



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE LAS AGUJAS
DE LA MARTENSITA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE
LOS ACEROS AISI 4140 Y AISI 4340”**

Trabajo de Titulación:

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERA MECÁNICA

AUTORA: DIANA ESTEFANÍA AGUIRRE RUIZ

DIRECTOR: Ing. Msc. Carlos Oswaldo Serrano Aguiar

Riobamba – Ecuador

2020

© 2020, Diana Estefanía Aguirre Ruiz

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

Yo, Diana Estefanía Aguirre Ruiz, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados de los mismos son auténticos. Los textos que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 22 de enero del 2020



Diana Estefanía Aguirre Ruiz

060457759-3

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA MECÁNICA

El tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: Proyecto de Investigación, “ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE LAS AGUJAS DE LA MARTENSITA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS AISI 4140 Y AISI 4340”, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Msc. Carlos Ramiro Cepeda Godoy PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2020 – 01 - 22
Ing. Msc. Carlos Oswaldo Serrano Aguiar DIRECTOR DEL TRABAJO DEL TITULACIÓN		2020 – 01 - 22
Ing. Msc. Edwin Fernando Viteri Núñez MIEMBRO DEL TRIBUNAL		2020 – 01 - 22

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiii
RESUMEN.....	xv
SUMMARY.....	xvi
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. MARCO TEORICO REFERENCIAL	2
1.1. Planteamiento del problema	2
<i>1.1.1. Antecedentes</i>	<i>2</i>
<i>1.1.2. Justificación</i>	<i>3</i>
<i>1.1.3. Alcance</i>	<i>4</i>
1.2. Objetivos.....	4
<i>1.2.1. Objetivo General.....</i>	<i>4</i>
<i>1.2.2. Objetivos específicos.....</i>	<i>4</i>
1.3. Materiales en la ingeniería.....	5
<i>1.3.1. Características y propiedades de los materiales</i>	<i>7</i>
1.4. Metales y aleaciones.....	8
<i>1.4.1. Aleaciones.....</i>	<i>8</i>
<i>1.4.1.1. Aleaciones Hierro – Carbono</i>	<i>9</i>
1.5. Aceros	9
<i>1.5.1. Influencia de los elementos aleantes en el acero</i>	<i>10</i>
<i>1.5.2. Componentes principales del Acero</i>	<i>10</i>
<i>1.5.2.1. Hierro (Fe).....</i>	<i>10</i>
<i>1.5.2.2. Carbono (C).....</i>	<i>11</i>

1.5.2.3.	<i>Carbono equivalente</i>	12
1.5.3.	<i>Diagrama Hierro – Carbono (Fe-C)</i>	13
1.5.3.1.	<i>Microestructuras de los aceros</i>	14
1.5.3.2.	<i>Mecanismos de transformación de fases en los metales</i>	16
1.5.4.	<i>Clasificación de los aceros</i>	17
1.6.	<i>Transformación martensítica</i>	20
1.6.1.	<i>Características generales de la transformación Martensítica</i>	21
1.6.2.	<i>Morfología de la martensita</i>	21
1.7.	<i>Tratamientos térmicos</i>	23
1.7.1.	<i>Temple</i>	24
1.8.	<i>Tamaño de grano</i>	25
1.8.1.	<i>Influencia del tamaño de grano en las propiedades de los materiales</i>	25
1.8.2.	<i>Métodos para determinar el tamaño de grano</i>	26
1.8.2.1.	<i>Método de comparación</i>	26
1.8.2.2.	<i>Método planimétrico</i>	27
1.8.2.3.	<i>Método general de las intercepciones</i>	28
1.9.	<i>Propiedades mecánicas de los materiales</i>	29
1.9.1.	<i>Dureza</i>	30
1.9.1.1.	<i>Ensayo de dureza Rockwell</i>	31
1.9.1.2.	<i>Ensayo de dureza Brinell</i>	32
1.9.1.3.	<i>Ensayo de dureza Vickers</i>	33
1.9.2.	<i>Ensayo de Tracción</i>	34
1.9.2.1.	<i>Esfuerzo máximo de tensión y elongación</i>	35

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	37
2.1.	Equipos y materiales	37
2.1.1.	<i>Microscopio electrónico de barrido</i>	37
2.1.2.	<i>Microscopio óptico</i>	38
2.1.3.	<i>Horno para tratamientos térmicos</i>	39
2.1.4.	<i>Durómetro</i>	40
2.1.5.	<i>Máquinas para el ensayo de tracción</i>	41
2.2.	Aceros AISI 4140 y AISI 4340	42
2.2.1.	<i>Características y aplicaciones del Acero AISI 4140</i>	42

2.2.2.	<i>Características y aplicaciones del Acero AISI 4340</i>	44
2.3.	Procedimiento para el análisis de la influencia de la longitud de las agujas de martensita en las propiedades mecánicas de los Aceros AISI 4140 y AISI 4340 ..	46
2.4.	Tratamientos térmicos	47
2.4.1.	<i>Obtención de las probetas</i>	47
2.4.2.	<i>Temperaturas críticas de los aceros</i>	47
2.4.2.1.	<i>Carbono y temperatura eutéctoides</i>	48
2.4.3.	<i>Etapas del tratamiento térmico</i>	49
2.5.	Análisis metalográfico	51
2.5.1.	<i>Procedimiento para la preparación de muestras metalográficas</i>	52
2.5.2.	<i>Obtención de las muestras metalográficas</i>	57
2.6.	Tamaño de grano de austenita	57
2.6.1.	<i>Procedimiento para determinar el tamaño de grano</i>	58
2.6.2.	<i>Cálculo del tamaño de grano</i>	58
2.7.	Ensayos para determinar las propiedades mecánicas	60
2.7.1.	<i>Dureza</i>	60

CAPÍTULO III

3.	MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	62
3.1.	Temperaturas críticas para los aceros AISI 4140 y AISI 4340	62
3.2.	Carbono equivalente	62
3.3.	Etapas del tratamiento térmico	63
3.3.1.	<i>Etapas del tratamiento térmico para el Acero AISI 4140 templado en agua a 15°C</i>	63
3.3.2.	<i>Etapas del tratamiento térmico para el Acero AISI 4140 templado en agua a 0°C</i> .	64
3.3.3.	<i>Etapas del tratamiento térmico para el Acero AISI 4340 templado en agua a 15°C</i>	66
3.3.4.	<i>Etapas del tratamiento térmico para el Acero AISI 4340 templado en agua a 0°C</i> .	67
3.4.	Microestructura de los aceros tratados térmicamente	68
3.4.1.	<i>Microestructura del Acero AISI 4140 templado en agua a 15°C</i>	68
3.4.2.	<i>Microestructura del Acero AISI 4140 templado en agua a 0°C</i>	69
3.4.3.	<i>Microestructura del Acero AISI 4340 templado en agua a 15°C</i>	70
3.4.4.	<i>Microestructura del Acero AISI 4340 templado en agua a 0°C</i>	71
3.5.	Longitud del tamaño de las agujas de la martensita	73

3.5.1.	<i>Tamaño de grano de la Austenita.....</i>	<i>73</i>
3.5.2.	<i>Longitud de las agujas de Martensita.....</i>	<i>74</i>
3.6.	Propiedades mecánicas de los Aceros AISI 4140 y AISI 4340	75
3.6.1.	<i>Dureza.....</i>	<i>75</i>
3.6.2.	<i>Tracción.....</i>	<i>76</i>
3.6.2.1.	<i>Resultados del ensayo de tracción para el acero ASIS 4140 templado en agua a 15°C.....</i>	<i>76</i>
3.6.2.2.	<i>Resultados del ensayo de tracción para el acero ASIS 4140 templado en agua a 0°C.....</i>	<i>78</i>
3.6.2.3.	<i>Resultados del ensayo de tracción para el acero ASIS 4340 templado en agua a 15°C.....</i>	<i>81</i>
3.6.2.4.	<i>Resultados del ensayo de tracción para el acero ASIS 4340 templado en agua a 0°C.....</i>	<i>84</i>
3.7.	Planteamiento del procedimiento para el cálculo de la longitud de Martensita ...	89
3.8.	Cálculo de la longitud promedio de para el Acero AISI 4140 a 800°C, templado en agua a 15°C.....	93
CONCLUSIONES.....		103
RECOMENDACIONES.....		101
BIBLIOGRAFÍA		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 1:	Clasificación de los materiales.....	7
Tabla 2-1:	Efecto de algunos elementos aleantes en los aceros.....	11
Tabla 3-1:	Formas alotrópicas del Hierro.....	12
Tabla 4-1:	Reacciones en los sistemas de fases binarios.....	15
Tabla 5-1:	Clasificación del acero por su composición.....	21
Tabla 6-1:	Tratamientos térmicos más comunes.....	24
Tabla 7-1:	Medios de enfriamiento para el temple.....	25
Tabla 8-1:	Relación entre el número de Jeffries y la Ampliación de la imagen.....	28
Tabla 9-1:	Escalas para la dureza Rockwell y sus aplicaciones.....	32
Tabla 1-2:	Comparación entre las características de los Microscopios Óptico y Electrónico.....	40
Tabla 2-2:	Composición química en porcentaje % del Acero AISI 4140.....	44
Tabla 3-2:	Normas equivalentes.....	45
Tabla 4-2:	Composición química en porcentaje % del Acero AISI 4340.....	45
Tabla 5-2:	Normas equivalentes.....	46
Tabla 6-2:	Dimensiones de las muestras de Acero AISI 4140 y AISI 4340.....	48
Tabla 7-2:	Parámetros para el temple de las probetas.....	52
Tabla 8-2:	Cálculo del tamaño de grano.....	61
Tabla 9-2:	Tamaño de Grano ASTM.....	61
Tabla 1-3:	Temperatura crítica Ac3 y temperaturas de transformación inicial (Ms) y final de la martensita (Mf).....	65
Tabla 2-3:	Nivel de soldabilidad de los aceros AISI 4140 y AISI 4340.....	65
Tabla 3-3:	Tamaño del grano de Austenita.....	77
Tabla 4-3:	Longitud de las agujas de Martensita.....	78
Tabla 5-3:	Dureza de los aceros AISI 4140 y AISI 4340.....	79
Tabla 6-3:	Datos generales del ensayo de Tracción.....	79
Tabla 7-3:	Resultados del ensayo de tracción para el acero AISI 440 Templado en Agua a 15°C.....	82

Tabla 8-3:	Tracción en el Acero AISI 4140 templado en agua a 0°C.....	85
Tabla 9-3:	Tracción en el Acero AISI 4340 templado en agua a 15°C.....	88
Tabla 10-3:	Tracción en el Acero AISI 4140 templado en agua a 0°C.....	91
Tabla 11-3:	Resultados de los ensayos de Dureza y Tracción en función a la longitud de las agujas de martensita.....	92
Tabla 12-3:	Longitudes de las agujas de martensita.....	100
Tabla 13-3:	Cálculo del error	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1.	Diagrama Hierro – Carbono.....	14
Figura 2-1.	Microestructuras en los aceros a) estructura interna de la ferrita, b) estructura interna de la cementita, c) estructura interna de la Perlita y d) estructura interna de la austenita.....	16
Figura 3-1.	Mecanismos de transformación a) Difusiva b) Desplazante.....	17
Figura 4-1.	Microestructuras en un acero hipoeutectoide.....	18
Figura 5-1.	Microestructuras en un acero eutectoide.....	19
Figura 6-1.	Microestructuras en un acero hipereutectoide.....	20
Figura 7-1.	Microestructuras de los aceros: a) Hipoeutectoide 0.38%C , b) Eutectoide 0.8%C, c) Hipereutectoide 1.4%C.....	20
Figura 8-1.	Transformación martensítica.....	22
Figura 9-1.	Formación de las agujas de martensita en función a la temperatura.....	23
Figura 10-1:	Muestra metalográfica, grano y límite de grano.....	26
Figura 11-1.	Plantilla graduada para el tamaño de grano.....	27
Figura 12-1.	Líneas de prueba para el Método de las Intercepciones.....	30
Figura 13-1.	Tipos de indentadores para los ensayos dureza.....	31
Figura 14-1.	Ensayo de dureza Rockwell.....	33
Figura 15-1.	Ensayo de dureza Brinell.....	34
Figura 16-1.	Ensayo de dureza Vickers.....	35
Figura 1-2.	Microscopio Electrónico de Barrido.....	38
Figura 2-2.	Microscopio Óptico.....	39
Figura 3-2.	Horno para tratamientos térmicos.....	40
Figura 4-2.	Durómetro.....	41
Figura 5-2.	Máquina Universal.....	42
Figura 6-2.	Mordazas para probetas cilíndricas.....	43
Figura 7-2.	Horno encendido a temperaturas altas.....	50
Figura 8-2.	Espesores de las muestras a) Acero AISI 4140 b) Acero AISI 4340.....	51
Figura 9-2.	Medios de enfriamiento agua a 15°C y 0°C.....	51

Figura 10-2.	Pirómetro.....	52
Figura 11-2.	Muestras de Acero AISI 4140.....	54
Figura 12-2.	Muestras de Acero AISI 4340.....	54
Figura 13-2.	Portalijas.....	55
Figura 14-2.	Muestra con una superficie irregular.....	56
Figura 15-2.	Resultado en la superficie del lijado grueso y fino.....	56
Figura 16-2.	Alumina 0,1 μm	57
Figura 17-2.	Máquina pulidora y Banco portalijas.....	57
Figura 18-2.	Muestras pulidas con un acabado superficial tipo espejo.....	58
Figura 19-2.	Ataque químico en las muestras con Nital al 2%.....	58
Figura 20-2.	a) Microestructura de un acero b) Límites de grano en una microestructura...	60
Figura 21-2.	Cálculo del tamaño de grano por el método de las intercepciones.....	61
Figura 22-2.	Identador en contacto con la muestra.....	63
Figura 23-2.	Espacio mínimo entre indentaciones.....	64
Figura 1-3.	Nivel de soldabilidad para los aceros AISI 4140 y AISI 4340.....	66
Figura 2-3.	Acero AISI 4140 Templado en agua a 15°C con temperaturas de austenización de a) 750°C b) 800°C y c) 900°C atacadas químicamente con Nital al 2%.....	72
Figura 3-3.	Acero AISI 4140 Templado en agua a 0°C con temperaturas de austenización de a) 750°C b) 800°C y c) 900°C atacadas químicamente con Nital al 2%.....	73
Figura 4-3.	Acero AISI 4340 Templado en agua a 15°C con temperaturas de austenización de a) 750°C b) 800°C y c) 900°C, atacados químicamente con Nital al 2%.....	74
Figura 5-3.	Acero AISI 4340 Templado en agua a 0°C con temperaturas de austenización de a) 750°C b) 800°C y c) 900°C, atacados químicamente con Nital al 2%.....	76
Figura 6-3:	Longitud del tamaño de las agujas de martensita.....	76
Figura 7-3:	Fractura en el ensayo de tracción a) dentro de la zona calibrada b) fuera de la zona calibrada.....	83
Figura 8-3.	Herramienta Set Scale.....	95
Figura 9-3.	Herramienta Thershold (Porcentaje de fases).....	96
Figura 10-3.	Tabla de resultados – ImageJ.....	97
Figura 11-3	Imagen insertada en ImageJ.....	97
Figura 12-3	Patrón de medida.....	97
Figura 13-3	Tabla de resultados.....	98

Figura 14-3	Set Scale.....	98
Figura 15-3	Sistema de unidades.....	98
Figura 16-3	Porcentaje de martensita en las áreas verdes.....	98
Figura 17-3	Longitud promedio según ImageJ.....	101

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-1.	Propiedades de los materiales.....	8
Gráfico 2-1.	Características de los materiales.....	9
Gráfico 3-1.	Clasificación de las aleaciones de Hierro – Carbono.....	10
Gráfico 4-1:	Niveles de soldabilidad en el Acero.....	13
Gráfico 1-2.	Diagrama de revenido para el Acero AISI 4140.....	44
Gráfico 2-2.	Diagrama de revenido para el Acero AISI 4340.....	46
Gráfico 3-2:	Procedimiento para el análisis de la influencia de la longitud de las agujas de martensita en las propiedades mecánicas de los Aceros AISI 4140 y AISI 4340.....	47
Gráfico 4-2.	Efecto de los elementos aleantes en a) Carbono eutectoide b) Temperatura eutectoide.....	49
Gráfico 1-3.	Etapas del tratamiento térmico para el Acero AISI 4140 calentado a a)750°C, b)800°C c) 900°C , templado en agua a 15°C.....	67
Gráfico 2-3.	Etapas del tratamiento térmico para el Acero AISI 4140 calentado a a)750°C, b)800°C c) 900°C, templado en agua a 0°C.....	68
Gráfico 3-3.	Etapas del tratamiento térmico para el Acero AISI 4340 calentado a a) 750°C, b) 800°C c) 900°C, templado en agua a 15°C.....	70
Gráfico 4-3.	Etapas del tratamiento térmico para el Acero AISI 4340 calentado a a) 750°C, b) 800°C c) 900°C, templado en agua a 0°C.....	71
Gráfico 5-3.	Curva Esfuerzo Vs. Deformación para el Acero AISI 4140 a 750 °C templado en agua a 15°C.....	80
Gráfico 6-3.	Curva Esfuerzo Vs. Deformación para el Acero AISI 4140 a 800 °C templado en agua a 15°C.....	81
Gráfico 7-3.	Curva Esfuerzo Vs. Deformación para el Acero AISI 4140 a 900 °C templado en agua a 15°C.....	82
Gráfico 8-3.	Curva Esfuerzo Vs. Deformación para el Acero AISI 4140 a 750 °C templado en agua a 0°C.....	83
Gráfico 9-3.	Curva Esfuerzo Vs. Deformación para el Acero AISI 4140 a 800 °C templado en agua a 0°C.....	84
Gráfico 10-3.	Curva Esfuerzo Vs. Deformación para el Acero AISI 4140 a 900 °C templado en agua a 0°C.....	85

Gráfico 11-3.	Curva Esfuerzo Vs. Deformación para el Acero AISI 4340 a 750 °C templado en agua a 15°C.....	86
Gráfico 12-3.	Curva Esfuerzo Vs. Deformación para el Acero AISI 4340 a 800 °C templado en agua a 15°C.....	87
Gráfico 13-3.	Curva Esfuerzo Vs. Deformación para el Acero AISI 4340 a 900 °C templado en agua a 15°C.....	88
Gráfico 14-3.	Curva Esfuerzo Vs. Deformación para el Acero AISI 4340 a 750 °C templado en agua a 15°C.....	89
Gráfico 15-3.	Curva Esfuerzo Vs. Deformación para el Acero AISI 4340 a 750 °C templado en agua a 15°C.....	90
Gráfico 16-3.	Curva Esfuerzo Vs. Deformación para el Acero AISI 4340 a 750 °C templado en agua a 15°C.....	91
Gráfico 17-3.	Comportamiento de la resistencia a la Tracción (barras) y Dureza (puntos) en función de las agujas de martensita del Acero AISI 4140 Templado a 15°C y 0°C.....	93
Gráfico 18-3.	Comportamiento de la resistencia a la Tracción (barras) y Dureza (puntos) en función de las agujas de martensita del Acero AISI 4340 Templado a 15°C y 0°C.....	94

RESUMEN

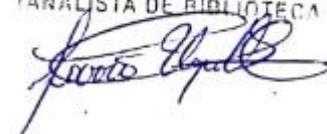
Los avances tecnológicos y el desarrollo industrial han llevado a los ingenieros a buscar nuevas alternativas sobre el uso de los materiales, para esto uno de sus principales metas es controlar su comportamiento en la industria mediante la modificación de sus propiedades, con el siguiente trabajo de investigación se pretende analizar la influencia del tamaño de las agujas de martensita en las propiedades mecánicas de los Aceros AISI 4140 y AISI 4340, mediante un procedimiento que ayude a determinar la longitud y distribución de la martensita su microestructura, las muestras fueron templadas para obtener distintas agujas de martensita, luego de hacer el análisis metalográfico de las muestras, se calcula el tamaño de grano para determinar el diámetro promedio, que equivale a la longitud de las agujas de martensita principales, las mismas que crecen de borde a borde en los granos de austenita, posterior a esto se realizaron ensayos de dureza y tracción, obteniendo durezas de 45,8 HRC para una aguja de 0,026 mm siendo la más pequeña y 60,2 HRC para una longitud de 0,0378 mm que corresponde a la longitud más grande promedio de las muestras analizadas y alcanzando una resistencia a la tracción de 1451,3MPa y 1589,74MPa. Concluyendo que la dureza incrementa a medida que las agujas de martensita crecen, sucede lo contrario con los resultados de la resistencia a la tracción cuyo comportamiento es independiente de la microestructura martensítica, para ampliar la investigación sobre la influencia de las agujas de martensita en las propiedades mecánicas de los aceros, se recomienda obtener muestras con longitudes de agujas que varíen considerablemente, considerando que en esta investigación los granos de austenita van de 6.5 a 8.5.

PALABRAS CLAVES: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <ESTRUCTURA MARTENSÍTICA>, <MARTENSITA>, <PROPIEDADES MECÁNICAS>, <DUREZA>, <RESISTENCIA A LA TRACCIÓN>

REVISADO

27 ENE 2020

Ing. Jhonatan Parreño Uquillas. M.B.
ANALISTA DE BIBLIOTECA



SUMMARY

Technological advances and industrial development have led engineers to look for new alternatives on the use of materials, for this one of their main goals is to control their behaviour in the industry by modifying their properties. The following research work aims to analyse the influence of the size of martensite needles on the mechanical properties of AISI 4140 and AISI 4340, using a procedure that helps determine the length and distribution of martensite and its microstructure. To obtain different martensite needles it was necessary to temper the samples, after doing the metallographic analysis of the samples, it proceeds to calculate the grain size to determine the average diameter, which equals to the length of the main martensite needles, the same ones that grow from the edge on the edge of the austenite grains. After this, hardness and tensile tests were carried out, obtaining hardnesses of 45.8 HRC for a needle of 0.026 mm being the smallest and 60.2 HRC for a length of 0.0378 mm corresponding to the most considerable average length of the samples analysed and reaching a tensile strength of 1451.3MPa and 1589.74MPa. Concluding that the hardness increases as martensite needles grow, the opposite occurs with the results of tensile strength whose behaviour is independent of the martensitic microstructure, to extend the investigation into the influence of martensite needles on the properties mechanical steels, the recommendation is to obtain samples with needle lengths that vary considerably, considering that in this investigation the austenite grains range from 6.5 to 8.5.

Keywords: <ENGINEERING SCIENCES AND TECHNOLOGY>, <MARTENSITIC STRUCTURE>, <MARTENSITE>, <MECHANICAL PROPERTIES>, <HARDNESS>, <TENSILE STRENGTH>



INTRODUCCIÓN

El desarrollo industrial que se ha logrado en los últimos años ha sido determinante dentro del marco económico del Ecuador y del mundo entero, factores como la innovación, el uso de nuevas tecnologías y el uso de nuevos materiales han aportado significativamente a este desarrollo y han obligado a que los ingenieros se vean en la necesidad de rediseñar nuevos materiales o mejorar las propiedades de los que ya existen, de aquí, la importancia de conocer las propiedades físicas y mecánicas que brinda un material, sin embargo la información en algunos casos es limitada, para esto investigar más a fondo las características que posee un material partiendo desde su microestructura se ha convertido en una de las soluciones para obtener materiales con mejores propiedades y más económicos.

En la actualidad se han incorporado diversas técnicas de producción y manufactura de los materiales, desde de la obtención de la materia prima, para convertirlos en productos industriales y finalmente en objetos al alcance del ser humano, estos objetos deben cumplir con los requerimientos del cliente, por ejemplo tener un ciclo de vida adecuado, buenas propiedades mecánicas como la resistencia, dureza, maquinabilidad, lo que garantiza un ciclo de vida adecuado del equipo, maquina, herramienta u objeto fabricado, estas técnicas de producción y manufactura están apoyados por procedimientos que ayudan a mejorar las propiedades de los materiales como los tratamientos térmicos, que son capaces de alterar la estructura del material variando únicamente la temperatura, para luego ser analizados mediante el uso de herramientas estadísticas.

Según Ashby (2005) existen más de 50 000 tipos de materiales clasificados en 5 grupos de acuerdo a sus propiedades y aplicaciones, por lo que estudiar la microestructura de los mismos y comprender su comportamiento son temas de gran importancia, esta investigación plantea analizar la influencia de las agujas de martensita en los aceros, que es el material más utilizado en la industria por su aplicabilidad y costo de producción relativamente bajo, esto permitirá conocer cómo varían las propiedades mecánicas en función a la longitud de las agujas de martensita, conociendo ya, que a la martensita se le atribuye la dureza de los aceros.

Para cumplir con el objetivo de la investigación se parte de obtener probetas con diferentes longitudes de agujas de martensita, para evaluar las propiedades mecánicas y analizar la influencia de la martensita en la dureza y resistencia a la tracción del material, finalmente se plantea un procedimiento para medir las agujas de martensita.

