 M22.050.12	
	17-4PH (T1-T4)	M22.050.01 M22.050.04	

	AISI 420 (T1-T4)	M22.050.05 M22.050.08	
Impacto Charpy	M303 (T1-T3)	M22.050.19 M22.050.21	
	17-4PH (T1-T3)	M22.050.13 M22.050.15	
	AISI-420 (T1-T3)	M22.050.16 M22.050.18	

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

### 3.7.3 Condiciones ambientales

- Temperatura:  $24,2 \pm 2,4$  °C
- Humedad relativa:  $41,4 \pm 8,0$  %

### 3.7.4 Ensayo de tracción material base


Se realiza el ensayo de tracción en doce probetas circulares de acero inoxidable: 4 probetas acero AISI420, 4 probetas acero M303, 4 probetas acero 17-4PH siguiendo el método establecido en la norma ASTM E8/EM8-09 “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials” para determinar las propiedades mecánicas de resistencia a la tracción

Para la realización de este ensayo, se utiliza la maquina universal o máquina de tracción, en donde, en base a la norma ya mencionada se sigue un procedimiento con un orden lógico para conseguir las siguientes características:

- Límite elástico
- Punto de fluencia o cadencia
- Esfuerzo último o límite de resistencia
- Carga de rotura
- Módulo de elasticidad
- Porcentaje de elongación

**Tabla 16-3:** Características de la maquina Universal Tinius Olsen

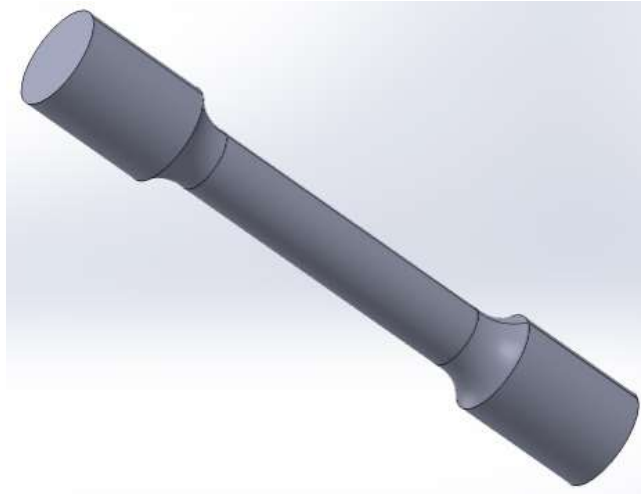
Características	Maquina Universal Tinius Olsen	
Marca	Tinius Olsen	
Modelo	Super L	
Capacidad de carga	587 KN	
Aplicación de carga	Sistema Hidráulico	
Voltaje	220 V	
Frecuencia	60 Hz	
Display	Digital	
Dimensiones	Ancho: 915 mm	
	Profundidad: 788 mm	
	Altura: 1016 mm	



**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

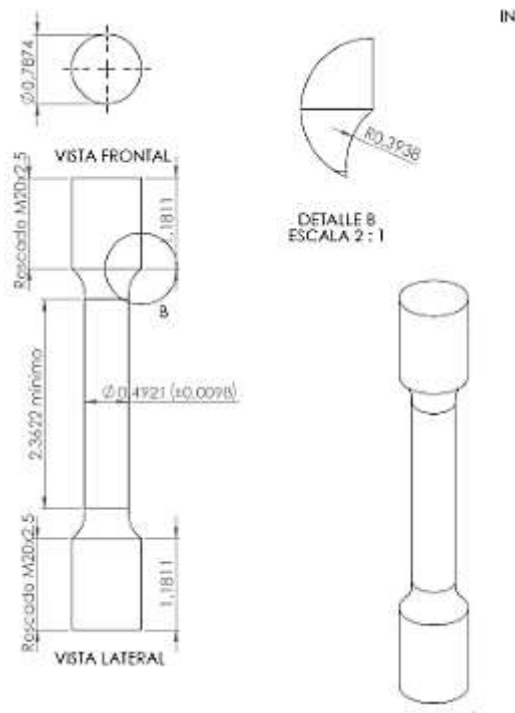
Para realizar el ensayo de tracción se tiene el siguiente procedimiento:

- Utilizando un martillo y una punta de acero, marcar una longitud calibrada de 50 mm
- Tomar las dimensiones de la probeta y verificar que cumpla con los parámetros dimensionales y geométricos que establece la norma para la validez del ensayo.
- Colocar las planchas y soportes para las mordazas cilíndricas roscadas
- Ubicar y sujetar el deformímetro en las marcas previamente realizadas en la probeta.
- Tomar simultáneamente datos de carga y deformación absoluta.
- Prestar atención antes de la rotura de la probeta (cuando la contracción en el diámetro de la probeta es notoria), se debe retirar el deformímetro para salvaguardar el equipo.
- Una vez que se ha producido la rotura desmontar la probeta para tomar mediciones de diámetro en la contracción y la longitud final entre las marcas de control.
- Retirar los residuos de la probeta ensayada.
- Desmontar los accesorios colocados como indica el numeral 5, y limpiar el espacio de trabajo.
- Apagar los equipos
- Realizar los cálculos que permita desarrollar los objetivos específicos establecidos.



**Ilustración 9-3:** Probeta para ensayo de tracción

Fuente: ASTM E8,2018



**Ilustración 10-3:** Dimensiones de probetas para ensayo de tracción

Fuente: ASTM E8,2018

**Tabla 177-3:** Características de las probetas de tracción

Material	M303-17-4PH AISI 420	M303-17-4PH AISI 420
Longitud (A)	125 mm	4,921 in
Diámetro (d)	12.5 mm	0,492 in

Longitud de ensayo (C)	50 mm	1,968 in
Diámetro externo (D)	20 mm	0,787 in

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022


### 3.7.5 Ensayo de impacto

Temperatura de ensayo:  $25,4 \pm 0,1$  °C

Se realiza el ensayo de impacto en 9 probetas de acero inoxidable: 3 probetas acero AISI420, 3 probetas acero M303, 3 probetas acero 17-4Ph, siguiendo el método establecido en la norma ASTM E23 de “Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials” de la cual se ha extraído la mayor parte de la información.

Además, se utiliza la Norma Ecuatoriana Obligatoria INEN 1502 para la “Verificación de Máquinas de Prueba”, la cual establece procedimientos especiales de verificación en diversas máquinas de prueba

**Tabla 18-3:** Características del Pendulo Charpy

Características	Péndulo Charpy	
Marca	Tinius Olsen	
Modelo	N/A	
Capacidad	358 J	
Aplicación de carga	Sistema mecánico	
Dimensiones	Ancho: 85 mm	
	Profundidad: 48 mm	
	Altura: 1010 mm	

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

**Tabla 19-3:** Condiciones generales del péndulo Charpy

Dimensiones	Designación
$40^{+0,5}_{-0}$ mm	Distancia entre los apoyos
De 1 a 1,5 mm	Radio de curvatura de los soportes
1:5	Inclinación de los soportes
30°	Angulo de la punta del martillo

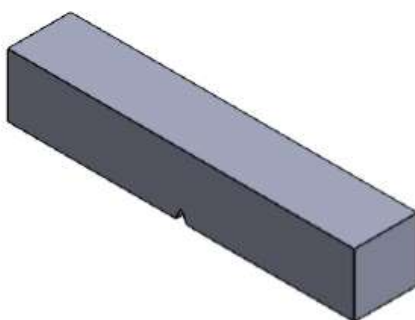
De 2 a 2,5 mm	Radio de curvatura de la punta del martillo
De 4,5 a 7 m/s	Velocidad del martillo en el momento del impacto
30 kgf/m	Energía del péndulo

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

Para este fin se lleva a cabo el siguiente procedimiento:

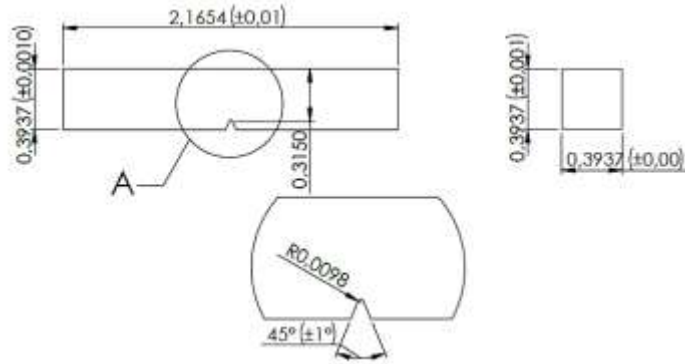
- Mediante un calibrador obtener las dimensiones de la probeta respetando la norma ASTM – E23
- Colocar y asegurar la probeta con el tornillo fijador.
- Realizar un ensayo en vacío para observar el desplazamiento de cero en el reloj del péndulo
- Verificar que la aguja de la caratula esté encerada.
- Tomar el martillo del péndulo y levantarlo hasta la altura deseada colocando el pin de seguridad
- Verificar que el martillo al caer se ubique en un solo plano y no existan obstáculos frente a él.
- Liberar el martillo soltando el pin de seguridad.
- Observar la cantidad de energía que ha absorbido en el impacto.
- Luego de que la probeta se halla fracturado y el brazo de la máquina esto totalmente parado, se quita el registro y se realizara el estudio y análisis de los materiales utilizados.
- Retirar las probetas y observar el tipo de fractura

Algunas de las características se las presenta de esta manera.



**Ilustración 11-3:** Probeta para ensayo de tenacidad

Fuente: ASTM E23,2018



**Ilustración 12-3:** Dimensiones de probetas para ensayo de tenacidad

Fuente: ASTM E23,2018

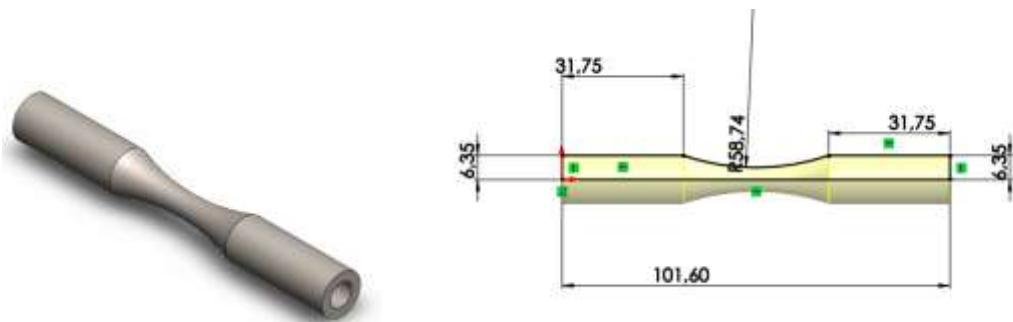
**Tabla 20-3:** Medidas de las probetas para el ensayo Charpy

<b>Longitud</b>	55 mm	2,1654 in
<b>Ancho</b>	10 mm	0,3937 in
<b>Espesor</b>	10 mm	0,3937 in
<b>Ángulo del entalle</b>	45°	45°
<b>Ancho del entalle</b>	3 mm	0,3450 in

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

### 3.8 Simulación Ensayo de Fatiga

Para este estudio se realiza un eje como se muestra en la ilustración 13-3, la geometría de la probeta del eje que se sometió a este ensayo de fatiga está según las dimensiones de la normativa para ensayos de materiales ASTM E466



**Ilustración 13-3:** Dimensiones de probetas para ensayo de tenacidad

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

En la Ilustración 14-3 se describe las propiedades del material, las cuales se obtienen previamente en los diferentes ensayos que se realizan en el laboratorio de resistencia de materiales, estos valores están tabulados para cada uno de los especímenes en estudio.



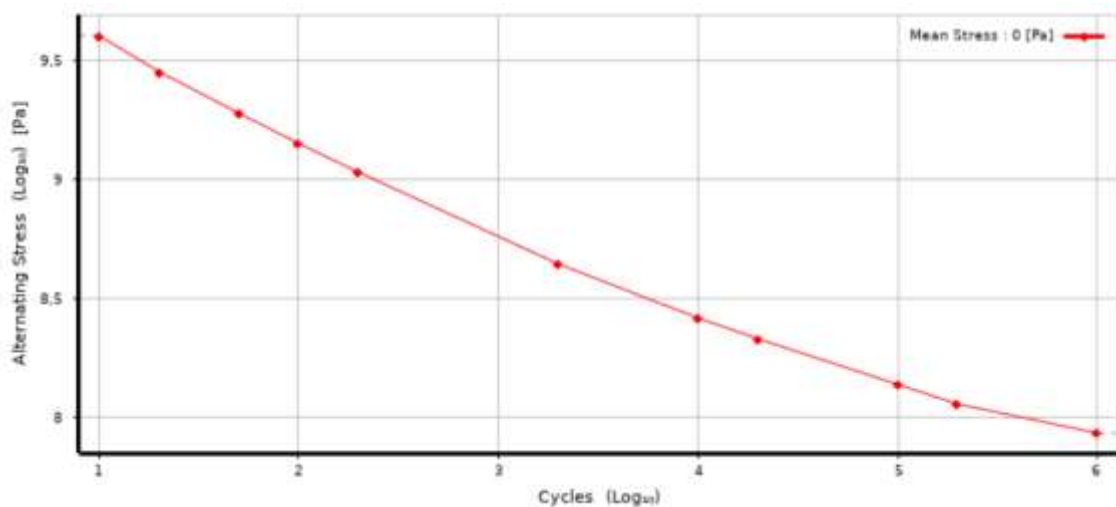
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>		
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
6	Isotropic Elasticity				
12	Strain-Life Parameters				
20	S-N Curve	Tabular			
24	Tensile Yield Strength	849,4	MPa		
25	Compressive Yield Strength	849,4	MPa		
26	Tensile Ultimate Strength	978,8	MPa		
27	Compressive Ultimate Strength	0	MPa		

**Ilustración 14-3:** Propiedad del material

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

### 3.8.1 Curvas S-N

La Ilustración 5-3 muestra la curva esfuerzo vs número de ciclos del material el cual se somete a fatiga, esta ilustración ayuda a la interpretación de que a medida que aumenta el número de ciclos el esfuerzo va disminuyendo.



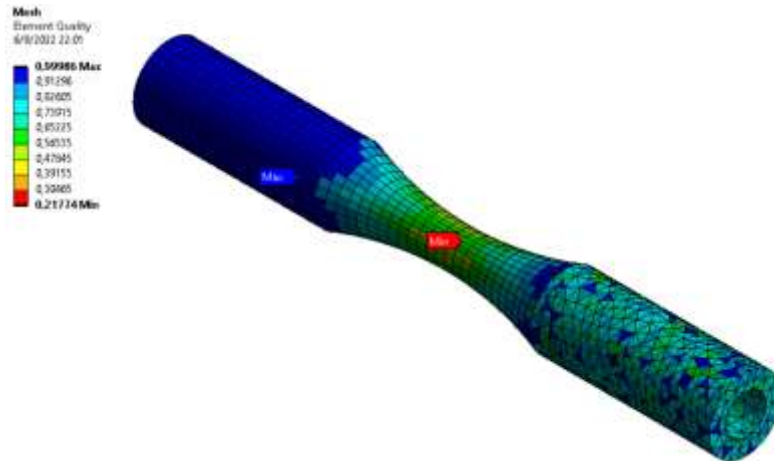
**Ilustración 15-3:** Curva S-N

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

### 3.5.2 Pre proceso Mallado

Para el mallado se utiliza diferentes métodos tanto globales como locales, así, el sweet method ayuda al mallado de cuerpos cilíndricos y por otra parte el Edge sizing define cuantas divisiones puede tener una línea.

En la Ilustración 16-3 muestra el mallado con la calidad de los elementos.



**Ilustración 16-3:** Pre proceso Mallado

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

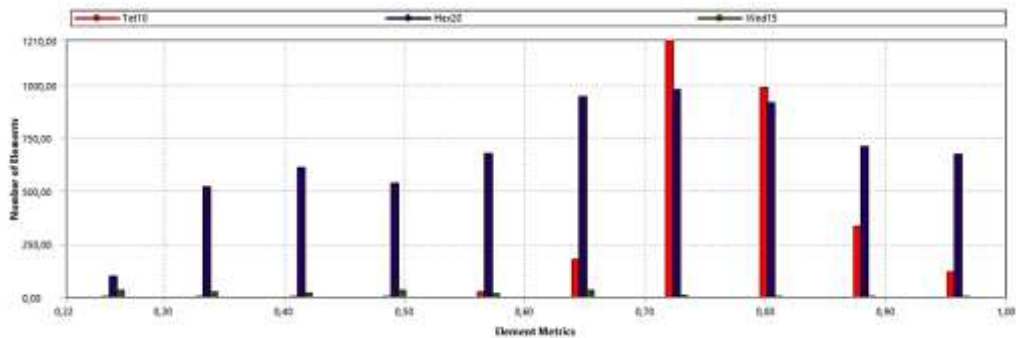
En el análisis que se realiza para este estudio, se debe asegurar que sea de manera confiable, esto se consigue revisando la calidad de mallado como se muestra en la ilustración 17-3 en donde indica que el valor mínimo es de 0,21, estando así dentro del parámetro para un análisis estructural asegurando con esto que los resultados que se obtiene son confiables.

Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	0,21774
<input type="checkbox"/> Max	0,99986
<input type="checkbox"/> Average	0,69543
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,17667

**Ilustración 17-3:** Calidad mallado

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

La Ilustración 18-3 indica los elementos que se generaran como tetraedros, cuadriláteros y el número de elementos que se van a analizar.

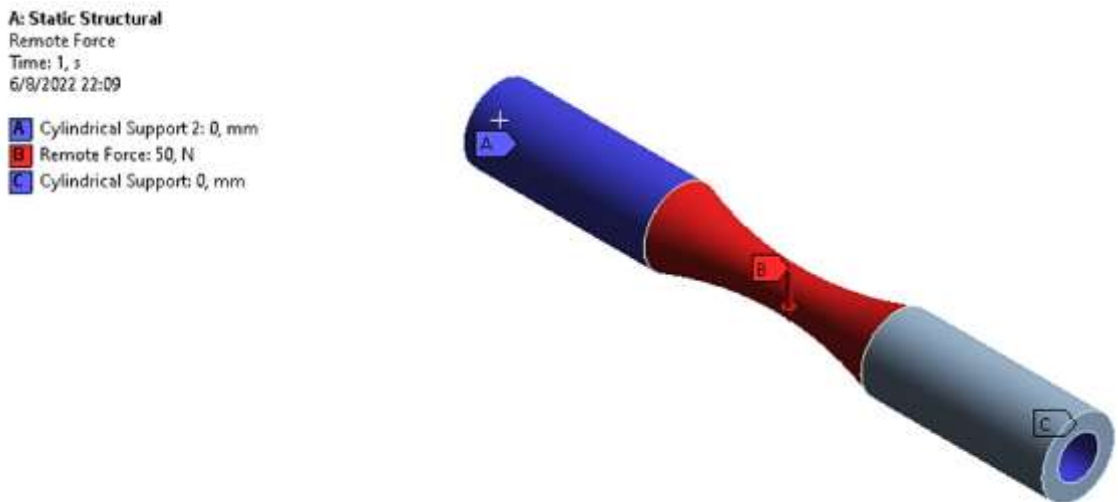


### Ilustración 18-3: Generaron como tetraedros, cuadriláteros

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

#### 3.5.3 Condiciones de borde

De acuerdo con el ensayo de fatiga se tiene dos puntos de apoyo además de un punto de carga, con lo cual se ha realizado el análisis con dos soportes, uno localizado en el contrapunto de la máquina de ensayos y otro en el lado de sujeción de las mordazas del mandril, de esta manera, la Ilustración 19-3 muestra tanto las condiciones de borde, como la carga remota que se coloca en el centro geométrico de la probeta.

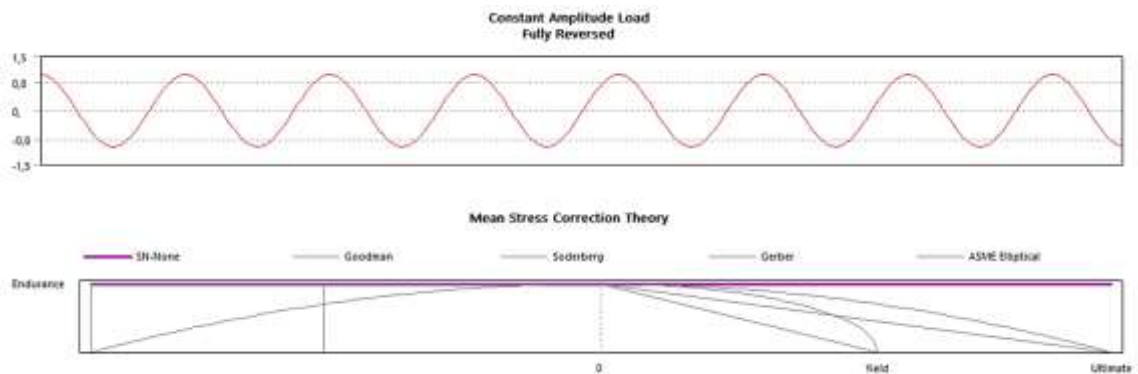


### Ilustración 19-3: Condición de borde

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

A continuación, se verifica los diferentes resultados que se obtendrá gracias a un análisis de parametrización se obtiene el número de ciclos que será capaz de resistir la probeta de cada uno de los diferentes materiales, así también se puede estipular el coeficiente de seguridad.

Para un análisis de fatiga se utiliza un coeficiente de Marín de 0,6 y un análisis del tipo full reversible, dando un factor de R igual a 1 como se muestra en la Ilustración 20-3 para este caso se analiza con la ayuda del esfuerzo equivalente de Von Mises.



### Ilustración 20-3: Esfuerzo de Von Misses

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

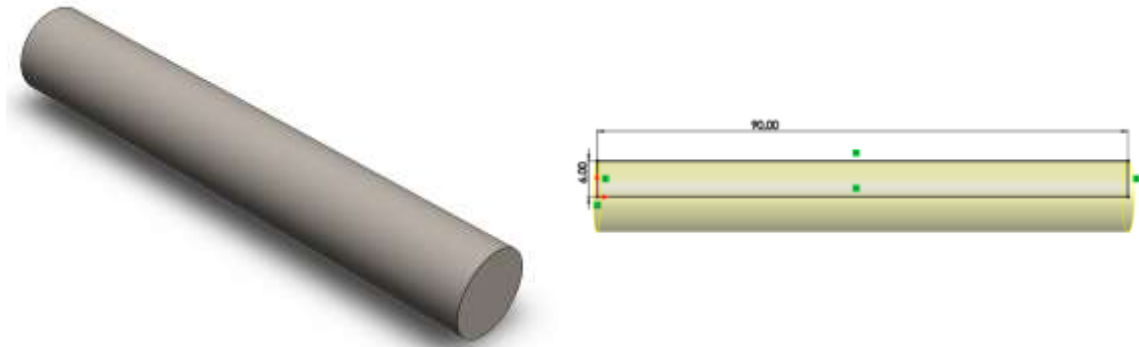
Fatigue Strength Factor (Kf)	0,6
<b>Loading</b>	
Type	Fully Reversed
<input type="checkbox"/> Scale Factor	1,
<b>Definition</b>	
<input type="checkbox"/> Display Time	End Time
<b>Options</b>	
Analysis Type	Stress Life
Mean Stress Theory	None
Stress Component	Equivalent (von-Mi...
<b>Life Units</b>	
Units Name	cycles
1 cycle is equal to	1, cycles

### Ilustración 21-3: Esfuerzo de Von Misses

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

## 3.9 Simulación Ensayo de Torsión

En la ilustración 22-3 se encuentra la geometría de una varilla de diámetro 12 mm y longitud 90 mm, estas medidas corresponden a la norma ASTM E143-02 para ensayos de torsión, en donde estipula que la longitud debe ser como mínimo 4 veces el diámetro.