CAPITULO I

1. MARCO TEORICO REFERENCIAL

1.1. Planteamiento del problema

1.1.1. Antecedentes

Existen miles de tipos de materiales para la ingeniería, con propiedades y características que los hacen únicos, sin embargo, en la actualidad gracias a los avances de la ciencia, tecnología o industria los ingenieros han podido rediseñar, reinventar e innovar las características de los materiales a fin de poder modificar sus propiedades y así obtener más beneficios, tomando en cuenta que los materiales son la parte fundamental en el diseño de todas las cosas que nos rodean. Para entender el comportamiento de los materiales en sus distintas aplicaciones, se debe empezar por conocer el comportamiento del material desde el nivel microestructural, la misma que proporciona una gran cantidad de información que el ingeniero debe discernir para realizar una correcta selección del material que va a utilizar. Existen diversos factores que pueden alterar las propiedades de los materiales, como su microestructura, composición química, variación de la temperatura, principalmente.

Conocer las propiedades de un material es una ventaja importante en la ingeniería, esto se justifica en el enunciado que emite Ashby en unas de sus obras:

Un producto exitoso, es uno que se desempeña bien, tiene una buena relación calidad-precio y da placer al usuario, utiliza los mejores materiales para el trabajo y explota plenamente su potencial y sus características. (Ashby 2005, p. 23)

Para controlar algunas de las propiedades se han realizado algunas investigaciones sobre los factores que alteran potencialmente el comportamiento de los materiales, y el más relevante resulta ser la temperatura, variable que interviene directamente en el uso de los tratamientos térmicos, que es el método más idóneo, para obtener microestructuras adecuadas según las propiedades requeridas en un material, según Aguilar (Soria Aguilar et al. 2015, p. 540) en su investigación titulada, Efecto del tratamiento térmico sobre las propiedades mecánicas y microestructura de un acero para tubería API 5CT J55; por otra parte Khera y otros autores, plantea seis objetivos principales de los tratamientos térmicos en las propiedades de los materiales: *Ablandar el material, Mejorar la maquinabilidad, Mejorar las propiedades de corte de las herramientas, Aumentar la resistencia y dureza del material, Mejorar la resistencia a la*

corrosión y a temperaturas altas y Eliminar el estrés y la tensión inducida por el trabajo en frío.
(Khera et al., 2014, p. 72)

Una vez que el ingeniero logra modificar las microestructuras del material, tener un control sobre las mismas sería lo idóneo, se han realizado algunas investigaciones sobre las microestructuras de los aceros, pero de algún modo se ha dejado de lado la transformación martensítica, una microestructura importante resultado del temple en los metales y responsable de mejorar la dureza en las aleaciones ferrosas, según Krauss:

La martensita en los aceros durante milenios se ha utilizado para realizar herramientas de trabajo, armas para batalla que soporten cargas mecánicas. Las aplicaciones abarcan desde herramientas manuales y espadas antiguas y elegantes, hasta piezas actuales de alta resistencia, alta resistencia a la fatiga y alta resistencia al desgaste para máquinas, herramientas y matrices.
(Krauss, 2002, p. 1)

Y coincide con varios autores en la estrecha relación que existe entre la estructura martensítica, el contenido de carbono y la temperatura de austenización en el temple, para incrementar la notablemente la dureza de los aceros. A pesar de la importancia de la martensita, estudiar su microestructura resulta bastante complejo, partiendo desde su mecanismo de transformación que es de tipo desplazante, una transformación poco común, hasta la formación de las agujas que son agujas sumamente finas y dificultan encontrar un procedimiento para medir su longitud y determinar la influencia en las propiedades mecánicas de los aceros, razones por las cuales no existe un procedimiento que ayude a determinar la longitud de las agujas de martensita, de aquí nace el tema de esta investigación que será apoyada en las investigaciones realizadas hasta la actualidad sobre la martensita, su transformación y características.

1.1.2. Justificación

Los ingenieros mediante investigaciones o material de apoyo deben estar en la capacidad de realizar una selección adecuada de los materiales para las distintas aplicaciones requeridas por la industria y a pesar de que exista una amplia gama de mercados a nivel mundial, muchas veces es necesario realizar estudios más amplios en la materia prima (los materiales) para conocer los datos exactos de su composición química, propiedades físicas y mecánicas que ayuden a interpretar de mejor manera la aplicabilidad del material.

Existe información limitada sobre la martensita, las investigaciones realizadas no van más allá de hablar sobre su transformación y microestructura, de aquí nace la propuesta del tema de investigación: Análisis de la influencia del tamaño de las agujas de martensita en las propiedades de los aceros AISI 4140 y AISI 4340, que parte de obtener diferentes longitudes de agujas de martensita para luego medir sus propiedades mecánicas, específicamente la dureza y la resistencia

a la tracción, resultados que serán analizados mediante herramientas estadísticas que permitan relacionar la variación de las propiedades en función al tamaño de la martensita; con los resultados obtenidos se podrán identificar de mejor manera las aplicaciones idóneas para cada uno de los materiales, pues se conoce que la martensita le atribuye una buena dureza al material, por ende, su principal campo de aplicación será en donde se requieran materiales duros.

1.1.3. Alcance

El proyecto de investigación se realizará en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo que cuenta con laboratorios en la Facultad de Mecánica, con los equipos y recursos necesarios para realizar dicha investigación teórica y experimental que ayuden a cumplir con los objetivos establecidos, mediante la documentación de los resultados obtenidos, como la longitud del tamaño de las agujas de martensita, la variación de las propiedades mecánicas y la relación que existe entre estos. Para obtener dichos resultados se realizarán tratamientos térmicos, análisis metalográfico en las muestras, se medirá el tamaño de grano, se medirá la dureza y resistencia a la tracción del material, en función a la longitud de las agujas de martensita, esto ayudará a información idónea para una selección adecuada de los materiales y alternativas para mejorar las propiedades de estos e identificar su aplicabilidad.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Analizar la influencia del tamaño de las agujas de martensita en las propiedades mecánicas de los Aceros AISI 4140 y AISI 4340, mediante un procedimiento que ayude a determinar la longitud y distribución de la martensita en la microestructura de estos aceros.

1.2.2. Objetivos específicos

- Obtener probetas con diferentes tamaños de aguja de martensita en los aceros AISI 4140 y AISI 4340
- Realizar un procedimiento para determinar el tamaño de las agujas de martensita la microestructura.
- Evaluar las propiedades mecánicas de las muestras luego de haber caracterizado la martensita, a fin de analizar su influencia en las propiedades mecánicas de los aceros AISI 4140 y AISI 4340
- Documentar y analizar los resultados obtenidos mediante herramientas estadísticas para buscar una aplicación apropiada en base a los resultados.

1.3. Materiales en la ingeniería

En la actualidad los materiales han jugado un papel importante dentro de los avances tecnológicos a los que se ha enfrentado la sociedad, dándole un gran impulso al desarrollo industrial que es un factor determinante en la economía de los países. Identificar las propiedades, características y bondades de los materiales para los ingenieros actualmente es una necesidad, ya que son la pieza clave en el diseño, en la fabricación e instalación de productos para el servicio del hombre, e incluso se han convertido en objeto de investigación con la finalidad de mejorar sus propiedades y así desarrollar nuevos materiales que satisfagan de mejor manera los requerimientos de la industria, garantizando seguridad, durabilidad, y eficiencia (TECNALIA 2019).

Miles de años atrás el hombre trabajaba con materiales que la naturaleza le brindaba, de origen animal, vegetal o mineral, como: la lana, la piedra, la madera, la seda, entre otros; hoy en día la industria obtiene los materiales en su mayoría de forma sintética, dando como resultado materiales como los metales, el acero, el plástico cuyos componentes principales se encuentran en la corteza terrestre, dejando como reto a los ingenieros la oportunidad de rediseñar, reinventar e innovar el uso de los materiales (Appold et al., 2002). Para entender el comportamiento de los materiales es necesario conocer la estructura de estos, la cual a escala microscópica que se conoce como microestructura y es la responsable de la variación de ciertas propiedades; además es necesario identificar el tipo de material con el que se desea trabajar, lo que facilitara la selección de este de acuerdo con las necesidades de la industria.

El uso adecuado de los materiales ha llevado incluso a mejorar las condiciones del estilo de vida del ser humano, actualmente se cuenta con sistemas de transporte y construcciones modernas, sistemas de comunicación, industrias con tecnología de punta que incluso ha reemplazado el uso de la mano de obra. De acuerdo con Ashby (2008, p. 1) existen alrededor de 50 000 tipos de materiales disponibles para su uso en la ingeniería, clasificados en cinco grupos, de acuerdo a sus propiedades y aplicaciones, que pueden variar de un material a otro.

En la Tabla 1.1, se recoge la mayor cantidad de información disponible en libros o catálogos a cerca de los tipos de materiales, sus propiedades y aplicaciones a fin de facilitar al ingeniero la selección adecuada del material, considerando lo enunciado anteriormente, para lograr buenos resultados debemos tener en cuenta la relación que existe entre la calidad, el costo y la satisfacción del cliente.

Tabla 1-1: Clasificación de los materiales

TIPO	PROPIEDADES	APLICACIONES
Metales y aleaciones <ul style="list-style-type: none"> - Hierro/aceros - Níquel, cobre, aluminio, titanio y sus aleaciones 	Conductividad eléctrica alta Moldeable, maquinable Buena formabilidad Buenos conductores de calor Puede endurecer significativamente mediante la aplicación de tratamientos térmicos	Alambres conductores Fabricación de ejes Partes de máquinas Partes de herramientas Construcción de estructuras
Polímeros <ul style="list-style-type: none"> - Polietileno - Poliamidas - Poliestireno - Policloruro de vinilo (PVC) - Resinas - Elastómeros 	Fáciles de convertir en películas delgadas, flexibles y herméticas. Resistentes a la humedad Aislantes eléctricos	Empaquetamiento de alimentos Encapsulado de circuitos Adhesivos
Cerámicos <ul style="list-style-type: none"> - Alumina - Cemento - Sílice - Vidrios y silicatos 	Aislantes térmicos, soportan altas temperaturas Inertes al metal fundido Alta capacidad de almacenamiento de carga Transparentes	Vidrios de ventanas Refractarios, es decir como recubrimientos para hornos Capacitores para microeléctrica
Compuestos <ul style="list-style-type: none"> - Polímeros reforzados - Grafito - epoxi 	Razón resistencia/peso alta Dureza alta Resistencia al impacto Costo bajo	Componente para aviones Herramientas de corte
Semiconductores <ul style="list-style-type: none"> - Silicio - GaAS 	Comportamiento eléctrico único Convierte señales eléctricas en luz	Transistores y circuitos integrados

Fuente: (Askeland y Wright 2017) & (Ashby y Jones 2008)

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

Existe una agrupación adicional en donde constan los materiales naturales, es decir los materiales que se encuentran en la naturaleza y la mano del hombre aún no ha intervenido para alterar sus propiedades, estos materiales los usaba el hombre primitivo para sobrevivir; recolectaban su alimento, cazaban, pescaban, todo esto con herramientas fabricadas a base de: madera, piedra, huesos; incluso fabricaban su propia vestimenta con algodón o piel; estos materiales aún están disponibles en la actualidad, aunque su uso indebido como la explotación o deforestación indiscriminada en la actualidad haya perjudicado a nuestro planeta.

1.3.1. Características y propiedades de los materiales

Como se ha mencionado cada material goza de características y propiedades únicas que garantizan satisfacer las necesidades de la industria.

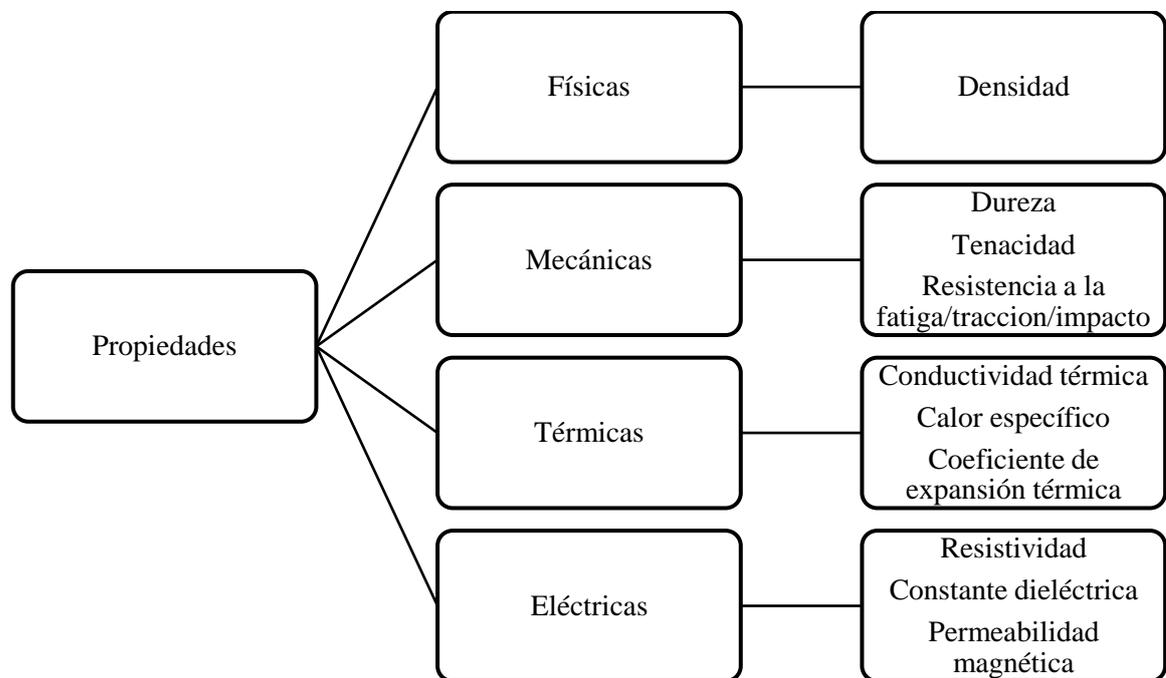


Gráfico 1-1. Propiedades de los materiales

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

Los materiales evolucionan constantemente y comprender su comportamiento ayuda a determinar procedimientos que controlen de cierto modo las propiedades de los materiales, esto es un soporte importante para la tecnología, estimula necesidad de desarrollar nuevos materiales o mejorar las propiedades de los que ya existen, a fin de lograr un alto rendimiento al menor costo (Ashby y Jones 2005).

Dentro de os materiales más utilizados en la industria se encuentran los metales y aleaciones, que, pese al incremento del uso de otros materiales como los polímeros, aún no se ha podido igualar o superar las propiedades que brindan los metales y aleaciones.

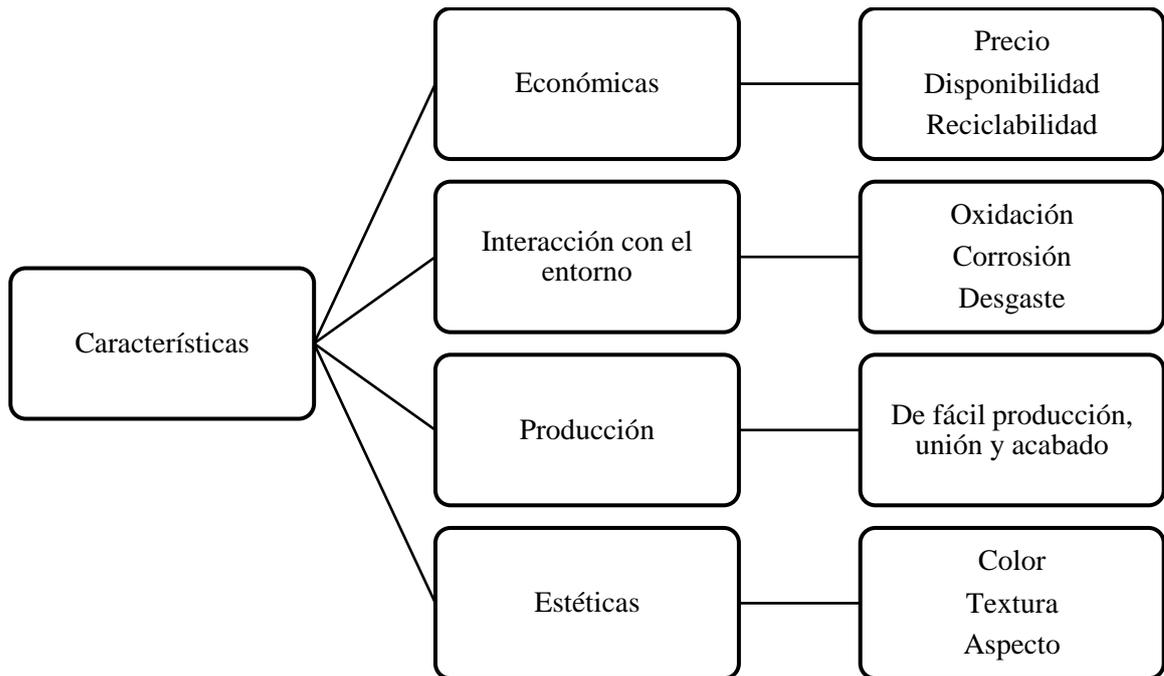


Gráfico 2-1. Características de los materiales

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

1.4. Metales y aleaciones

Los metales son materiales con propiedades relativamente altas, sin embargo, en su estado puro son fáciles de deformar, debido a su ductilidad son menos resistentes a la fatiga y de todos los tipos de materiales, son los menos resistente a la corrosión; por lo que para mejorar sus propiedades es necesario agregar algunos elementos aleantes y con la ayuda de los tratamientos mecánicos y térmicos se obtienen resultados favorables (Ashby 2005, p. 3).

1.4.1. Aleaciones

Las aleaciones consisten básicamente en agregar elementos de la tabla periódica como el carbono, el cromo, fósforo, entre otros, a un metal base, existen diferentes métodos, por ejemplo: agregar el elemento aleante al metal en un horno o por medio del prensado en caliente en donde le metal y el elemento aleante se intercalan y forman la aleación. Las aleaciones presentan mejores propiedades para distintas aplicaciones en la ingeniería en donde se necesita mejor resistencia a temperaturas altas y a la corrosión.

Las principales aleaciones utilizadas en la ingeniería son:

- Aleaciones de hierro: aceros y fundiciones

- Aleaciones de cobre
- Aleaciones ligeras: aleaciones de aluminio, aleaciones de Magnesio y aleaciones de Titanio
- Aleaciones de bajo punto de fusión: aleaciones de zinc, aleaciones de Plomo y aleaciones de Estaño
- Aleaciones especiales: Aleaciones en base de Níquel y Cobalto

Las aleaciones en base hierro son las más relevantes en la industria, ya que el hierro es el elemento base en los aceros, que a la vez contiene cantidades de carbono que varía en porcentaje de peso, brindando propiedades importantes para la fabricación de herramientas, estructuras metálicas, partes y accesorios de máquinas.

1.4.1.1. Aleaciones Hierro – Carbono

Las aleaciones Hierro – Carbono a la vez se pueden clasificar en Aceros y Fundiciones por su contenido de carbono, que puede variar en porcentaje de peso.

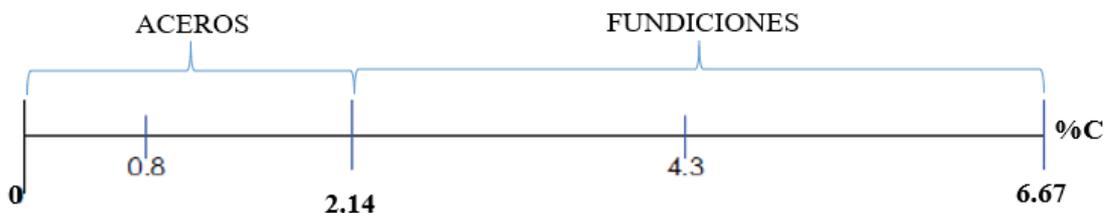


Gráfico 3-1. Clasificación de las aleaciones de Hierro - Carbono

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

1.5. Aceros

El acero es un material potencialmente utilizado por las pequeñas y grandes industrias, gracias a sus propiedades mecánicas, maquinabilidad y disponibilidad, para tener una idea de la importancia de este material, solo en el año 2013 se obtuvo una producción de 1 600 millones de toneladas de acero en el mundo siendo China, Japón y Estados Unidos los mayores productores de este material (Nutting, et al, 2019). Además de una gama extensa de propiedades del acero, su popularidad y aceptación en la industria se debe también al bajo costo de producción, conformado y procesamiento y a la abundancia de sus dos materias primas, ya que como se ha mencionado el acero es una aleación de hierro y carbono (Fe-C), el hierro es un mineral que representa el 5,6% de la corteza terrestre, en estado puro el hierro es un material bastante inestable pero al

combinarse con el carbono mejora sus propiedades, el carbono en los aceros puede variar hasta un 2% en su composición (Askeland et al, 2012, p. 497) cabe recalcar que este porcentaje puede variar entre bibliografías.

1.5.1. Influencia de los elementos aleantes en el acero

En los aceros al igual que en todas las aleaciones se evidencian también la presencia de elementos químicos aleantes que dependiendo de su concentración pueden modificar sus propiedades, lo que permite que este material se adapte con mayor facilidad a las necesidades requeridas por la industria, como: la resistencia al desgaste y corrosión, elasticidad, deformación entre otras. Es un material totalmente recuperable y reciclable, convirtiéndose así en un material 100% sostenible (UNESID 2019).

Tabla 2-1: Efecto de algunos elementos aleantes en los aceros

Características	Elementos
Dureza a alta temperatura	Tungsteno, molibdeno, cobalto, vanadio, cromo, manganeso
Resistencia la desgaste por fricción	Vanadio, tungsteno, molibdeno, cromo, manganeso
Endurecimiento profundo	Manganeso, molibdeno, cromo, silicio, níquel, vanadio
Distorsión mínima del temple	Molibdeno, cromo, manganeso
Resistencia la impacto	Vanadio, tungsteno, molibdeno, manganeso, cromo

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

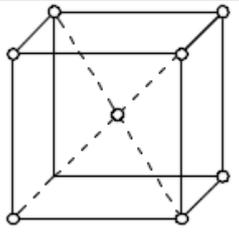
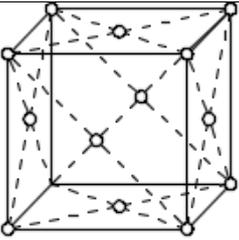
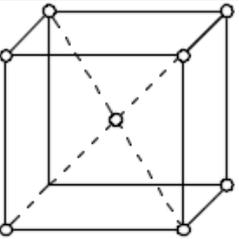
1.5.2. Componentes principales del Acero

1.5.2.1. Hierro (Fe)

El hierro es el componente principal de los aceros, lo encontramos en grandes cantidades en la corteza terrestre, en estado sólido es policristalino, como todos los metales, es decir que posee muchos cristales unidos entre sí en sus límites, y un cristal es una disposición de átomos ordenados que se representan mejor como esferas que se tocan entre sí, estos cristales se ordenan en planos, que se penetran entre sí de maneras específicas.

Para el hierro, la disposición de la red se puede visualizar mejor mediante un cubo unitario con ocho átomos de hierro en sus esquinas.

Tabla 3-1: Formas alotrópicas del Hierro

Hierro	Temperatura (°C)	Estructura cristalina	
Hierro alfa Fe ^α	910	bcc	
Hierro gama Fe ^γ	1400	fcc	
Hierro delta Fe ^δ	1539	bcc	

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

El hierro cuenta con una característica muy importante y es que se trata de un metal alotrópico, es decir que 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 extraños (elementos aleantes) en una solución sólida (Callister y Rethwisch, 2016, pp. 48-50).

1.5.2.2. Carbono (C)

El carbono es el elemento aleante no metálico de mayor influencia en los aceros, el porcentaje de carbono presente en los puede variar considerablemente las propiedades 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 la cementita y 3) en forma libre, más conocido como grafito, una particularidad del carbono es que en su estado puro sirve para la fabricación de lápices, pero una vez combinado con el hierro lo encontramos incluso en grandes estructuras metálicas (Torres, 2004, p. 10).

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 (Fernández, 2011, p. 10).

1.5.2.3. Carbono equivalente

El cálculo del carbono equivalente en los aceros relaciona matemáticamente el porcentaje en peso de los elementos aleantes y la influencia que tiene sobre las propiedades del material, es un indicador de la soldabilidad de los aceros y de la capacidad de endurecimiento del material, pues a medida que se incrementa el porcentaje de carbono en los aceros el material se vuelve más duro y dificulta la soldadura.

En el Gráfico 1.1 se pueden observar los niveles de soldabilidad del acero: como óptimo, aceptable y riesgo de fallo, representado el Nivel I, Nivel II y Nivel III respectivamente (Salas et al, 2009, p. 60).

Según el Instituto Internacional de Soldadura:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad (1-1)$$

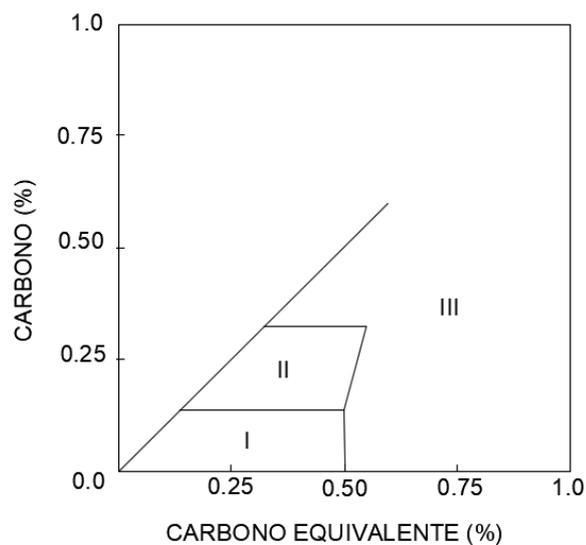


Gráfico 4-1: Niveles de soldabilidad en el Acero

Fuente: (Salas, Paulette y Magdaleón 2009, p. 60)

Para continuar con el estudio de los aceros se ha considerado importante entender el diagrama Hierro (Fe) – Carbono (C), muy utilizado en la ingeniería de los materiales.

1.5.3. Diagrama Hierro – Carbono (Fe-C)

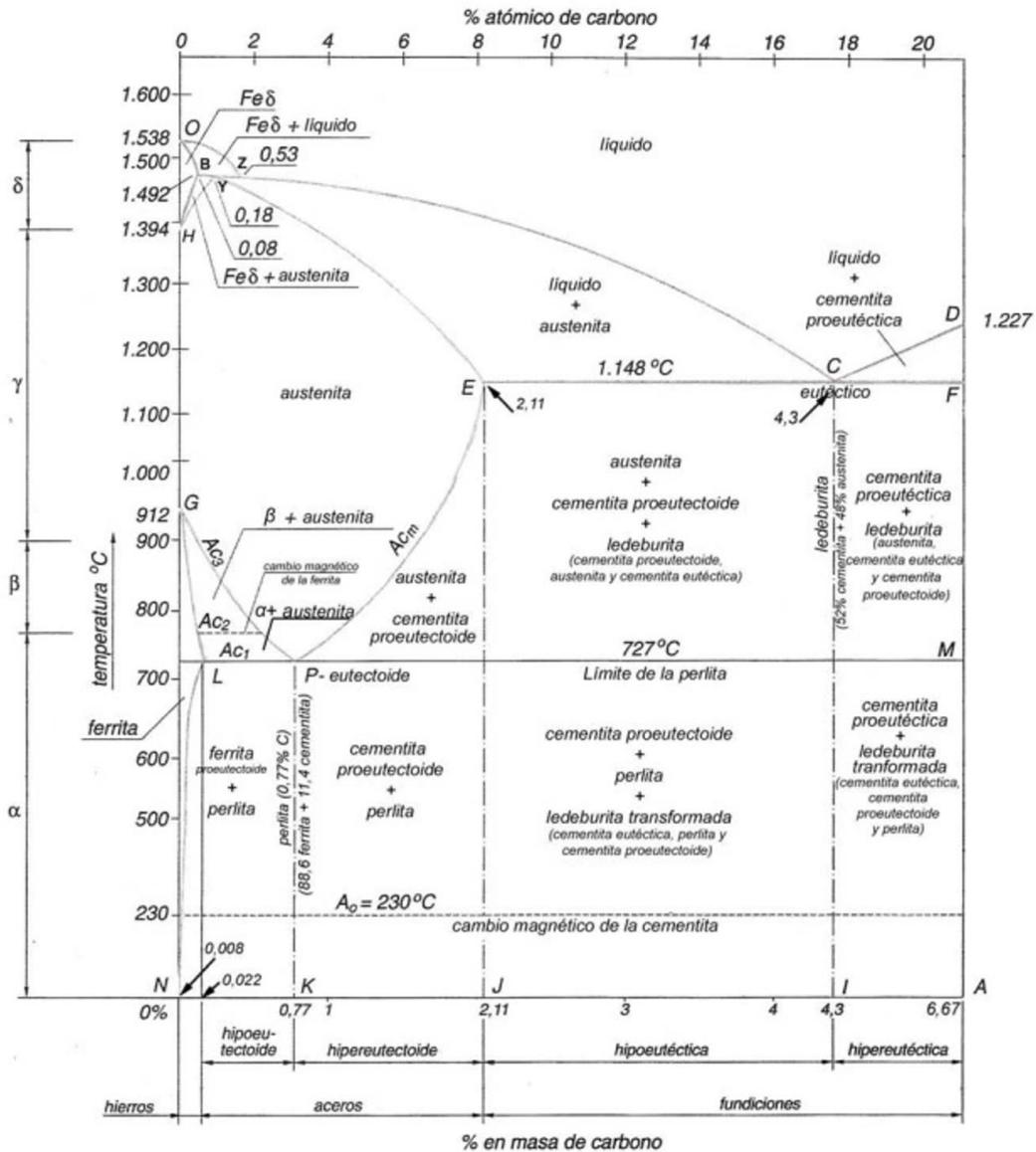


Figura 1-1. Diagrama Hierro – Carbono

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

El diagrama Fe-C, es de los sistemas binarios más estudiados en la metalurgia, muestra las diferentes transformaciones de fases que ocurren en función a la temperatura y microestructura, en este caso el contenido de carbono (Askeland et al, 2012, p. 404).

En el diagrama Fe-C el contenido de carbono va desde el 0% hasta el 6,67%, que representa la cantidad máxima de carbono que se puede disolver en el hierro, después del 6,67% de carbono

se encuentran las aleaciones metálicas que no son de mucha importancia para la ingeniería y con un contenido de carbono desde el 0% hasta el 2.11% se encuentran los aceros. Existen puntos críticos en el diagrama Fe-C que facilitan la comprensión del mecanismo de transformación de las fases en el acero, que se identifican como reacciones invariantes de un sistema binario.

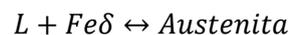
Tabla 4-1: Reacciones en los sistemas de fases binarios

Reacción	Ecuación	Características del diagrama de fases
Eutéctica	$L \rightarrow \alpha + \beta$	
Peritética	$\alpha + L \rightarrow \beta$	
Monotética	$L_1 \rightarrow L_2 + \alpha$	
Eutectoide	$\gamma \rightarrow \alpha + \beta$	
Peritectoide	$\alpha + \beta \rightarrow \gamma$	

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

En el diagrama Fe – C, se evidencian tres reacciones principales:

- **Peritética:** a 1492°C y 0.18%C



- **Eutéctica:** a 1148°C y 4.3%C



- **Eutectoide:** a 727°C y 0.77%C



1.5.3.1. Microestructuras de los aceros

- **Ferrita**

La ferrita es una de las formas alotrópicas del hierro, alrededor de los 723°C se denomina Ferrita α y por encima de los 1300°C Ferrita δ . La ferrita se caracteriza por ser dúctil, con una dureza de 90 Brinell y una resistencia a la tracción igual a 22 Kgf/mm², en los aceros hipoeutectoides con concentraciones menores a 0.6% C aparece en forma de cristales y se mezcla con la perlita, mientras que en los aceros con concentraciones de 0,6% a 0,85% de carbono se presenta en forma de agujas alargadas que se orientan en la misma orientación que la austenita (Sola, 2009, p. 25)

- **Cementita**

Es el microconstituyente más duro puede alcanzar hasta 700 Brinell de dureza, se le conoce también como Carburo de Hierro (Fe₃C), tiene una unidad de celda ortorrómbica, para contenidos de carbono mayores a 0.9% el cementita se identifica como cementita primaria o proeutéctica, en la matriz ferrítica se encuentra en forma de glóbulos. Cristalográficamente el cementita se observa como regiones brillantes luego de que las muestras hayan sido atacadas con reactivos químicos. (Sola ,2009, p. 27)

- **Perlita**

La perlita está formada por la unión de la ferrita y cementita, que crecen en conjunto con la austenita, la perlita se forma como resultado de la reacción eutécticoide, siendo la más reconocible, estéticamente más agradable y más comercializada. Debido a que la perlita implica la nucleación y el crecimiento de dos nuevas fases, que finalmente cooperan entre sí, esta transformación tiene características únicas (Shiflet, 2001, p. 6783). Posee una dureza de 80 Brinell y 80 Kgf/mm², es resultado del enfriamiento lento de la austenita a temperaturas que pueden variar de 600°C a 723°C, si el enfriamiento es rápido se identifica como sorbita (Sola, 2009, p. 27).

- **Austenita**

Austenita o hierro gama, de estructura fcc, estable a temperaturas altas, por lo que durante el enfriamiento se puede transformar con facilidad en otras microestructuras, una transformación incompleta conlleva a la formación de austenita retenida, la máxima solubilidad del carbono es de 0,8C a 2%C a 1130°C, otorga al acero buenas características de resistencia, dureza y soldabilidad, pero la plasticidad es su propiedad más importantes ya que facilita la forja (Llulluna, 2014, p. 20).

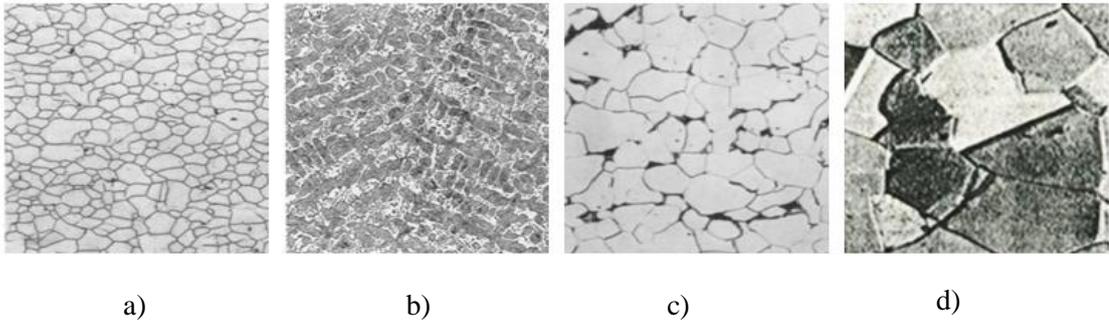


Figura 2-1. Microestructuras en los aceros a) ferrita, b) cementita, c) Perlita y d) austenita

Fuente: (Pinzón, 2013)

1.5.3.2. Mecanismos de transformación de fases en los metales

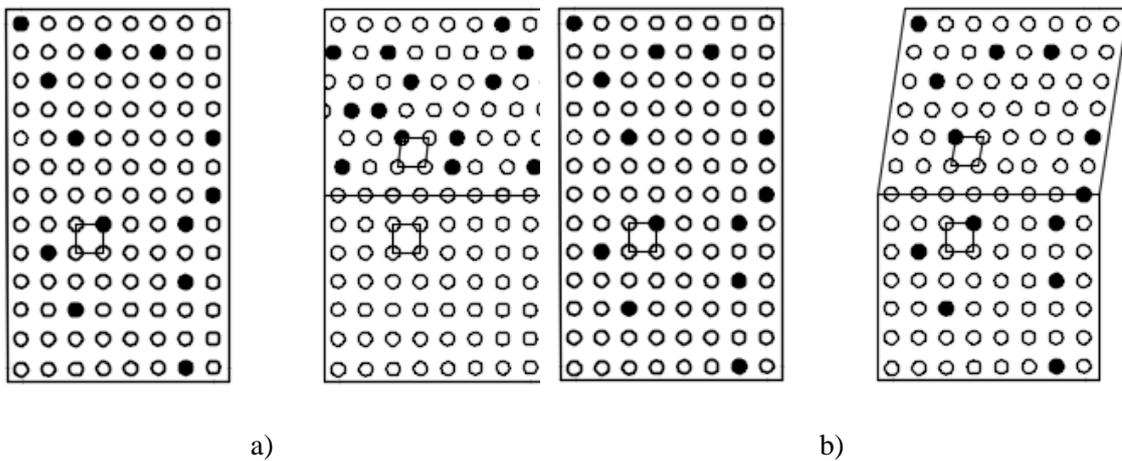


Figura 3-1. Mecanismos de transformación a) Difusiva b) Desplazante

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

La mayoría de las propiedades de los materiales en este caso de los aceros, dependen del mecanismo atómico que ocurre durante el proceso de transformación de las fases existentes en la microestructura de un material, la ingeniería de materiales en la actualidad trabaja con estas microestructuras a fin de conocer y mejorar las propiedades de los materiales e incluso llegar a controlarlas, para esto es importante identificar que algunas microestructuras están formadas de una, varias o una mezcla de fases por ejemplo la perlita; además de microconstituyentes que están formados por la ferrita y la cementita.

Uno de los mecanismos que ayuda a lograr una transformación de fases adecuada es la aplicación de tratamientos térmicos que consiste en calentar o enfriar los aceros dentro de un rango de temperaturas y que gracias a la inestabilidad relativa que existe entre la fase original y la fase final, entre otros factores como: la composición química de los aceros, temperatura de

calentamiento o enfriamiento, deformaciones y velocidades aplicadas al material, se obtienen los resultados esperados, como se ha venido mencionando en la teoría. (García Rodero ,2014)

Existen dos mecanismos de transformación: difusiva y desplazaste. La transformación difusiva consiste en romper los enlaces atómicos y reorganizarlos en un patrón diferente, en este tipo de transformación no se evidencia un cambio de forma, pero si existe difusión atómica a través del material, la mayoría de las transformaciones suceden por este mecanismo. Mientras que la transformación desplazante deforma de manera homogénea el patrón original y forma una nueva estructura cristalina sin difusión atómica, pero da lugar al cambio estructural, a pesar de ser el mecanismo de transformación menos común, el temple en los aceros es posible gracias transformación desplazante, ya que las velocidades de enfriamientos son sumamente rápidas lo que da lugar a la transformación instantánea de la austenita en martensita, gracias al movimiento cooperativo de los átomos de carbono (Ashby y Jones 2005, p. 61).

1.5.4. Clasificación de los aceros

Los aceros por su composición química pueden clasificarse en:

Tabla 5-1: Clasificación del acero por su composición

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: (Ashby y Jones, 2005, p. 4) & (Ospina et al, 2007, p. 175)

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

Según el Diagrama Fe-C

- **Aceros hipoeutectoides**

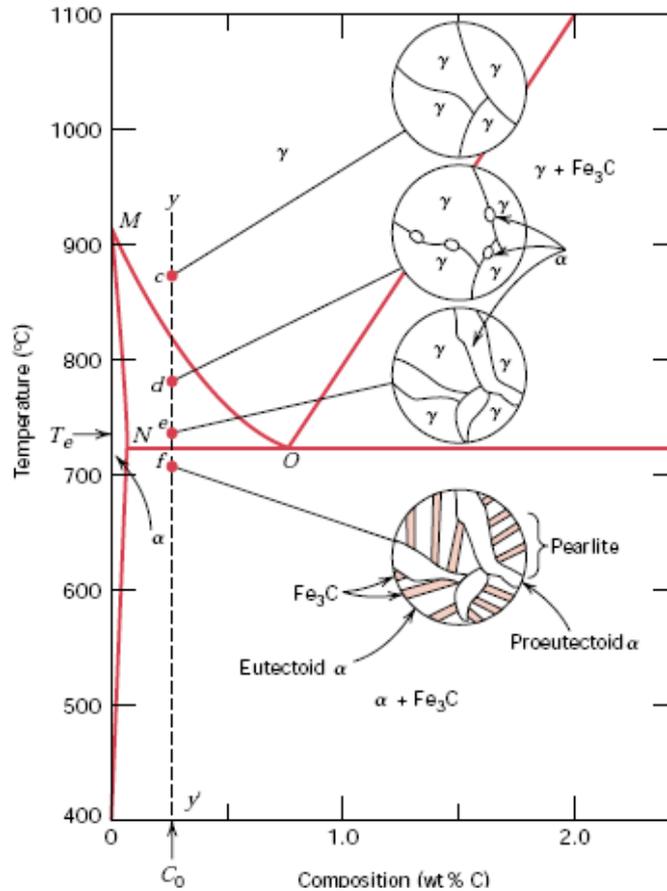


Figura 4-1. Microestructuras en un acero hipoeutectoide

Fuente: (Allauca, 2011, p. 27)

Estos aceros tienen un contenido de carbono inferior a 0.77%, se ubican a la izquierda del punto eutectoide, están formados por una mezcla de ferrita y perlita.

- **Aceros eutectoides**

Cuando el porcentaje de carbono es igual a 0.77%, al enfriar estos aceros lentamente, se forman dos fases simultáneamente: a ferrita y la cementita, dando lugar a la perlita, que como se explicó en el apartado anterior la perlita es resultado de la reacción eutectoide, solo los aceros eutectoides pueden llegar a tener 100% de perlita (Flores, 1996, p. 11).

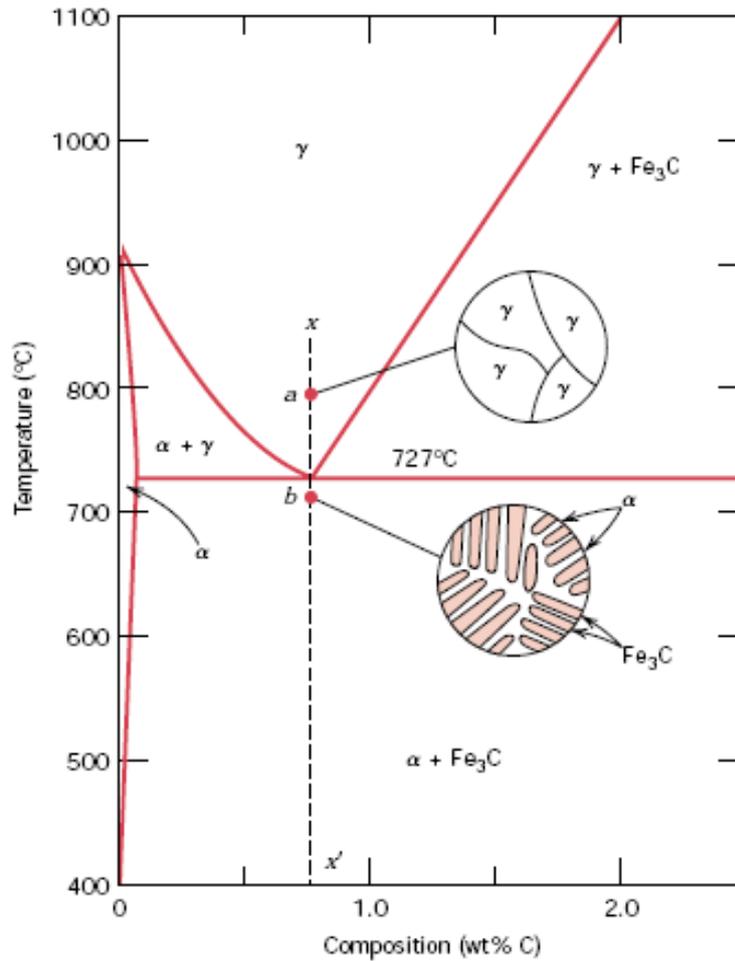


Figura 5-1. Microestructuras en un acero eutectoide

Fuente: (Allauca, 2011, p. 25)

- **Aceros hipereutectoides**

Cuando el porcentaje de carbono es mayor a 0.77% hasta aproximadamente el 2% de carbono, a temperaturas menores a 750°C la composición de austenita baja del 1%C a 0.77%C (enfriamiento), no hay más variaciones en la microestructura, por lo que a temperatura ambiente se tiene la presencia de perlita y cementita libre, que está rodeando los granos de perlita. Por otro lado, al calentarse por encima de los 725°C, el cementita se transforma en austenita. A medida que la temperatura incrementa se puede llegar a la formación de una fase 100% austenítica.

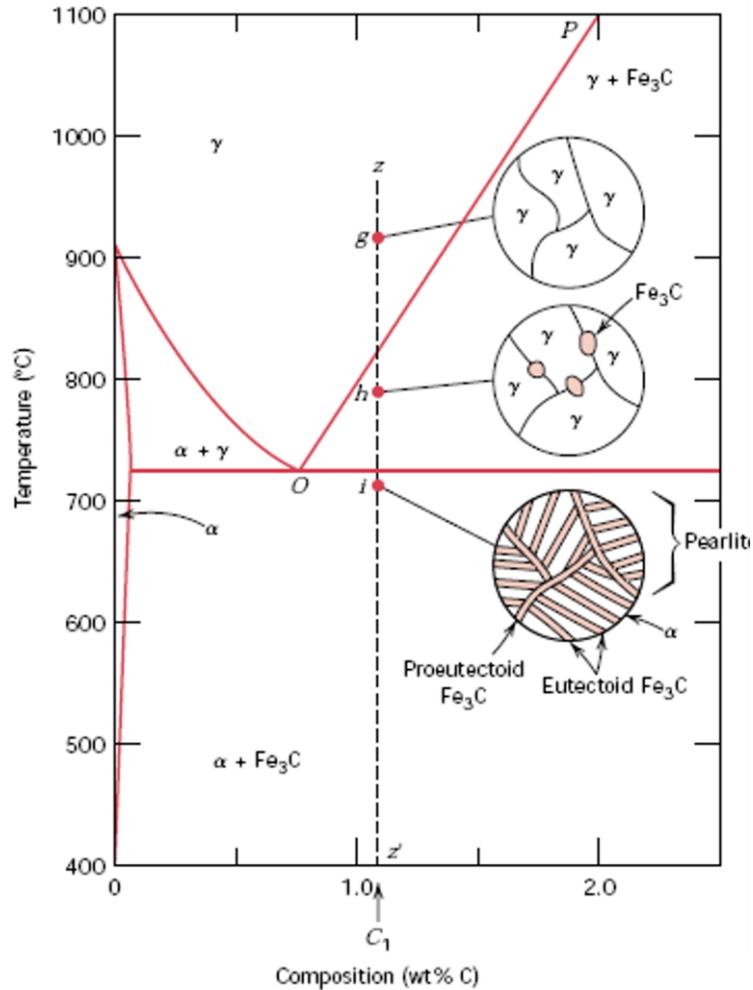


Figura 6-1. Microestructuras en un acero hipereutectoide

Fuente: (Allauca, 2011, p. 27)

1.6. Transformación martensítica

A diferencia de la ferrita o la perlita la martensita se forma por la deformación de la red de austenita, esta deformación provoca un cambio en la superficie del área que ha sido transformada presentando una gran cizalla y expansión de su volumen. En los aceros la martensita se define como una solución sólida supersaturada de carbono (Meyrick y Powell, 2003, p. 2), ya que la velocidad de enfriamiento es tal que la mayoría de los átomos de carbono no sufren una mezcla aleatoria durante el cambio estructural y se identifican por tener un movimiento cooperativo que logra que se organicen de manera rápida.

Lo complicado de estudiar este tipo de microestructura es determinar la forma en que se produce la transformación de la martensita, por ello uno de los propósitos de realizar este estudio es identificar algunas de la característica de la transformación y realizar un estudio breve de la

cristalografía de la martensita, que al ser una fase no equilibrada no se encuentra en el diagrama de equilibrio Fe-C, sino que se representa más bien en diagrama de transformación isotérmica, que señala el inicio de la transformación martensítica a una temperatura M_s y un final teórico M_f , se ha llamado teórico ya que no existe una temperatura que indique la transformación martensítica ha llegado a su fin, la temperatura M_f solo indica que se ha alcanzado el 95% de la transformación (Pastor, 2015, p. 6).

1.6.1. Características generales de la transformación Martensítica

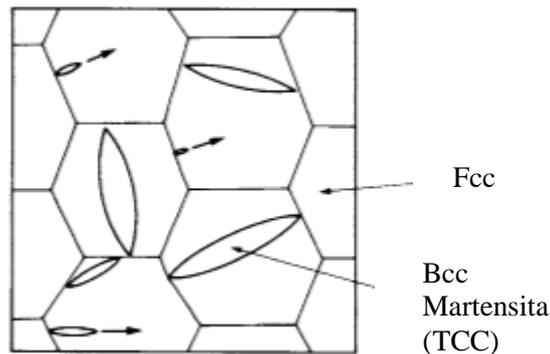


Figura 8-1. Transformación martensítica

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

Se trata de una transformación de tipo desplazante sin difusión, desde una estructura fcc a una estructura bbc, su fase madre es la austenita, que al calentarse sobre la temperatura A_{c3} y luego enfriarse hasta M_s y hasta llegar al final de su transformación. La estructura martensítica consta de innumerables granos finos y alargados, semejantes a una aguja, que crecen a la par de los granos grandes y equiaxiales de la austenita, como se puede observar en la figura 8-1. Uno de los mecanismos para lograr la formación de martensita en los aceros es el temple, tratamiento térmico que involucra algunas variables como la temperatura, composición química, velocidad de enfriamiento, que al final ayudan a alterar la microestructura del material, para facilitar este procedimiento el temple se realiza en agua o aceite para obtener mejores resultados, considerando que la velocidad de formación de las agujas de martensita es muy elevada.