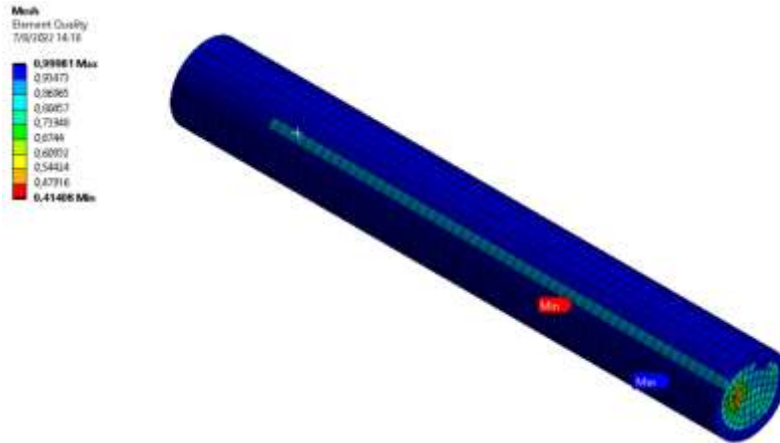
### Ilustración 22-3: Simulación del ensayo de torsión

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

#### 3.6.1 Pre proceso Mallado

Para realizar el mallado de una geometría completamente cilíndrica, se utiliza el comando global SWEP MESH, el mismo que se muestra en ilustración 23-3, con un promedio de calidad de malla de 0,83 y una calidad mínima de 0,43.

Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	0,41408
<input type="checkbox"/> Max	0,99981
<input type="checkbox"/> Average	0,83055
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,12741



**Ilustración 23-3:** Simulación del pre proceso mallado

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

### 3.6.2 Condiciones de borde

Para simular un ensayo de torsión se debe asumir que una parte de la varilla va a estar totalmente fija, mientras que en el extremo opuesto se someterá a un momento torsor como se muestra en la ilustración 24-3

#### A: Static Structural

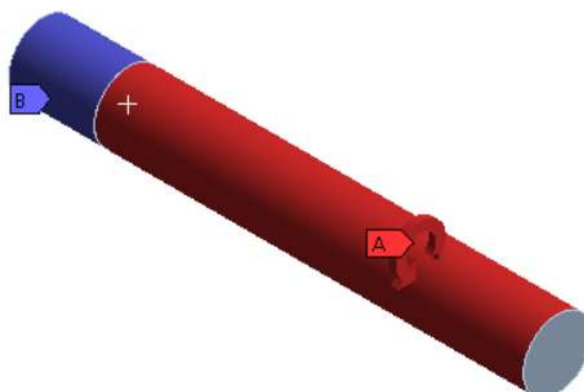
Moment

Time: 1, s

7/8/2022 14:21

**A** Moment: 50, N-mm

**B** Fixed Support



**Ilustración 24-3:** Simulación de condición del borde

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022



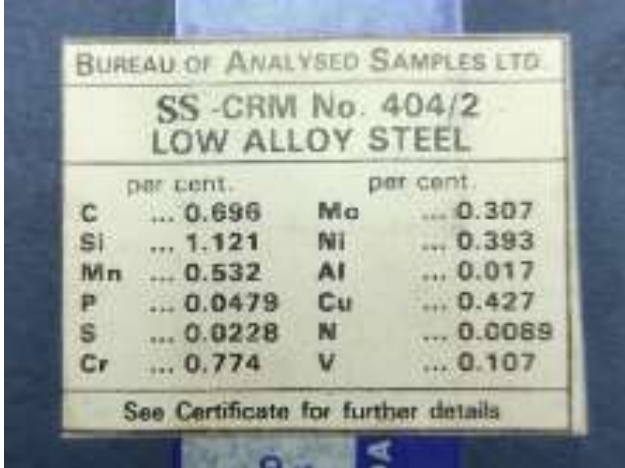
## CAPÍTULO IV

### 4 RESULTADOS

En el presente capítulo se detallarán los resultados obtenidos de los ensayos realizados para la caracterización del acero M303, se contrastarán sus metalografías, composición química, propiedades mecánicas y se validará su sustitución con los aceros AISI 420 y 17-4PH.

#### 4.1 Calibración del espectrómetro

La calibración del espectrómetro se lo realizó con el acero de baja aleación SS-CRM 402/2, según lo recomendado por el fabricante. Este material está destinado para la calibración de espectrómetros de emisión óptica y de rayos X para el análisis de materiales similares, como los aceros inoxidable. A continuación, en la ilustración 1-4 se muestra la escala de valores de calibración del equipo



per cent.		per cent.	
C	... 0.696	Mo	... 0.307
Si	... 1.121	Ni	... 0.393
Mn	... 0.532	Al	... 0.017
P	... 0.0479	Cu	... 0.427
S	... 0.0228	N	... 0.0069
Cr	... 0.774	V	... 0.107

See Certificate for further details

**Ilustración 1-4:** Valores permisibles del espectrómetro.

Fuente: Sheet , 2020

Una vez preparado el patrón de calibración, se realizó el ensayo de espectrometría de lo cual se obtuvo los siguientes valores:

**Tabla 1-4:** Mediciones obtenidas en el ensayo de calibración

<b>ELEMENTO</b>	<b>Valor permisible (%)</b>	<b>Valor Obtenido (%)</b>
<b>C</b>	0,969	0,722
<b>Si</b>	1,121	1,226
<b>Mn</b>	0,532	0,607
<b>P</b>	0,0479	0,0030
<b>S</b>	0,0228	0,0030
<b>Cr</b>	0,774	0,729
<b>Mo</b>	0,307	0,330
<b>Ni</b>	0,393	0,312
<b>Al</b>	0,017	0,034
<b>Cu</b>	0,427	0,322
<b>V</b>	0,107	0,117

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

A continuación, se detalla el grado de error obtenido durante la calibración del equipo, mediante la siguiente expresión:

$$Error_{porcentual} = \frac{|Valor_{real} - Valor_{experimental}|}{Valor_{real}} \quad (13)$$

**Tabla 2-4:** Error porcentual de medición.

<b>ELEMENTO</b>	<b>Error (%)</b>
<b>C</b>	25
<b>Si</b>	9
<b>Mn</b>	14
<b>S</b>	87
<b>Cr</b>	6
<b>Mo</b>	7
<b>Ni</b>	21
<b>Cu</b>	25
<b>V</b>	9

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022





Sample:

Analysis Time: 18.05.2022 12:25:15

Method: Fe110

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
∅	0,722	1,226	0,607	<0,0030	<0,0030
	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Cu [%]	Al [%]
∅	0,729	0,330	0,312	0,322	0,034
	Co [%]	Nb [%]	Ti [%]	V [%]	W [%]
∅	0,0059	<0,0050	0,0055	0,117	<0,020
	B [%]	Sn [%]	Fe [%]		
∅	<0,0010	0,013	95,55		

**Ilustración 2-4:** Composición química obtenido en base al ensayo de espectrometría al acero de calibración.

Fuente: Sheet , 2020

## 4.2 Ensayo de Espectrometría

Una vez preparadas las probetas y calibrado el equipo, se realiza el análisis de espectrometría de los aceros designados: M303, AISI 420 y 17-4PH.

### 4.2.1 Acero AISI 420

**Tabla 3-4:** Datos de la composición química del acero AISI 420 obtenidos en el ensayo de espectrometría.

## Bruker Analysis Report



Sample:

Analysis Time: 18.05.2022 11:52:54

Method: Fe130

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
∅	0,476	0,104	0,572	<0,0030	<0,0030
	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Cu [%]	Al [%]
∅	13,98	<0,0100	0,047	0,032	0,035
	Co [%]	Nb [%]	Ti [%]	V [%]	Fe [%]
∅	0,020	<0,0100	0,0047	0,068	84,66


Fuente: Sheet , 2020

Los resultados obtenidos para el acero AISI 420, muestran un porcentaje de carbono del 0,476%C, 0,104%Si, 0,572%Mn, 13,98%Cr, estos valores se encuentran dentro del límite máximo recomendado, valores que se estipulan en diferentes bibliografías (menor del 1,2%C y más de 10,5%Cr) para cumplir como un acero inoxidable, estos valores tabulados por medio de la espectrometría se los compara con los datos químicos de cada material que se encuentran en el capítulo del marco teórico.

#### 4.2.2 Acero M303

**Tabla 4-4:** Datos de la composición química del acero M303 obtenidos en el ensayo de espectrometría.

**Bruker Analysis Report**



---

Sample:				
Analysis Time:	18.05.2022 12:05:58	Method:	Fe130	

---

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
∅	0,336	0,174	0,663	<0,0030	<0,0030
	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Cu [%]	Al [%]
∅	14,91	0,734	0,606	0,047	0,036
	Co [%]	Nb [%]	Ti [%]	V [%]	Fe [%]
∅	0,029	<0,0100	0,0042	0,070	82,40

Fuente: Sheet , 2020

Los resultados obtenidos para el acero M303, muestran un porcentaje de carbono del 0,336%C, 0,174%Si, 0,663%Mn, 14,91%Cr, estos valores se encuentran dentro del límite máximo recomendado, valores que se estipulan en diferentes bibliografías (menor del 1,2%C y más de 10,5%Cr) para cumplir como un acero inoxidable, estos valores tabulados por medio de la espectrometría se los compara con los datos químicos de cada material que se encuentran en el capítulo del marco teórico.

### 4.2.3 Acero 17-4Ph

**Tabla 5-4:** Datos de la composición química del acero 17-4PH obtenidos en el ensayo de espectrometría.

#### Bruker Analysis Report



Sample:					
Analysis Time: 18.05.2022 12:32:33			Method: Fe130		
	<b>C [%]</b>	<b>Si [%]</b>	<b>Mn [%]</b>	<b>P [%]</b>	<b>S [%]</b>
Ø	0,098	0,397	0,701	<0,0030	<0,0030
	<b>Cr [%]</b>	<b>Mo [%]</b>	<b>Ni [%]</b>	<b>Cu [%]</b>	<b>Al [%]</b>
Ø	15,23	0,074	5,291	3,543	0,023
	<b>Co [%]</b>	<b>Nb [%]</b>	<b>Ti [%]</b>	<b>V [%]</b>	<b>Fe [%]</b>
Ø	0,112	0,195	0,0058	0,079	74,25

Fuente: Sheet , 2020

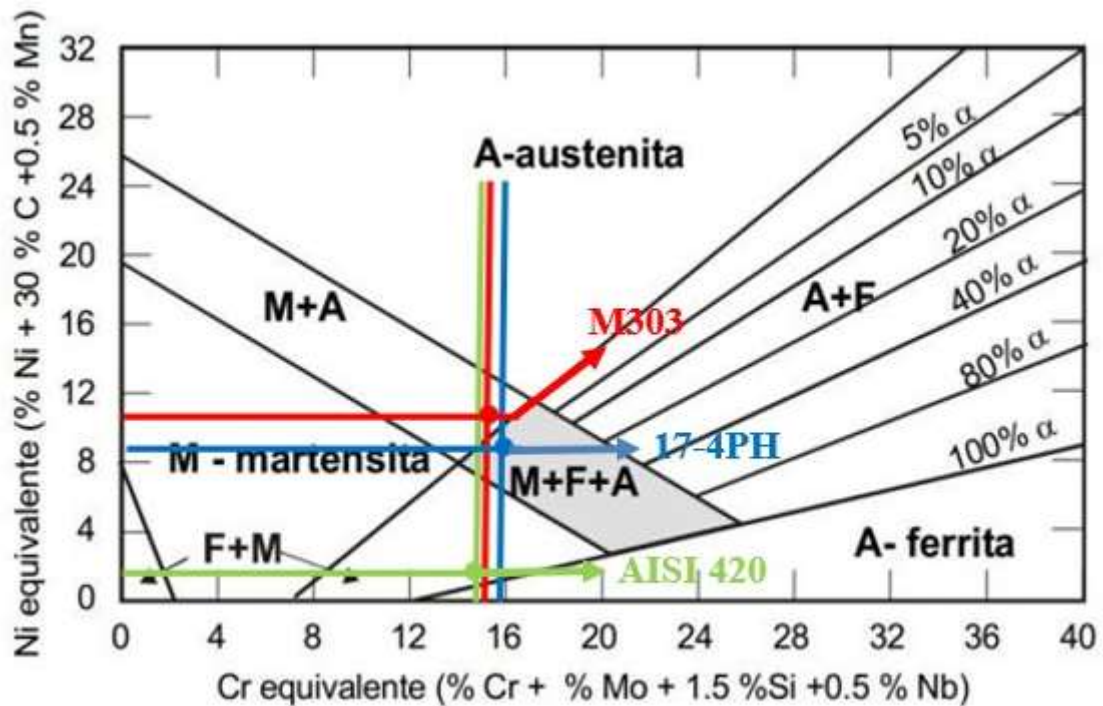
Los resultados obtenidos para el acero 17-4PH, muestran un porcentaje de carbono del 0,098%C, 0,397%Si, 0,701%Mn, 15,23%Cr, estos valores se encuentran dentro del límite máximo recomendado, valores que se estipulan en diferentes bibliografías (menor del 1,2%C y más de 10,5%Cr) para cumplir como un acero inoxidable, estos valores tabulados por medio de la espectrometría se los compara con los datos químicos de cada material que se encuentran en el capítulo del marco teórico.

Con una correcta determinación de la composición química mediante el ensayo de espectrometría se realiza el análisis de las microestructuras de cada uno de los materiales en estudio, además con la ayuda del diagrama de Schaeffler se determina la microestructura presente, aplicando las ecuaciones de porcentajes equivalentes, tanto para el Cromo como el Níquel.

Mediante el empleo del diagrama de Schaeffler se determina también la estructura, se realiza en primera instancia el cálculo de los equivalentes por medio de la utilización de las formulas

$$\begin{aligned}Cr_{eq} &= \%Cr + \%Mo + 1,5 \cdot (\%Si) + 0,5 \cdot (\%Nb) \\ Ni_{eq} &= \%Ni + 30 \cdot (\%C) + 0,5 \cdot (\%Mn)\end{aligned}$$

Aplicando las ecuaciones antes mencionadas para cada uno de los materiales en estudio, se tiene para el M303  $Cr_{eq} = 15,91$  y  $Ni_{eq} = 11,01$  (color rojo), para el acero 17-4PH  $Cr_{eq} = 15,997$  y  $Ni_{eq} = 8,581$  (color azul) y finalmente para el acero AISI 420  $Cr_{eq} = 15,555$  y  $Ni_{eq} = 1,835$  (color verde)



**Ilustración 3-4:** Diagrama de Schaeffler

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

Con las líneas trazadas sobre el diagrama de Schaeffler se aprecia las microestructuras de cada uno de los materiales, acorde al porcentaje equivalente de cada elemento químico presente, así para el acero M303 se encuentra en la zona de Martensita más Austenita, el acero 17-4PH está dentro de una zona que posee Martensita, Ferrita y Austenita, finalmente para el acero AISI 420 se encuentra en una zona que prevalece la Ferrita y la Martensita, con esto y la ayuda de las micrografías se revela y comprueba las microestructuras presentes en cada uno de ellos.

A continuación, se presenta los resultados que se obtiene de la microestructura de los aceros con un voltaje de 20 (Kv) a diferentes amplitudes como: 500X, 750X, 1000X, 1500X, mediante la obtención de una superficie tipo espejo como se muestra en la ilustración siguiente:

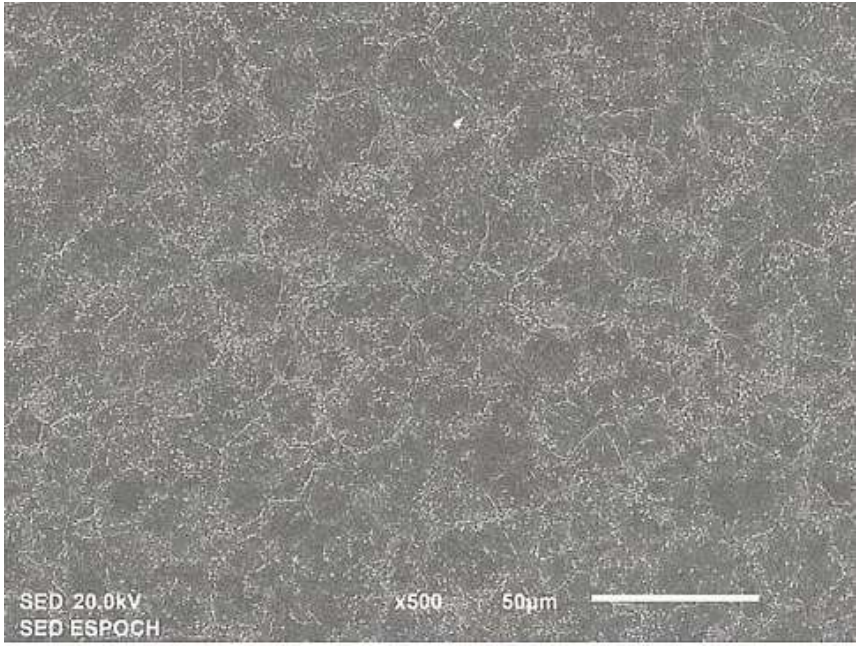


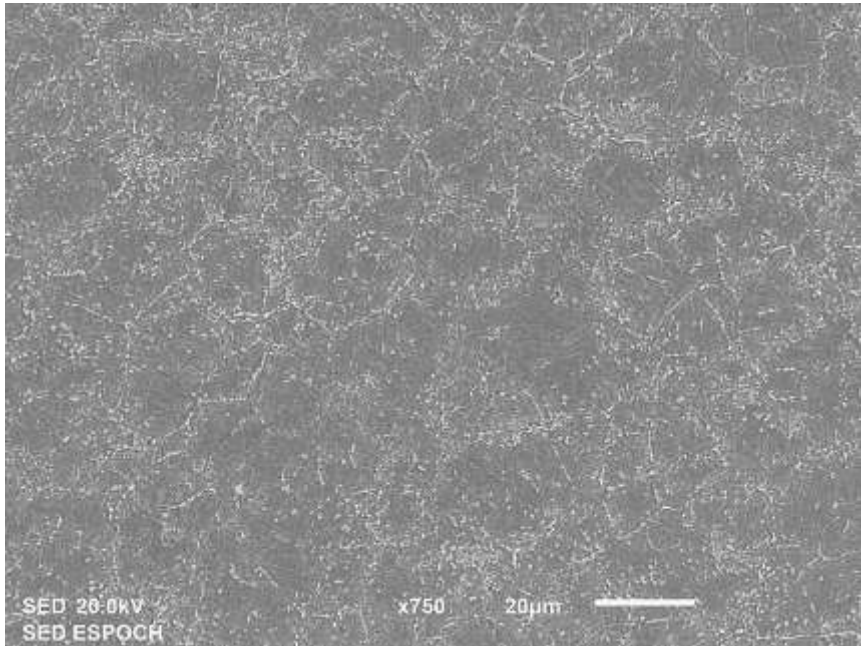
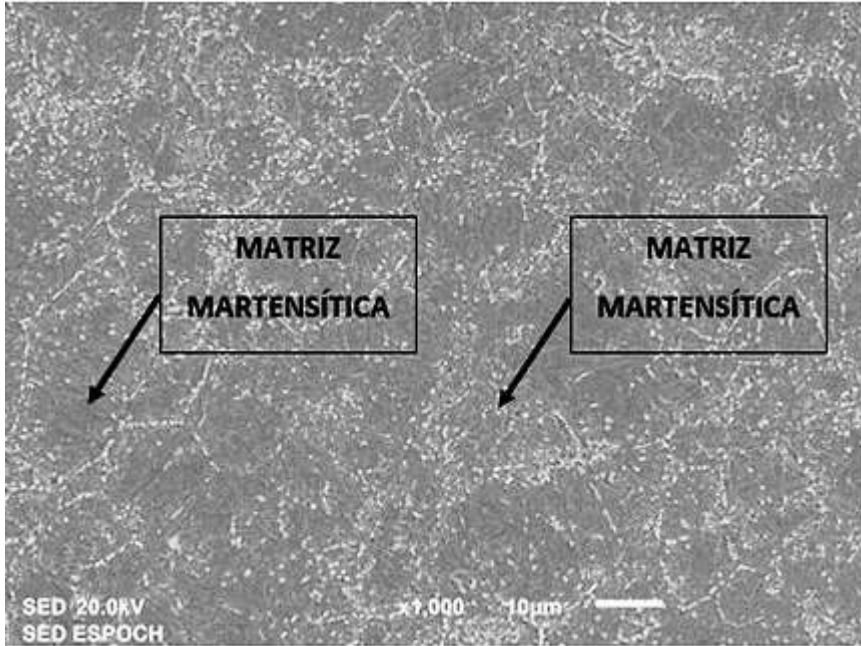
**Ilustración 4-4:** Probetas con superficie tipo espejo