1.6.2. Morfología de la martensita

Como se mencionó anteriormente las agujas de martensita se forman dentro los granos de austenita, partiendo de al menos una aguja principal que va de límite a límite y posteriormente se forman agujas secundarias como ramificaciones en dirección perpendicular a la aguja principal. Hasta la actualidad no han existido procedimientos que ayuden a determinar de manera exacta la longitud de las agujas, una de las principales causas podría ser la complejidad de la

microestructura ya se trata de granos sumamente finos, cuya longitud y volumen se incrementan a medida que aumenta la temperatura de austenización en los aceros.

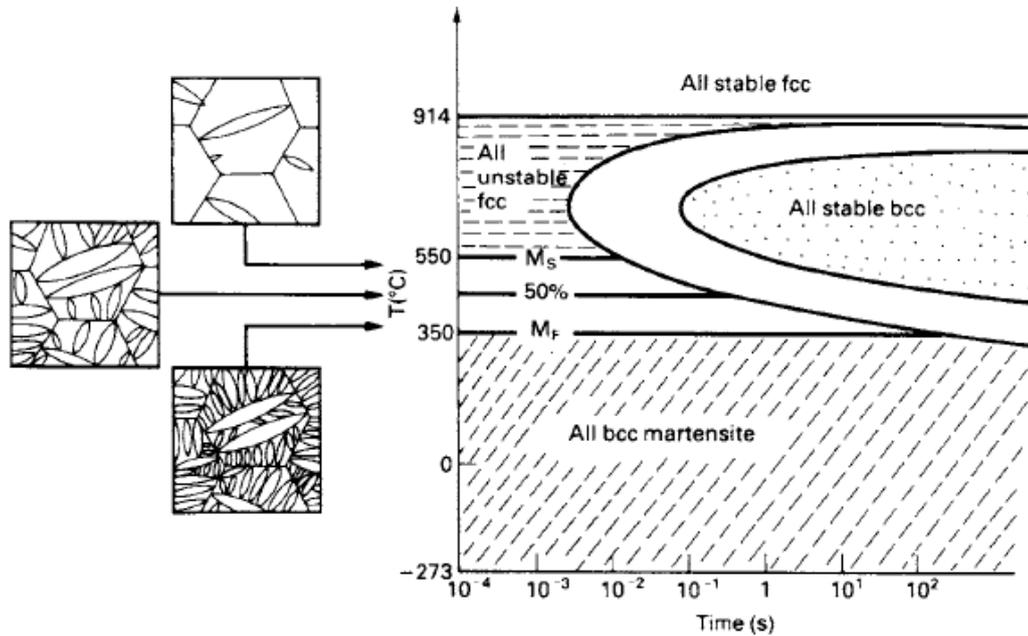


Figura 9-1. Formación de las agujas de martensita en función a la temperatura

Fuente: (Ashby y Jones, 2005, p. 93)

En los aceros de bajo y medio carbono la martensita se encuentra en forma de listones o agujas, agrupados en paquetes casi paralelos, 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, específicamente la martensita en listones provoca una fractura de tipo frágil, lo que se liga estrechamente con la dureza que tienen los materiales templados de estructura martensítica .

Además es necesario considerar dentro de la morfología de la martensita que 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 que puede alterar las propiedades de la microestructura, por lo que estudiar la austenita retenida sería otro tema de investigación, para lograr que la austenita logre transformarse completamente sería necesario utilizar procedimientos con incrementos de energía, una alternativa es transformar la martensita inducida por tensión que al final tiene las mismas características y morfología que la martensita obtenida por enfriamiento (Krauss, 2002, pp. 41-43).

La transformación martensítica posee una característica única, que estructuralmente es reversible, es decir que si transformamos de manera desplazante la martensita de nuevo a la fase de alta

temperatura, la austenita, cada átomo en la martensita vuelve a su posición original en la red de fcc, con este principio propio de la martensita se han desarrollado una amplia gama de aleaciones de memoria que se utilizan para fabricar: remaches de cierre automático e incluso antenas de montaje automático para aviones (Ashby y Jones, 2005, p. 96).

1.7. Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos son procesos controlados que permiten calentar y enfriar los metales, para alterar su microestructura y modificar así sus propiedades mecánicas, estos cambios no afectan la composición química del material ni la forma del producto, pero proporcionará mejores propiedades como la resistencia a altas temperaturas y a la corrosión..

Los tratamientos térmicos constan de tres etapas:

- Calentamiento
- Permanencia
- Enfriamiento

Tabla 6-1: Tratamientos térmicos más comunes

Tratamiento térmico	Características
Recocido	Consta de dos fases templar y revenir el material, se lo realiza con la finalidad de incrementar en los metales la resistencia al impacto y a las deformaciones, ablandar el acero para facilitar su maquinabilidad.
Normalizado	Consiste en calentar el material sobre la temperatura A_{c3} y luego enfriarlo a temperatura ambiente, este tratamiento se aplica para refinar el grano y liberar tensiones producto de tratamientos anteriores.
Revenido	El revenido sirve para mejorar la tenacidad en los aceros, la misma que es baja después de haber sido templados y da como resultado una microestructura llamada martensita revenida.

Fuente: (Flores, 1996, pp. 28- 33)

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

Estos procedimientos consisten en calentar los metales a diferentes temperaturas y luego enfriarlos en diferentes medios de enfriamiento a distintas velocidades, con la finalidad de aumentar la resistencia y dureza del material, de mejorar el mecanizado, las propiedades de corte y la resistencia a la corrosión y el trabajo a temperaturas altas (Rojas y Martínez, 2013, p2).

1.7.1. Temple

Es de los tratamientos térmicos más sencillos de realizar, que se caracteriza por endurecer el material ya que da lugar a la formación de la martensita producto de la deformación de la estructura cristalina, se debe calentar el material a una temperatura mayor a la temperatura Ac3 para aceros hipoeutectoides y sobre la temperatura Ac1 para aceros eutectoides e hipereutectoides, este incremento puede ir como mínimo de 30 a 50 grados centígrados, para garantizar una transformación homogénea de la austenita (Torres, 2004, p20), una vez calentado el material, este se enfría a velocidades sumamente rápidas.

Existen algunos medios de enfriamiento que proporcionan características específicas a las muestras que serán templadas, uno son más rápidos como la salmuera, pero a la vez por su naturaleza corrosiva se recomienda tener algunas precauciones.

Tabla 7-1: Medios de enfriamiento para el temple

Medios de enfriamiento	Características
Agua	Es el más común, por su bajo costo No se evidencian fisuras en las muestras Fácil de eliminar, no produce contaminación Puede variar la temperatura con facilidad
Aceite	Existen dos tipos de aceite: convencional y aceite rápido El aceite convencional no tiene aditivos que puedan alterar el enfriamiento El aceite rápido, es un medio de enfriamiento más rápido ya que contiene aditivos que alteran el enfriamiento
Salmuera (Cloruro de calcio o Cloruro de sodio)	La velocidad de enfriamiento es mayor a la velocidad del enfriamiento del agua. Son de naturaleza corrosiva por lo tanto se recomienda el uso de medios de protección

Fuente: (García 2013, p. 28)

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

1.8. Tamaño de grano

Al hablar de tamaño de grano en los aceros, en realidad se trata del tamaño de la austenita como fase madre antes de cualquier transformación luego que el material haya sido calentado, de aquí la estrecha relación entre el tamaño de grano y la temperatura de calentamiento, sin embargo, para lograr esto, es necesario superar la temperatura crítica del material. Se presume que a medida que se incrementa la temperatura y el tiempo el tamaño de grano crece (Herring 2005, p1).

Antes de conocer los métodos que existen para medir el tamaño de grano, se considera necesario identificar dos conceptos importantes que ayudaran a identificar los granos en una microestructura, según la Norma ASTM E1112-12:

- **Grano:** es un cristal individual, parte de una estructura cristalina, orientados en diferentes direcciones, pero cuenta con la misma configuración atómica que el material policristalino.
- **Límite de grano:** es una estructura estrecha que se forma a partir de la formación de granos cristalinos individuales con un núcleo diferente, indica el cambio de una dirección cristalográfica a otra.

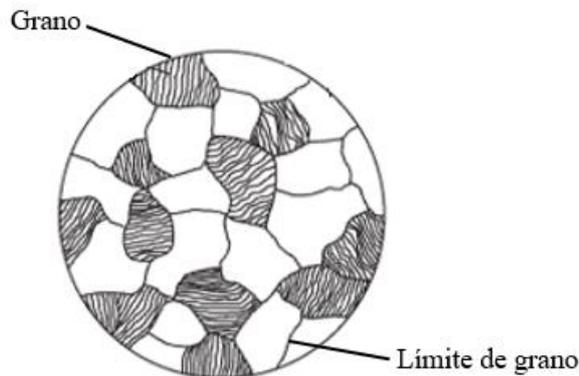


Figura 10-1: Muestra metalográfica, grano y límite de grano

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

1.8.1. *Influencia del tamaño de grano en las propiedades de los materiales*

Las propiedades mecánicas de los aceros son sensibles a la variación de su tamaño de grano, controlar el crecimiento del grano ayudaría a mejorar algunas propiedades como: la dureza, la resistencia a la fatiga, impacto o tracción, incluso favorecería al proceso de maquinabilidad ya que al mecanizado en bruto le favorece la presencia de granos grandes, mientras que al mecanizado para acabado superficial le beneficia la presencia de granos finos, el tamaño de grano afecta más en las propiedades que están dentro de la primera etapa de la deformación, exactamente

el límite elástico, ya que existe mayor interacción en granos de estructura pequeña que en granos de estructura grande (Herring 2005, p. 20). Por tal razón es importante determinar el tamaño de grano que exista en una muestra metalográfica, tomando en cuenta que determinar un tamaño de grano promedio funciona solo en muestras con una microestructura geoméricamente similar, caso contrario el tamaño de grano se verá alterado significativamente (Morris, 2001, p. 4).

1.8.2. Métodos para determinar el tamaño de grano

Existen algunos métodos para determinar el tamaño de grano en las muestras metalográficas, las normas ASTM E112 – 13, especifica algunas de estos:

1.8.2.1. Método de comparación

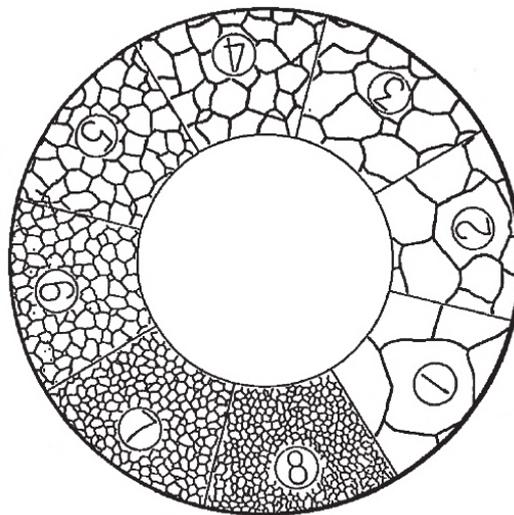


Figura 11-1. Plantilla graduada para el tamaño de grano

Fuente: (Llulluna 2014, p39)

Este método consiste en comparar la muestra metalográfica con una serie de imágenes con diferentes tamaños de granos, representados en una plantilla graduada, este método es muy sencillo y práctico si la comparación es la adecuada, los microscopios ópticos cuentan con un lente ocular que permite determinar el tamaño de grano, el número de la imagen en la plantilla que coincida con la muestra metalográfica es el valor del tamaño del grano, si la muestra metalográfica tiene una ampliación de 100X, caso contrario se debe usar un factor de corrección, que se suma al tamaño de gramo que indica la plantilla.

$$Q = 6,64 \text{Log}_{10} \left(\frac{M}{Mb} \right) \quad (1-1)$$

Donde:

Q: factor de corrección

M: Ampliación de la imagen

Mb: 100x

1.8.2.2. Método planimétrico

Para este método se realiza una circunferencia de 5000 mm² sobre la imagen metalográfica, para determinar el número de granos equivalentes, se cuentan los granos que se encuentran dentro del área, más la mitad del total de granos intersecados por la circunferencia, se determina el número de granos en un milímetro cuadrado, utilizando el número de Jeffries, con la siguiente expresión:

$$N_A = f \left(N_{interiores} + \frac{N_{interrsecados}}{2} \right) \quad (2-1)$$

$$f = 0.0002M^2$$

Donde:

N_A: Número de granos por milímetro cuadrado

f: Número de Jeffries

N_{interior}: Número de granos dentro del área

N_{interrsecados}: la mitad del número de granos intersecados por la circunferencia

Tabla 8-1: Relación entre el número de Jeffries y la Ampliación de la imagen

Ampliación de la imagen M	Multiplicador de Jeffries, para obtener granos/mm ² f
1	0.0002
10	0.02

Continua

Ampliación de la imagen M	Multiplicador de Jeffries, para obtener granos/mm ² f
25	0.125
50	0.5
75	1.125
100	2
150	4
200	8
250	12.5
300	18
500	50
750	112.5
1000	200

Fuente: (ASTM 2013, p9)

Realizad por: Aguirre, Diana, 2019

1.8.2.3. Método general de las intercepciones

Es el método más utilizado, ya que no requiere de marcas para el conteo de los granos, este procedimiento se recomienda para granos que se apartan de una forma equiaxial uniforme, a granos que se encuentren separados de las tres dimensiones principales y se obtiene un tamaño de grano promedio.

Existen tres formas para realizar este método:

- 1. Intercepción lineal de Heyn;** este procedimiento consiste en trazar líneas rectas sobre la imagen, con una longitud suficiente para interceptar al menos 50 granos.
- 2. Intercepción circular:** Algunos autores recomiendan el uso de líneas de prueba circulares, ya que al tener una matriz circular se logra compensar las desviaciones de las formas de grano equiaxiales, es así como tenemos: *Procedimiento simple de Hillarid:* se utiliza un

círculo de 100, 200, 250 mm de perímetro comúnmente y el *Procedimiento de los tres círculos de Abrams*, que sugiere trazar tres círculos concéntricos con la misma separación y que sumados den un perímetro total de 500mm, estos procedimientos se recomiendan realizar en diferentes sectores para lograr un tamaño de grano por medio más exacto.

Una vez realizado el conteo se procede a reemplazar en las fórmulas:

$$G = (6.643856 * \log \bar{N}_L) - 3.288 \quad (3-1)$$

$$\bar{N}_L = \frac{Ni}{L/M} \quad (3-1)$$

$$\bar{l} = L/Ni \quad (4-1)$$

Donde:

Ni: número de intercepciones

L: Longitud de la línea

M: Aumento de la imagen

N_L: Número de intercepciones por unidad de longitud

\bar{l} : Intercepción media lineal

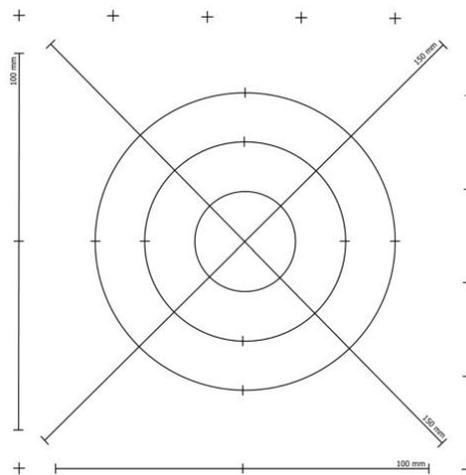


Figura 12-1. Líneas de prueba

Fuente: (ASTM 2013, p11)

1.9. Propiedades mecánicas de los materiales

Las propiedades mecánicas ayudan a comprender el comportamiento de los materiales sometidos a cargas o esfuerzos, siendo los más importantes (Aponte Rodríguez y Villazón Amarís, 2001, pp. 2-3):

- *La resistencia a la tracción:* indica la carga máxima que puede soportar un material antes de llegar a la fractura o el esfuerzo de fluencia que indica el cambio del material de la zona plástica a la elástica.
- *Rigidez:* de la curva esfuerzo – deformación, se puede determinar el módulo de Young, el mismo que a medida que se incrementa indica que el material necesita de esfuerzos grandes para lograr alguna deformación en el material.
- *Ductilidad:* define la capacidad de deformarse que posee el material antes de llegar a la fractura, los materiales que no admiten deformaciones fracturarse se conocen como frágiles.
- *Dureza:* Es la oposición del material a ser rayado, deformado o penetrado.
- *Tenacidad:* indica la capacidad que tiene el material para absorber las energías de impacto que genera un golpe repentino.

Para cuantificar estas propiedades es necesario realizar ensayos en muestras de prueba que arrojen la información que se desea obtener, en esta investigación se realizaron dos tipos de ensayos: Dureza y Tracción.

1.9.1. Dureza

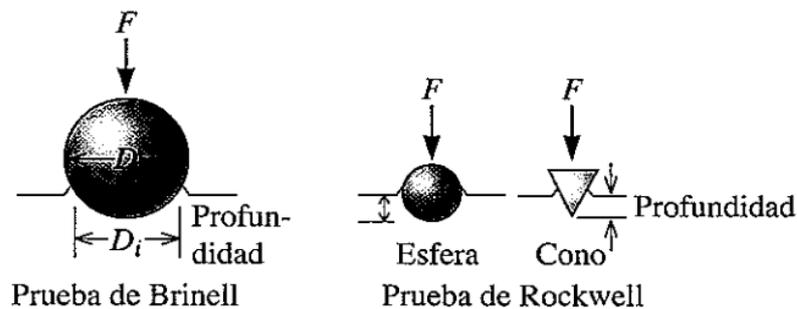


Figura 13-1. Tipos de indentadores para los ensayos dureza

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

La dureza se define como la resistencia que presentan los materiales a la deformación permanente, al desgaste, a la abrasión o a ser rayados; sin embargo, a pesar de ser es una propiedad mecánica importante, que difiere de uno a otros materiales, fue en el siglo XIX que se empezó a desarrollar experimentos para cuantificar esta propiedad y las máquinas que realizaban dichos experimentos fueron comercializadas a partir del siglo XX, se identificaban dos categorías en base al tipo de indentador para determinar la dureza:

- La primera que consiste en utilizar una bola o un cono de acero endurecido
- La segunda que utiliza diamantes de diferentes formas

Las dos formas consisten en presionar una superficie plana bajo una carga establecida, que depende del tipo del material a ensayar. Esta propiedad tiene una estrecha relación con la resistencia que posee el material, especialmente a la tracción (Walley 2012, p1028).

Para medir esta propiedad en la actualidad se realizan ensayos de dureza, de diferentes tipos en función de las características de los materiales. Estos ensayos son fáciles de realizar y se consideran no destructivos ya que la huella que deja el indentador está dentro de áreas de bajo estrés, el procedimiento que sigue cada uno de estos métodos están establecidos dentro de normas como la ASTM. La dureza es evaluada por la cantidad de deformación permanente que se presenta en la superficie del material, se determina midiendo la profundidad de la sangría (huella del indentador), pero se debe tomar en cuenta que a medida que el material se vuelve más blando la profundidad de la huella es mayor y el área proyectada aumenta (ASM International 1999, p9).

1.9.1.1. Ensayo de dureza Rockwell

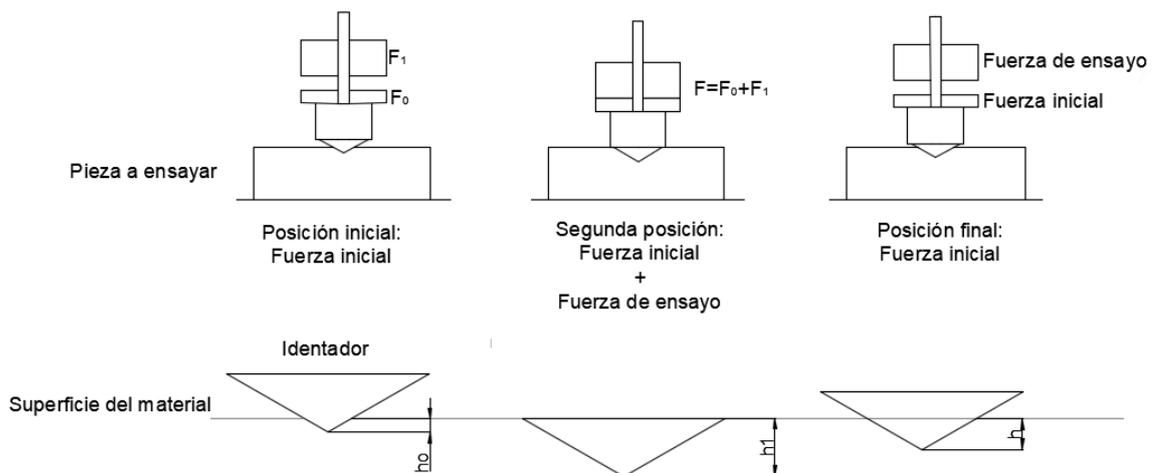


Figura 14-1. Ensayo de dureza Rockwell

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

Se considera como el ensayo más común, ya que no requiere de fórmulas ni tablas de transformación, el resultado se obtiene directamente, la máquina mide la profundidad de la huella que deja el indentador y la transforma en un valor para la dureza Rockwell, además este tipo de ensayo cuenta con varias escalas aplicables para diferentes materiales, que se diferencian por las letras del abecedario, por ejemplo se usa la escala HRC para aceros de alta resistencia o la escala HRF para materiales blandos, además cada escala trabaja con un indentador específico, que puede

ser un diamante en forma cónica con un ángulo de 120° y redondeado ligeramente en la punta o una bola de acero endurecida, esta puede ser de diferentes diámetros: 1/16”, 1/8”, 1/4” o 1/2”.

Tabla 9-1: Escalas para la dureza Rockwell y sus aplicaciones

Prueba	Identador	Carga		Aplicación
		Kgf	N	
Rockwell A	Cono	60	588,4	Materiales muy duros
Rockwell B	Esfera de 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 de 1/8”	100	981	Materiales muy blandos
Rockwell F	Esfera de 1/16”	60	588,4	Aluminio, materiales blandos

Fuente: (Askeland, Fulay y Wright 2012, p222)

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

Norma: ASTM E 18 - *Standard Test Method for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials.*

1.9.1.2. Ensayo de dureza Brinell

Para determinar la dureza Brinell se utiliza como identador una bola de acero endurecido de 10mm de diámetro, esta bola se presiona sobre la superficie del material con una carga establecida q es: 3000 kgf para hierros colados y aceros y 500Kgf para aleaciones no ferrosas y se toma la medida del diámetro que deja la huella del identador con un microscopio de baja potencia, que por lo general está en un rango de 2 a 6 mm (Askeland, Fulay y Wright 2012, p222) la carga se aplica de 10 a 15 segundos para el hierro y los aceros y durante 30 segundo para otros metales. En caso de que el material sea mas duro se reemplaza la bola de acero por una bola de tungsteno.

La fórmula para calcular la dureza Brinell viene dada por:

$$BH = \frac{F}{\frac{\pi D}{2} [D - \sqrt{D^2 - d^2}]} \quad (5-1)$$

De donde:

F: carga aplicada

D: diámetro de la bola

d: diámetro de la huella del indentador

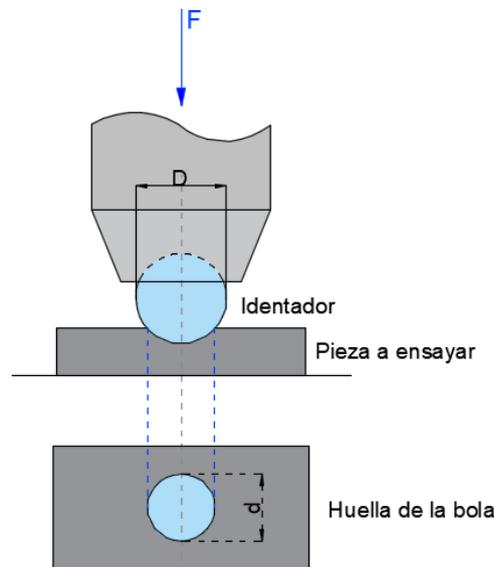


Figura 15-1. Ensayo de dureza Brinell

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

Norma: *ASTM E 10, Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials.*

1.9.1.3. Ensayo de dureza Vickers

Para este método se utiliza un indentador de diamante en forma de pirámide de base cuadrada con una carga de 1 a 100kgf, durante 10 o 15 segundos, este tipo de ensayo se recomienda para aceros tratados superficialmente mediante nitruración o cementación y para piezas delgadas (Appold et al. 2002, p100). Para encontrar el valor de la dureza Vickers se saca el promedio de las dos diagonales de la impresión de la huella, que tiene la forma de un cuadrado y se reemplaza en la Ecuación (2-1) o se trabaja con tablas.

$$HV = 1,854 \frac{F}{d^2} \quad (6-1)$$

De donde:

F: carga aplicada en kgf

d: promedio de las diagonales de la huella en mm

El valor de la dureza Vickers se informa de la siguiente manera: 800HV/10, que significa que la dureza Vickers de 800 se determinó con una carga de 10kgf, la ventaja de este método es que ayuda a encontrar durezas más precisas.