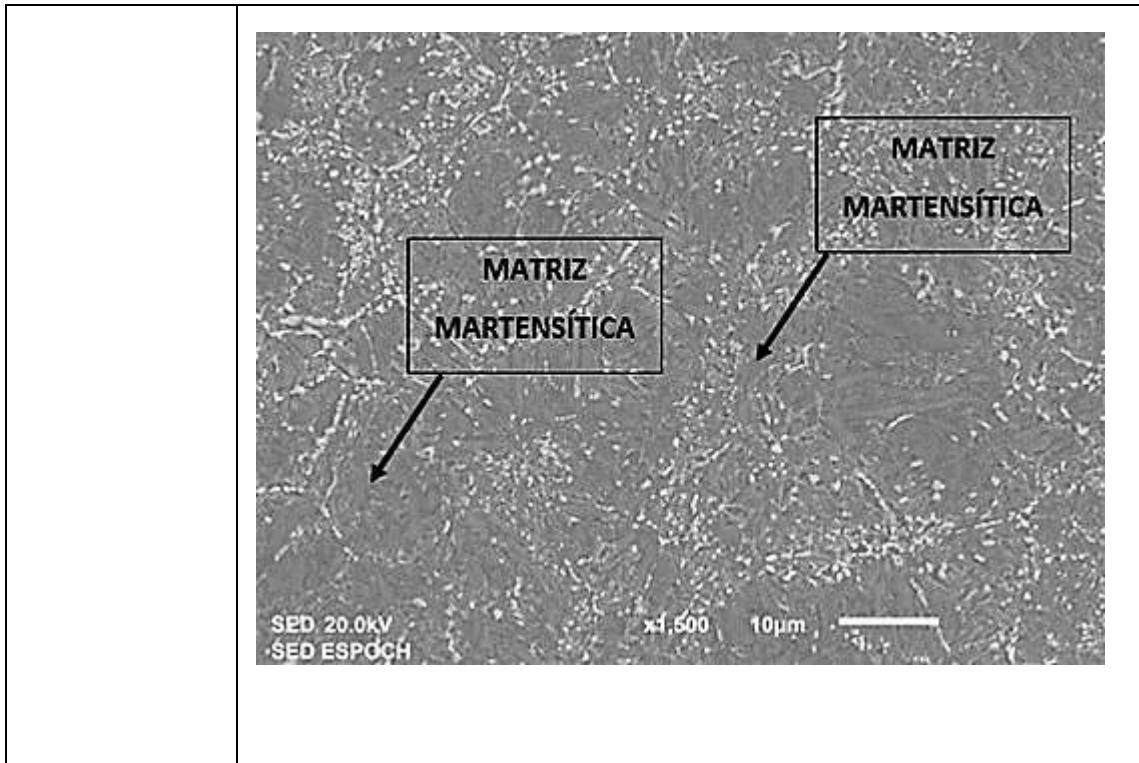
Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

#### 4.2.4 Microestructura M303

**Tabla 1-4:** Microestructura M303

AMPLIACIÓN	MICROGRAFÍA
500X-50um	
750X-20um	

	 <p>SED 20.0kV      x750      20µm</p> <p>SED ESPOCH</p>
<p>1000X- 10um</p>	 <p>MATRIZ MARTENSÍTICA</p> <p>MATRIZ MARTENSÍTICA</p> <p>SED 20.0kV      x1.000      10µm</p> <p>SED ESPOCH</p>
<p>1500X – 10um</p>	



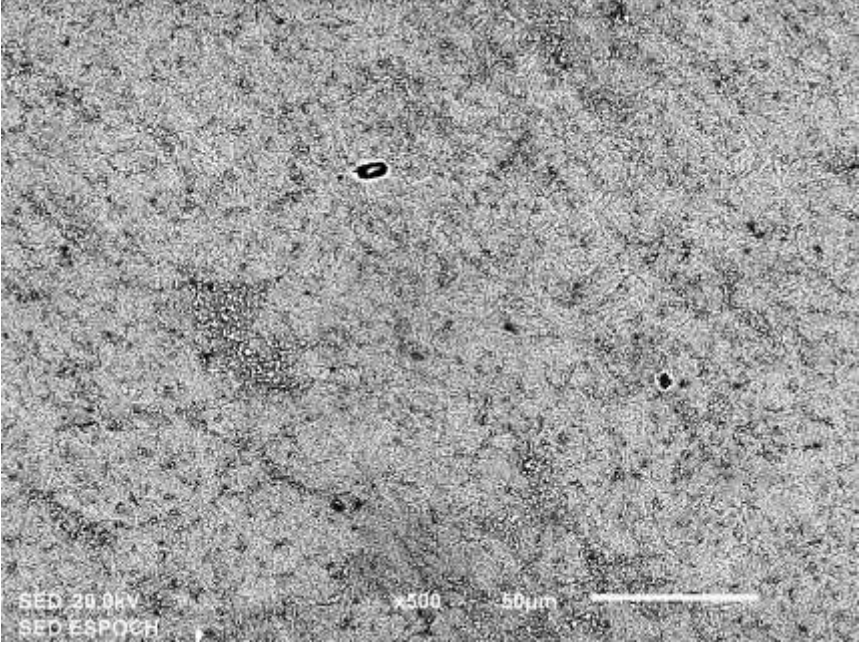
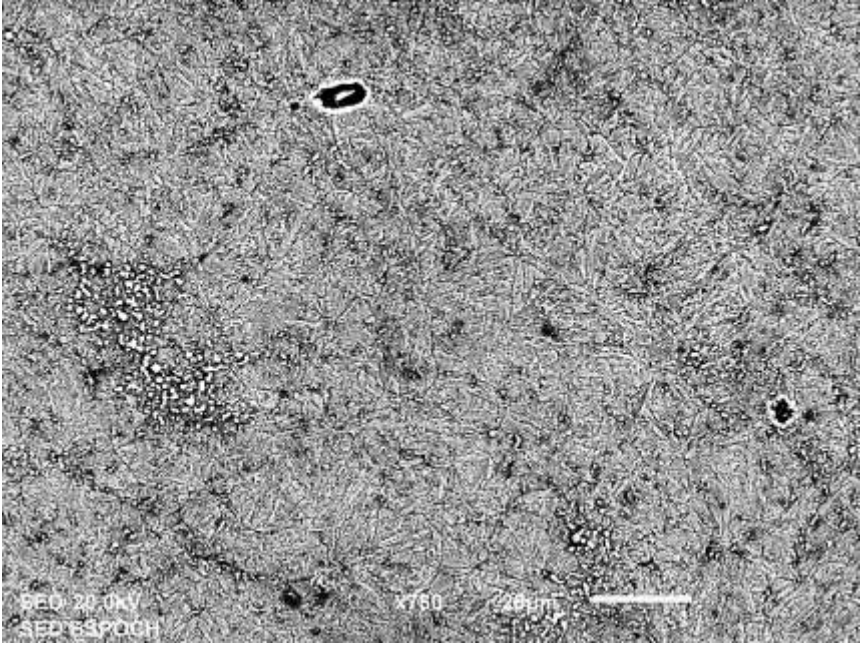
Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

En las microestructuras mostrada se identifica al acero M303 en donde se evidencia la formación de martensita desde los granos de austenita, en los límites de grano se presentan precipitaciones de carburos de cromo en menor cantidad a comparación de los carburos de hierro.

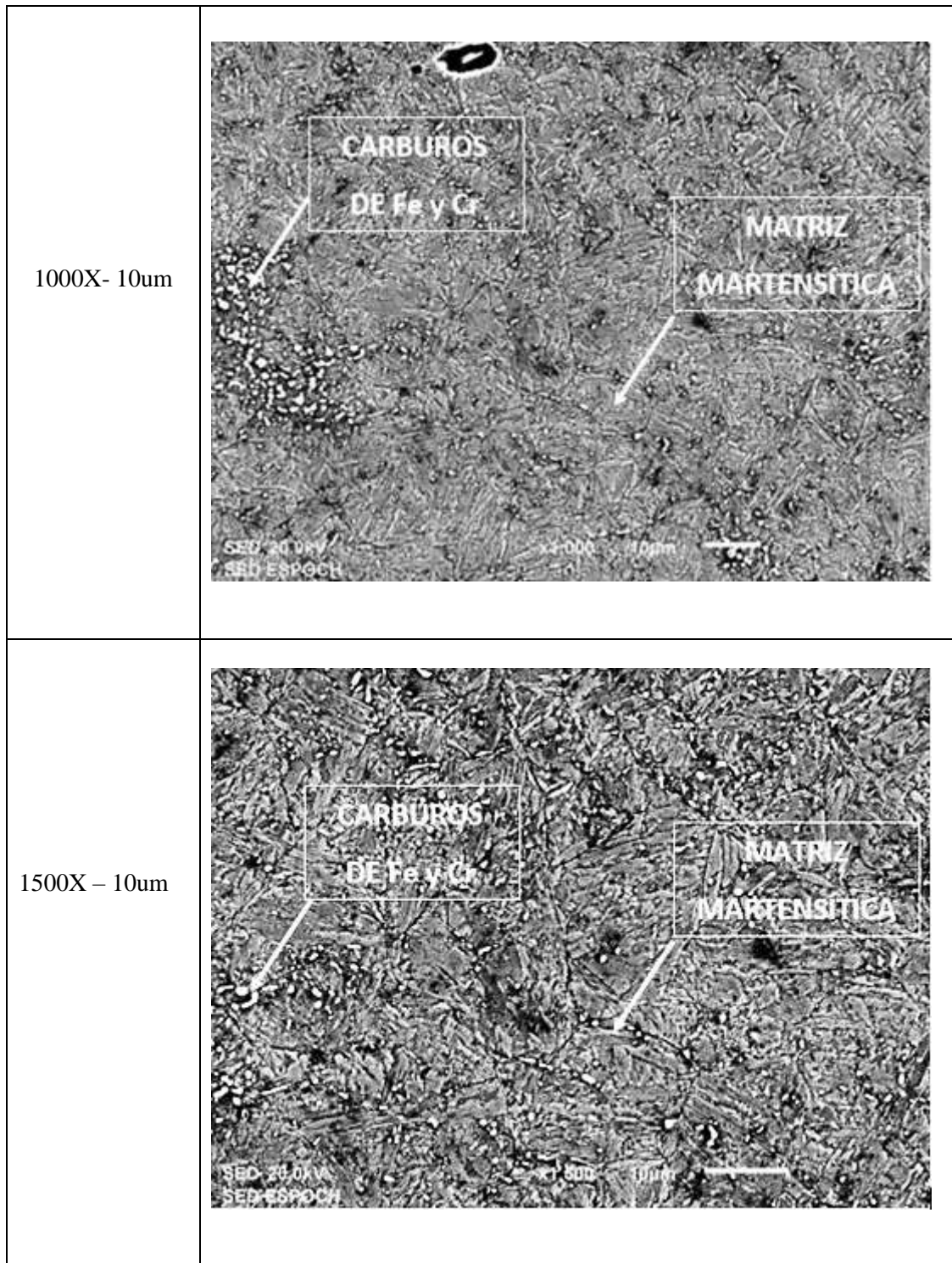
#### 4.2.5 Microestructura AISI 420

Tabla 2-4: Microestructura AISI 420

AMPLIACIÓN	MICROGRAFÍA
500X-50um	

	 <p>SED 20.0kV SED ESPOCH</p> <p>x500 50µm</p>
750X-20um	 <p>SED 20.0kV SED ESPOCH</p> <p>x750 20µm</p>



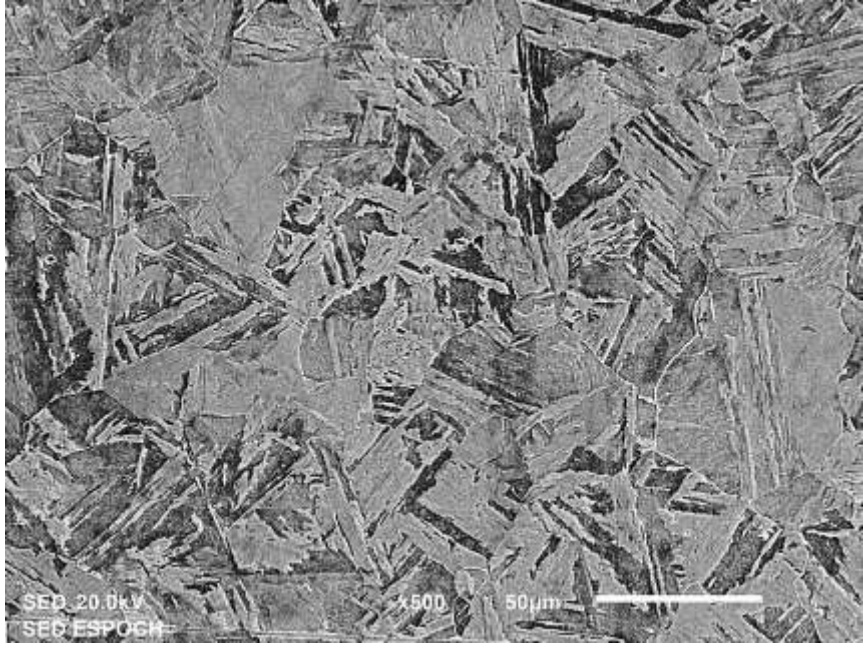
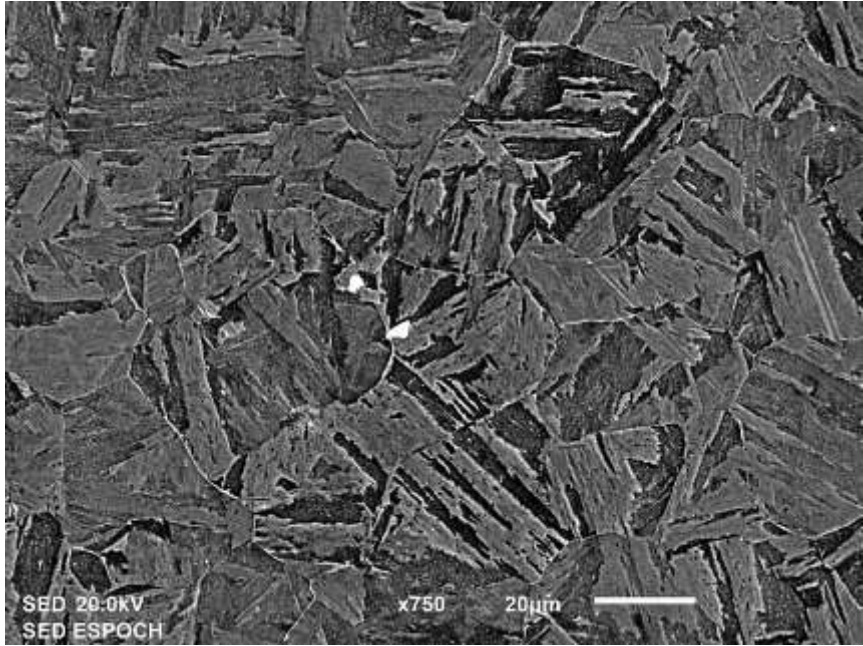


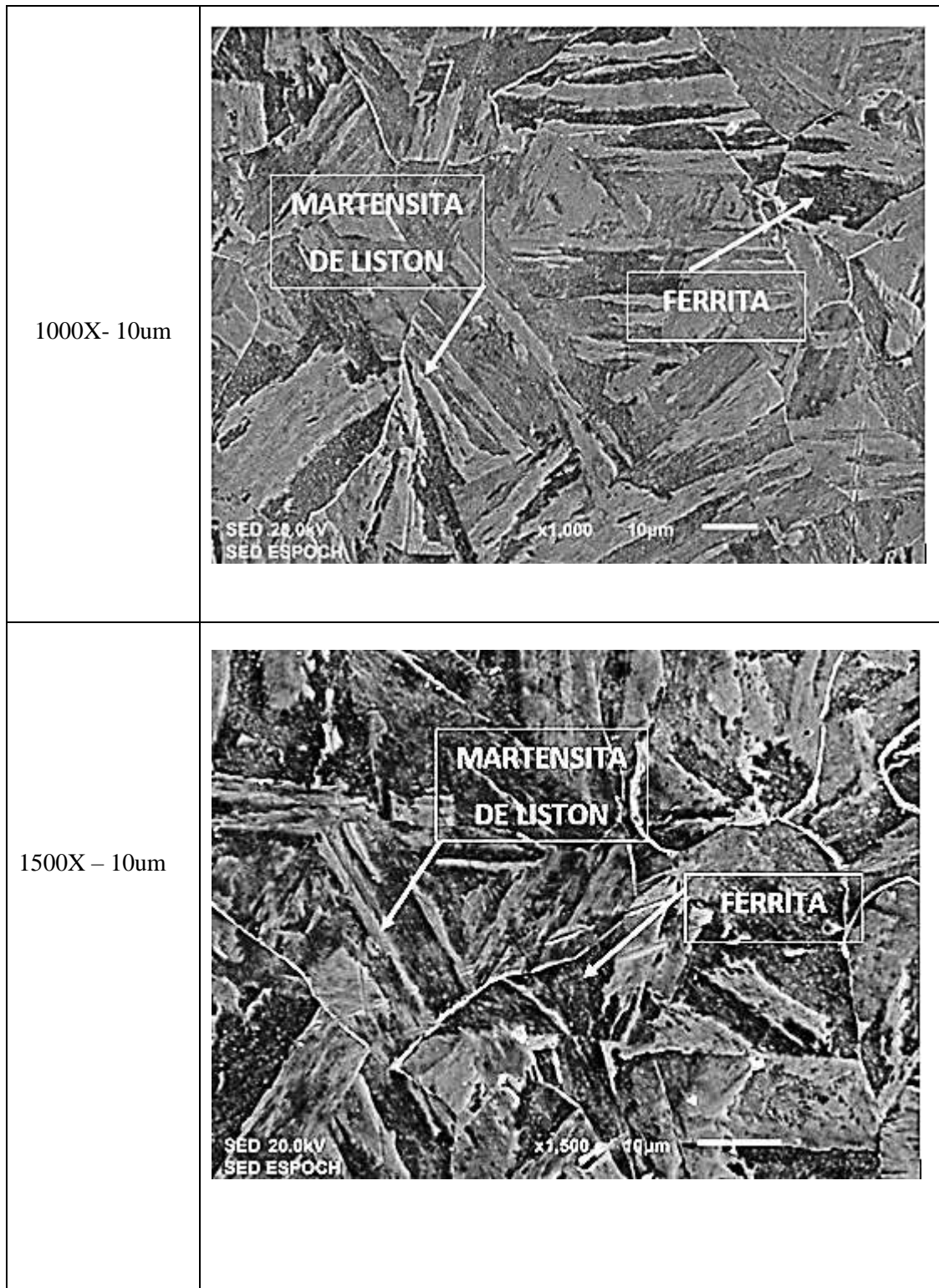
Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

En las microestructuras mostrada se identifica al acero AISI 420 que presenta martensita en su gran mayoría, así como se puede identificar una zona de coloración blanquizca en forma de lagunas, siendo esto carburos de cromo y de hierro.

#### 4.2.6 Microestructura 17-4 PH

Tabla 3-4: Microestructura 17-4 PH

AMPLIACIÓN	MICROGRAFÍA
500X-50um	
750X-20um	



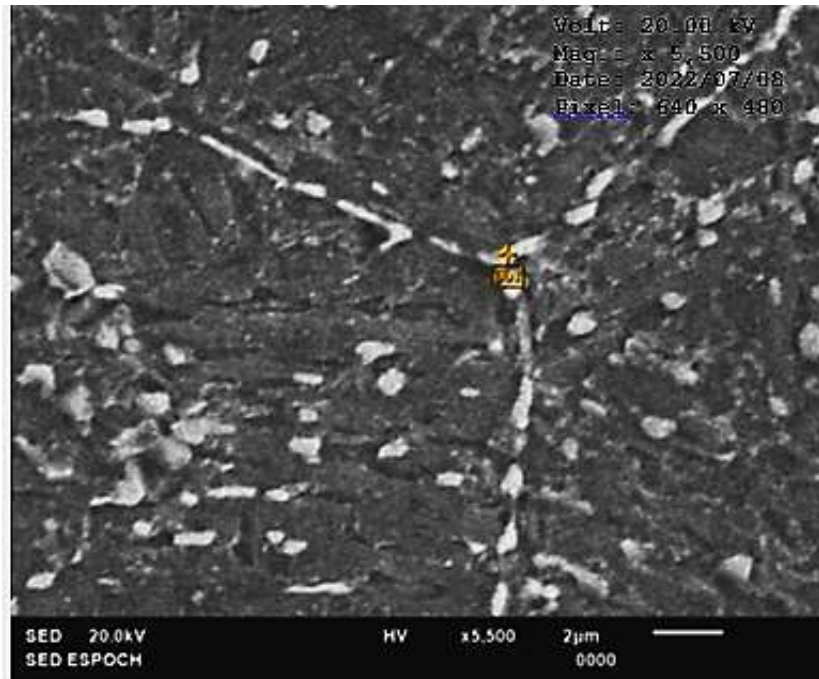
Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

En las microestructuras mostrada se identifica al acero 17-4PH en donde es evidente la presencia de martensita de listón y ferrita, además de carburos de hierro, estas imperfecciones en la micrografía se analizaron con un EDS.

### 4.3 EDS

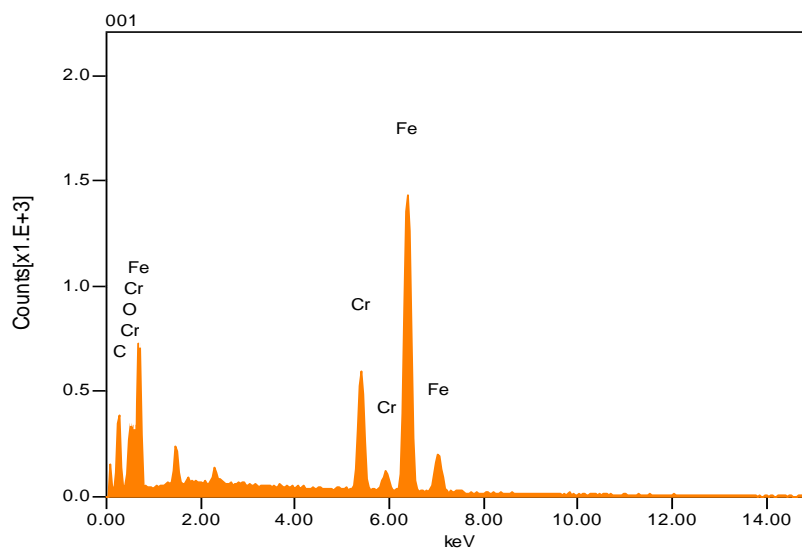
El análisis elemental EDS de las muestras se realiza en regiones puntuales de las micrografías para obtener la composición química de algunas porosidades y pequeños desperfectos que se presentan en las tomas de cada uno de los materiales.

#### 4.3.1 EDS del acero M303



**Ilustración 5-4:** Microestructura del acero M303 para la realización de la prueba EDS

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022



**Ilustración 6-4:** Diagrama de la prueba EDS del acero M303

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

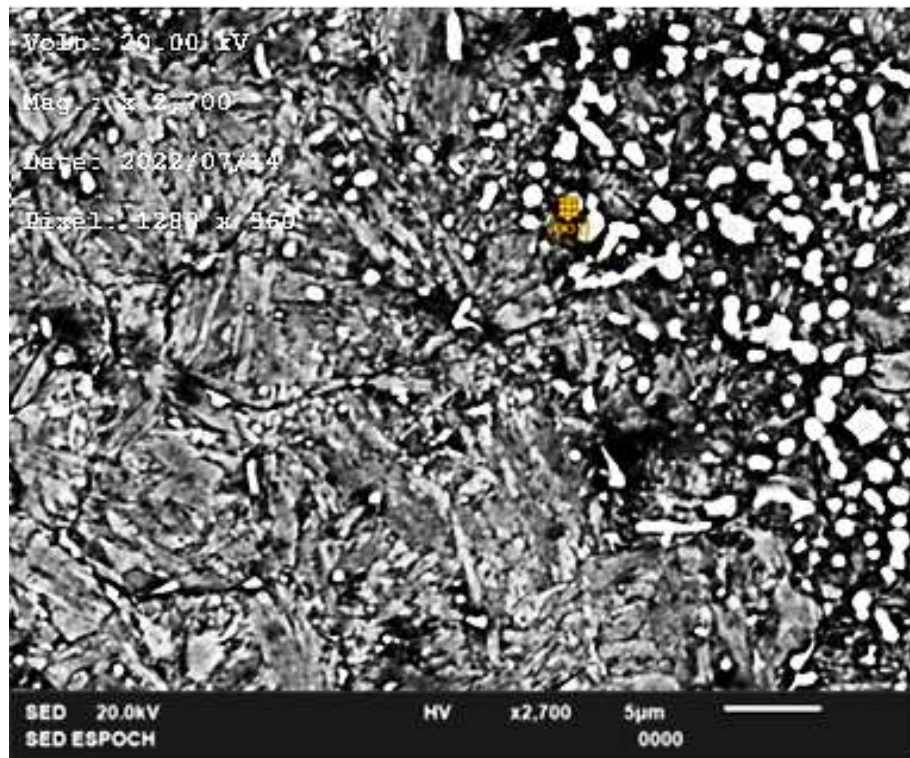
**Tabla 4-4:** Datos de la composición química del segmento analizado en el acero M303 mediante la prueba EDS

Formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K ratio	Line
C	2.20	48.50	0.00	0.03	1804	0.0092550	K
O							
Cr2O3	3.84	6.70	4.95	0.03	8224	0.0251719	K
FeO	12.14	44.81	16.57	0.04	21792	0.0887871	K
Total	18.18	100.00	21.52				

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

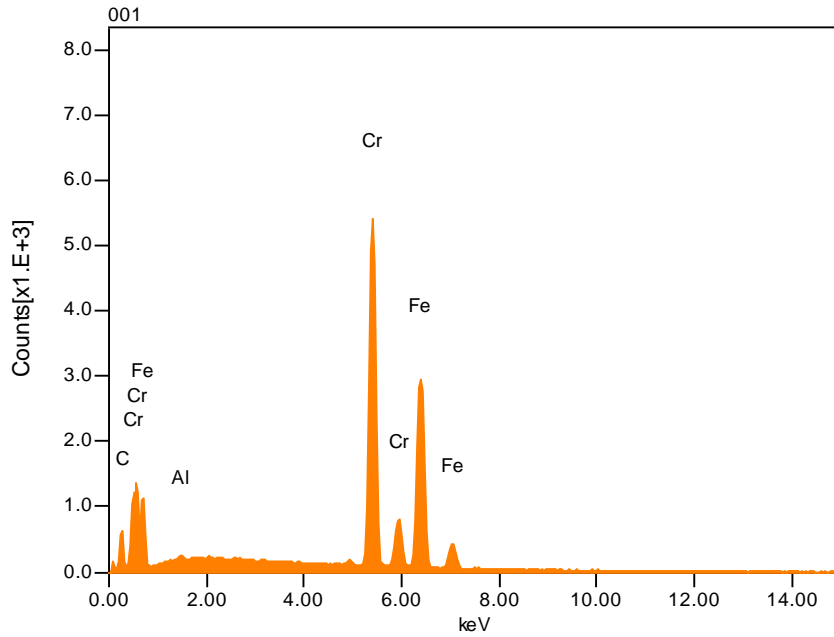
Con el análisis EDS que se realiza en el SEM del laboratorio de materiales de la ESPOCH, en el caso para el acero M303 se tiene la presencia de carburos de hierro y carburos de cromo con un valor en porcentaje de cada uno, que no sirve para realizar una comparación de manera cuantitativa sino más bien de manera cualitativa.

### 3.3.1. EDS del acero AISI 420



**Ilustración 7-4-:** Microestructura del acero AISI 420 para la realización de la prueba EDS

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022



**Ilustración 8-4-:** Diagrama de la prueba EDS del acero AISI 420

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

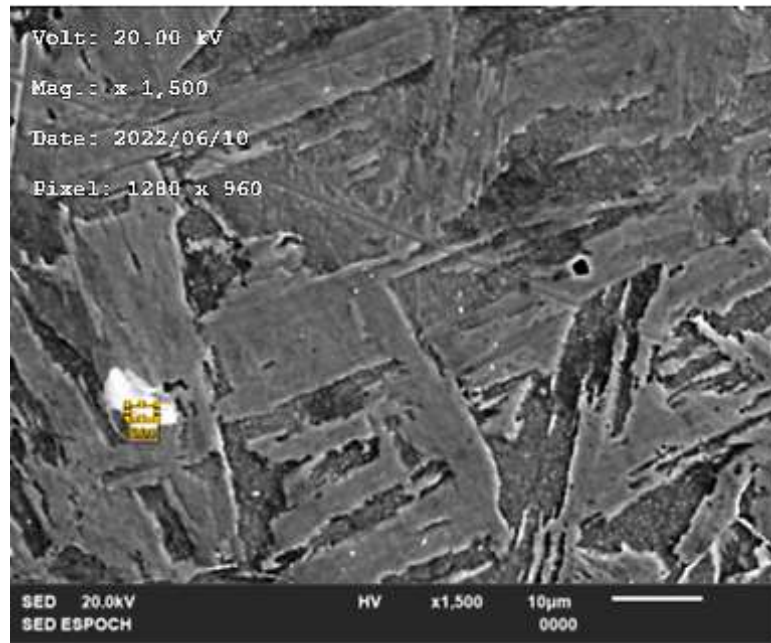
**Tabla 5-4:** Datos de la composición química del segmento analizado en el acero AISI 420 mediante la prueba EDS

Formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K ratio	Line
C	3.36	31.70	0.00	0.04	2776	0.0142362	K
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.21	0.23	0.09	0.02	488	0.0005285	K
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36.68	27.38	10.64	0.08	78060	0.2389277	K
FeO	25.76	40.69	7.90	0.06	46293	0.1886163	K
Total	66.01	100.00	18.63				

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

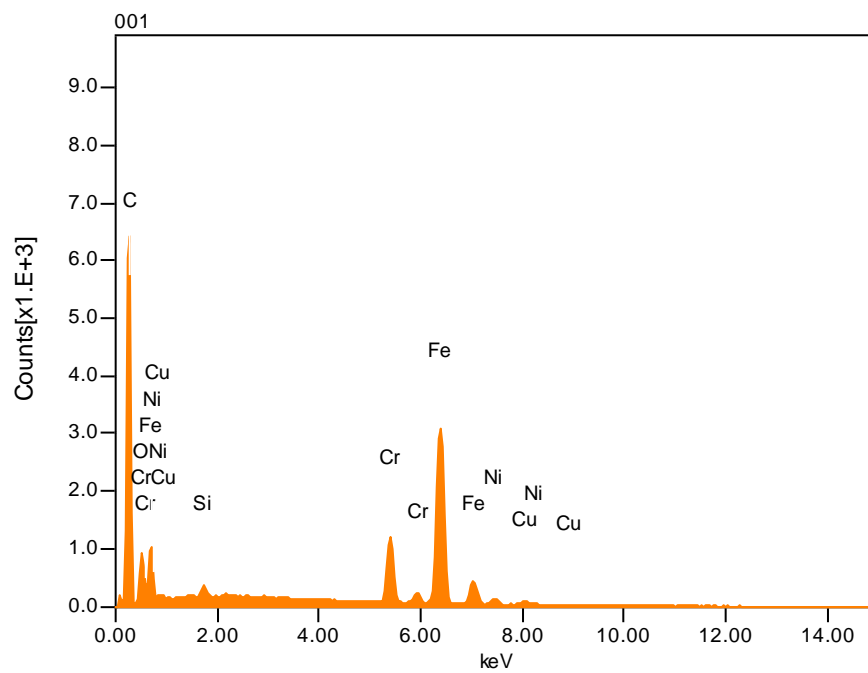
Con el análisis EDS que se realizó en el SEM del laboratorio de materiales de la ESPOCH, en el caso para el acero AISI 420 se tiene la presencia de algunas precipitaciones de carburos de cromo y óxidos de hierro, con un valor en porcentaje de cada uno, que no sirve para realizar una comparación de manera cuantitativa sino de manera cualitativa.

### 3.3.2. EDS acero 17-4PH



**Ilustración 9-4-:** Microestructura del acero 17-4PH para la realización de la prueba EDS

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022



**Ilustración 10-4-:** Diagrama de la prueba EDS del acero 17-4PH

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

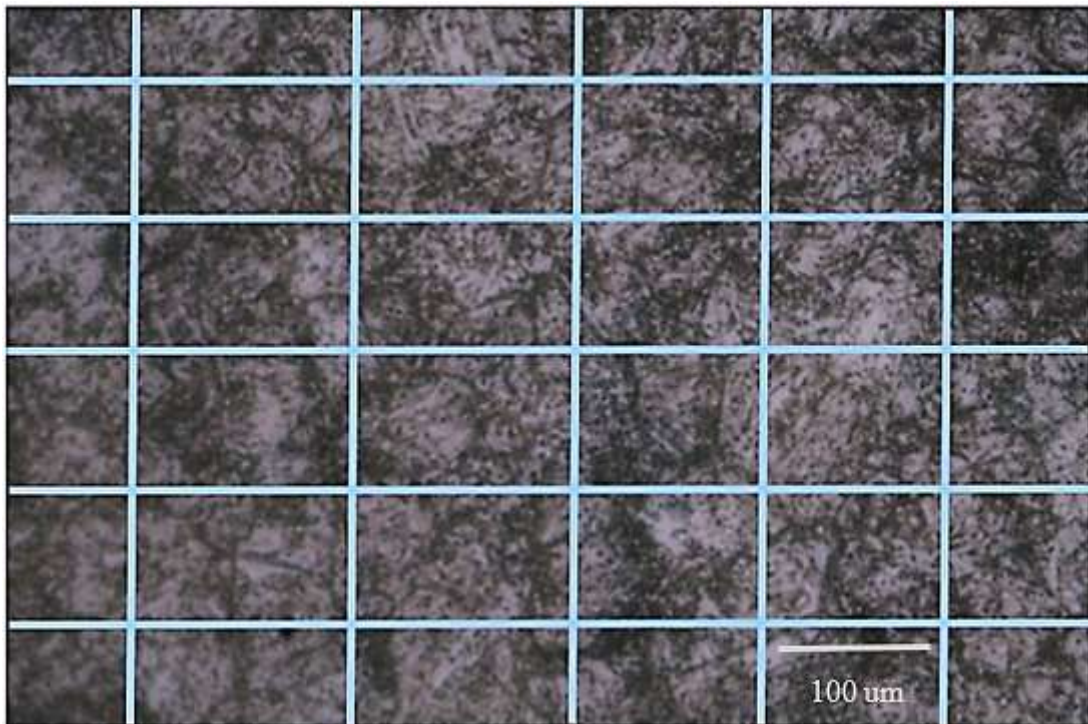
**Tabla 6-4:** Datos de la composición química del segmento analizado en el acero 17-4PH mediante la prueba EDS

Formula	mass%	Atom%	Sigma	Net	K ratio	Line
C	32.02	75.37	0.11	30719	0.1575614	K
O	5.66	10.00	0.07	4299	0.0242534	K
Si	0.22	0.22	0.01	1216	0.0014655	K
Cr	5.33	2.90	0.03	16334	0.0499950	K
Fe	20.99	10.63	0.05	47417	0.1931928	K
Ni	1.04	0.50	0.02	1669	0.0095247	K
Cu	0.88	0.39	0.03	1104	0.0073124	K
Total	66.13	100.00				

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

Con el análisis EDS que se realizó en el SEM del laboratorio de materiales de la ESPOCH, en el caso para el acero 17-4PH se tiene los valores en porcentajes del mismo material, que no sirve para realizar una comparación de manera cuantitativa sino de manera cualitativa.

#### 4.4 Tamaño de grano de la austenita



**Ilustración 11-4-:** Microestructura del acero M303 a 40x tomada en el microscopio óptico Nikon.

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022



### 4.3.2 Acero M303

Línea horizontal

$$L1 = 10 \text{ granos}$$

$$L2 = 11 \text{ granos}$$

$$L3 = 11 \text{ granos}$$

$$L4 = 10 \text{ granos}$$

$$L5 = 9 \text{ granos}$$

$$\text{Promedio} = \frac{10 + 11 + 11 + 10 + 9}{5} = 10,2$$

$$E = \frac{\text{longitud d ela línea}}{\# \text{ de granos}}$$

$$E = \frac{182}{10,2} = 17,843$$

$$G = 10 - 6,64 \log\left(\frac{E}{10}\right)$$

$$G = 8,33$$

Línea vertical

$$L6 = 9 \text{ granos}$$

$$L7 = 8 \text{ granos}$$

$$L8 = 8 \text{ granos}$$

$$L9 = 9 \text{ granos}$$

$$L10 = 8 \text{ granos}$$

$$\text{Promedio} = \frac{9 + 8 + 8 + 9 + 8}{5} = 8,4$$

$$E = \frac{\text{longitud d ela línea}}{\# \text{ de granos}}$$

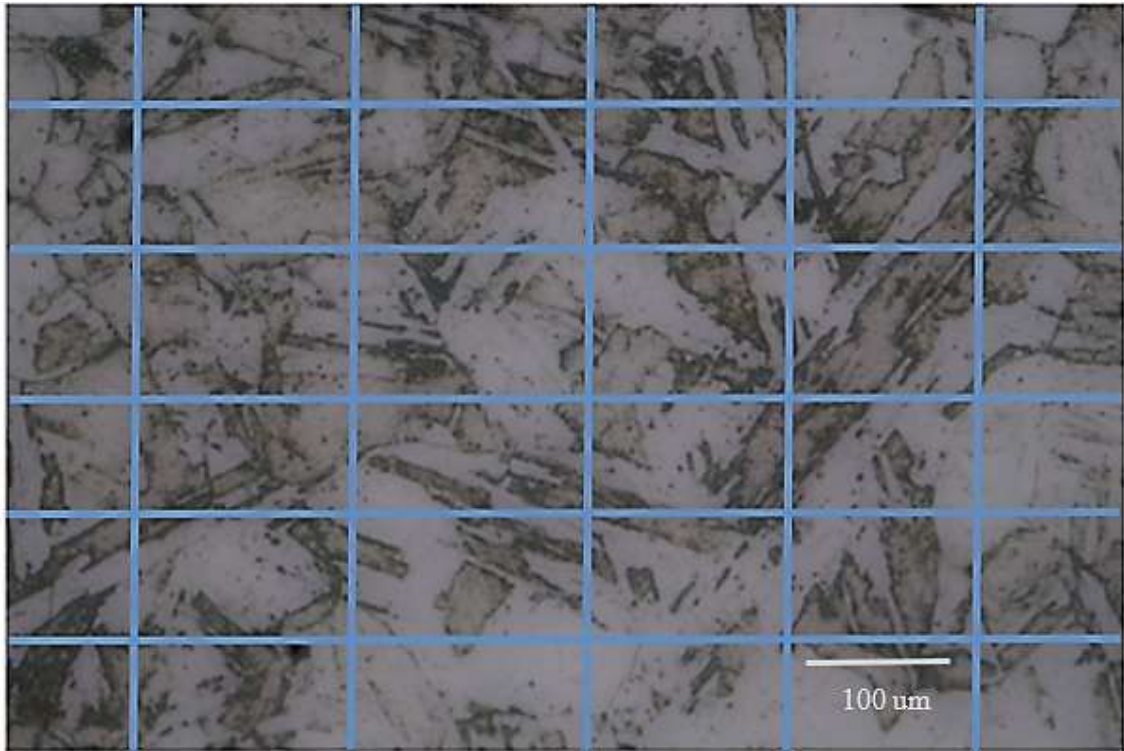
$$E = \frac{121}{8,4} = 14,404$$

$$G = 10 - 6,64 \log\left(\frac{E}{10}\right)$$

$$G = 8,94$$

Para el acero M303 se presenta un tamaño de grano 8,64 claramente definido.

#### 4.4.1 Acero 17-4PH



**Ilustración 12-4-:** Microestructura del acero 17-4PH a 40x tomada en el microscopio óptico Nikon

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

Línea horizontal

$L1 = 9$  granos

$L2 = 8$  granos

$L3 = 8$  granos

$L4 = 7$  granos

$L5 = 10$  granos

$$\text{Promedio} = \frac{9 + 8 + 8 + 7 + 10}{5} = 8,4$$

$$E = \frac{\text{longitud de la línea}}{\# \text{ de granos}}$$

$$E = \frac{182}{8,4} = 21,667 =$$

$$G = 10 - 6,64 \log\left(\frac{E}{10}\right)$$

$$G = 7,77$$

Línea vertical

$L_6 = 6$  granos

$L_7 = 5$  granos

$L_8 = 6$  granos

$L_9 = 5$  granos

$L_{10} = 5$  granos

$$\text{Promedio} = \frac{6 + 5 + 6 + 5 + 5}{5} = 5,4$$

$$E = \frac{\text{longitud de la línea}}{\# \text{ de granos}}$$

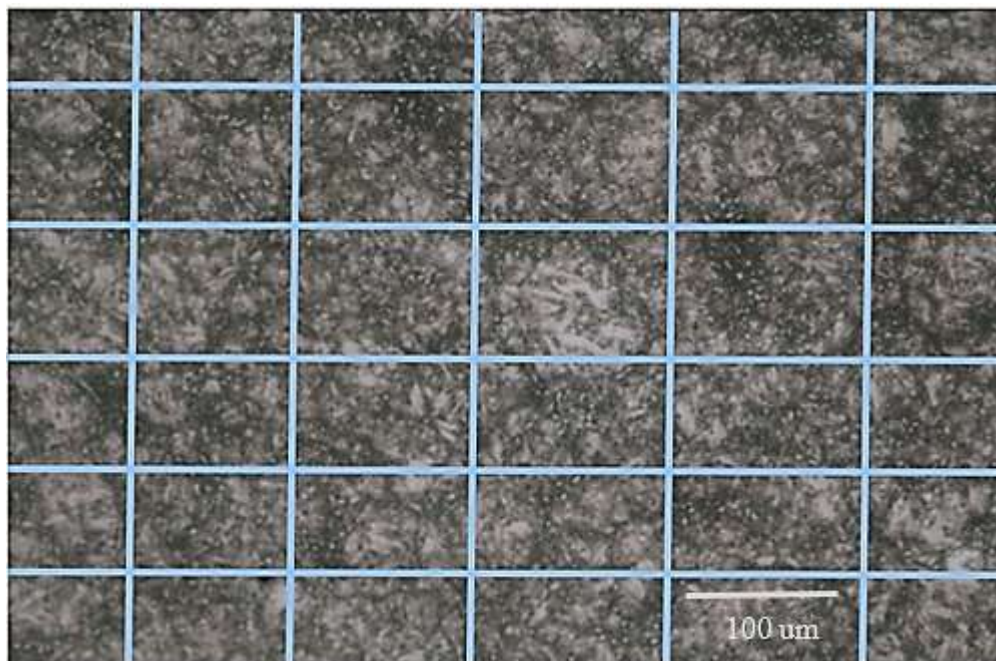
$$E = \frac{121}{5,4} = 22,407 =$$

$$G = 10 - 6,64 \log\left(\frac{E}{10}\right)$$

$$G = 7,67$$

Para el acero 17-4PH presenta un tamaño de grano 7,72 claramente definido.

#### 4.4.2 Acero AISI 420



**Ilustración 13-4:** Microestructura del acero M303 a 40x tomada en el microscopio óptico Nikon

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

Línea horizontal

$L1 = 11$  granos

$L2 = 9$  granos

$L3 = 9$  granos

$L4 = 10$  granos

$L5 = 10$  granos

$$\text{Promedio} = \frac{11 + 9 + 9 + 10 + 10}{5} = 9,8$$

$$E = \frac{\text{longitud d ela línea}}{\# \text{ de granos}}$$

$$E = \frac{182}{9,8} = 18,571 =$$

$$G = 10 - 6,64 \log\left(\frac{E}{10}\right)$$

$$G = 8,21$$

Línea vertical

$L6 = 7$  granos

$L7 = 6$  granos

$L8 = 6$  granos

$L9 = 7$  granos

$L10 = 6$  granos

$$\text{Promedio} = \frac{7 + 6 + 6 + 7 + 6}{5} = 6,4$$

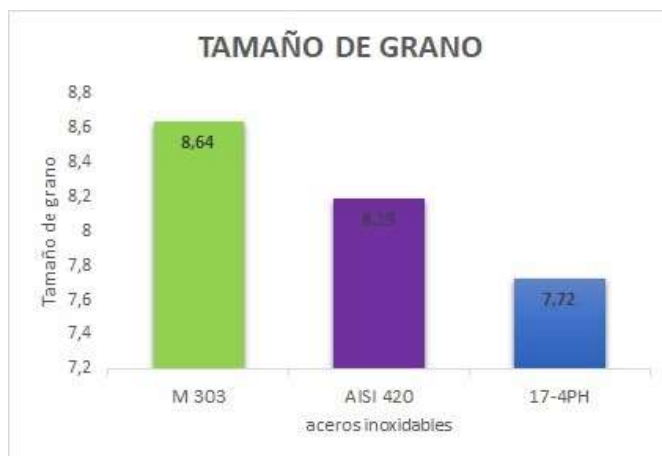
$$E = \frac{\text{longitud d ela línea}}{\# \text{ de granos}}$$

$$E = \frac{121}{6,4} = 18,906$$

$$G = 10 - 6,64 \log\left(\frac{E}{10}\right)$$

$$G = 8,16$$

Para el acero AISI 420 presenta un tamaño de grano 8,19 claramente definido.