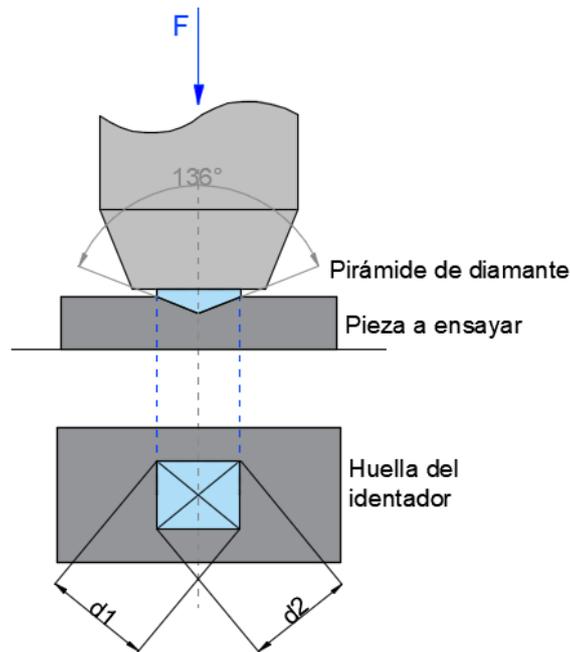


Figura 16-1. Ensayo de dureza Vickers

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

Norma: *ASTM E 92 - Standard test method for Vickers Hardness of Metallic Materials*

La dureza Vickers y Brinell, se obtienen de una comparación entre las cargas y las dimensiones de la huella, a diferencia de la dureza Rockwell que se determina en base a la profundidad de la huella y es una lectura directa («Hardness» 1995, p62).

1.9.2. Ensayo de Tracción

El ensayo de tracción es uno de los ensayos más importantes en la ingeniería, ya que otorga información de las propiedades de los materiales sometidos a cargas axiales, es un ensayo destructivo que garantiza calidad en el material y por ende una buena selección. El dato de mayor importancia para el ingeniero como resultado de este ensayo es conocer la tensión necesaria que requiere un material para que se genere una deformación plástica considerable o la tensión máxima que un material puede soportar. Este ensayo también proporciona información sobre la ductilidad del material, es decir cuánto puede deformarse el material antes de llegar a la fractura (Davis,2004, p. 1).

Para ensayos de tracción en los metales se usa la norma ASTM E8 (2010) que especifica las consideraciones para la máquina en donde se realiza el ensayo tanto como para la muestra de prueba.

El ensayo de tracción proporciona resultados importantes para determinar el comportamiento del material sometido a fuerzas de axiales de tracción.

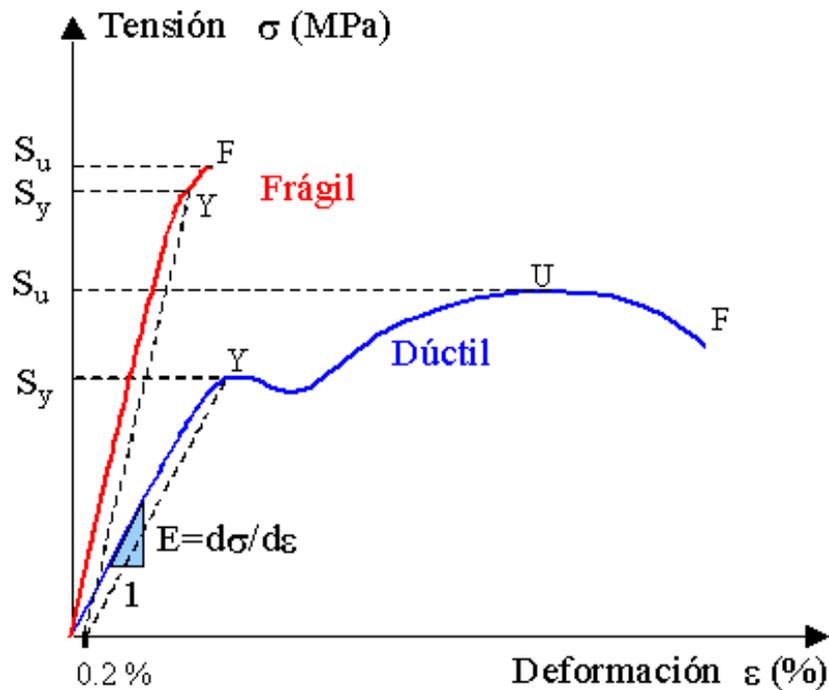


Gráfico 5-1. Curva esfuerzo deformación para los metales

Fuente: (Perez, 2014, p. 1)

En el Gráfico 5-1 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_y** límite de fluencia: tensión que soporta el material durante el ensayo
- **S_u** límite de rotura: tensión al momento de producirse la fractura

Las curvas indican el comportamiento para los materiales frágiles (línea roja) y dúctiles (línea azul), para los materiales frágiles el punto U y F coinciden.

1.9.2.1. Esfuerzo máximo de tensión y elongación

Una vez finalizado el ensayo que se procede a realizar el cálculo del esfuerzo y la elongación del material, con las siguientes expresiones:

$$A(\%) = \frac{L_f - L_0}{L_0} * 100 \quad (7-1)$$

De donde:

A: alargamiento o elongación

L_f : longitud final

L_0 : longitud inicial (calibrada)

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ (Mpa)} \quad (8-1)$$

De donde:

σ : esfuerzo de tracción

F: Fuerza aplicada

A: sección transversal de la muestra ensayada

CAPITULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Equipos y materiales

2.1.1. *Microscopio electrónico de barrido*

El microscopio electrónico de barrido (Figura 1-2) conocido como SEM por sus siglas en inglés (Escanning Electron Microscopy) utiliza un tipo de tecnología moderna para reproducir las imágenes, por lo que se ha convertido en uno de los equipos más versátiles para analizar la microestructura y caracterizar la composición química de los materiales, el funcionamiento de este tipo de microscopia consiste en reemplazar la luz por electrones de alta energía, para esto cuenta con un accesorio capaz de generar un haz de electrones que iluminan la imagen en un área determinada y en conjunto con un sistema de detectores recoge la información necesaria como resultado de una interacción electrón-muestra, para describir las características de la superficie de la muestra (Zhou et al. 2007).

Una ventaja importante del microscopio electrónico de barrido es que proporciona mayor amplitud en las imágenes, llegando incluso a 30 000x, a diferencia del microscopio óptico que cuenta únicamente con 3 ampliaciones 100x, 200x y 500x, que pueden limitar el análisis en las muestras.

Está formado principalmente por: una fuente de electrones lente de electrones, detectores para las señales de interés y dispositivos de visualización y salida de datos.

Por el tipo de tecnología que utiliza este equipo, hay que 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.



Figura 1-2. Microscopio Electrónico de Barrido

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

2.1.2. Microscopio óptico

En los últimos años el uso de la microscopía ha sido de gran aporte para el desarrollo de investigaciones multidisciplinarias y a pesar de los avances tecnológicos y métodos de análisis cuantitativos y cualitativos de imagen más sofisticados, el microscopio óptico en la actualidad sigue vigente, siendo un equipo mucho más sencillo de manipular comparando con el microscopio electrónico de barridos (Davidson y Abramowitz 2012, p1).



Figura 2-2. Microscopio Óptico

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

El microscopio óptico conocido como microscopio de luz, tiene una potencia de 0,2 m lo que quiere decir que mejora 750 veces lo que el ser humano puede ver a simple vista, existen cinco tipos de microscopía óptica que dependen de la variación de los lentes y el haz de luz, son los siguientes: campo brillante, campo oscuro, contraste de fase, interferencia diferencial y fluorescencia (Carlos, Torres y Condó 2007, p159) sin embargo la principal desventaja de este tipo de microscopios es su limitación en el número de ampliaciones.

Tabla 1-2: Comparación entre las características de los Microscopios Óptico y Electrónico

Características	Óptico	Electrónico
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: (Roane et al, 2009, p168)

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

2.1.3. *Horno para tratamientos térmicos*

La principal función de este tipo de hornos es proporcionar calor a altas temperaturas a las muestras colocadas en su interior para ser tratadas térmicamente, el calor puede ser generado por combustión de gases, sólidos o líquidos y calientan las piezas por contacto directo o indirecto mediante paredes u otros sistemas conductores de calor.



Figura 3-2. Horno para tratamientos térmicos

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

Existen algunos tipos de hornos para tratamientos térmicos y pueden ser de tipo industrial eléctrico, por inducción electromagnética, por el uso de microondas y se usan para fundir piezas, realizar tratamientos superficiales, mejorar propiedades mecánicas, ablandar materiales, según sean las necesidades requeridas (PowderTronic 2019).

2.1.4. Durómetro



Figura 4-2. Durómetro

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

2.1.5. Máquinas para el ensayo de tracción

Se las conoce como máquinas universales, que aplica cargas de tensión, compresión o flexión a las muestras de pruebas y como resultado proporciona una curva de estrés ante los diferentes tipos de cargas aplicadas al material según el tipo de ensayo. Las máquinas pueden ser electromecánicas o hidráulicas.

- *Máquina universal de accionamiento electromecánico.* – su sistema de funcionamiento consta de un motor eléctrico, un sistema de reducción de engranajes y el juego de tornillos que mueven la cruceta (aplicador de la carga) de acuerdo con el tipo de ensayo, la velocidad de la cruceta se puede ajustar variando la velocidad del motor.
- *Máquina universal de accionamiento hidráulico.* - cuenta con un pistón de simple o doble acción para mover el aplicador de carga, para controlar la velocidad de la cruceta se debe ajustar una válvula de aguja compensada por presión. Estas máquinas cuentan con un sistema de agarre para sujetar las muestras a ensayar, que deben ser seleccionadas de acuerdo con el tipo de muestra.



Figura 5-2. Máquina Universal

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

2.2. Aceros AISI 4140 y AISI 4340

Los aceros AISI 4140 y AISI 4340, presentan propiedades mecánicas superiores a las propiedades de los aceros al carbono, esto se debe al efecto de dos elementos aleantes principales presentes en su composición química como: el Cromo y el Molibdeno, que se encuentran en diferentes porcentajes, son aceros estructurales conocidos como aceros al Cromo - Molibdeno utilizados generalmente en la industria petrolera, gas, para la construcción grandes maquinarias e incluso cualquier objeto que se encuentra a nuestro alcance como agujas.

Cromo (Cr). - es un elemento común en los aceros aleados que aumenta la dureza, la resistencia a la tracción mejora la templabilidad y la resistencia la desgaste y temperaturas altas.

Molibdeno (Mo). - incrementa la profundidad de endurecimiento del acero, mejora su tenacidad y resistencia a la corrosión, este elemento logra estabilizar los carburos complejos y evita el ablandamiento prematuro durante el revenido (Vidaurri 2011).

La investigación se realiza con aceros de la empresa BÖHLER Aceros Kohler Uddehol, la misma que otorga el documento de certificación del material que detalla las especificaciones técnicas, composición química, características y propiedades del material, para garantizar que cumpla con los requerimientos establecidos.

2.2.1. Características y aplicaciones del Acero AISI 4140

Las características que se detallan a continuación se basan en la información que proporcionan los fabricantes, proveedores e información bibliográfica, siendo datos que pueden variar de una fuente a otra por tratarse de valores promedios que se esperan cumpla el material, se ha reunido la mayor cantidad de información posible.

a) Composición química

Tabla 2-2: Composición química en porcentaje % del Acero AISI 4140

Acero	C	S	Si	Mn	P	Cr	Mo	Ni	V	Al
4140	0,415	0,035	<0.4	0,75	0,035	1.05	0,175	0,016	0,005	0,013

Fuente: (BÖHLER, 2019)

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

b) Propiedades

Según el Manual de Aceros Especiales Bohler ((2011, pp. 55-57) el acero AISI 4140 en tiene la siguiente descripción:

Estado de suministro: Bonificado 29-34 HRC

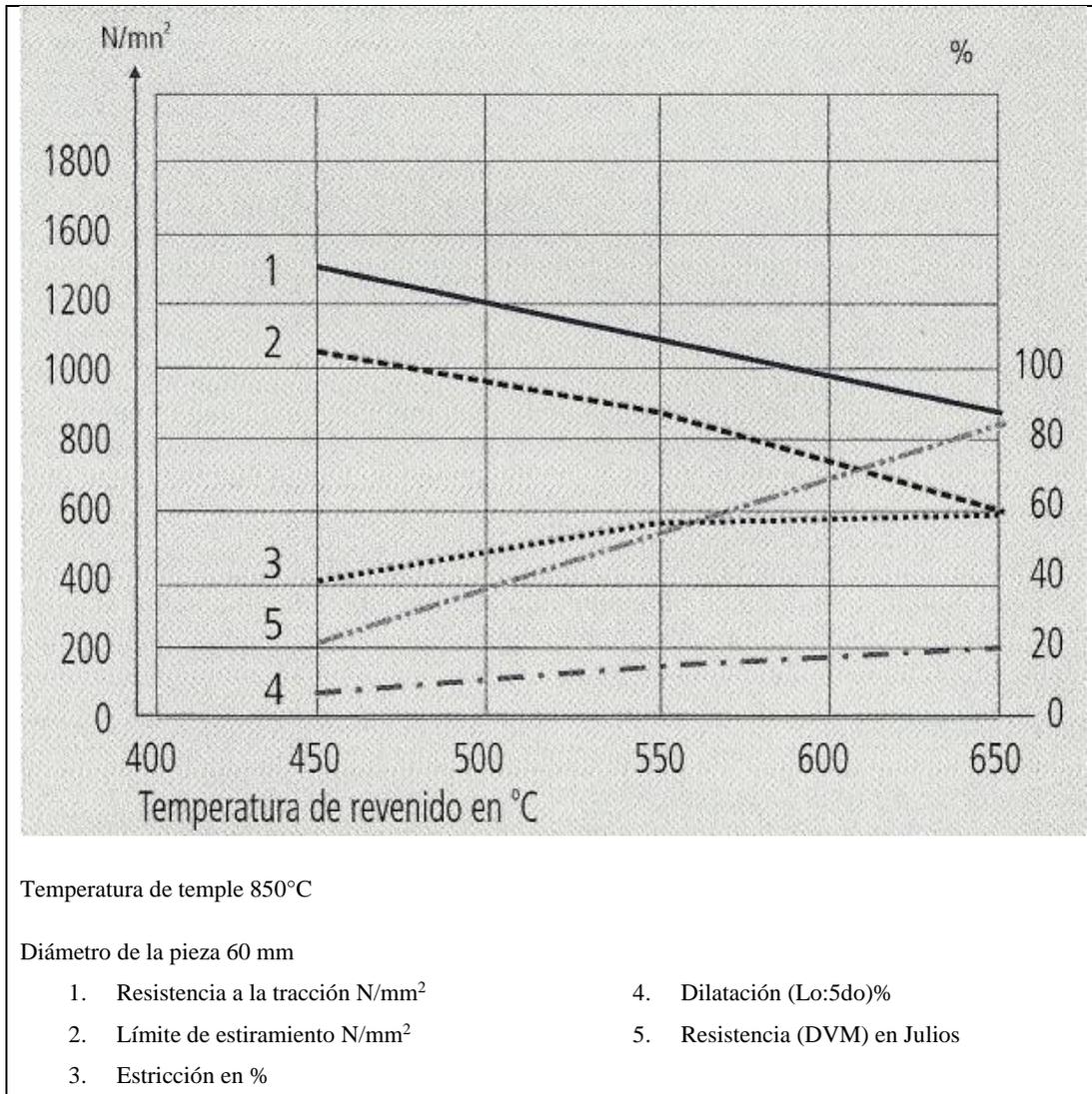


Gráfico 1-2. Diagrama de revenido para el Acero AISI 4140

Fuente: (Bohler, 2011, p. 60)

c) Normas equivalentes comunes

Tabla 3-2: Normas Equivalentes

SAE/AISI	DIN	
4140	1.7225	42CrMo4

Fuente: (Bohler, 2011, p. 60)

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

d) Aplicaciones y usos

- Piezas para maquinas en general

- Engranajes, engranajes de transmisión
- Pernos de alta resistencia
- Bielas
- Paredes de presión
- Componentes oleohidráulicos
- Componentes para compresores
- Elementos estructurales

2.2.2. Características y aplicaciones del Acero AISI 4340

Las características que se detallan a continuación se basan en la información que proporcionan los fabricantes, proveedores e información bibliográfica, siendo datos que pueden variar de una fuente a otra por tratarse de valores promedios que se esperan cumpla el material, se ha reunido la mayor cantidad de información posible.

a) Composición química

Tabla 4-2: Composición química en porcentaje % del Acero AISI 4340

Acero	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	Al
4340	0.43	<0,4	0,65	1.5	0,3	1,9	0,08	0,03

Fuente: (BÖHLER, 2019)

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

b) Normas equivalentes más comunes

Tabla 5-2: Normas equivalentes

SAE/AISI	DIN	
4340	1.6565	34CrNiMo6

Fuente: (Bohler, 2011, p. 57)

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

c) Propiedades mecánicas

Según el Manual de Aceros Especiales Bohler (2011, pp. 55-57) el acero AISI 4340 en tiene la siguiente descripción:

Estado de suministro: Bonificado 29-34 HRC

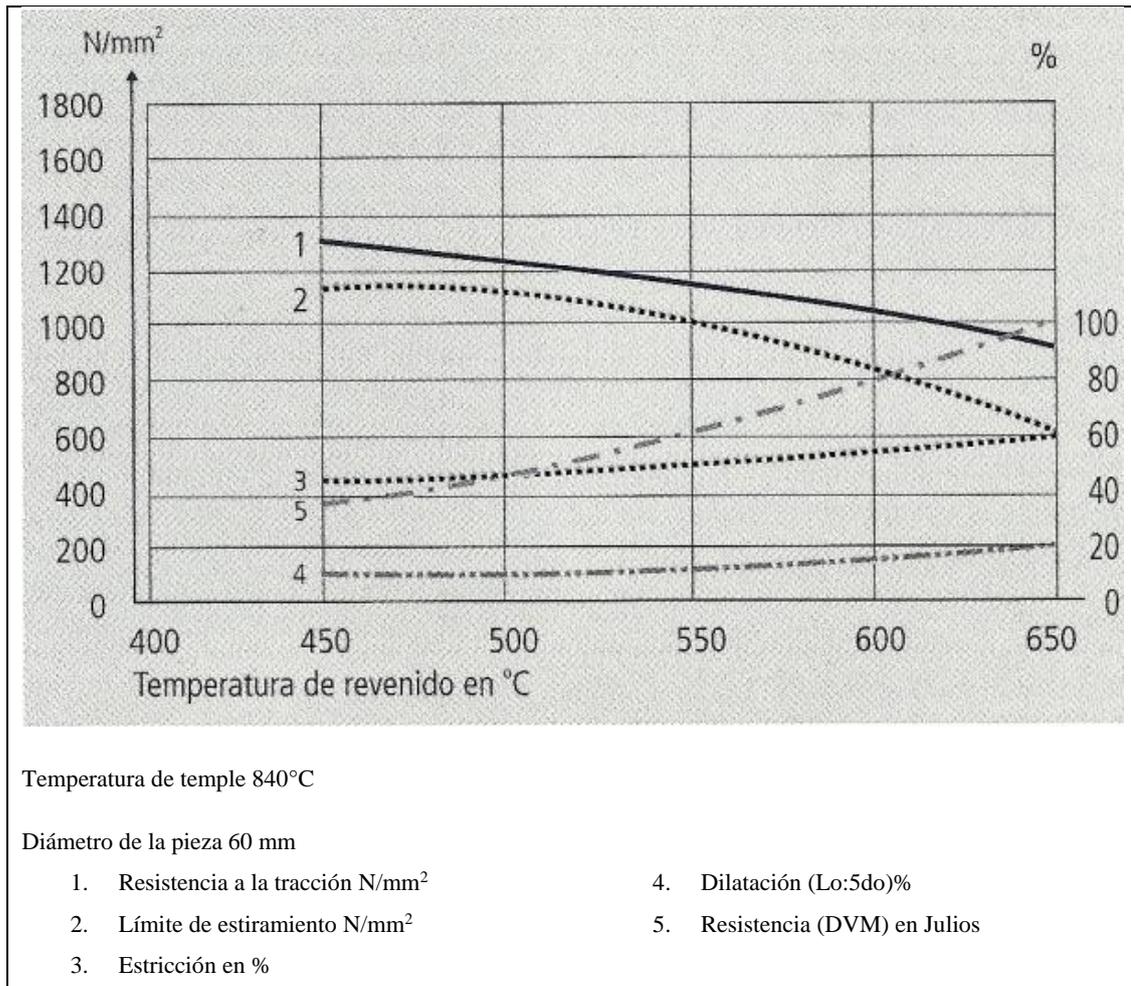


Gráfico 2-2. Diagrama de revenido para el Acero AISI 4340

Fuente: (Bohler, 2011, p. 57)

d) Aplicaciones y usos

- Ejes, piñones
- Elementos estructurales
- Componentes de barras de perforación
- Componentes oleohidráulicos
- Componentes para compresores de gas industrial

2.3. Procedimiento para el análisis de la influencia de la longitud de las agujas de martensita en las propiedades mecánicas de los Aceros AISI 4140 y AISI 4340

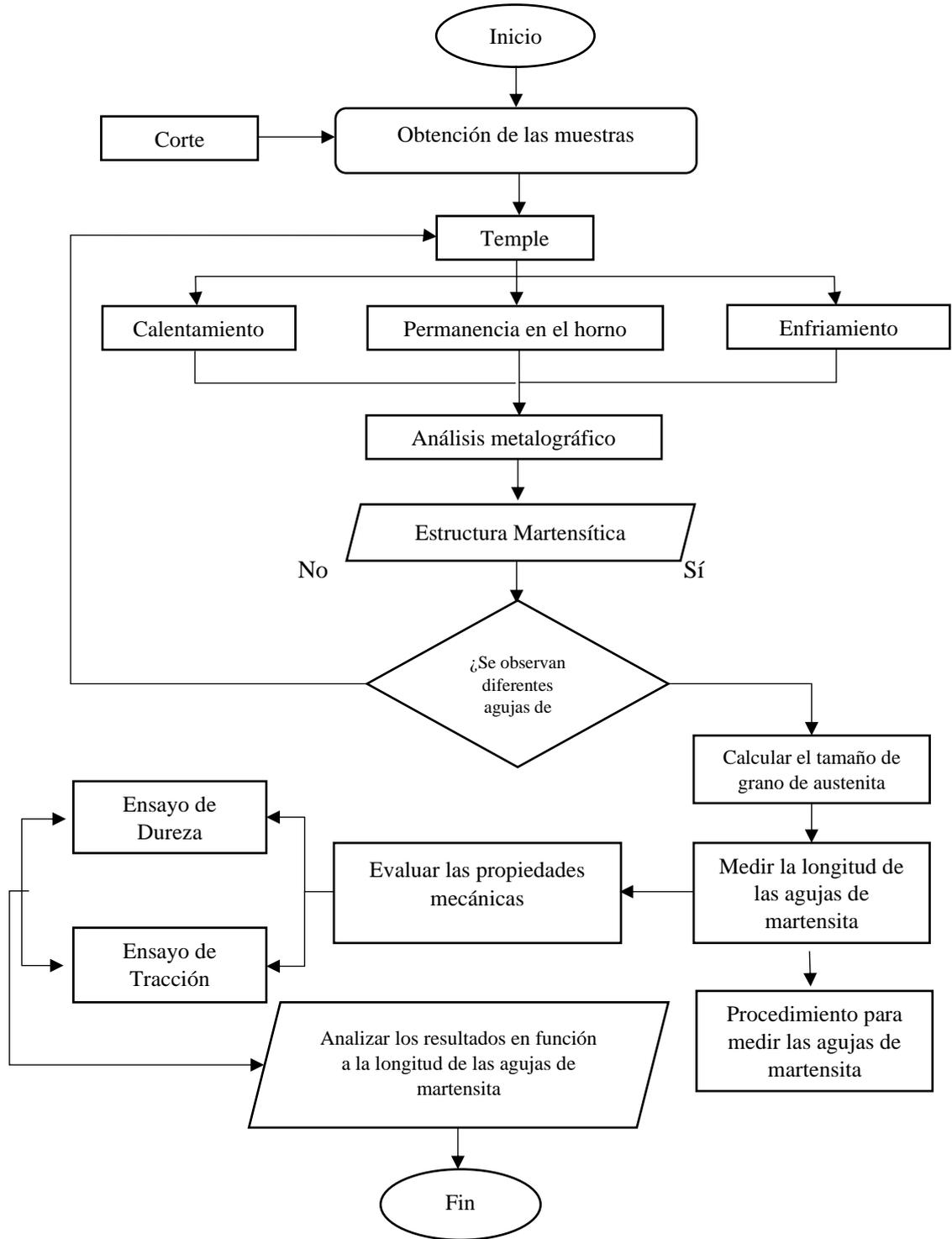


Gráfico 3-2: Procedimiento para el análisis de la influencia de la longitud de las agujas de martensita en las propiedades mecánicas de los Aceros AISI 4140 y AISI 4340

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

2.4. Tratamientos térmicos

La finalidad de realizar tratamientos térmicos en las probetas como se ha explicado en la teoría es mejorar las propiedades de los materiales sin alterar su composición química, en este caso las probetas serán calentadas a temperaturas críticas Ac3, para garantizar la formación de martensita, para luego ser enfriadas rápidamente en agua, el agua es el medio de enfriamiento más adecuado para los aceros de medio carbono, ya que evita en lo posible la formación de grietas (Vega et al., 1999, p. 3).