**Ilustración 14-4:** Representación del tamaño de grano de los aceros

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

**Tabla 7-4:** Inclusiones acero M303

MATERIAL	Tamaño de grano		
	horizontal	Vertical	Promedio
<b>M303</b>	8,33	8,94	<b>8,64</b>
<b>AISI 420</b>	8,21	8,16	<b>8,19</b>
<b>17-4PH</b>	7,77	7,67	<b>7,72</b>

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022


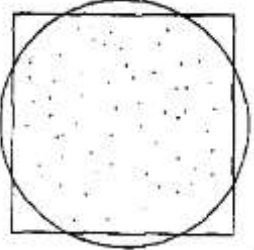
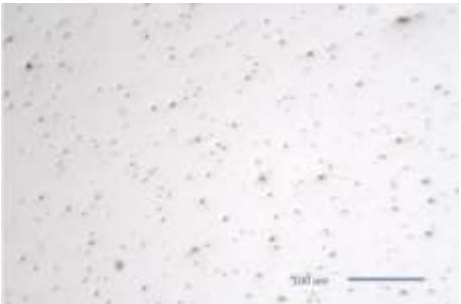
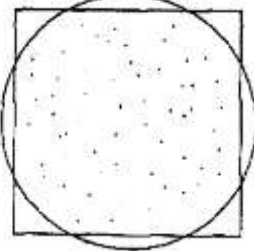

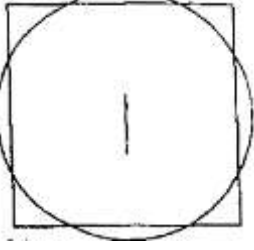
Acorde a los resultados del tamaño de grano se obtiene un menor índice para el acero 17-4PH a comparación del M303 y AISI 420 que presentan una gran semejanza entres los dos, con este análisis y medición del tamaño de grano, se corrobora las propiedades mecánicas de estos aceros, en donde a menor tamaño de grano las propiedades mecánicas aumentan, debido al tamaño de grano que se obtiene se dice que es de tipo fino.

#### 4.4 Análisis de inclusiones

A continuación, se muestran las imágenes más relevantes luego de realizar el barrido en la muestra de corte longitudinal de las probetas de aceros inoxidable

#### 4.5.1 Inclusiones acero M303

**Tabla 8-4:** Inclusiones acero M303

AMPLIACIÓN	INCLUSIONES	SEGÚN SU MORFOLOGÍA
10x		<p>ÓXIDOS GLOBULARES SEVERIDAD 5</p> <p>5</p> 
		<p>ÓXIDOS GLOBULARES SEVERIDAD 5</p> <p>5</p> 
		<p>SILICATO SEVERIDAD 1 ½</p> 

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022


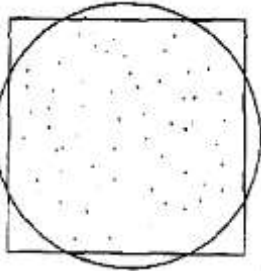

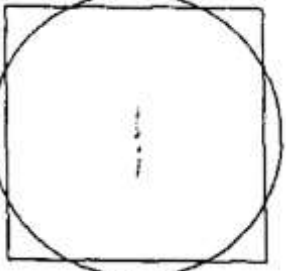

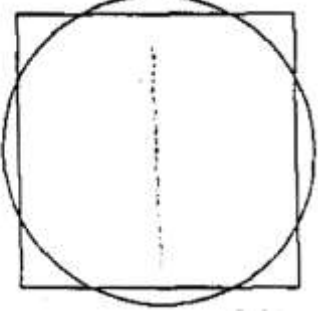

En la muestra de acero M303 se comparan las inclusiones obtenidas mediante la norma ASTM E45 teniendo así de tipo óxido globular severidad 5 de tamaño fino, con un número mínimo de 64 inclusiones que son producidas posiblemente en el proceso de refinación y vertido en el lingote, de igual manera son de mayores diámetros, debido a la precipitación por las bajas velocidades de enfriamiento.

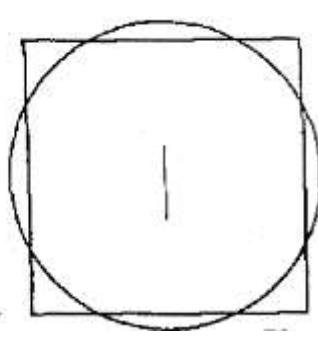
También se puede observar la presencia de inclusiones tipo silicato con severidad 1½; producidas posiblemente por la mezcla de refractarios fundidos. Como se mencionó anteriormente la

existencia de inclusiones no metálicas es inevitable en el acero y estas inclusiones no son consideradas como defectos.

#### 4.5.1 Inclusiones acero AISI 420

Tabla 9-4: Inclusiones acero AISI 420

AMP	INCLUSIONES	SEGÚN SU MORFOLOGÍA
10X		<p>ÓXIDOS GLOBULARES SEVERIDAD 5</p> <p>5</p> 
		<p>SULFUROS SEVERIDAD 1 ½</p> <p>1 ½</p> 
		<p>SULFUROS SEVERIDAD 2 ½</p> <p>2 ½</p> 
		<p>SILICATO</p>


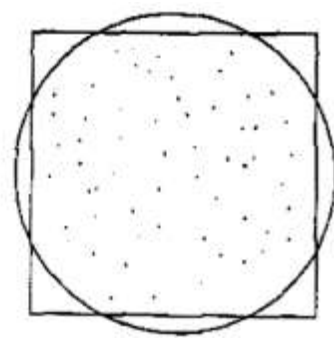

		<p style="text-align: center;">SEVERIDAD 1 ½</p> 
--	--	--

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

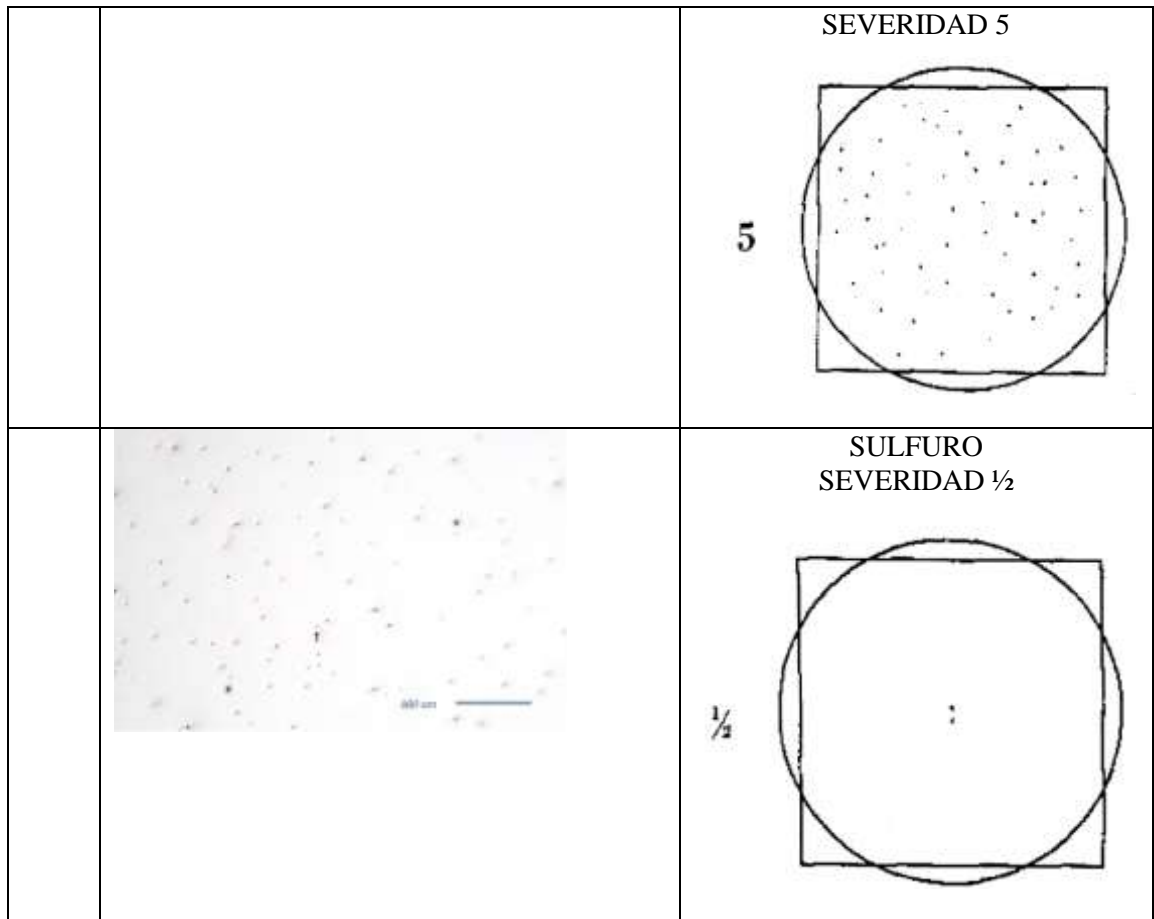
En la muestra de acero AISI 420 se comparan las inclusiones obtenidas mediante la norma ASTM E45 teniendo así de tipo óxido globular severidad 5 de tamaño fino, con un número mínimo de 64 inclusiones e inclusiones tipo Sulfuro tamaño fino, severidad 2 ½, que son producidas posiblemente en el proceso de refinación y vertido en el lingote. También se tiene la presencia de inclusiones tipo silicato tamaño fino, con severidad 1½; producidas posiblemente por la mezcla de refractarios fundidos.

#### 4.4.1 Inclusiones acero 17-4PH

**Tabla 10-4:** Inclusiones acero 17-4 PH

AMP	INCLUSIONES	SEGÚN SU MORFOLOGÍA
		<p style="text-align: center;">ÓXIDOS GLOBULARES SEVERIDAD 5</p> 
		<p style="text-align: center;">OXIDOS GLOBULARES</p>





Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

En la muestra de acero 17-4PH se comparan las inclusiones obtenidas mediante la norma ASTM E45 teniendo así de tipo óxido globular severidad 5 de tamaño fino, con un número mínimo de 64 inclusiones e inclusiones tipo Sulfuro tamaño fino, severidad ½, que son producidas posiblemente en el proceso de refinación y vertido en el lingote.

**Tabla 11-4:** Resumen de inclusiones presentes en los materiales

MATERIAL	Tipo de inclusiones - Severidad			
	Oxid. Globu.	Silicatos	Sulfuros	Afección
<b>M303</b>	5	1 ½		<b>MEDIA</b>
<b>AISI 420</b>	5	1 ½	1 ½	<b>ALTA</b>
<b>17-4PH</b>	5	½		<b>BAJA</b>

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

#### **4.4.2 Efecto de las inclusiones sobre las propiedades mecánicas.**

Las inclusiones no metálicas tienen un efecto importante en las propiedades mecánicas, principalmente en tres casos; el inicio de la fractura dúctil, el crecimiento de la fractura dúctil y la porosidad, por lo que esto afecta significativamente los resultados en el ensayo de impacto. Las inclusiones no metálicas de gran tamaño también son puntos de iniciación de la fatiga y pueden iniciar la fractura.

Un efecto importante de las inclusiones de tipo sulfuro es reducir la tenacidad y mejorar la maquinabilidad, mientras que las inclusiones de tipo silicato no favorecen al mecanizado.

Las inclusiones observadas en las muestras de los aceros M303, AISI 420 y 17-4Ph son de tamaño pequeño, por lo que se deduce que estas inclusiones no son puntos de inicio de fatiga y no inicia una ruptura o fallo repentino en el material.

Además, en las muestras de acero AISI 420 y 17-4Ph, se observan inclusiones de tipo sulfuro lo que esto indica que el material presenta una reducción de la resistencia a la fractura, pero una mejora en la maquinabilidad, a diferencias de las muestras de acero M303 se observan inclusiones tipo silicato.

Las inclusiones alargadas talen como las inclusiones tipo silicato presentes en el acero M303 y AISI 420, pueden presentar principio de la fractura dúctil, crecimiento de la fractura dúctil y la porosidad, por lo tanto, afectan de manera significativa en los resultados de las pruebas de impacto, de esta manera se obtiene una relación entre la resistencia y el porcentaje de silicato es inversamente proporcional, mientras aumenta el porcentaje de silicato disminuye su resistencia al impacto.

### **4.5 Dureza**

#### **4.5.1 Rockwell**

##### **4.5.1.1 Acero M303**

**Tabla 12-4:** Datos de dureza Rockwell del acero M303

<b>DUREZA M303</b>	
<b>MEDICIÓN 1</b>	32,5 HRC
<b>MEDICIÓN 2</b>	33 HRC
<b>MEDICIÓN 3</b>	32,5 HRC
<b>MEDICIÓN 4</b>	32 HRC
<b>MEDICIÓN 5</b>	32 HRC
<b>MEDICIÓN 6</b>	31,5 HRC

<b>MEDICIÓN 7</b>	31 HRC
<b>MEDICIÓN 8</b>	32 HRC
<b>MEDICIÓN 9</b>	32 HRC
<b>MEDICIÓN 10</b>	31,5 HRC
<b>PROMEDIO</b>	<b>32 HRC</b>

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

#### 4.5.1.2 Acero AISI 420

**Tabla 13-4:** Datos de dureza Rockwell del acero AISI 420

<b>DUREZA 17-4PH</b>	
<b>MEDICIÓN 1</b>	29,5 HRC
<b>MEDICIÓN 2</b>	30 HRC
<b>MEDICIÓN 3</b>	29,5 HRC
<b>MEDICIÓN 4</b>	31 HRC
<b>MEDICIÓN 5</b>	29,5 HRC
<b>MEDICIÓN 6</b>	30 HRC
<b>MEDICIÓN 7</b>	30 HRC
<b>MEDICIÓN 8</b>	29,5 HRC
<b>MEDICIÓN 9</b>	29,5 HRC
<b>MEDICIÓN 10</b>	29 HRC
<b>PROMEDIO</b>	<b>29,75 HRC</b>

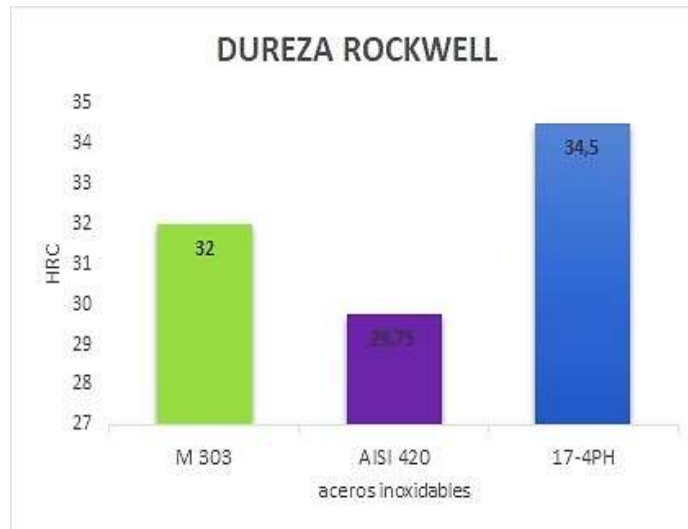
Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

#### 4.5.1.3 Acero 17-4PH

**Tabla 14-4:** Datos de dureza Rockwell del acero 17-4PH

<b>DUREZA AISI 420</b>	
<b>MEDICIÓN 1</b>	34,5 HRC
<b>MEDICIÓN 2</b>	34 HRC
<b>MEDICIÓN 3</b>	37,5 HRC
<b>MEDICIÓN 4</b>	34 HRC
<b>MEDICIÓN 5</b>	35 HRC
<b>MEDICIÓN 6</b>	35 HRC
<b>MEDICIÓN 7</b>	34 HRC
<b>MEDICIÓN 8</b>	34,5 HRC
<b>MEDICIÓN 9</b>	34,5 HRC
<b>MEDICIÓN 10</b>	34 HRC
<b>PROMEDIO</b>	<b>34,5 HRC</b>

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022



**Ilustración 15-4:** Dureza Rockwell

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

En los ensayos realizados se obtiene un promedio de dureza para los diferentes aceros tales como, para el acero M303 una dureza de 32 HRC, para el acero 17-4PH una dureza de 34 HRC y para el acero AISI 420 una dureza de 30 HRC.

Siendo así el que tiene mayor dureza el acero 17-4PH debido al tamaño de grano que presente con un ASTM 7 y de menor dureza el acero AISI 420 con un tamaño de grano ASTM 8.

La dureza Rockwell C es una característica que se utiliza en el ámbito industrial, sin embargo, se realiza una comparación y validación con la dureza Brinell.

#### 4.5.2 *Brinell*

Los cálculos para la dureza se toman en cuenta una carga  $P=187,5$  Kgf y un  $D=2,5$  mm.

##### 4.5.2.1 *Acero M303*

**Tabla 15-4:** Cálculo de dureza Brinell del acero M303

	Medición 1	Medición 2	promedio	dureza
<b>d1</b>	0,885	0,9	0,893	289,831
<b>d2</b>	0,885	0,885	0,885	294,938
<b>d3</b>	0,9	0,905	0,903	283,218
<b>d4</b>	0,885	0,88	0,883	296,669
			<b>promedio</b>	<b>291,164</b>

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

#### 4.5.2.2 Acero 17-4PH

**Tabla 16-4:** Cálculo de dureza Brinell del acero 17-4PH

	Medición 1	Medición 2	promedio	dureza
<b>d1</b>	0,8	0,75	0,775	387,737
<b>d2</b>	0,81	0,805	0,8075	356,36
<b>d3</b>	0,805	0,8	0,8025	360,94
<b>d4</b>	0,83	0,81	0,82	345,27
			<b>promedio</b>	<b>362,578</b>

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

#### 4.5.2.3 Acero AISI 420

**Tabla 17-4:** Cálculo de dureza Brinell del acero AISI 420

	Medición 1	Medición 2	promedio	dureza
<b>d1</b>	0,84	0,835	0,838	282,166
<b>d2</b>	0,85	0,85	0,850	282,583
<b>d3</b>	0,845	0,84	0,843	282,498
<b>d4</b>	0,84	0,85	0,845	283,509
			<b>promedio</b>	<b>282,689</b>

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022



**Ilustración 16-4-:** Dureza Brinell

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

En los ensayos realizados para determinar la dureza Brinell se obtiene un promedio para los diferentes aceros tales como, para el acero M303 una dureza de 291 HB, para el acero 17-4PH una dureza de 362 HB y para el acero AISI 420 una dureza de 282 HB.

## 4.6 Tracción

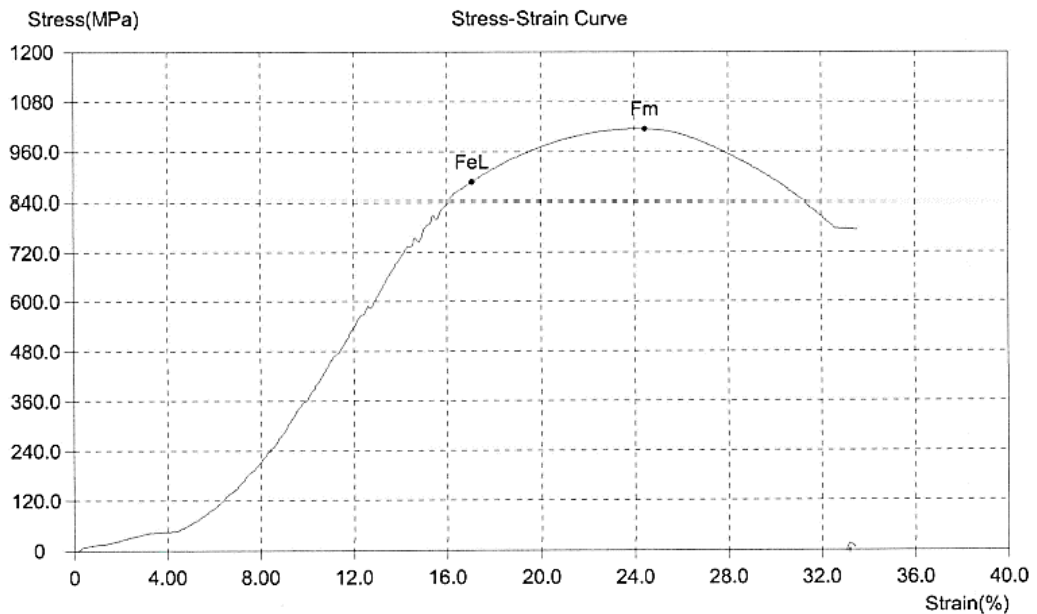
El procesamiento de los datos del ensayo de tracción se los muestra en la siguiente Tabla 16-4

#### 4.6.1 Acero M303

**Tabla 18-4:** Ensayo de tracción del acero M303

Id.	Diámetro Promedio	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	lbf	N	ksi	MPa	ksi	MPa	
Prob. 1	12,57	27 306	121 463	123,2	849,4	142,0	978,8	21,2
Prob. 2	12,60	27 329	121 564	122,9	847,2	141,4	974,9	21,1
Prob.3	12,61	27 549	122 542	124,6	859,2	142,3	981,2	20,5
Prob.4	12,63	27 538	122 497	122,9	847,3	141,8	977,8	21,1
<b>Promedio</b>	<b>12,60</b>	<b>27,431</b>	<b>122,017</b>	<b>123,4</b>	<b>850,8</b>	<b>141,9</b>	<b>978,2</b>	<b>21,00</b>

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022



**Ilustración 17-4:** Curva Esfuerzo – Deformación para el acero M303

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

En la Ilustración 17-4 se muestra el diagrama Esfuerzo – deformación del acero M303 correspondiendo a una resistencia a la tracción de 978,2 MPa, soportando una carga máxima de 122,017 N antes de llegar a la fractura, teniendo así un promedio de deformación de 21 %, un límite de fluencia de 850,8 Mpa como se indica en la Tabla 18, además de un Módulo de Young de 215 GPa, el cual se obtiene del diagrama Esfuerzo – Deformación.

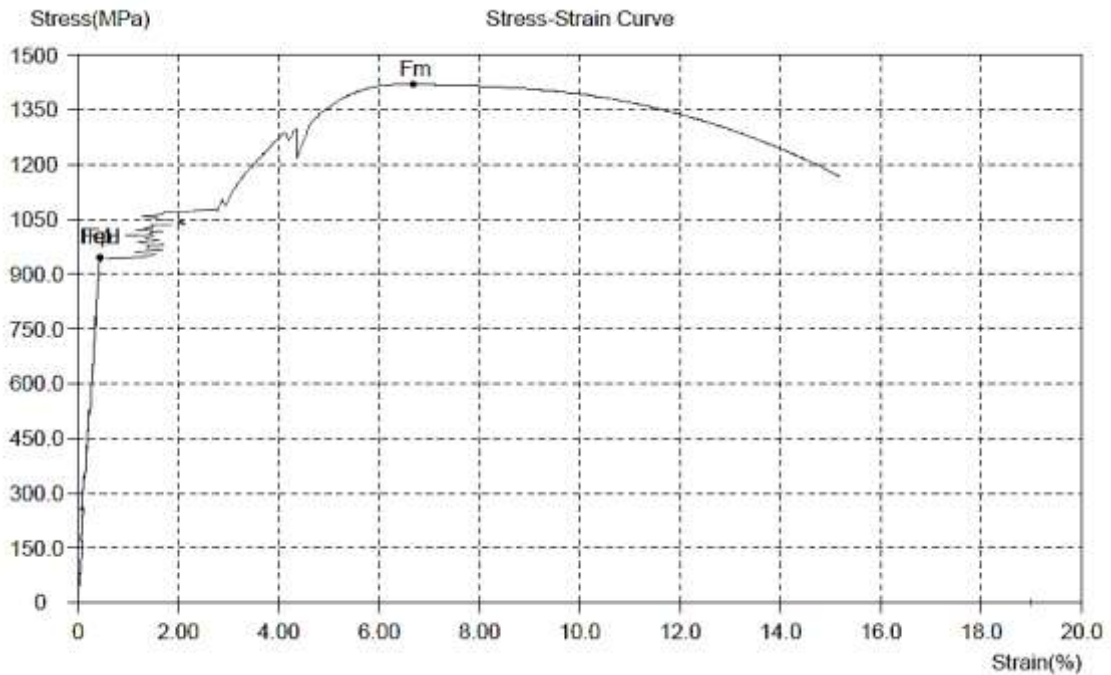
#### 4.6.1 Acero 17-4PH

**Tabla 19-4:** Ensayo de tracción del acero 17-4PH

Id.	Diámetro Promedio	Carga máxima registrada	Límite de fluencia	Resistencia a la tracción	% elongación en 50 mm
-----	-------------------	-------------------------	--------------------	---------------------------	-----------------------

	mm	lbf	N	ksi	MPa	ksi	MPa	
Prob. 1	12,67	30 616	136 186	141,2	973,8	156,7	1 080,2	17,1
Prob. 2	12,65	30 658	136 372	133,7	922,0	157,4	1 085,1	16,9
Prob.3	12,71	30 661	136 386	140,4	968,1	155,9	1 074,9	16,9
Prob.4	12,67	30 558	135 928	140,7	970,3	156,4	1 078,1	16,2
<b>Promedio</b>	<b>12,68</b>	<b>30,623</b>	<b>136,218</b>	<b>139,0</b>	<b>958,6</b>	<b>156,6</b>	<b>1079,6</b>	<b>16,8</b>

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022



**Ilustración 18-4:** Curva Esfuerzo – Deformación para el acero 17-4PH

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

En la Ilustración 18 se muestra el diagrama Esfuerzo – deformación del acero 17-4PH correspondiendo a una resistencia a la tracción de 1079,6 MPa, soportando una carga máxima de 136,218 N antes de llegar a la fractura, teniendo así una deformación de 16,8 % y un límite de fluencia de 958,6 MPa como se indica en la Tabla 19-4, además de un Módulo de Young de 225 GPa, el cual se obtiene del diagrama Esfuerzo – Deformación.

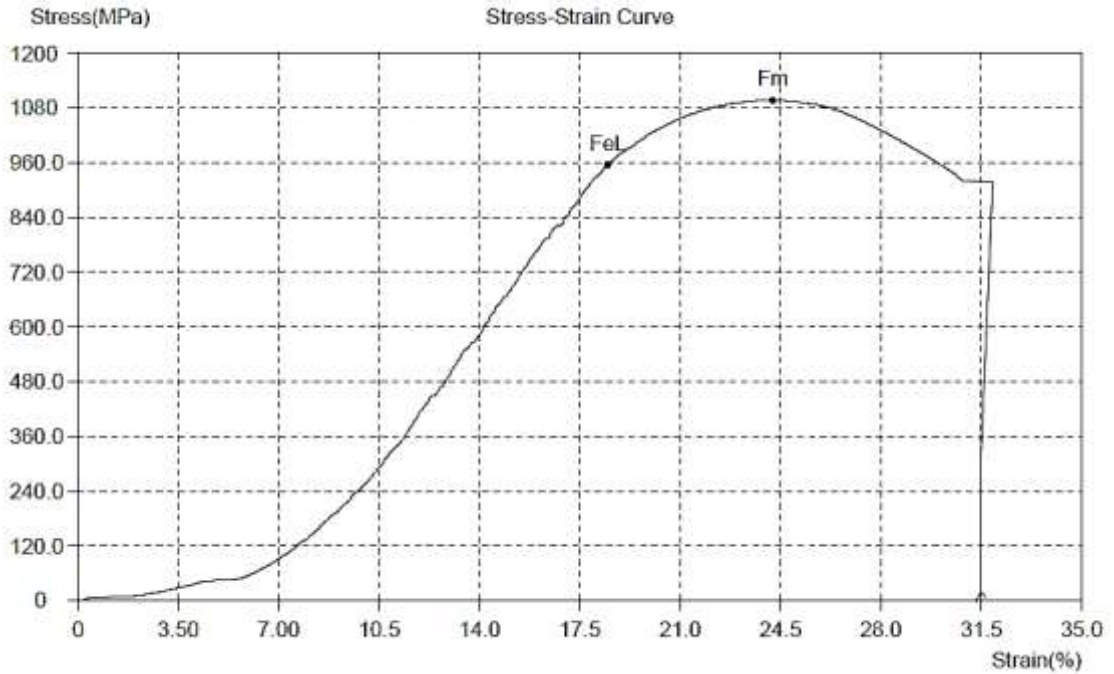
#### 4.6.2 Acero AISI 420

**Tabla 20-4:** Ensayo de tracción del acero AISI 420

Id.	Diámetro Promedio	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	lbf	N	ksi	MPa	ksi	MPa	
Prob. 1	12,48	29 419	130 864	139,8	963,7	155,2	1 069,8	12,8

Prob. 2	12,50	29 607	131 699	139,8	964,2	155,7	1 073,2	14,1
Prob.3	12,50	29 075	129 334	137,7	949,7	152,9	1 053,9	14,3
Prob.4	12,52	29 289	130 285	138,4	953,9	153,5	1 058,3	14,5
<b>Promedio</b>	<b>12,50</b>	<b>29,348</b>	<b>130,546</b>	<b>138,9</b>	<b>957,9</b>	<b>154,3</b>	<b>1063,8</b>	<b>13,9</b>

Realizado por: Rosero Juan & Rojas Bryan, 2022



**Ilustración 19-4:** Curva Esfuerzo – Deformación para el acero AISI 420

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

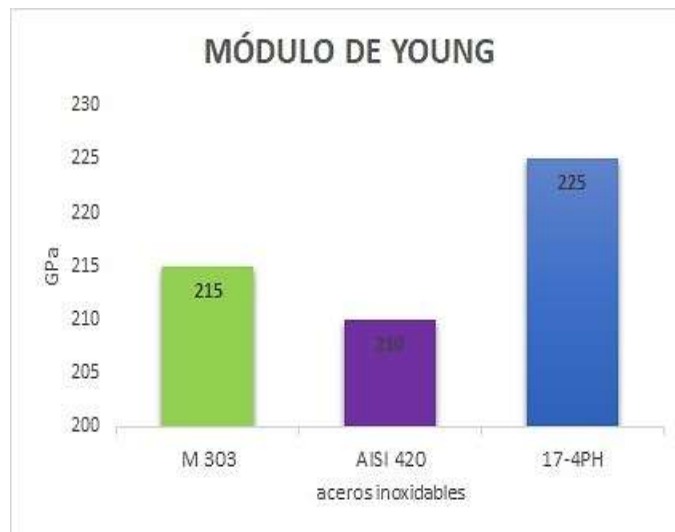
En la Ilustración 19-4 se muestra el diagrama Esfuerzo – deformación del acero AISI 420 correspondiendo a una resistencia a la tracción de 1063,8 MPa, soportando una carga máxima de 130,546 N antes de llegar a la fractura, teniendo así un promedio de deformación de 13,9 % y un límite de fluencia de 957,9 MPa como se indica en la Tabla 20-4, además de un Módulo de Young de 210 Gpa, el cual se obtiene del diagrama Esfuerzo – Deformación.





**Ilustración 20-4:** Representación del límite de fluencia y resistencia a la tracción de cada material.

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022



**Ilustración 21-4:** Representación del módulo de Young de cada material.

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

Respecto a las propiedades que se obtiene por medio de los ensayos realizados, el material que presenta mejor comportamiento a tracción es acero 17-4PH con una resistencia a la tracción de 1079,6 Mpa superior del acero M303 que tiene una resistencia a la tracción de 978,2 Mpa.

#### 4.7 Impacto

En las Tablas de la 19-4 a la 21-4 se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de impactoCVN realizado a las probetas.

4.7.1 *Acero M303*

**Tabla 21-4:** Resultados obtenidos del ensayo de impacto CVN del acero M303

Identificación	Energía de Impacto	
	ft-lbf	J
M22.050.19	20	27
M22.050.20	18	24
M22.050.21	16	22

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

4.7.2 *Acero 17-4PH*

**Tabla 22-4:** Resultados obtenidos del ensayo de impacto CVN del acero 17-4PH

Identificación	Energía de Impacto	
	ft-lbf	J
M22.050.13	88	119
M22.050.14	94	127
M22.050.15	84	114

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

4.7.3 *Acero AISI 420*

**Tabla 23-4:** Resultados obtenidos del ensayo de impacto CVN del acero AISI 420

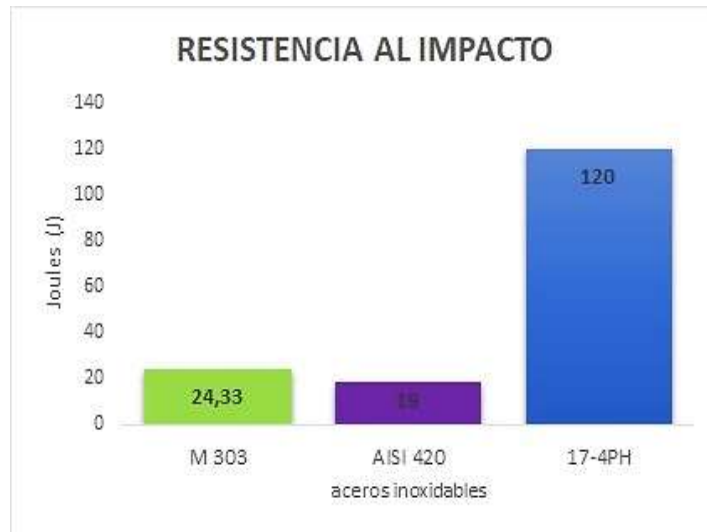
Identificación	Energía de Impacto	
	ft-lbf	J
M22.050.16	14	19
M22.050.17	12	16
M22.050.18	16	22

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

**Tabla 24-4:** Resumen de resultados del ensayo de impacto

MATERIAL	Energía de Impacto - J			
	Prob. 1	Prob. 2	Prob. 3	Promedio
<b>M303</b>	27	24	22	<b>24,33</b>
<b>AISI 420</b>	19	16	22	<b>19</b>
<b>17-4PH</b>	119	127	114	<b>120</b>

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022



**Ilustración 22-4:** Curva Esfuerzo – Deformación para el acero M303

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

Después de concluido los ensayos de tenacidad, se realiza una media aritmética para determinar un promedio de la energía de impacto para los aceros M303, 17-4PH y AISI 420 dando un valor de 24,33 Joules, 120 Joules y 19 Joules respectivamente.

Con estos valores de energía de impacto, se deduce que el material con mayor resistencia al impacto es el 17-4PH teniendo 120 Joules, sumamente superior al acero M303 que se desea suplir.

#### 4.8 Resultados simulación Fatiga

Análisis de resultados acero M303

Para obtener diferentes resultados se parametrizo la carga que se va a probar, el número de ciclos de vida de la probeta y el coeficiente de seguridad dinámico obteniendo los siguientes resultados.

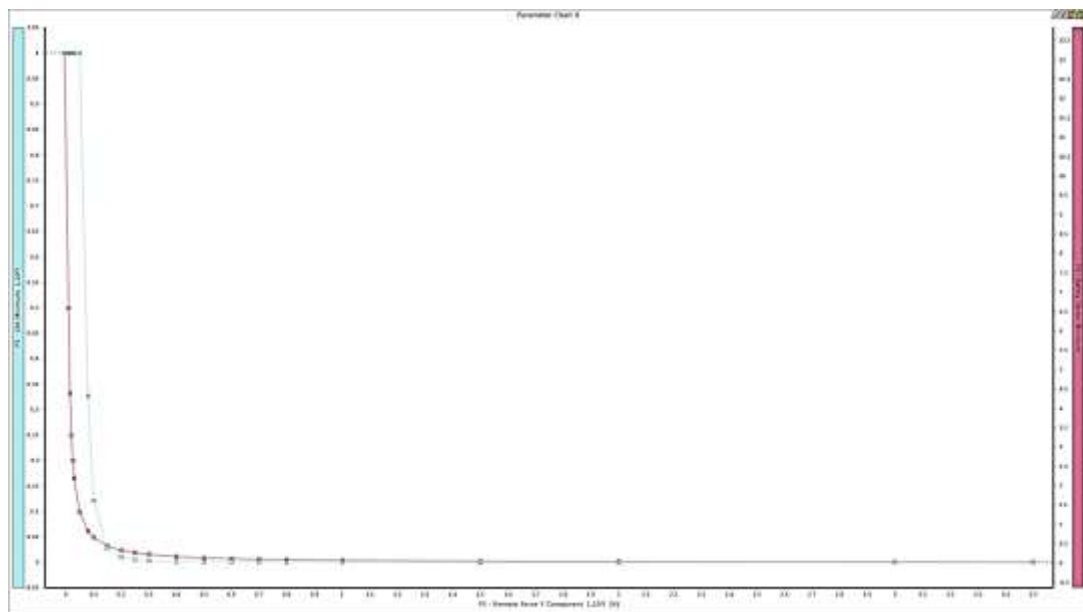
**Tabla 25-4:** Resultados fatiga M303- ANSYS

Table of Design Points							
	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	P1 - Remote Force Y Component	P4 - Mesh Element Size	P5 - Remote Force Y Component	P6 - Mesh Element Size	P2 - Life Minimum	P3 - Safety Factor Minimum
2	Units	N	mm	N	mm		
3	DP 0 (Current)	-50	1,5	-50	1,5	1E+06	13,173
4	DP 1	100	1,5	-50	1,5	1E+06	6,5867
5	DP 2	150	1,5	-50	1,5	1E+06	4,3912
6	DP 3	200	1,5	-50	1,5	1E+06	3,2934
7	DP 4	250	1,5	-50	1,5	1E+06	2,6347
8	DP 5	300	1,5	-50	1,5	1E+06	2,1956
9	DP 6	500	1,5	-50	1,5	1E+06	1,3173
10	DP 7	800	1,5	-50	1,5	3,265E+05	0,82334
11	DP 8	1000	1,5	-50	1,5	1,212E+05	0,65867
12	DP 9	1500	1,5	-50	1,5	27450	0,43912
13	DP 10	2000	1,5	-50	1,5	10034	0,32934
14	DP 11	2500	1,5	-50	1,5	5032,7	0,26347
15	DP 12	3000	1,5	-50	1,5	2864,6	0,21956
16	DP 13	4000	1,5	-50	1,5	1280,6	0,16467
17	DP 14	5000	1,5	-50	1,5	716,77	0,13173
18	DP 15	6000	1,5	-50	1,5	496,14	0,10978
19	DP 16	7000	1,5	-50	1,5	298,8	0,094096
20	DP 17	8000	1,5	-50	1,5	211,14	0,082334
21	DP 18	10000	1,5	-50	1,5	120,99	0,065867
22	DP 19	15000	1,5	-50	1,5	46,17	0,043912
23	DP 20	20000	1,5	-50	1,5	23,866	0,032934
24	DP 21	30000	1,5	-50	1,5	10,375	0,021956
25	DP 22	35000	1,5	-50	1,5	0	0,018819

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

Se analizaron 25 puntos de diseño dando como resultados que la carga para obtener una probeta a vida infinita del material AISI 303 es de 500 N o 51 Kgf donde el número de ciclos es de un millón, mientras que el número mínimo de ciclos es de 10 con una carga de 30000 N donde el elemento fallara por fatiga, de igual manera se puede estimar los diferentes ciclos de vida dependiendo la carga que se aplica.

De esta manera se obtiene la ilustración siguiente que es la curva S-N describiendo los valores calculados.



**Ilustración 23-4:** Curva S-N acero M303

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

**Acero 17-4PH**

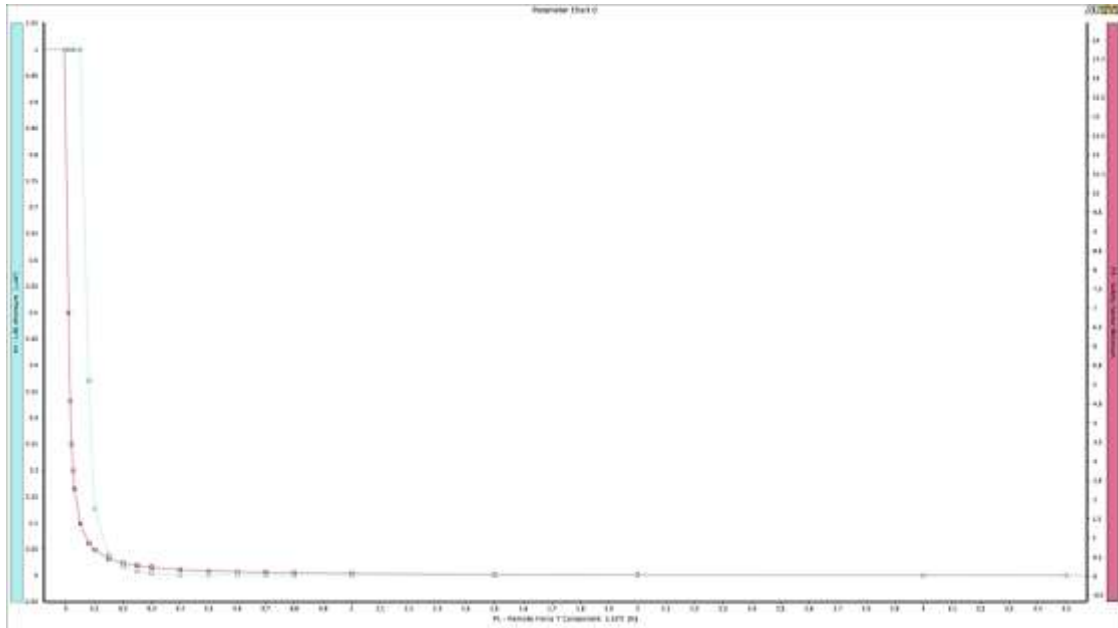
**Tabla 26-4:** Resultados fatiga 17-4 PH- ANSYS

Table of Design Points								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Name	P1 - Remote Force Y Component	P4 - Mesh Element Size	P2 - Life Minimum	P3 - Safety Factor Minimum	Retain	Retained Data	Note
2	Units	N	mm					
3	DP 0 (Current)	-50	1,5	1E+06	13,754	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
4	DP 1	100	1,5	1E+06	6,8771	<input type="checkbox"/>		
5	DP 2	150	1,5	1E+06	4,5847	<input type="checkbox"/>		
6	DP 3	200	1,5	1E+06	3,4385	<input type="checkbox"/>		
7	DP 4	250	1,5	1E+06	2,7508	<input type="checkbox"/>		
8	DP 5	300	1,5	1E+06	2,2924	<input type="checkbox"/>		
9	DP 6	500	1,5	1E+06	1,3754	<input type="checkbox"/>		
10	DP 7	800	1,5	3,704E+05	0,85964	<input type="checkbox"/>		
11	DP 8	1000	1,5	1,2683E+05	0,68771	<input type="checkbox"/>		
12	DP 9	1500	1,5	39131	0,48847	<input type="checkbox"/>		
13	DP 10	2000	1,5	16798	0,34385	<input type="checkbox"/>		
14	DP 11	2500	1,5	7609,5	0,27508	<input type="checkbox"/>		
15	DP 12	3000	1,5	4284,3	0,22924	<input type="checkbox"/>		
16	DP 13	4000	1,5	1749,2	0,17193	<input type="checkbox"/>		
17	DP 14	5000	1,5	911,64	0,13754	<input type="checkbox"/>		
18	DP 15	6000	1,5	535,28	0,11462	<input type="checkbox"/>		
19	DP 16	7000	1,5	341,25	0,098244	<input type="checkbox"/>		
20	DP 17	8000	1,5	231,06	0,085964	<input type="checkbox"/>		
21	DP 18	10000	1,5	135,65	0,068771	<input type="checkbox"/>		
22	DP 19	15000	1,5	49,237	0,045847	<input type="checkbox"/>		
23	DP 20	20000	1,5	25,342	0,034385	<input type="checkbox"/>		
24	DP 21	30000	1,5	10,41	0,022924	<input type="checkbox"/>		
25	DP 22	35000	1,5	0	0,019649	<input type="checkbox"/>		
						<input type="checkbox"/>		

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

Se analizaron 25 puntos de diseño dando como resultados que la carga para obtener una probeta a vida infinita del material 17-4PH es de 500 N o 51 kgf donde el número de ciclos es de un millón, mientras que el número mínimo de ciclos es de 10 con una carga de 30000 N donde el elemento fallara por fatiga, de igual manera se puede estimar los diferentes ciclos de vida dependiendo la carga que se aplica.

De esta manera se obtiene la ilustración siguiente que es la curva S-N describiendo los valores calculados.