El tratamiento que se realiza es el temple y consta de tres etapas principales:

- Primera: obtener la probeta con las dimensiones deseadas
- Segunda: determinar las temperaturas críticas de los aceros AISI 4140 y AISI 4340
- Tercera: identificar las etapas del tratamiento térmico (calentar - mantener - enfriar)

2.4.1. Obtención de las probetas

Las probetas se extraen desde ejes de acero AISI 4140 y AISI 4340, con las dimensiones especificadas en la Tabla 6-2

Tabla 6-2: Dimensiones de las muestras de Acero AISI 4140 y AISI 4340

Muestra	Material	Diámetro (mm)	Espesor (mm)
1	AISI 4140	100	20
2	AISI 4340	75	10

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

2.4.2. Temperaturas críticas de los aceros

Las temperaturas críticas en los diagramas de transformación son las temperaturas a las cuales se produce el cambio de fase en el material, para la investigación se determinarán la temperatura Ac1, que da lugar a la reacción eutectoide, en donde inicia la transformación de la ferrita en austenita; la temperatura Ac3, en donde se espera que la transformación haya terminado; Ms y Mf, que indican el inicio y final de la transformación martensítica respectivamente, todos estos valores serán calculados en función a la composición química del acero (Parodi et al. 2017, p. 4).

Tomando en cuenta que los elementos aleantes son capaces de modificar algunas características del material se realiza el cálculo de las temperaturas críticas, temperaturas de transformación martensítica y el carbono eutectoide en función a los elementos aleantes, ya que estos pueden subir o bajar la temperatura de transformación.

2.4.2.1. Carbono y temperatura eutectoides

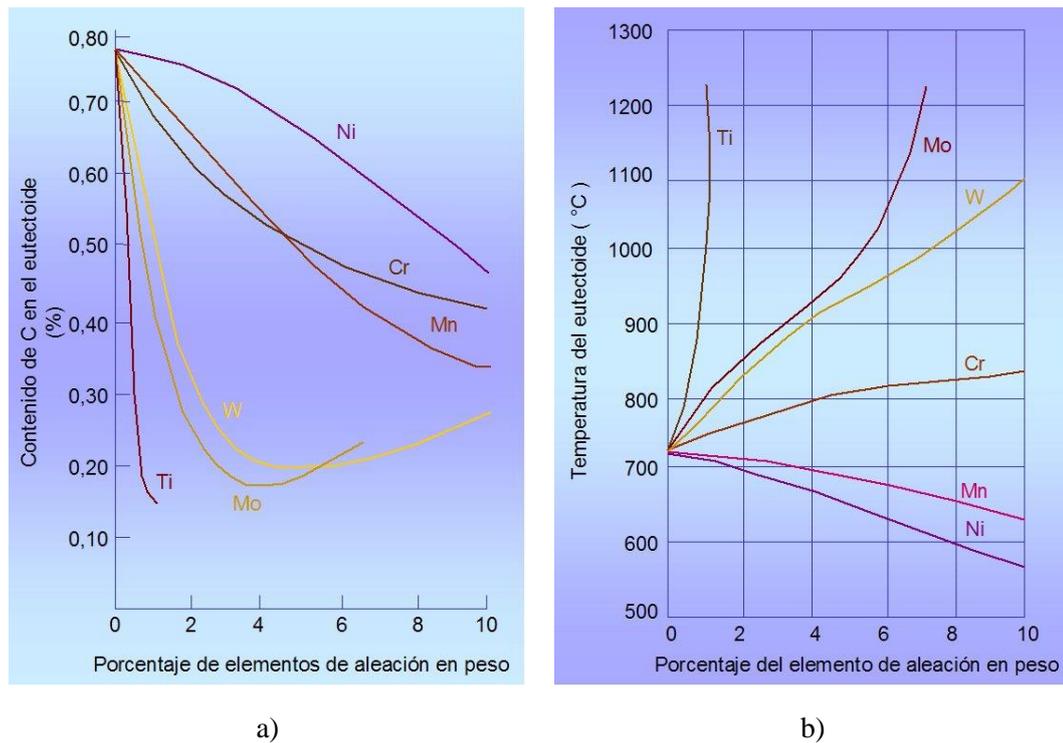


Gráfico 4-2. Efecto de los elementos aleantes en a) Carbono eutectoide b) Temperatura eutectoide

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

$$Ac_3 = 902 - 255\%C - 11\%Mn + 19\%Si - 5\%Cr + 13\%Mo - 20\%Ni + 55\%V \quad (1-2)$$

Usando la relación de Steven & Haynes (Cabrera, 2017, p:23) para determinar la temperatura de transformación martensítica:

$$Ms = 561 - 474\%C - 33\%Mn - 17\%Cr - 17\%Ni - 21\%Mo \quad (2-2)$$

$$Mf = Ms - 185^\circ C \quad (3-2)$$

Según la información obtenida en a catálogos o material bibliográfico, se pueden calcular estas temperaturas en base al porcentaje de los elementos aleantes en el acero.

Otra forma es mediante las curvas del Gráfico 4-2

2.4.3. Etapas del tratamiento térmico

- **Calentamiento:** tomando en cuenta la temperatura Ac3 para cada acero, se decide calentar las probetas a 750°C, 800°C y 900°C, en un horno de tratamiento térmico ubicado en el laboratorio de Fundición en la Facultad de Mecánica – ESPOCH.



Figura 7-2. Horno encendido a temperaturas altas

Fuente: Aguirre, Diana; 2019

- **Tiempo de austenización (permanencia en la temperatura fijada):** para conocer el tiempo de austenización emplea la siguiente fórmula en función al espesor del material, la misma que se recomienda para muestras pequeñas, con la finalidad de lograr una transformación homogénea de la austenita (Cabrera 2017):

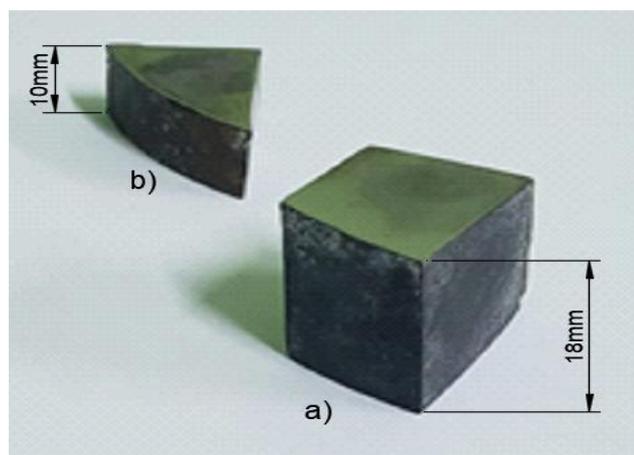


Figura 8-2. Espesores Acero a) AISI 4140 b) AISI 4340

Fuente: Aguirre, Diana, 2019

$$T_p = 20 + \frac{e}{2} \quad (4-2)$$

Donde:

T_p : tiempo de permanencia en minutos

e : espesor de la muestra en milímetros

- **Enfriamiento:** el medio de enfriamiento utilizado es el agua a 15°C y 0°, siendo este el medio de enfriamiento más común para este tipo de aceros, el tiempo que permanecen de las probetas en el agua puede variar de 5 a 10 segundos hasta lograr que las probetas lleguen a la temperatura ambiente.



Figura 9-2. Agua a 15°C y 0°C

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

Para mantener un control adecuado de las temperaturas del agua, del horno y de las probetas se utilizó un pirómetro (ver Figura10-2), para lograr exactitud en las medidas de temperatura.



Figura 10-2. Pirómetro

Fuente: Aguirre, Diana, 2019

En la Tabla 7-2, se detallan 3 parámetros fundamentales que se deben considerar para realizar el temple en las probetas.

Tabla 7-2: Parámetros para el temple de las probetas

Probeta	Acero (AISI)	Temperatura de austenización (°C)	Tiempo de permanencia (min)	Medio de enfriamiento (Agua °C)
1	4140	750	29	Agua 15°C
2		800	29	
3		900	29	
4	4140	750	29	Agua 0°C
5		800	29	
6		900	29	
7	4340	750	25	Agua 15°C
8		800	25	
9		900	25	
10	4340	750	25	Agua 0°C
11		800	25	
12		900	25	

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

2.5. Análisis metalográfico

Para el análisis metalográfico se utilizaron dos tipos de microscopios, el microscopio óptico para verificar que la superficie del material este lista, es decir con el acabado superficial tipo espejo sin rayas, para luego llevar las muestras a las microscopio electrónico de barrido, en donde se obtienen las fotografías para el análisis correspondiente, calcular el tamaño de grano y posterior a esto determinar la longitud de las agujas de martensita, además que este cuenta con mayor número de ampliaciones y permite tomar medidas de longitud con mayor exactitud, se usa también el microscopio óptico para verificar la existencia de las microestructuras encontradas en el microscopio electrónico de barrido, estos equipos están ubicados en el laboratorio de Materiales en la Facultad de Mecánica – ESPOCH.

2.5.1. Procedimiento para la preparación de muestras metalográficas

Para lograr una mejor apreciación de las muestras en los microscopios, estas deben tener una superficie adecuada libre de impurezas e imperfecciones producto del maquinado y tratamiento térmico, para lograr esto se siguen las indicaciones que proporciona la norma ASTM-E3-11 (2017), para la preparación de muestras metalográficas para análisis microestructural.

1. Dimensiones de la probeta

Para facilitar el manejo de las probetas al momento de realizar el pulido grueso tanto como el fino, la norma recomienda muestras de 12mm² a 25mm², con una altura que facilite la manipulación, tomando en cuenta que muestras muy pequeñas o muy grandes, no son fáciles de preparar, por lo tanto, no se conseguirá la superficie deseada para observar en el microscopio.



Figura 11-2. Muestras de Acero AISI 4140

Fuente: Aguirre, Diana, 2019



Figura 12-2. Muestras de Acero AISI 4340

Fuente: Aguirre, Diana, 2019

2. Corte de las probetas

Al realizar el corte en las probetas la principal recomendación que proporciona la norma es evitar alteraciones en la estructura del material, existen tres formas de realizar este procediendo:

- **Cizallado:** puede realizarse con una máquina o manualmente, pero con una lubricación adecuada, se utiliza en materiales con durezas inferiores a 35 HRC.
- **Corte abrasivo con una cuchilla:** la ventaja de este tipo de corte es que la superficie de corte queda lisa, casi lista para el pulido, sin embargo, una mala decisión de las condiciones de corte puede alterar con facilidad la microestructura del material, por lo tanto se debe tener en cuenta el tipo de cuchilla recomendada de acuerdo con el tipo de material y mantener una lubricación adecuada, se recomienda para materiales blandos utilizar cuchillas de ataque, mientras que para materiales duros cuchillas de unión suave. Los discos de corte se usan con frecuencia en materiales cuya dureza esta alrededor de los 35 HRC.
Discos de óxido de aluminio: recomendado para materiales ferrosos
Discos de carburo de silicio: recomendado para aleaciones de metales no ferrosos
Discos impregnados con diamantes: recomendado para metales y cerámicos duros
- **Corte con flama:** este corte altera la estructura del material en el borde, por lo que se recomienda que la muestra que va a ser cortada con este método sea lo suficientemente grande para que extraer una muestra adecuada, es decir con las dimensiones anteriormente indicadas utilizando cualquiera de los métodos anteriores.

Para la investigación se cortaron las probetas mediante un corte abrasivo con una cuchilla de óxido de aluminio recomendada para materiales ferrosos.

3. Desbaste



Figura 13-2. Portalijas

Fuente: Aguirre, Diana; 2019

El proceso de desbaste consta de dos etapas: un lijado grueso y un lijado fino, se realiza en el banco portalijas que cuenta con un sistema de agua circula constantemente, que cumple dos funciones: refrigerar y barrer la superficie de la muestra para evitar que se acumulen partículas de material; las lijas son 3M ya que brindan una amplia gama de productos que van desde el lijado grueso hasta el fino.

- **Lijado grueso:** su principal objetivo es rectificar la superficie del material que puede presentar irregularidades resultado del corte y así lograr una superficie plana. Este proceso inicia con una lija número 100 o 150 dependiendo de las condiciones de la superficie y continua de manera sucesiva con las lijas 240, 320, 400, 500, y 600.



Figura 14-2. Muestra de superficie irregular

Fuente: Aguirre, Diana; 2019

- **Lijado fino:** para esta parte se continua con las lijas 800, 1000, 1200 y 1500; un papel de grano más fino que ayuda a borrar las rayas producidas por las lijas anteriores, al final del procedimiento en la superficie se puede observar un lijado unidireccional.



Figura 15-2. Resultado en la superficie del lijado grueso y fino

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

Este procedimiento se realiza de manera manual en los bancos ubicados en el laboratorio (Figura 13-2) de la institución, se coloca la lija en la superficie del banco y se debe sostener con la mano izquierda, con la mano derecha se mueve la probeta de arriba hacia abajo a lo largo de la lija, rotando 90° cada cierto tiempo.

4. Pulido

Al igual que los equipos anteriores el laboratorio de materiales cuenta con una máquina pulidora, con un disco horizontal cubierto con un paño al que se le agregan partículas abrasivas para lograr

un acabado tipo espejo en la superficie de la muestra, tanto el tipo de paño como el tipo de abrasivo, dependen del material que se va a pulir, ya que existen una gran variedad; se puede trabajar con paños de seda, lana, terciopelo e incluso paños de billar; actualmente se trabaja también con paños sintéticos.



Figura 16-2. Alumina 0,1 µm

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

Existen dos tipos de abrasivos comúnmente utilizados: Alumina (Al_3O_2) (ver Figura 5-2) recomendado para materiales ferrosos y el Óxido de Cerio para aluminio, magnesio y sus aleaciones.

Se decide pulir las probetas con alúmina como abrasivo de 0.1µm y un paño sintético de microfibra.



Figura 17-2. Máquina pulidora y Banco portalijs

Fuente: Aguirre, Diana; 2019

Una vez pulidas las probetas se almacenan en un recipiente cubiertas de algodón para evitar el contacto entre ellas y así la formación de rayas, que pueden dañar el acabado superficial tipo espejo de las muestras.

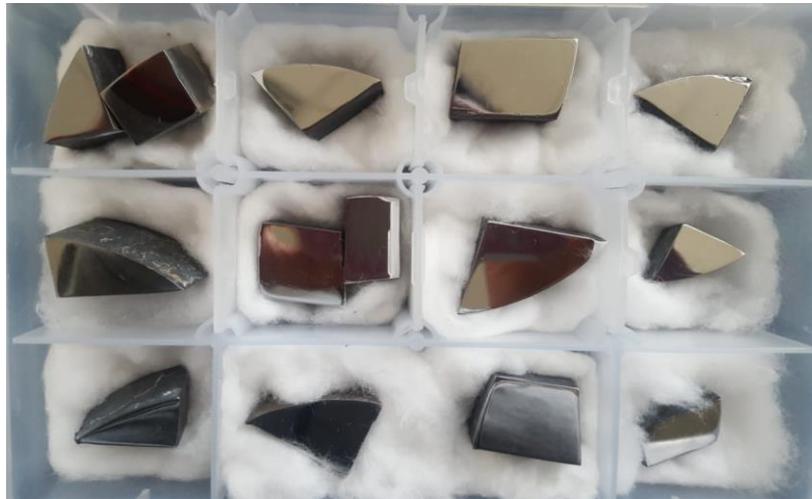


Figura 18-2. Muestras pulidas con un acabado superficial tipo espejo

Fuente: Aguirre, Diana; 2019

5. Ataque químico

Una vez que las probetas se encuentran con el acabado superficial deseado, es decir una superficie plana tipo espejo, sin rayas ni irregularidades, están listas para realizar el ataque químico, este es un procedimiento que sirve para revelar la información microestructural de los materiales, se usa un tipo de reactivo específico para cada material en función de lo que se quiere observar.

En base a la información detallada en la Norma ASTM E-407 (2015) las probetas son atacadas químicamente con Nital al 2% (Ácido Nítrico y alcohol), recomendado para aceros al carbono y permite diferenciar la ferrita de la martensita.



Figura 19-2. Ataque químico con Nital al 2%

Fuente: Aguirre, Diana; 2019

2.5.2. Obtención de las muestras metalográficas

Al terminar con el procedimiento anterior, se procede a tomar las imágenes de las muestras del material, con ampliaciones indicadas; en el microscopio electrónico de barrido ya que las imágenes son de mejor calidad y facilita tomar las mediciones necesarias para cumplir con el objetivo establecido.

Para utilizar el microscopio electrónico de barrido hay que tener en cuenta algunas recomendaciones:

- Las probetas deben estar limpias y secas para ser montadas en el portaprobetas, de ser necesario se puede utilizar pega de carbono para sujetar las muestras.
- Verificar que el voltaje se encuentre constante en el equipo
- Mantener la ventilación adecuada en la cámara de vacío para generar la presión nominal
- Es necesario ajustar el escenario manualmente en la botonera que se encuentra en el exterior del equipo y una vez que se haya llegado al enfoque deseado, ajustar la perilla de enfoque para mejorar la calidad de la imagen.

2.6. Tamaño de grano de austenita

Se decide calcular el tamaño de grano de austenita, considerándola como la fase madre de la transformación martensítica.

Para medir el tamaño de grano en las muestras metalográficas se utilizó la norma ASTM E112 (2013), mediante el método de las intercepciones con las siguientes fórmulas:

$$G = (6.643856 * \log \bar{N}_L) - 3.288 \quad (5-2)$$
$$\bar{N}_L = \frac{Ni}{L/M}$$

$$\bar{l} = L/Ni \quad (6-2)$$

Donde:

Ni: número de intercepciones

L: Longitud de la línea

M: Aumento de la imagen

N_L: Número de intercepciones por unidad de longitud

\bar{l} : Intercepción media lineal

2.6.1. Procedimiento para determinar el tamaño de grano

1. Identificar la ampliación de la imagen
2. Identificar los límites de grano, el cambio de dirección de las agujas de martensita indica el límite de un grano de austenita.
3. Trazar líneas aleatorias de longitud conocida
4. Contar el número de intercepciones.

Si la línea pasa por el grano N es 1

Si la línea es tangencial a un límite de grano N es 0.5

Si la línea termina dentro de un grano N es 0.5

5. Se procede a reemplazar los datos en las ecuaciones (5-2)

2.6.2. Cálculo del tamaño de grano

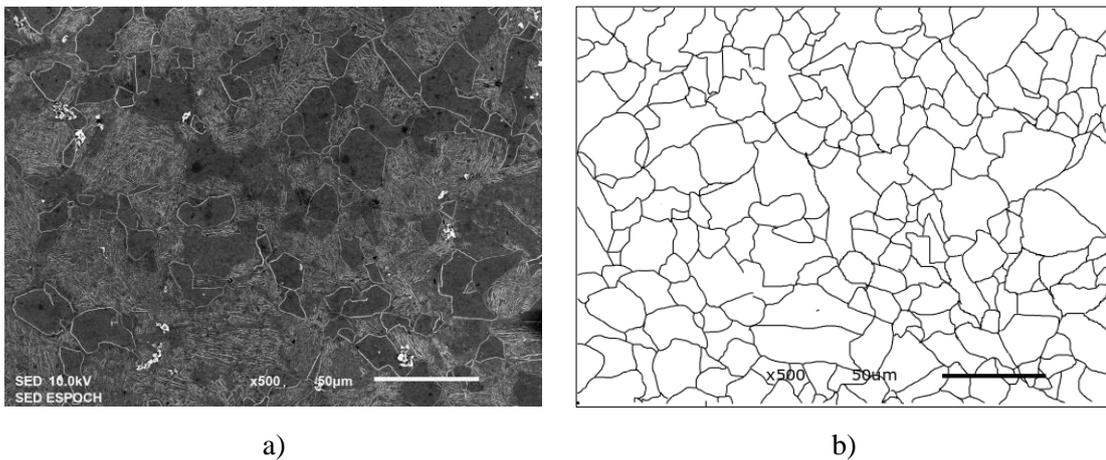


Figura 20-2. a) Microestructura de un acero b) Límites de grano en una microestructura

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

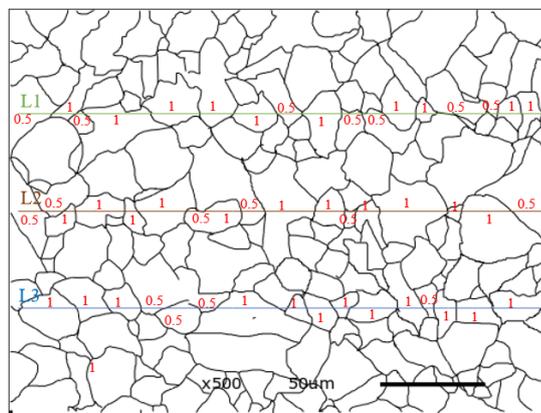


Figura 21-2. Plantilla para calcular el tamaño de grano

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

Tabla 8-2: Cálculo del tamaño de grano

N° línea	L (mm)	N° de granos	N _L	\bar{l} (mm)	G
1	0.25	13.5	54	0.0185	8.22
2	0.25	14	56	0.0179	8.33
3	0.25	14	56	0.0179	8.33
			Promedio	0.0177	8.358

Realizado por : Aguirre, Diana, 2019

Con los valores calculados para el \bar{l} , ingresamos en la Tabla 9-2, para determinar el tamaño de grano ASTM y compararlo con el tamaño de grano calculado mediante la fórmula

Tabla 9-2: Tamaño de Grano ASTM

Tamaño de grano	Granos/Unidad de área		Área promedio del grano		Diámetro promedio		Línea media de intercepción		\bar{N}_L
No	\bar{N}_A		\bar{A}		\bar{d}		\bar{l}		
G	No./in. ² at 100X	No./mm ² a 1X	mm ²	µm ²	mm	µm	mm	µm	No./mm
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.508	508	0.4525	452.5	2.21
0	0.5	7.75	0.129	129032	0.3592	359.2	0.32	320	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1	1	15.5	0.0645	64516	0.254	254	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2	2	31	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.16	160	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.151	151	0.1345	134.5	7.43
3	4	62	0.0161	16129	0.127	127	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4	8	124	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.08	80	12.5
4.5	11.31	175.36	0.0057	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5	16	248	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6	32	496	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.04	40	25
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7	64	992	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8	128	1984	0.0005	504	0.0225	22.5	0.02	20	50
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9	256	3968	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10	512	7936	0.00013	126	0.0112	11.2	0.01	10	100
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11	1024	15872	0.000063	63	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4

Continua

Continúa

11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.006	5.9	168.2
12	2048	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.005	5	200
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13	4096	63488.1	0.000016	15.8	0.004	4	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.003	3	336.4
14	8192	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400

Fuente: (ASTM, 2013, p. 9)

Realizado por : Aguirre, Diana, 2019

2.7. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas

A fin de determinar algunas de las propiedades mecánicas del material en estudio, se decide realizar ensayos de dureza y tracción y se registran los datos para analizarlos y ser comparados en función al tamaño de la aguja de la martensita.

2.7.1. Dureza

Al tratar térmicamente las muestras de acero, obtenemos martensita, por tal razón se logra endurecer el material, para medir la dureza se realiza el ensayo Rockwell, escala C, con un indentador de diamante y una precarga de 150 kgf (1470 N), como especifica la norma ASTM E18-15 (2015), la misma que se usa para hierros fundidos, aceros endurecidos, titanio y materiales duros.

Para obtener resultados más precisos la norma recomienda que las caras de la muestra sean planas, uniformes, sin incrustaciones de óxidos o impurezas. La preparación de la muestra se debe realizar de manera que se evite alguna alteración del endurecimiento de la superficie del material.

El ensayo consta de las siguientes etapas:

- El indentador se pone en contacto con la muestra de prueba, se indica la carga de la prueba, que depende del tipo de escala Rockwell, para este caso 1470 N y se procede a encerrar el equipo, manteniendo por unos segundos la fuerza preliminar.
- Luego accionamos la palanca de modo que la fuerza del indentador se incrementa por la fuerza preliminar F1, hasta alcanzar la fuerza de prueba.
- Luego de unos segundos, regresamos la palanca a su posición original a fin de eliminar la fuerza de prueba, el valor de la dureza Rockwell para la muestra es la que marca la pantalla del equipo. Como se observa en la Figura 22-2, el valor de la dureza es el resultado de la diferencia de las alturas que deja de la huella del indentador sobre la muestra.



Figura 22-2. Identador en contacto con la muestra

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

- Como el resultado de este ensayo es un valor directo, se recomienda tomar algunas mediciones y realizar un promedio, en la Figura 23-2, se aprecia la distancia que debe existir entre cada medición, como recomienda la norma, donde d es el diámetro de la huella del indentador.

$$HR = \frac{HR_1 + HR_2 + HR_3 + \dots + HR_n}{n} \quad (7-2)$$

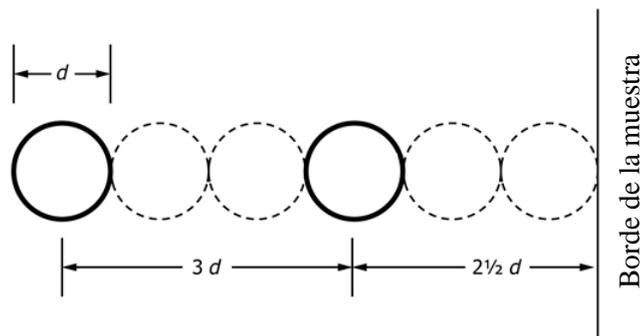


Figura 23-2. Espacio mínimo entre indentaciones

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

CAPITULO III

3. MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1. Temperaturas críticas para los aceros AISI 4140 y AISI 4340

La temperatura de transformación Ac1, para los dos aceros es la misma, ya que corresponde a la temperatura de la reacción eutectoide del diagrama Fe-C.

$$Ac1 = 727^{\circ}C$$

Tabla 1-3: Temperatura crítica Ac3 y temperaturas de transformación inicial (Ms) y final de la martensita (Mf)

Tipo de Acero	Ac3 (°C)	Ms (°C)	Mf (°C)
AISI 4140	788,235	317,416	132,416
AISI 4340	757,85	282,47	97,47

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

3.2. Carbono equivalente

Con la ecuación 1.1 se realizó el cálculo del carbono equivalente, valor que indica la capacidad de soldabilidad de los aceros, con los siguientes resultados:

Tabla 2-3: Nivel de soldabilidad de los aceros AISI 4140 y AISI 4340

Tipo de Acero	% Carbono	% Carbono equivalente	Nivel de soldabilidad
AISI 4140	0.43	0.7597	3
AISI 4340	0.42	0.926	3

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

En la tabla 2-3 se observa como el porcentaje de carbono equivalente varia notablemente el uno del otro a pesar de tener contenidos de carbono semejantes, esto se debe a la que fórmula está en función del porcentaje de los elementos aleantes y esta composición cambia entre estos aceros.

En la Figura 1-3, se ha trazado líneas para determinar el nivel de soldabilidad de los aceros AISI 4140 línea azul y el Acero AISI 4340 línea naranja, al intersecarse las líneas en función al contenido de carbono y al porcentaje de carbono equivalente calculado, los dos aceros caen la

zona III, lo que quiere decir que el material presentará fallas al ser soldado o que el material no es soldable, la principal causa se debe a que los materiales son relativamente duros.

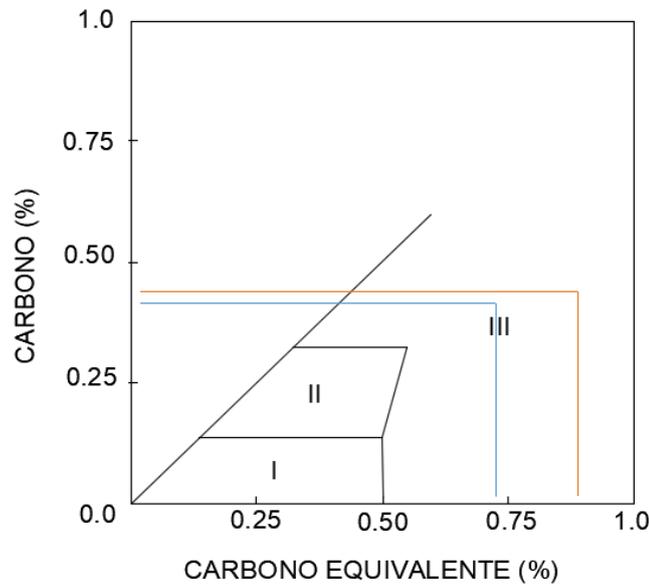


Figura 1-3. Nivel de soldabilidad para los aceros
AISI 4140 y AISI 4340

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

3.3. Etapas del tratamiento térmico.

3.3.1. Etapas del tratamiento térmico para el Acero AISI 4140 templado en agua a 15°C

En el Gráfico 1 se puede observar que el horno se demora en llegar a los 750°C, 26 minutos, luego 10 minutos más en llegar a los 800°C y 23 minutos después llega a los 900 °C, demorándose en la etapa de calentamiento en total 59 minutos, al llegar a cada una de las temperaturas de calentamiento las probetas permanecen en el horno durante 29 minutos, a fin de lograr una transformación homogénea de la austenita, este tiempo es calculado en función al espesor de la muestra, transcurridos los 29 minutos se sacan las probetas del horno y se sumergen en agua a 15°C de 1 a 3 minutos aproximadamente hasta que las probetas lleguen a la temperatura ambiente, finalmente se retiran del agua y se las deja secar. En el Gráfico 1-3, se aprecia que la temperatura de calentamiento no supera la temperatura crítica Ac3 que corresponde a 788.2°C, por lo que probablemente no habrá una transformación austenítica, por ende, no se formaran las agujas de martensita, para la probeta 2 (Ver gráfico 1b-3) la temperatura de calentamiento supera mínimamente la temperatura crítica Ac3, pues la diferencia es de apenas 11.8°C, existirá una transformación austenítica, pero en las imágenes de la microestructura se deberá analizar si existe o no la presencia de austenita retenida. Finalmente en la probeta 3 (ver gráfico 1c-3) se logra superar la temperatura crítica Ac3 con 111.8°C, cumpliendo con lo que recomienda la teoría, que

dice, que para lograr una transformación homogénea de la austenita se debe incrementar al menos de 30°C a 50°C la temperatura Ac3 (Torres, 2004, p20).

El tratamiento térmico para las muestras de Aceros AISI 4140 ha tomado en total 1 hora con 37 minutos, considerando el tiempo de calentamiento de las muestras, el tiempo de permanencia en el horno y el tiempo que tarda el material en llegar a la temperatura ambiente sumergidas en el medio de enfriamiento (ver gráfico 1d-3)

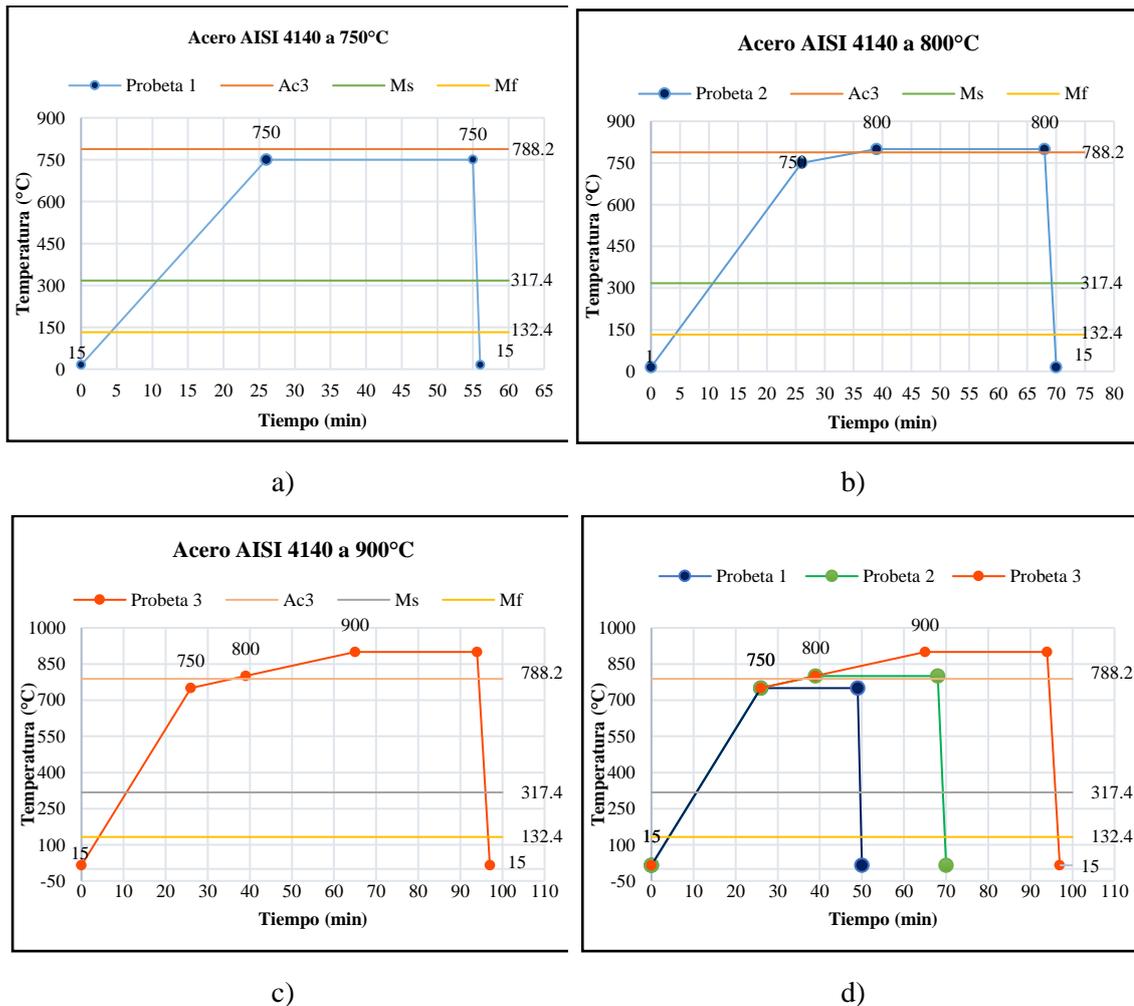


Gráfico 1-3. Etapas del tratamiento térmico para el Acero AISI 4140 calentado a a)750°C, b)800°C c) 900°C , templado en agua a 15°C

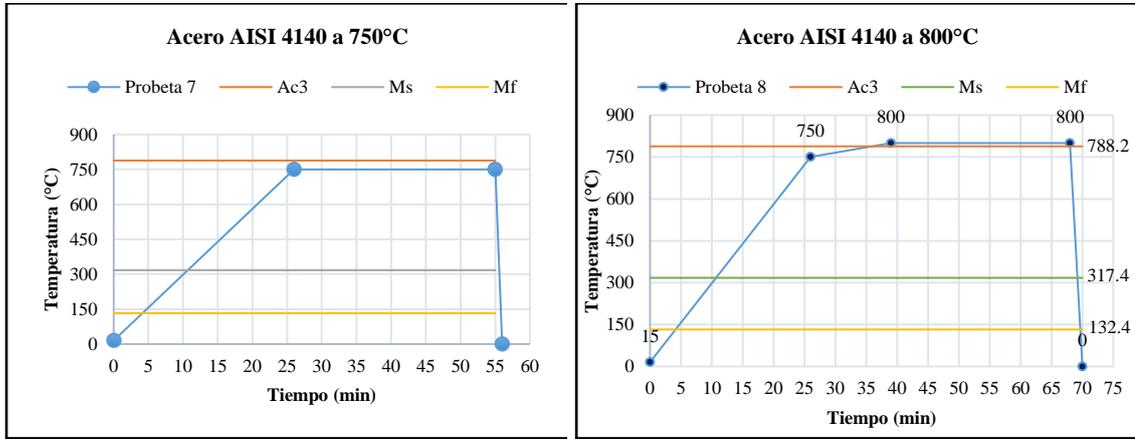
Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

3.3.2. Etapas del tratamiento térmico para el Acero AISI 4140 templado en agua a 0°C

Para este tratamiento térmico el medio de enfriamiento es el agua a 0°C.

Para las siguientes muestras de Acero AISI 4140, la etapa de calentamiento y permanecía en el horno son las mismas del Gráfico 2-3, ya que las probetas fueron calentadas a la mismas temperaturas y permanecieron en el horno durante 29 minutos, a fin de lograr una transformación homogénea de la austenita, este tiempo es calculado en función al espesor de la muestra,

transcurridos los 29 minutos se sacan las probetas del horno y se sumergen en agua a 0°C de 1 a 3 minutos aproximadamente agitando las probetas constantemente hasta que lleguen a la temperatura ambiente.



a)

b)

c)

d)

Gráfico 2-3. Etapas del tratamiento térmico para el Acero AISI 4140 calentado a a)750°C, b)800°C c) 900°C, templado en agua a 0°C

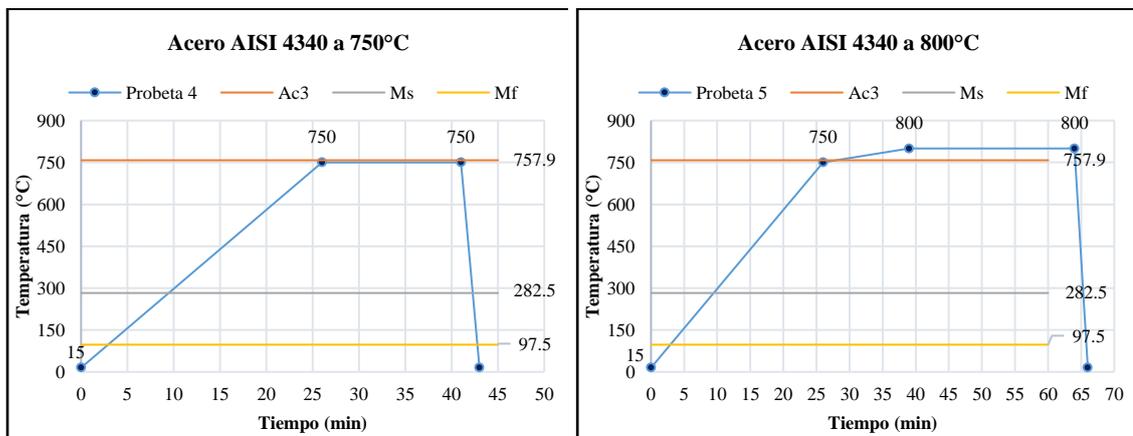
Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

En la probeta 7 (ver Gráfico 2a-3) no supera la temperatura crítica Ac3 que corresponde a 788.2°C, la probeta 8 (ver Gráfico 2b-3) supera esta temperatura con a apenas 11.8 °C, sin embargo en el análisis metalográfico habrá que observar que tanto influye el medio de enfriamiento en la transformación de la austenita en martensita, y si se evidencia o no la presencia de austenita retenida, en la probeta número 9 (Ver Gráfico 2c-3) por la diferencia de temperaturas considerable de 111.8°C, se garantiza la formación de las agujas de martensita, ya que la temperatura de calentamiento es la necesaria para lograr una transformación homogénea de la austenita. En el Gráfico 2d-3, se observa que este proceso dura 1 hora con 36 minutos.

3.3.3. Etapas del tratamiento térmico para el Acero AISI 4340 templado en agua a 15°C

En el Gráfico 3-3 se puede observar que el horno se demora en llegar a los 750°C, 26 minutos, luego 10 minutos más en llegar a los 800°C y 23 minutos después llega a los 900 °C, demorándose en la etapa de calentamiento en total 59 minutos, al llegar a cada una de las temperaturas de calentamiento las probetas permanecen en el horno durante 25 minutos, a fin de lograr una transformación homogénea de la austenita, este tiempo es calculado en función al espesor de la muestra, transcurridos los 29 minutos se sacan las probetas del horno y se sumergen en agua a 15°C de 1 a 2 minutos aproximadamente hasta que las probetas lleguen a la temperatura ambiente, finalmente se retiran del agua y se las deja secar. En el Gráfico 3a-3, que corresponde a la probeta 4, se aprecia que la temperatura de calentamiento no supera la temperatura crítica Ac3 que corresponde a 757,9°C, por lo que probablemente no habrá una transformación austenítica, por ende, no se formaran las agujas de martensita, pero no hay que dejar de lado el análisis metalográfico para verificar si se dio o no la transformación austenítica ya que hay que tomar en cuenta la influencia de los elementos aleantes o medio de enfriamiento, para la probeta 5 (Ver gráfico 3b-3) la temperatura de calentamiento supera la temperatura crítica Ac3 con 42.1°C, es decir que si será posible la transformación austenítica, Finalmente en la probeta 6 (ver gráfico 3c-3) se logra superar la temperatura crítica Ac3 con 142.1°C, lo que garantiza la formación de las agujas de martensita, sin embargo en todos los casos habrá que analizar la existencia o no de austenita retenida.

El tratamiento térmico para las muestras de Aceros AISI 4340 ha tomado en total 1 hora con 32 minutos, considerando el tiempo de calentamiento de las muestras, el tiempo de permanencia en el horno y el tiempo que tarda el material en llegar a la temperatura ambiente sumergidas en el medio de enfriamiento (ver gráfico 3d-3)



a)

b)

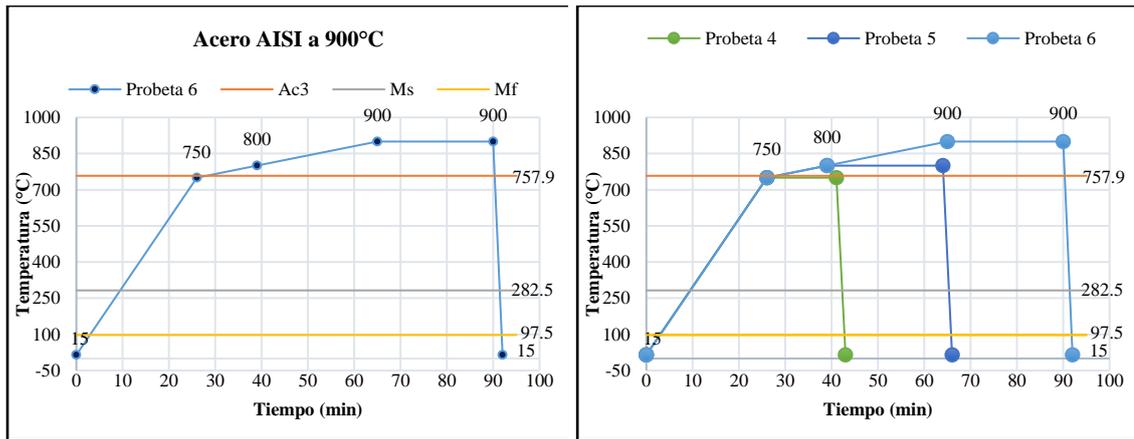


Gráfico 3-3. Etapas del tratamiento térmico para el Acero AISI 4340 calentado a a) 750°C, b) 800°C c) 900°C, templado en agua a 15°C

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

3.3.4. Etapas del tratamiento térmico para el Acero AISI 4340 templado en agua a 0°C

Para las siguientes muestras de Acero AISI 4340, la etapa de calentamiento y permanencia en el horno son las mismas del Gráfico 3-3, ya que las probetas fueron calentadas a la mismas temperaturas y permanecieron en el horno durante 25 minutos. A fin de lograr una transformación homogénea de la austenita, este tiempo es calculado en función al espesor de la muestra, transcurridos los 25 minutos se sacan las probetas del horno y se sumergen en agua a 0°C de 1 a 2 minutos aproximadamente agitando las probetas constantemente hasta que lleguen a la temperatura ambiente, se puede observar de la misma forma que la probeta 10 (ver Gráfico 4a-3) no supera la temperatura crítica Ac3 que corresponde a 757.9°C, pero no se debe dejar de lado el análisis metalográfico para verificar si se dio o no la transformación austenítica, ya que es necesario tomar en cuenta la influencia de los elementos aleantes o medio de enfriamiento, la probeta 11 (ver Gráfico 4b-3) supera esta temperatura con apenas 42.1 °C y la probeta 12 (Ver Gráfico 4c-3) con 142.1°C, lo que garantiza la formación de las agujas de martensita, sin embargo en todos los casos habrá que analizar la existencia o no de austenita retenida.

El tratamiento térmico para las muestras de Aceros AISI 4340 ha tomado en total 1 hora con 32 minutos, considerando el tiempo de calentamiento de las muestras, el tiempo de permanencia en el horno y el tiempo que tarda el material en llegar a la temperatura ambiente sumergidas en el medio de enfriamiento (ver gráfico 4d-3)

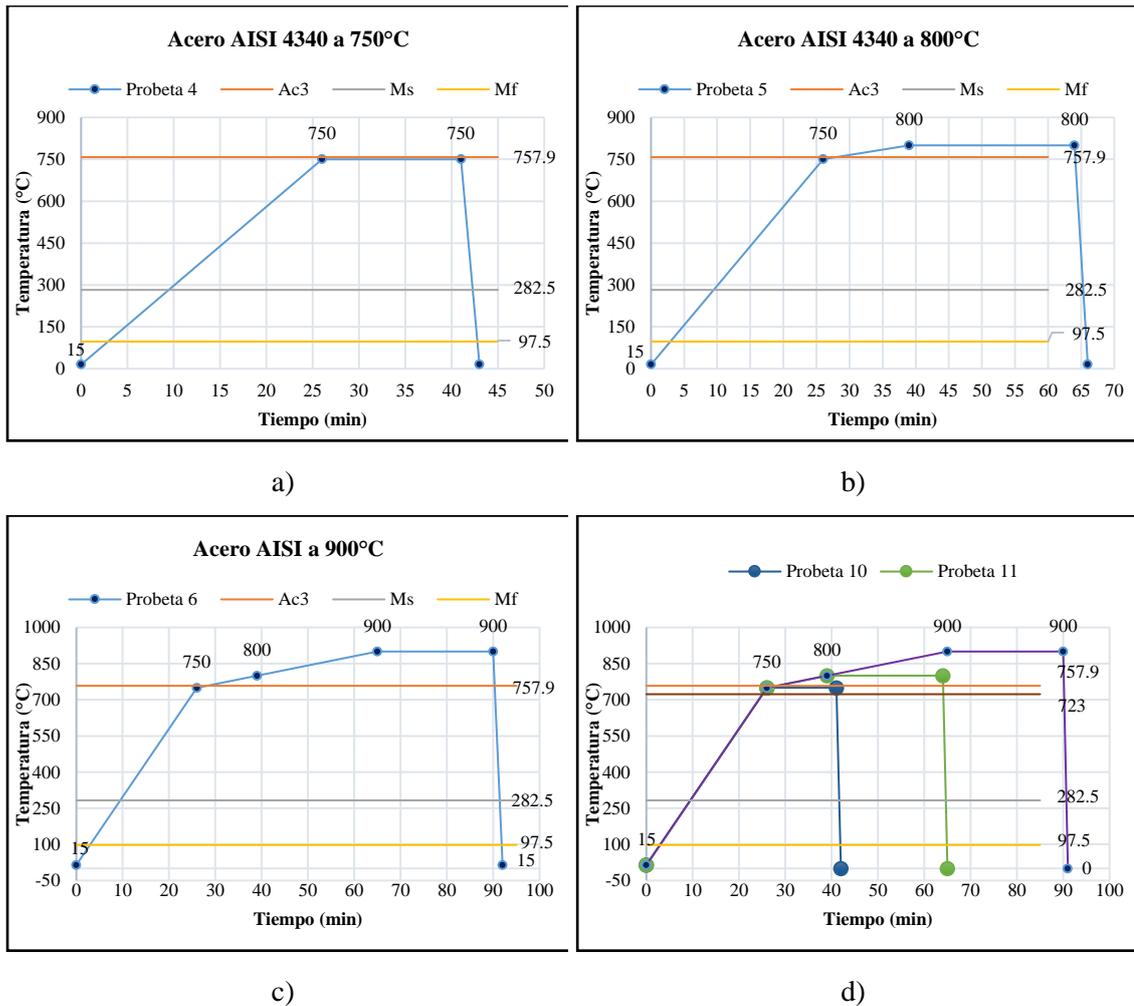


Gráfico 4-3. Etapas del tratamiento térmico para el Acero AISI 4340 calentado a a) 750°C, b) 800°C c) 900°C, templado en agua a 0°C