**Ilustración 24-4:** Curva S-N acero 17-4PH

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

### Acero AISI 420

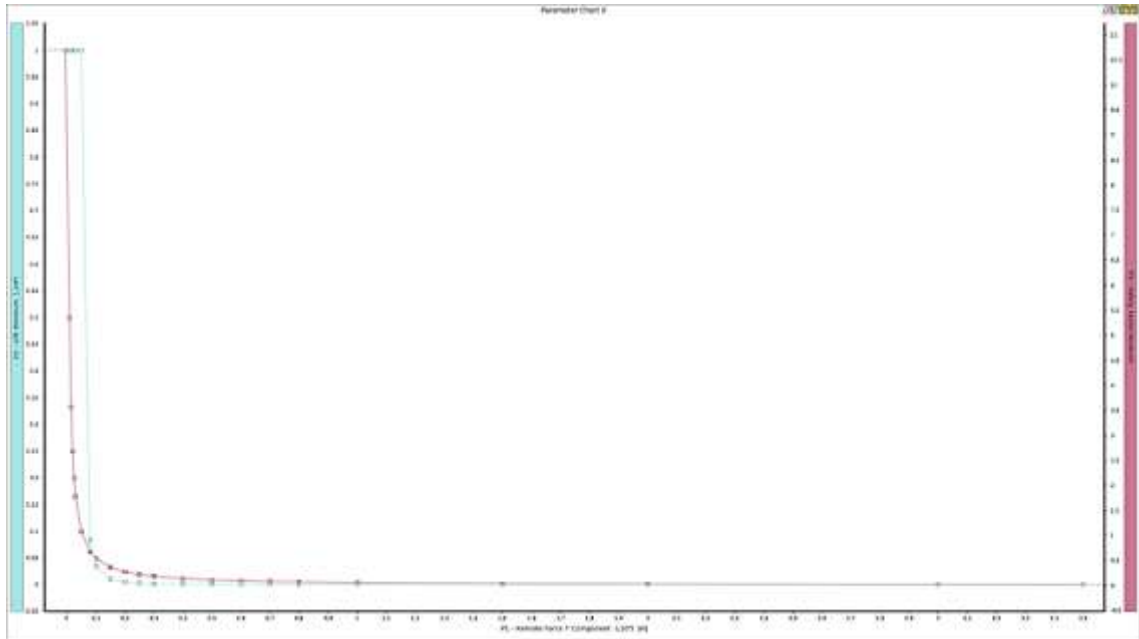
**Tabla 27-4:** Resultados fatiga AISI 420- ANSYS

Table of Design Points					
	A	B	C	D	E
1	Name	P1 - Remote Force Y Component	P4 - Mesh Element Size	P2 - Life Minimum	P3 - Safety Factor Minimum
2	Units	N	mm		
3	DP 0 (Current)	-50	1,5	1E+06	10,698
4	DP 1	100	1,5	1E+06	5,3489
5	DP 2	150	1,5	1E+06	3,5659
6	DP 3	200	1,5	1E+06	2,6744
7	DP 4	250	1,5	1E+06	2,1395
8	DP 5	300	1,5	1E+06	1,783
9	DP 6	500	1,5	1E+06	1,0698
10	DP 7	800	1,5	83349	0,66861
11	DP 8	1000	1,5	34374	0,53489
12	DP 9	1500	1,5	10460	0,35659
13	DP 10	2000	1,5	4613	0,26744
14	DP 11	2500	1,5	2428,1	0,21395
15	DP 12	3000	1,5	1572	0,1783
16	DP 13	4000	1,5	860,21	0,13372
17	DP 14	5000	1,5	538,88	0,10698
18	DP 15	6000	1,5	367,73	0,089148
19	DP 16	7000	1,5	266,21	0,076412
20	DP 17	8000	1,5	201,22	0,066861
21	DP 18	10000	1,5	108,95	0,053489
22	DP 19	15000	1,5	27,909	0,035659
23	DP 20	20000	1,5	13,069	0,026744
24	DP 21	30000	1,5	0	0,01783
25	DP 22	35000	1,5	0	0,015282

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

Se analizaron 25 puntos de diseño dando como resultados que la carga para obtener una probeta a vida infinita del material AISI 420 es de 500 N o 51 kgf donde el número de ciclos es de un millón, mientras que el número mínimo de ciclos es de 13 con una carga de 20000 N donde el elemento fallara por fatiga, de igual manera se puede estimar los diferentes ciclos de vida dependiendo la carga que se aplica.

De esta manera se obtiene la ilustración siguiente que es la curva S-N describiendo los valores calculados.



**Ilustración 25-4:** Curva S-N acero AISI 420

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

Con los datos obtenidos para la fatiga, el mejor material que soporta mayor fatiga con gran carga es el 17-4PH con 10 ciclos a una carga de 30000 N, que está igual que el M303 que se desea sustituir.

#### 4.9 Cálculo de Fatiga teórica

Para saber el número de ciclos de un elemento mecánico se aplica la siguiente formula:

$$S_f = aN^b \quad (14)$$

Donde:

$S_f$ : Resistencia a la fatiga [MPa]

$a$ : Coeficiente [MPa]

$N$ : Número de ciclos

$b$ : Coeficiente

$$a = \frac{(f S_{ut})^2}{S_e} \quad (15)$$

Donde:

$f$ : Fracción de resistencia a la fatiga

$S_{ut}$ : Resistencia a la tracción [MPa]

$S_e$ : Límite de fatiga [MPa]

$$b = -\frac{1}{3} \log \left( \frac{f S_{ut}}{S_e} \right) \quad (16)$$

Para encontrar los esfuerzos en una sección circular se utiliza la siguiente ecuación

$$\sigma = \frac{32M}{\pi d^3} \quad (17)$$

Donde:

$\sigma$ : Esfuerzo Normal [MPa]

$M$ : Momento aplicado [Nm]

$d$ : Diametro de la probeta [mm]

Al analizar el ensayo de fatiga se tiene una fatiga totalmente reversible con un valor de  $R=1$  donde la resistencia a la fatiga será igual al esfuerzo invertido y a su vez este es igual al esfuerzo amplitud

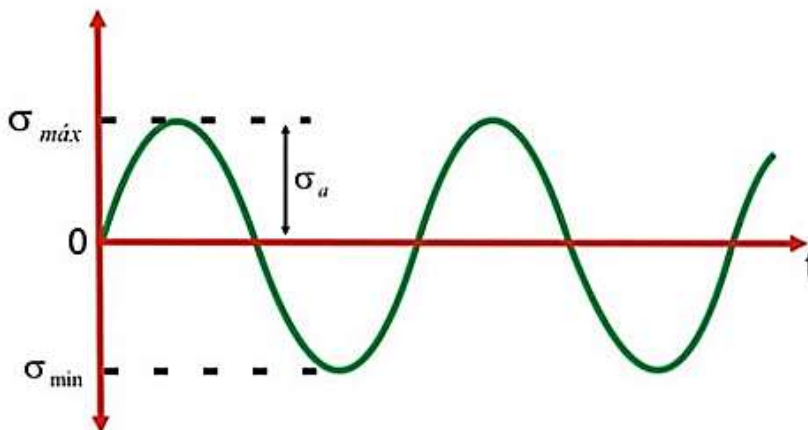
$$S_f = \sigma_{inv} = \sigma_a \quad (18)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (19)$$

Para tener un valor más acertado se debe amplificar el esfuerzo con un factor  $k_f$  el mismo que tiene un valor de 1,6 en flexión.

$$\sigma_a = k_f * \sigma_{nom} \quad (20)$$

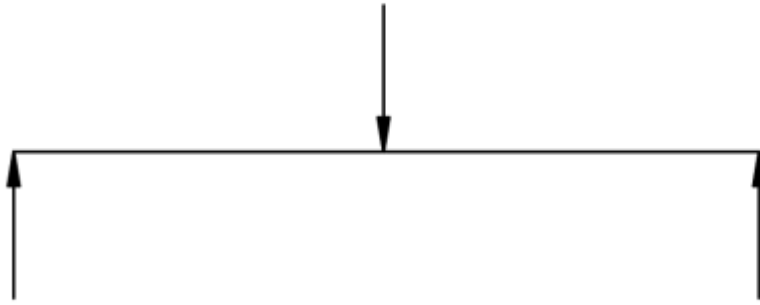
Para encontrar los diferentes esfuerzos se cambia el sistema de fuerzas por un par equivalente aplicado en el centro de la probeta



**Ilustración 26-4-:** Esfuerzo completamente invertido

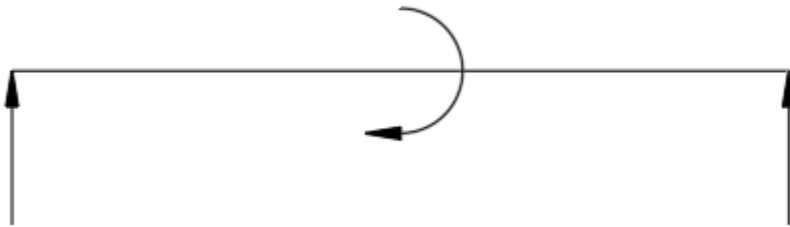
Fuente: García L, 2017





**Ilustración 27-4:** Sistema de fuerzas

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022



**Ilustración 28-4:** Par equivalente

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

Con esto se calcula el diferente momento aplicado en la probeta

**Tabla 28-4:** Calculo del momento en la probeta a diferentes cargas

Carga (N)	Momento (Nm)
50	2,54
100	5,08
150	7,62
500	25,4
800	40,64
1000	50,8
1500	76,2
2500	127
5000	254
10000	508
15000	762

20000	1016
25000	1270
30000	1524
35000	1778

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

Se calcula el esfuerzo

**Tabla 29-4:** Cálculo del esfuerzo (Mpa)

<b>Momento Nm</b>	<b>Esfuerzo Mpa</b>
2,54	100,568616
5,08	201,137233
7,62	301,705849
25,4	1005,68616
40,64	1609,09786
50,8	2011,37233
76,2	3017,05849
127	5028,43082
254	10056,8616
508	20113,7233
762	30170,5849
1016	40227,4466
1270	50284,3082
1524	60341,1698
1778	70398,0315

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

Se calcula el factor a con la fórmula (15)

Donde f se toma con un valor de 0,9 debido a la flexión pura, el valor de  $S_e$  considera el más crítico que es

$$S_e = 0,5S_e' \quad (21)$$

Donde  $S_e'$  se considera a flexión pura y es la resistencia a la tracción multiplicado por un factor de 0,6

$$S_e = 0,5 * 0,6 * S_{ut} \quad (22)$$

Acero M303

$$a = \frac{(0,9 * 978,2)^2}{0,59 * 0,6 * 978,2}$$

$$a = 2641,14 \text{ MPa}$$

Acero 17-4 PH

$$a = \frac{(0,9 * 1079,6)^2}{0,59 * 0,6 * 1079,6}$$

$$a = 2914,92 \text{ MPa}$$

Acero AISI 420

$$a = \frac{(0,9 * 1063,8)^2}{0,59 * 0,6 * 1063,8}$$

$$a = 2872,26 \text{ MPa}$$

Cálculo del factor b

Acero M303

$$b = -\frac{1}{3} \log \left( \frac{0,9 * 978,2}{0,5 * 0,6 * 978,2} \right)$$

$$b = -0.1590404182$$

Acero 17-4 PH

$$b = -\frac{1}{3} \log \left( \frac{0,9 * 1079,6}{0,5 * 0,6 * 1079,6} \right)$$

$$b = -0.1590404182$$

Acero AISI 420

$$b = -\frac{1}{3} \log \left( \frac{0,9 * 1063,8}{0,5 * 0,6 * 1063,8} \right)$$

$$b = -0.1590404182$$

Cálculo del número de ciclos

$$N = \left( \frac{\sigma_{inv}}{a} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (23)$$

**Tabla 30-4:** Resultados teóricos obtenidos de Números de ciclos

Carga (N)	Momento (Nm)	Esfuerzo amplitud (Mpa)	Numero de ciclos Acero M303	Numero de ciclos Acero AISI 420	Numero de ciclos Acero 17-4 PH
50	2,54	160,9097863	43740258,57	13236311,41	74123727,29
100	5,08	321,8195725	25987630,13	10409443,26	64878538,97

150	7,62	482,7293588	23740258,49	8132363,27	64123727,16
200	10,16	643,639145	17614293,48	7332411,09	61214447,45
250	12,7	804,5489313	16618169,45	6275640,25	59856348,15
300	15,24	965,4587176	15987630,03	5040944,32	44878538,18
350	17,78	1126,368504	11239784,07	4898527,65	35993659,24
400	20,32	1287,27829	9173045,812	3054892,24	15544954,89
450	22,86	1448,188076	4374025,842	2132363,11	7412372,703
500	25,4	1609,097863	2255129,684	1928269,56	1821619,331
800	40,64	2574,55658	317415,194	85830,373	378975,774
1000	50,8	3218,195725	123865,711	35668,28	129916,814
1500	76,2	4827,293588	28451,297	10892,826	38216,193
2500	127	8045,489313	5083,451	2488,832	7839,313
5000	254	16090,97863	736,268	547,105	940,325
10000	508	32181,95725	124,882	116,697	140,202
15000	762	48272,93588	48,268	28,617	50,703
20000	1016	64363,9145	25,049	13,541	26,281
30000	1524	96545,87176	10,824	2,76699E-4	10,722
35000	1778	112636,8504	5,6458E-5	1,0497E-6	9,57E-05

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

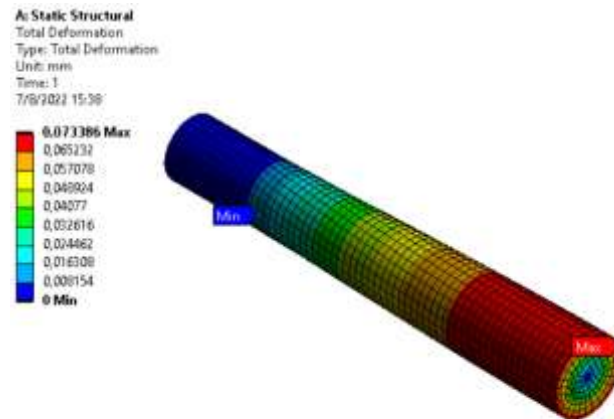
**Tabla 31-4:** Cálculo del porcentaje de error a partir de vida finita

Carga (n)	Numero de ciclos acero m303	Numero de ciclos m303 ANSYS	Porcentaje de error	Numero de ciclos acero AISI 420	Numero de ciclos acero AISI 420 ANSYS	Porcentaje de error	Numero de ciclos acero 17-4 PH	Numero de ciclos 17-4PH ANSYS	Porcentaje de error
800	317415,194	3,27E+05	2,86	85830,373	83349	2,89	378975,774	3,70E+05	2,26
1000	123865,711	1,21E+05	2,15	35668,28	34374	3,62	129916,814	1,27E+05	2,40
1500	28451,297	27450	3,52	10892,826	10460	3,97	38216,193	39131	2,39
2500	5083,451	5032,07	1,01	2488,832	2428,1	2,44	7839,313	7609,5	2,93
5000	736,268	716,77	2,65	547,105	538,88	1,50	940,325	911,64	3,05
10000	124,882	120,99	3,12	116,697	108,95	6,63	140,202	135,65	3,24
15000	48,268	46,17	4,35	28,617	27,909	2,47	50,703	49,237	2,89
20000	25,049	23,866	4,72	13,541	13,069	3,48	26,281	25,342	3,57
30000	10,824	10,375	4,15	2,77E-04	0,00E+00	0	10,722	10,41	2,91
35000	0,00	0,00	0,00	1,05E-06	0,00E+00	0	9,57E-05	0	0
<b>PROMEDIO</b>			<b>2,85</b>			<b>2,70</b>			<b>2,56</b>

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

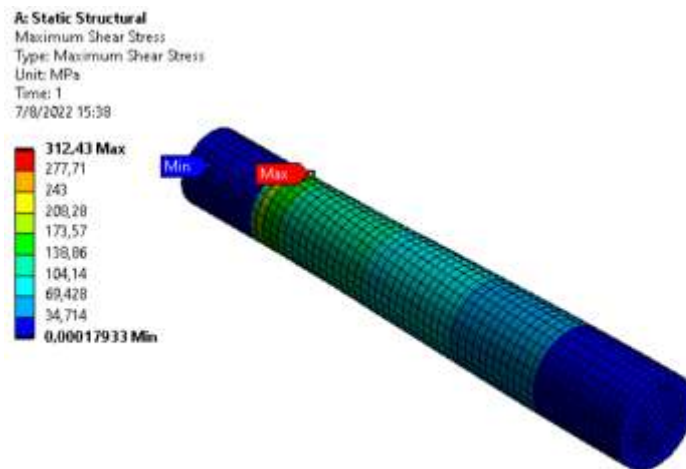
#### 4.10 Resultados simulación Torsión

A continuación, se presentan los resultados que se obtiene del ensayo de tracción en la varilla, para esto se parametriza el momento que se aplica en un extremo y se lo enfrenta tanto a la deformación total como al esfuerzo cortante máximo debido a la torsión.



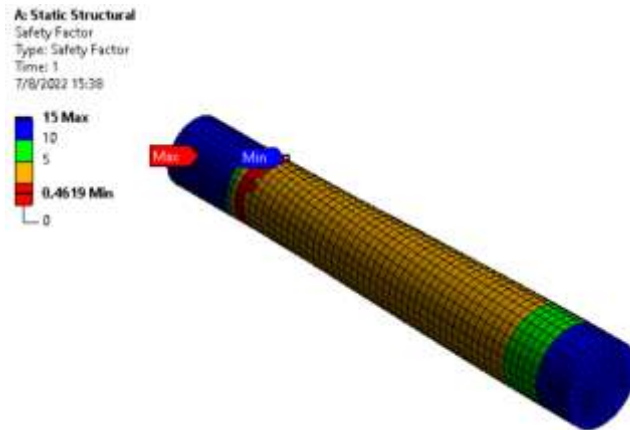
**Ilustración 29-4:** Valores de deformación ANSYS

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022



**Ilustración 30-4:** Esfuerzo cortante

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022



**Ilustración 31-4:** Factor de seguridad

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

Para obtener la gráfica se parametrizo cada valor hasta encontrar el máximo aplicable antes de que se produjera el fallo el cual da un valor de momento de 15000 Nm valor con el cual la probeta sufrirá una ruptura.

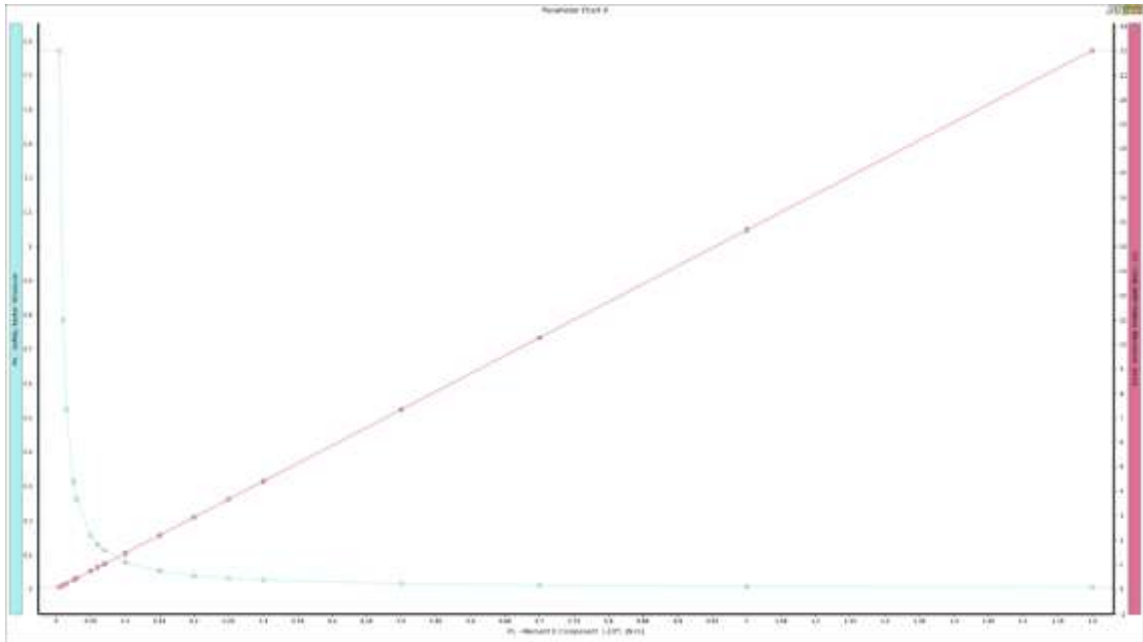
Acero M303

La deformación máxima mostrada con 15000 Nm es de 22 mm.

**Tabla 32-4:** Resultados ensayo torsión acero M303

Table of Design Points						
	A	B	C	D	E	F
1	Nombre	P1 - Moment X Component	P2 - Maximum Shear Stress Maximum	P3 - Total Deformation Maximum	P4 - Equivalent Stress Maximum	P5 - Safety Factor Minimum
2	Units	N m	MPa	mm	MPa	
3	DP 0 (Current)	50	312,43	0,073386	541,24	1,572
4	DP 1	100	624,85	0,14677	1082,5	0,78598
5	DP 2	150	937,28	0,22016	1623,7	0,52398
6	DP 3	250	1562,1	0,36693	2706,2	0,31439
7	DP 4	300	1874,6	0,44032	3247,4	0,26199
8	DP 5	500	3124,3	0,73386	5412,4	0,1572
9	DP 6	600	3749,1	0,88063	6494,8	0,131
10	DP 7	700	4374	1,0274	7577,3	0,11228
11	DP 8	1000	6248,5	1,4677	10825	0,078598
12	DP 9	1500	9372,8	2,2016	16237	0,052398
13	DP 10	2000	12497	2,9354	21649	0,039298
14	DP 11	2500	15621	3,6693	27062	0,031439
15	DP 12	3000	18746	4,4032	32474	0,026199
16	DP 13	5000	31243	7,3386	54124	0,01572
17	DP 14	7000	43740	10,274	75773	0,011228
18	DP 15	10000	62485	14,677	1,0825E+05	0,0078598
19	DP 16	15000	93728	22,016	1,6237E+05	0,0052398

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022



**Ilustración 32-4-:** Curva Momento-Deformación acero M303

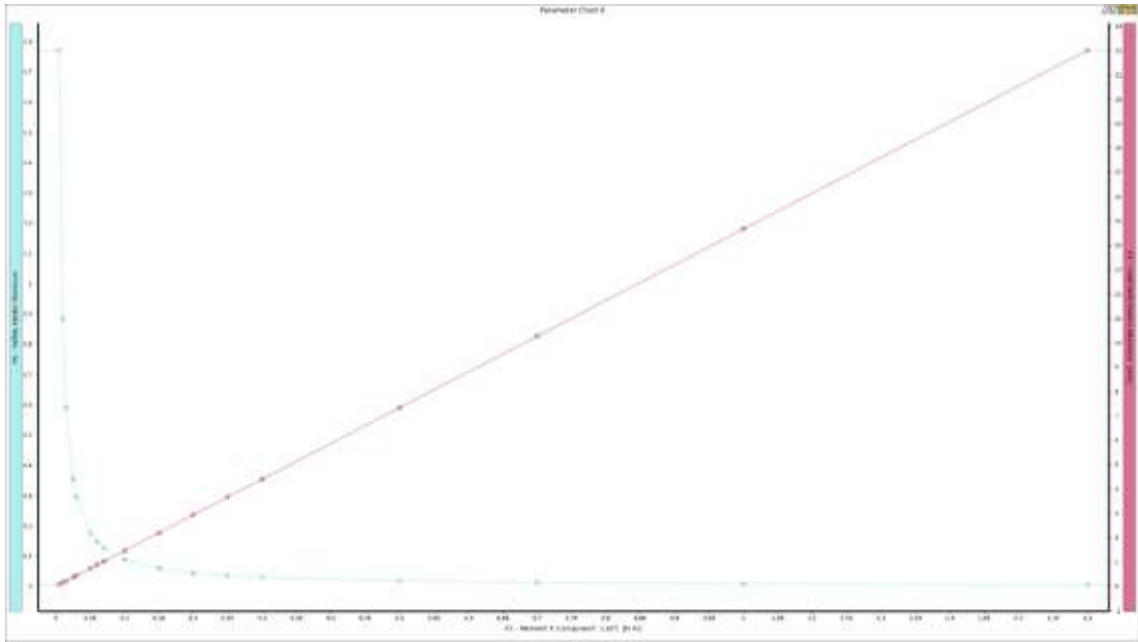
Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

**Acero 17-4PH**

**Tabla 33-4:** Resultados ensayo torsión acero 17-4PH

Table of Design Points						
	A	B	C	D	E	F
1	Name	P1 - Moment X Component	P2 - Maximum Shear Stress Maximum	P3 - Total Deformation Maximum	P4 - Equivalent Stress Maximum	P5 - Safety Factor Minimum
2	Units	N.m	MPa	mm	MPa	
3	DP 0 (Current)	50	312,43	0,073386	541,24	1,7711
4	DP 1	100	624,85	0,14677	1082,5	0,88556
5	DP 2	150	937,28	0,22016	1623,7	0,59038
6	DP 3	250	1562,1	0,36693	2706,2	0,35423
7	DP 4	300	1874,6	0,44032	3247,4	0,29519
8	DP 5	500	3124,3	0,73386	5412,4	0,17711
9	DP 6	600	3749,1	0,88063	6494,8	0,14759
10	DP 7	700	4374	1,0274	7577,3	0,12651
11	DP 8	1000	6248,5	1,4677	10825	0,088556
12	DP 9	1500	9372,8	2,2016	16237	0,059038
13	DP 10	2000	12497	2,9354	21649	0,044278
14	DP 11	2500	15621	3,6693	27062	0,035423
15	DP 12	3000	18746	4,4032	32474	0,029519
16	DP 13	5000	31243	7,3386	54124	0,017711
17	DP 14	7000	43740	10,274	75773	0,012651
18	DP 15	10000	62485	14,677	1,0825E+05	0,0088556
19	DP 16	15000	93728	22,016	1,6237E+05	0,0059038

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022



**Ilustración 33-4-:** Curva Momento-Deformación acero 17-4PH

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

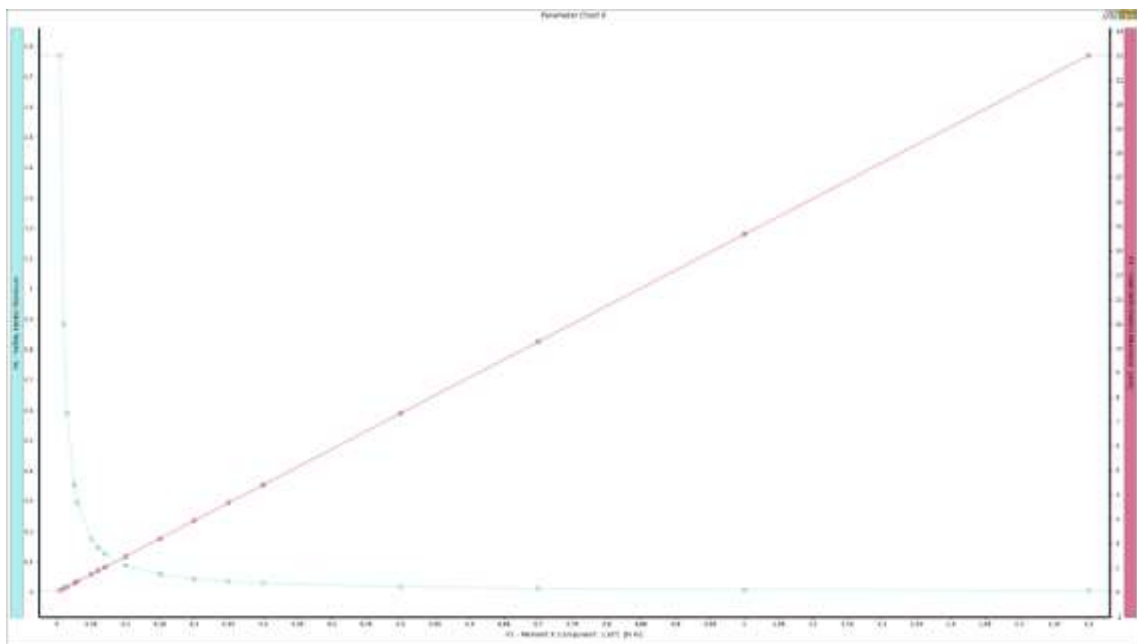


Acero AISI 420

**Tabla 34-4:** Resultados ensayo torsión acero AISI 20

Table of Design Points						
	A	B	C	D	E	F
1	Name	P1 - Moment X Component	P2 - Maximum Shear Stress Maximum	P3 - Total Deformation Maximum	P4 - Equivalent Stress Maximum	P5 - Safety Factor Minimum
2	Units	N.m	MPa	mm	MPa	
3	DP 0 (Current)	50	312,43	0,073386	541,24	1,7698
4	DP 1	100	624,85	0,14677	1082,5	0,88492
5	DP 2	150	937,28	0,22016	1623,7	0,58994
6	DP 3	250	1562,1	0,36693	2706,2	0,35397
7	DP 4	300	1874,6	0,44032	3247,4	0,29497
8	DP 5	500	3124,3	0,73386	5412,4	0,17698
9	DP 6	600	3749,1	0,88063	6494,8	0,14749
10	DP 7	700	4374	1,0274	7577,3	0,12642
11	DP 8	1000	6248,5	1,4677	10825	0,088492
12	DP 9	1500	9372,8	2,2016	16237	0,058994
13	DP 10	2000	12497	2,9354	21649	0,044246
14	DP 11	2500	15621	3,6693	27062	0,035397
15	DP 12	3000	18746	4,4032	32474	0,029497
16	DP 13	5000	31243	7,3386	54124	0,017698
17	DP 14	7000	43740	10,274	75773	0,012642
18	DP 15	10000	62485	14,677	108250	0,0088492
19	DP 16	15000	93728	22,016	162370	0,0058994

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022



**Ilustración 34-4:** Curva Momento-Deformación acero AISI 420

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

#### 4.11 Cálculo de Torsión teórica

Cálculo del ángulo de torsión

Para calcular el ángulo de torsión se debe analizar al sistema como una viga empotrada en el extremo



**Ilustración 35-4:** Sistema viga empotrada en el extremo

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

Con lo cual se tiene datos conocidos del momento que se aplica en el extremo de la varilla, el diámetro de la varilla y el módulo cortante de la probeta.

Con esto se procede a calcular el ángulo de torsión con la siguiente formula

$$\phi = \frac{TL}{GJ} \quad (24)$$

Donde:

$\phi$ : Ángulo de torsión [°]

$T$ : Torque aplicado [Nm]

$G$ : Modulo cortante del material [Pa]

$J$ : Momento Polar de inercia [m<sup>4</sup>]

La longitud se expresa como la distancia máxima hacia el empotramiento, en este caso es la longitud total de la probeta que tiene un valor de 90 mm o 0,09 m.

El diámetro de la probeta es de 12 mm.

$$J = \frac{\pi}{2} * r^4 \quad (25)$$

$$J = 3,257 \times 10^{-8}$$

Debido a que se utilizan 3 probetas que tienen diferente módulo cortante se calcula el ángulo de torsión para cada una en radianes y grados

**Tabla 35-4:** Resultados teóricos obtenidos Angulo de torsión

Momento (Nm)	Angulo de torsión (Rad) Acero M303	Angulo de torsión (°) Acero M303	Angulo de torsión (Rad) Acero 17-4 PH	Angulo de torsión (°) Acero 17-4 PH	Angulo de torsión (Rad) Acero AISI 420	Angulo de torsión (°) Acero AISI 420
50	0,00131910	0,07557863	0,001296749	0,0742982	0,0013376	0,0766386
100	0,00260329	0,14915725	0,002722092	0,1559644	0,00266637	0,1527715

150	0,00399219	0,22873588	0,003995871	0,2289466	0,0040417	0,2315725
250	0,00677001	0,38789314	0,00654343	0,374911	0,00649138	0,3719288
300	0,00798439	0,45747176	0,00781721	0,4478931	0,0079991	0,4583145
500	0,01312115	0,75178627	0,013086861	0,7498219	0,0131573	0,7538575
1000	0,02603285	1,49157254	0,025981735	1,4886438	0,02666366	1,527715
1500	0,03992194	2,28735881	0,039076989	2,2389466	0,03999549	2,2915725
2000	0,05206570	2,98314508	0,052044475	2,9819288	0,05193105	2,9754301
2500	0,06595479	3,77893135	0,06477082	3,7110946	0,06619817	3,7928757
3000	0,07809856	4,47471762	0,0776485	4,4489314	0,07824564	4,4831451
5000	0,13190959	7,5578627	0,130868608	7,4982189	0,13331829	7,6385751
10000	0,25858319	14,8157254	0,264668332	15,164378	0,26370359	15,109103
15000	0,40285717	23,0820156	0,405527478	23,235013	0,38886117	22,280104

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

**Tabla 36-4:** Cálculo del porcentaje de error de la deformación

Momento (Nm)	Porcentaje de error acero M303	Porcentaje de error acero 17-4PH	Porcentaje de error acero AISI 420
50	2,9091	1,2359	4,2519
100	1,6675	5,9593	3,9939
150	3,7493	3,8378	4,9283
250	5,4095	2,1341	1,3494
300	3,7493	1,6908	3,9262
500	2,3845	2,1288	2,6527
1000	1,6005	1,4069	3,9284
1500	3,7493	1,6680	3,9262
2000	1,6005	1,5604	1,3454
2500	2,9011	1,1262	3,2581
3000	1,5983	1,0279	1,7832
5000	2,9011	2,1288	3,9271
10000	0,9363	3,2140	2,8599
15000	4,6184	5,2464	1,1854
<b>PROMEDIO</b>	<b>2,8410</b>	<b>2,4547</b>	<b>3,0940</b>

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

Para calcular el esfuerzo cortante al cual está sometida la probeta se utiliza la siguiente fórmula:

$$\tau = \frac{16T}{\pi d^3} \quad (26)$$

Donde:

$\tau$ : Esfuerzo Cortante [MPa]

$T$ : Torque aplicado [Nmm]

$d$ : Diametro de la probeta [mm]

**Tabla 37-4:** Calculo del Esfuerzo cortante

Momento (N m)	Esfuerzo cortante (MPa)
50	147,365688
100	294,731376
150	442,097064
200	589,462752
250	736,82844
300	884,194128
350	1031,55982
400	1178,9255
450	1326,29119
500	1473,65688
1000	2947,31376
1500	4420,97064
2000	5894,62752
2500	7368,2844
3000	8841,94128
3500	10315,5982
4000	11789,255
4500	13262,9119
5000	14736,5688
5500	16210,2257
6000	17683,8826
10000	29473,1376
15000	44209,7064

Realizado por: Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

**Tabla 38-4:** Resumen de las propiedades de cada material

MATERIALES	Propiedades mecánicas				
	Lim. Fluencia. (Mpa)	Res. Tracción (Mpa)	Mod. Young (GPa)	D. Rockwel HRC	D. Brinell HB
<b>M303</b>	850,8	978,2	218	32	291,164
<b>AISI 420</b>	957,9	1063,8	240	29,75	282,689

<b>17-4PH</b>	<b>958,6</b>	<b>1079,6</b>	<b>275</b>	<b>34,5</b>	<b>362,578</b>
---------------	--------------	---------------	------------	-------------	----------------

**Realizado por:** Rojas Juan & Rosero Israel, 2022

Luego de haber realizado la caracterización metalográfica y estudio de las propiedades mecánicas de los aceros inoxidable M303, AISI 420 y 17-4PH, se determina que el acero 17-4PH va a presentar un mejor comportamiento mecánico en comparación con los aceros mencionados, esto se hace contraste con los resultados de la evaluación de sus propiedades mecánicas teniendo así una mayor resistencia a la tracción con 1079.6MPa y una tenacidad de 120 Joules, esta diferencia con los demás materiales radica en su microestructura debido a que posee martensita de listón, quien proporciona un aumento en su tenacidad, mientras que los aceros M303 y AISI 420 pierden resistencia a la tracción y tenacidad, esto se debe a la producción inclusiones no metálicas del tipo silicato, por tal razón el acero que sustituye y presenta mejores propiedades mecánicas al acero M303 es el acero 17-4PH con lo que se cumple el objetivo principal del trabajo de investigación

## CONCLUSIONES

La composición química de los aceros M303, 17-4PH y AISI 420 obtenidas mediante un análisis metalográfico se encuentran dentro al rango que estipula los fabricantes y se puede comprobar que se trata del mismo material analizado.

La composición química de los materiales tiene como resultado en un mayor porcentaje de Cr (Cromo) al acero 17-4PH, siendo así mencionado material el que proporcionara mejor comportamiento como un acero inoxidable.

Las micrografías que se obtienen en el análisis para el acero M303 son granos de austenita y en su interior lleva una matriz martensítica encontrándose así en sus límites de grano algunas precipitaciones de carburos de cromo, estos componentes endurecen el material y reducen la ductilidad y tenacidad.

Las micrografías que se obtienen en el análisis para el acero 17-4PH, se presenta martensita de listón y ferrita en su estructura, esta martensita de listón proporciona mayor tenacidad al material a comparación de la martensita normal, se ve influenciada además en la resistencia a la tracción.

Las micrografías que se obtienen en el análisis para el acero AISI 420, se presenta martensita en su mayoría y algunos carburos de hierro y cromo, estos componentes endurecen el material y reducen la ductilidad y tenacidad.

La incidencia del tamaño de grano en las propiedades es inversamente proporcional, a mayor número de grano las propiedades disminuyen.

Para los aceros M303, 17-4PH y AISI 420 los tamaños de grano que se obtiene son de 8, 7, 8 respectivamente.

Las inclusiones que se encuentran en los aceros M303, 17-4PH y AISI 420 son de naturalidad, oxido globular y silicato, oxido globular y sulfuro, sulfuros y silicatos, respectivamente; los sulfuros no presentan mayor afección en las propiedades a diferencia de los óxidos y silicatos, sin embargo, acorde a la severidad que se obtiene el que menor afectación tiene es el acero 17-4PH.

La dureza Rockwell C para los aceros M303, 17-4PH y AISI 420 son 32 HRC, 34,5 HRC y 29,75 HRC respectivamente, para dureza Brinell son 291, 362 y 282 respectivamente.

La resistencia a la tracción para los aceros M303, 17-4PH y AISI 420 son de 978,2 MPa, 1079,6 MPa y 1063,8 MPa respectivamente.

El impacto que pueden soportar los aceros M303, 17-4PH y AISI 420 son de 24 J, 120 J y 19 J respectivamente.

## **RECOMENDACIONES**

Para un análisis correcto para la obtención de las micrografías se recomienda la utilización de lijas de manera progresiva en el tamaño de grano, así con ello se consigue una superficie tipo espejo.

Se recomienda para la realización de los diferentes ensayos para obtener las propiedades mecánicas de los aceros, verificar el certificado de calibración para así conseguir datos exactos que puedan ser válidos.

Se recomienda realizar una limpieza minuciosa de las probetas antes y después de realizar el ataque químico correspondiente para cada material, esto con ayuda de alcohol, una secadora y algodón.

Se recomienda la utilización del químico Vilella para el correspondiente ataque químico, controlar el tiempo de aplicación y su efectividad.

Se recomienda en la etapa de mecanizado de las diferentes probetas por los ensayos correspondientes realizar una verificación de las medidas acorde a lo estipulado en las diferentes normas de aplicación para el fin pertinente.

Se recomienda realizar los ensayos de fatiga y torsión para un mejor contraste con los resultados obtenidos analíticos y teóricos.

Se recomienda una sustitución del material M303 por el 17-4PH que cumple con propiedades mecánicas iguales y en otras superiores al mismo, esto con la finalidad de satisfacer el requerimiento.

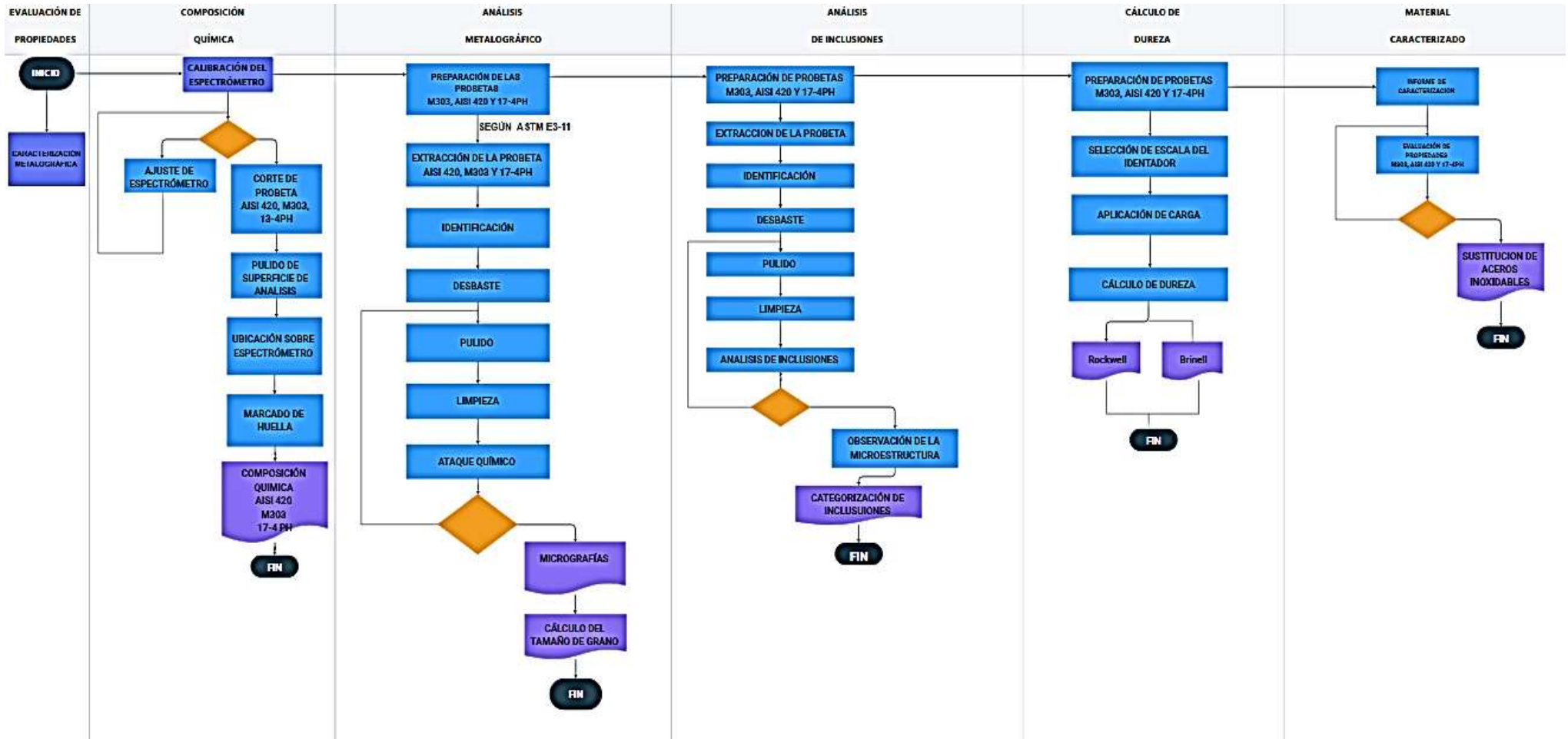


## BIBLIOGRAFÍA

- APARICIO, G., ARMAS, H. y CIACCIA, M.** *Tension elasto-plastic behavior of ASTM A-569 steel sheet  $\sigma\epsilon =$* . Rev. INGENIERÍA UC. 2007. 2007. pp. 57-63.
- CARGUA, C.** *Optimización de la resistencia a la corrosión de un bronce al aluminio en un ambiente corrosivo controlado*. Proyecto de Investigación. S.l.: s.n. 2019.
- DÍAZ, F.** *Metalografía y lo que faltaba*. S.l.: Nacional Autónoma de México. 2019.
- GAMBOA, H. y QUISPE, N.** *Elaboración de procedimientos y métodos para el control de la producción de los aceros producidos en NOVACERO S.A.* S.l.: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/268/1/15T00416.pdf>. 2009.
- GARCÍA, J. y ARENAS, J.** *Análisis de Aceros por Microscopía Óptica* [en línea]. S.l.: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/12065/ANALISISACERO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. 2017. Disponible en: <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/12065/ANALISISACERO.pdf?sequence=1>.
- LANAS, L. y PROAÑO, S.** *Desarrollo de procedimientos para ensayos de micrografía, dureza, espectrometría de rayos X y análisis de la microestructura de productos laminados para la mejora del control de calidad en la empresa NOVACERO S.A.* S.l.: Escuela Politécnica del Ejército. 2011.
- MARÍN, J.** *Identificación De Microconstituyentes En Aleaciones De Aluminio Mediante Metalografía Óptica En Color* [en línea]. S.l.: Nacional Autónoma de México. 2019. Disponible en: [http://oa.upm.es/54474/1/TFG\\_JAVIER\\_MARIN\\_DE\\_LA\\_PUENTE.pdf](http://oa.upm.es/54474/1/TFG_JAVIER_MARIN_DE_LA_PUENTE.pdf).
- ORTEGA, Y.** *Impact test: Charpy test*. Revista Mexicana de Física [en línea]. 2016. pp. 51-57. ISSN 0035001X. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmfe/v52n1/v52n1a8.pdf>.
- REYNA, G.** *Manual De Practicas de Análisis Metalográfico*. S.l.: Centro de Enseñanza Técnica Industrial. 2022.
- SANTOS, E.** *Acerca del ensayo de dureza*. 2018.
- SUAREZ, M.** *Máquina de fatiga flexo rotativa para ensayos de resistencia de materiales para el taller de mecánica de la FICA* [en línea]. S.l.: Técnica del Norte. 2017. Disponible en: [http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/7153/1/04\\_MEC\\_170\\_TRABAJO\\_DE\\_GRADO.pdf](http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/7153/1/04_MEC_170_TRABAJO_DE_GRADO.pdf).
- TREJO, J.** *Conversión de microscopio metalográfico convencional en innovador microscopio metalográfico digital*. El Salvador: s.n. ISBN 9789996150555. 2017.
- UNITEDTEST.** *Máquina de prueba de torsión*. Beijing United Test Co [en línea]. Disponible en: <https://www.directindustry.es/prod/beijing-unitedtest-co-ltd/product-103733-1077977.html>.

ANEXOS:

ANEXO A: DIAGRAMA DE PROCESO DE CARACTERIZACIÓN DE ACEROS M303, AISI 420 Y 17-4PH



**ANEXO B: MONTAJE DE LA MUESTRA PARA ENSAYO DE TRACCIÓN.**



**ANEXO C: MUESTRAS 17-4PH DESPUÉS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN**



**ANEXO D: MUESTRAS AISI-420 DESPUÉS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN**



**ANEXO E: MUESTRAS M303 DESPUÉS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN**



**ANEXO F: MONTAJE DE LA MUESTRA PARA ENSAYO DE IMPACTO.**



**ANEXO G: MUESTRAS 17-4PH DESPUÉS DEL ENSAYO DE IMPACTO.**



**ANEXO H: MUESTRAS AISI-420 DESPUÉS DEL ENSAYO DE IMPACTO**



**ANEXO I: MUESTRAS M303 DESPUÉS DEL ENSAYO DE IMPACTO.**