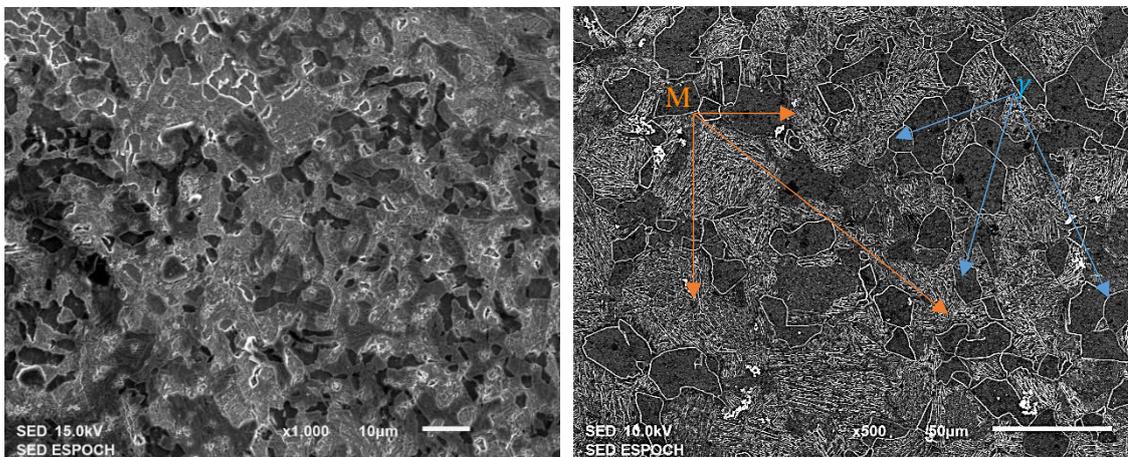
Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

3.4. Microestructura de los aceros tratados térmicamente

3.4.1. Microestructura del Acero AISI 4140 templado en agua a 15°C

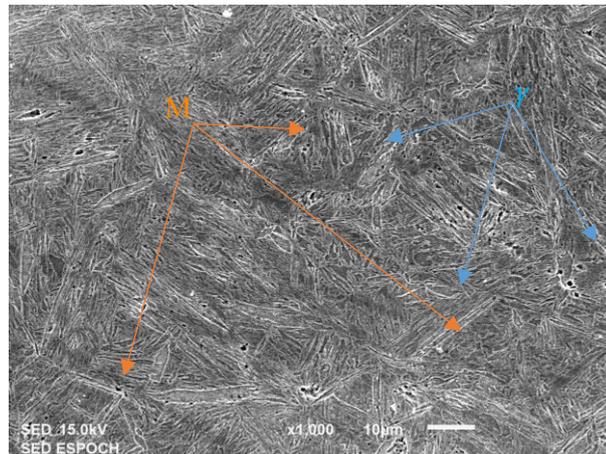
En la Figura 2-3, se observan las microestructuras presentes en el acero AISI 4140 tratados térmicamente, las muestras fueron templadas en agua a 15°C luego de haber sido calentadas a 750°C, 800°C y 900°C, y atacadas químicamente con Nital al 2% para distinguir con facilidad la martensita, se puede evidenciar con el cambio en la microestructura del material, sin embargo en la Figura 2-3 a, no se observa la formación de martensita, esto se debe a que no se superó la temperatura crítica Ac3. Para lograr la transformación completa de la austenita, como lo indica el Gráfico 1-3; en la Figura 2-3.b y Figura 2-3 se observa que parte de la austenita logra transformarse en martensita, identificando la martensita como las agujas de contorno blanco y la

austenita en color negro, que en este caso vendría a representar la austenita retenida, como producto de una transformación incompleta de la fase austenítica.



a)

b)



c)

Figura 2-3. Acero AISI 4140 Templado en agua a 15°C con temperaturas de austenización de a) 750°C b) 800°C y c) 900°C atacadas químicamente con Nital al 2%

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

3.4.2. Microestructura del Acero AISI 4140 templado en agua a 0°C

Para el Acero AISI 4140, templado en agua a 0°C, se evidencia la formación de las agujas de martensita desde la primera temperatura de calentamiento (Figura 3-3.a), a pesar de no haber superado la temperatura crítica Ac_3 igual a 788.2°C, de acuerdo con la teoría la austenita es estable únicamente a temperaturas altas, por lo que se puede decir que a 750°C, que supera la temperatura de la reacción eutécticoide Ac_1 igual a 723°C con 27°C, se logra transformar en martensita gracias a su inestabilidad y por el efecto del enfriamiento, que para el temple debe ser muy rápido, lo que representa un cambio brusco para la microestructura del material.

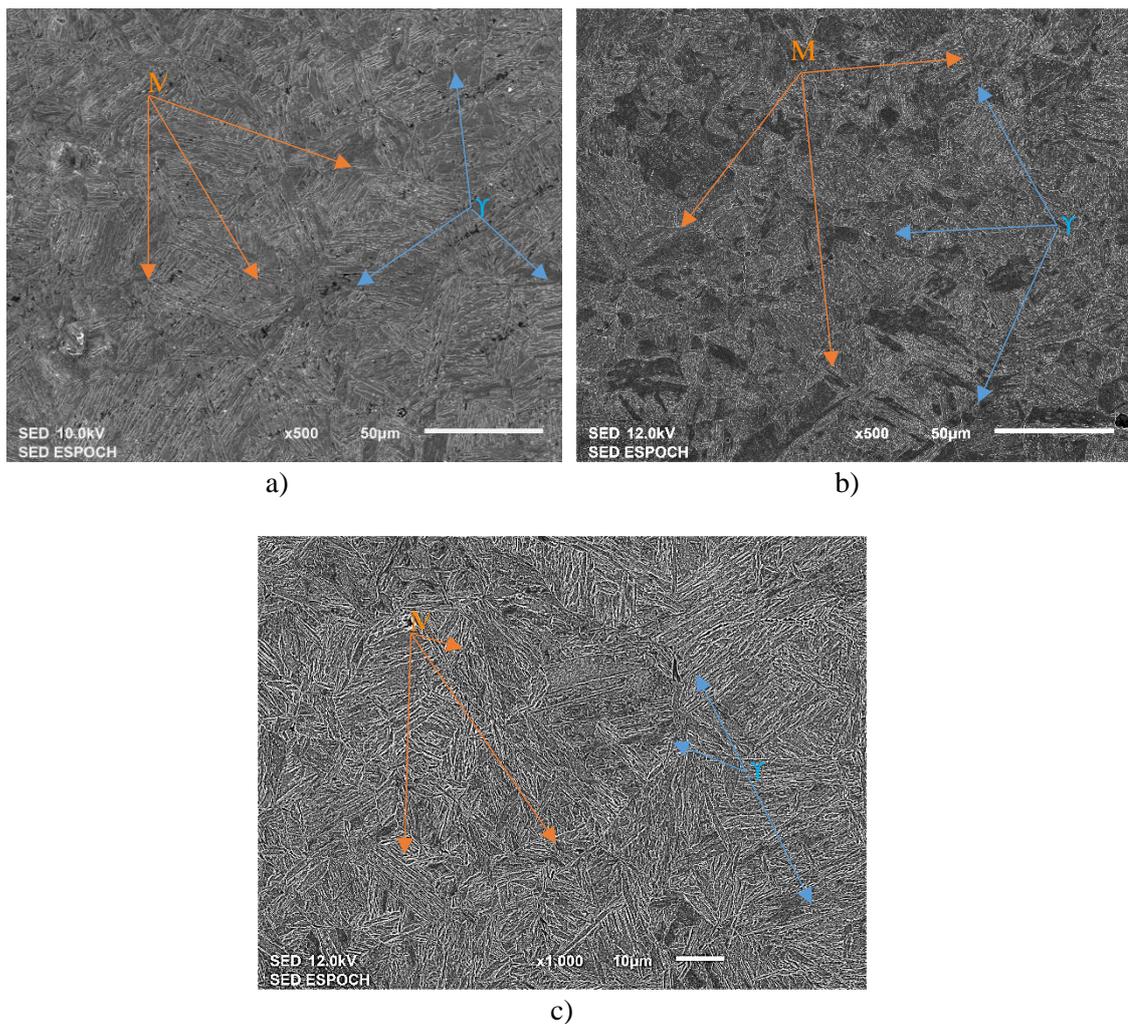


Figura 3-3. Acero AISI 4140 Templado en agua a 0°C con temperaturas de austenización de a) 750°C b) 800°C y c) 900°C atacadas químicamente con Nital al 2%

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

Para las siguientes temperaturas de calentamiento 800°C y 900°C, Figura 3-3b y 3-3c, diferenciar la martensita se vuelve un poco más fácil, es evidente la formación de la martensita en forma de listones, forma típica de los aceros de medio carbono, sin embargo, se sigue evidenciando la presencia de austenita retenida, una de las causas podría ser el efecto de los elementos aleantes.

3.4.3. *Microestructura del Acero AISI 4340 templado en agua a 15°C*

En la Figura 4-3, se pueden observar las microestructuras presentes en el acero AISI 4140 tratados térmicamente, las muestras fueron templadas en agua a 15°C luego de haber sido calentadas a 750°C, 800°C y 900°C, y atacadas químicamente con Nital al 2% para distinguir con facilidad la martensita.

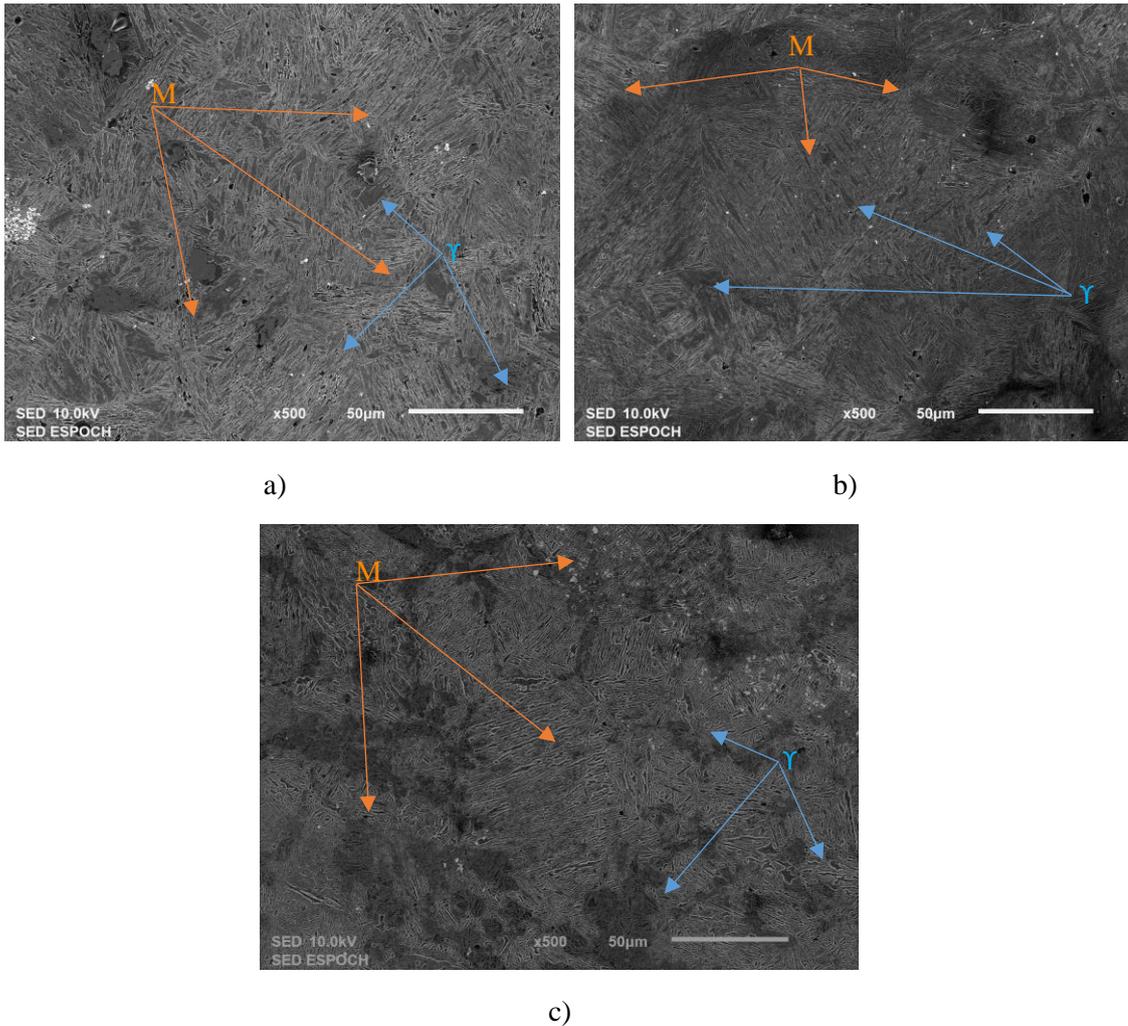


Figura 4-3. Acero AISI 4340 Templado en agua a 15°C con temperaturas de austenización de a) 750°C b) 800°C y c) 900°C, atacados químicamente con Nital al 2%

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

Se puede evidenciar el cambio en la microestructura del material, pues se observa la formación de las agujas de martensita en forma de listones desde la primera temperatura de austenización 750°C (Figura 4-3.a), en las siguientes temperaturas de autenticación, (Figuras 4-3.a y 4-3.b) se aprecia con facilidad la forma aguja, fina y alargada que tiene la estructura martensítica. En las tres muestras se observa la presencia de austenita retenida, partes más oscuras ubicadas por sectores. A pesar de no haber superado la temperatura crítica Ac3 igual a 757.1°C, se ouno de los factores que hicieron posible la formación de la martensita podría ser la influencia de los elementos aleantes sobre la microestructura de los aceros, más el tratamiento térmico que representa un cambio brusco para el material al cambiar la temperatura rápidamente.

3.4.4. *Microestructura del Acero AISI 4340 templado en agua a 0°C*

Para el Acero AISI 4340, templado en agua a 0°C, en la Figura 5-3.a, se puede observar las gujas de martensita y como crecen a medida que la temperatura de austenización incrementa.

Para las siguientes temperaturas de austenización 800°C y 900°C, (figura 5-3b y 5-3c) diferenciar la martensita se vuelve un poco más fácil, es evidente la formación de la martensita en forma de listones, forma típica de los aceros de medio carbono, sin embargo, se sigue evidenciando la presencia de austenita retenida

Analizar los factores que hacen que la austenita se quede retenida y no se transforme completamente, podría ser un tema de investigación, ya que al lograr controlar esta microestructura y lograr una transformación completa las propiedades que mejora la transformación austenítica podrían llegar al máximo.

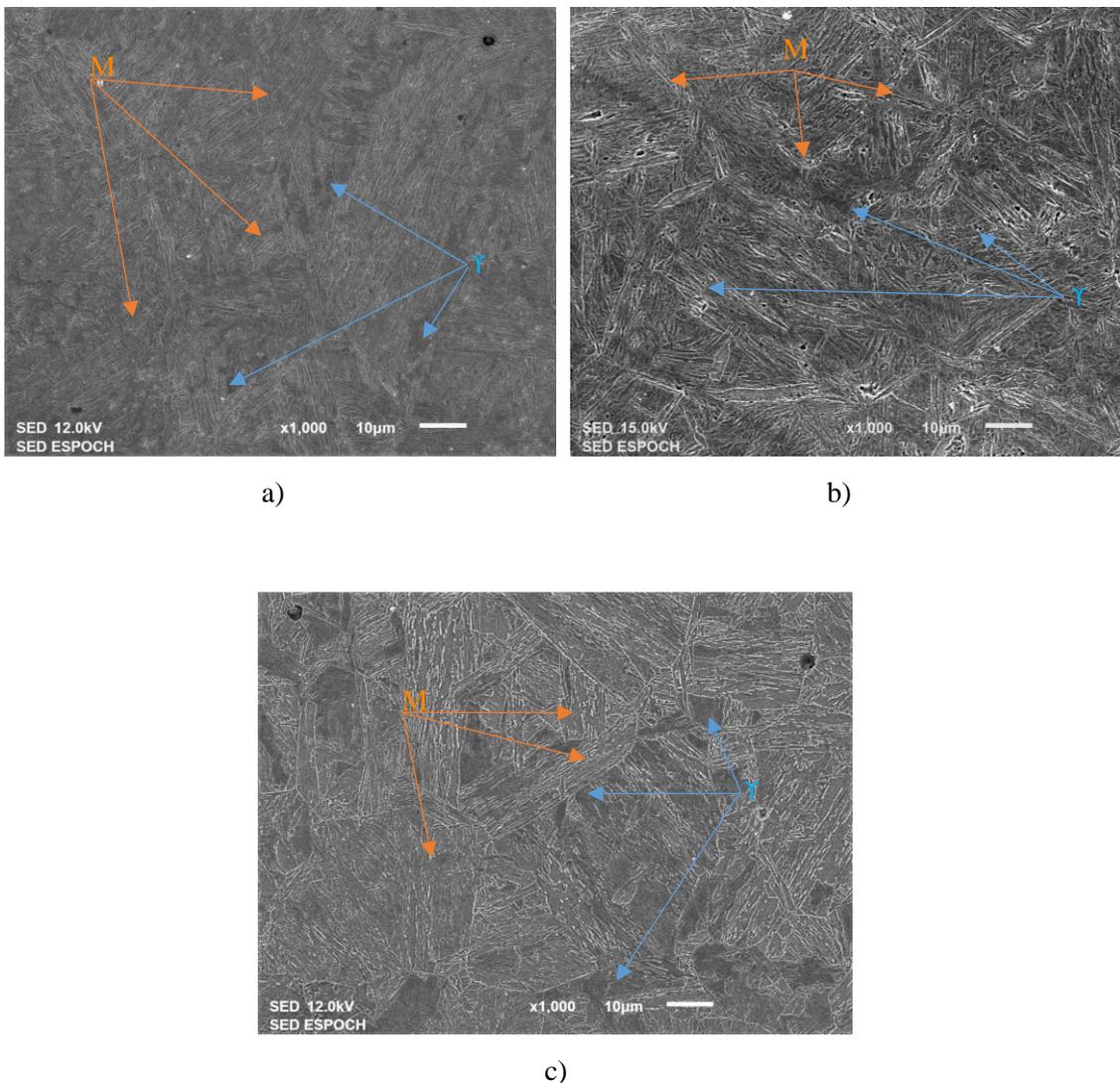


Figura 5-3. Acero AISI 4340 Templado en agua a 0°C con temperaturas de austenización de a) 750°C b) 800°C y c) 900°C, atacados químicamente con Nital al 2%

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

3.5. Longitud del tamaño de las agujas de la martensita

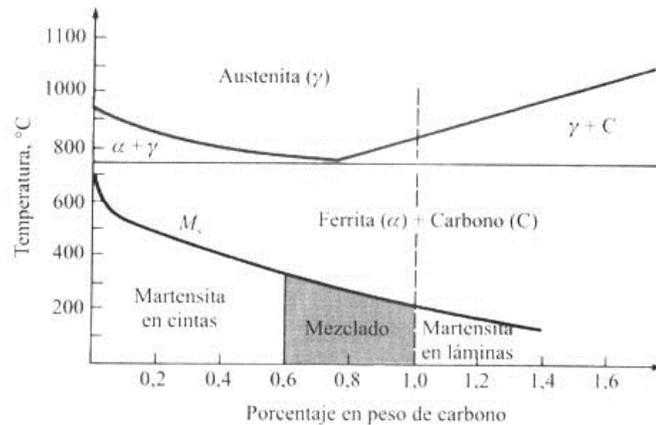


Figura 6-3: Longitud del tamaño de las agujas de martensita.

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

Los métodos para determinar el tamaño de grano descritos en el marco teórico referencial generalmente se aplican para granos de bordes regulares y equiaxiales, medir la martensita que son agujas finas, alargadas y de forma irregular, resulta complicado, partiendo del proceso de formación mismo de esta microestructura, sin embargo, al realizar el análisis metalográfico en las imágenes se puede apreciar la formación de al menos una aguja de martensita principal que va de borde a borde en los granos de austenita, la fase previa a la transformación martensítica, bajo este resultado se podría decir con cierto grado de confiabilidad que el tamaño de grano de austenita calculado está relacionado directamente con la longitud de las agujas de martensita en los aceros, para comprobar esto se ha calculado el diámetro promedio del grano de austenita que reemplazará a la longitud de las agujas de martensita.

3.5.1. Tamaño de grano de la Austenita

Tabla 3-3: Tamaño del grano de Austenita

Muestra	T (°C)	\bar{l} (mm)	Tamaño de grano Promedio	Grano ASTM
AISI 4140, temple en agua a 15°C	800	0.017	8.516	8.5
	900	0.025	7.33	7.5
AISI 4340, temple en agua a 15°C	750	0.02	8.016	8
	800	0.028	7.006	7
	900	0.034	6.44	6.5

Continúa

Muestra	T (°C)	\bar{l} (mm)	Tamaño de grano Promedio	Grano ASTM
AISI 4140, temple en agua a 0°C	750	0.023	7.651	7.5
	750	0.023	7.651	7.5
	800	0.026	7.25	7
	900	0.033	6.541	6.5
AISI 4340, temple en agua a 0°C	750	0.025	7.408	7.5
	800	0.027	7.159	7
	900	0.33	6.541	6.5

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

Una vez que se ha calculado el tamaño de grano de Austenita, en la Tabla 9-2, se puede observar que a cada grano de austenita le corresponde un diámetro promedio, que como se ha mencionado corresponde a la longitud de las agujas de martensita.

3.5.2. Longitud de las agujas de Martensita

Tabla 4-3: Longitud de las agujas de Martensita

Muestra	T (°C)	Grano ASTM	Longitud de la martensita (mm)	Longitud promedio (mm)	Error
AISI 4140, temple en agua a 15°C	800	8.5	0.0189	0.019	1%
	900	7.5	0.0267	0.0275	3%
AISI 4340, temple en agua a 15°C	750	8	0.0225	0.022	2%
	800	7	0.0318	0.307	2%
	900	6.5	0.0378	0.037	2%
AISI 4140, temple en agua a 0°C	750	7.5	0.0267	0.0259	3%
	800	7	0.0318	0.0317	0%
	900	6.5	0.0378	0.038	1%
AISI 4340, temple en agua a 0°C	750	7.5	0.0267	0.0271	1%
	800	7	0.0318	0.0322	1%
	900	6.5	0.0378	0.0375	1%

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

En la Tabla 4-3, se detallan las longitudes de las agujas de martensita calculadas a partir del tamaño de grano de austenita, teniendo agujas con una longitud mínima de 0.0189 mm que

corresponde al Acero AISI 4140 a 800°C templado en agua a 15°C y una longitud máxima de 0.0378mm, para el Acero AISI 4140 a 900°C templado en agua a 0°C.

Hasta aquí se cumple con el primer objetivo, obtener agujas de martensita con diferentes longitudes, esto gracias al efecto del temple en los aceros, variación de la temperatura y elementos aleantes del material, Acero AISI 4140 a 750°C templado en agua a 15°C, pues como se observa en la Figura 2-3a, la austenita no logró una transformación austenítica completa.

Es importante notar que las gujas de martensita dejan de crecer cuando llegan al siguiente límite de grano de austenita y cambian su dirección de manera instantánea.

3.6. Propiedades mecánicas de los Aceros AISI 4140 y AISI 4340

3.6.1. Dureza

Se tomaron 5 mediciones como especifica la norma para el ensayo de dureza Rockwell.

Tabla 5-3: Dureza de los aceros AISI 4140 y AISI 4340

Muestra	Longitud de Martensita	Medición de dureza HRC					Dureza (HRC)
	(mm)	1	2	3	4	5	
AISI 4140 temple en agua a 15°C	0	48	48	45	49	48	47.6
	0.0189	60	57	54	52	50	54.6
	0.0267	56	57	60	55	59	57.4
AISI 4340, temple en agua a 15°C	0.0225	48	56.5	49	56	51	52.1
	0.0318	56	55	55	60	56	56.4
	0.0378	66	62	59	56	58	60.2
AISI 4140 temple en agua a 0°C	0.0267	41	51	45	50	50	47.4
	0.0318	43	57	49	55	55	51.8
	0.0378	56	50	56	58	52	54.4
AISI 4340 temple en agua a 0°C	0.0267	40	46	45	50	48	45.8
	0.0318	46	59	53	58	55	54.2
	0.0378	55	58	58	60	57	57.6

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

En la tabla 5-3, se observan los resultados del ensayo de dureza Rockwell C, obteniendo una dureza máxima de 60.2 HRC y una dureza mínima de 45.8 HRC.

3.6.2. Tracción

Los ensayos de tracción se realizaron en el Laboratorio de Resistencia de materiales del Centro de Fomento Productivo Metalmeccánico Carrocero de Ambato, con la siguiente la siguiente descripción

Tabla 6-3: Datos generales del ensayo de Tracción

Método de ensayo	ASTM E8/E8M_16a: Método de prueba estándar para pruebas de tensión en materiales metálicos.
Tipo de ensayo	Cuantitativo
Tipo de probeta	Cilíndrica
Diámetro	12.5 ± 5 mm
Longitud Calibrada	50mm
Velocidad del ensayo	10mm/min
Precarga	5000 N
Temperatura	28.3°C
Humedad Relativa	74.4 %

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

3.6.2.1. Resultados del ensayo de tracción para el acero ASIS 4140 templado en agua a 15°C

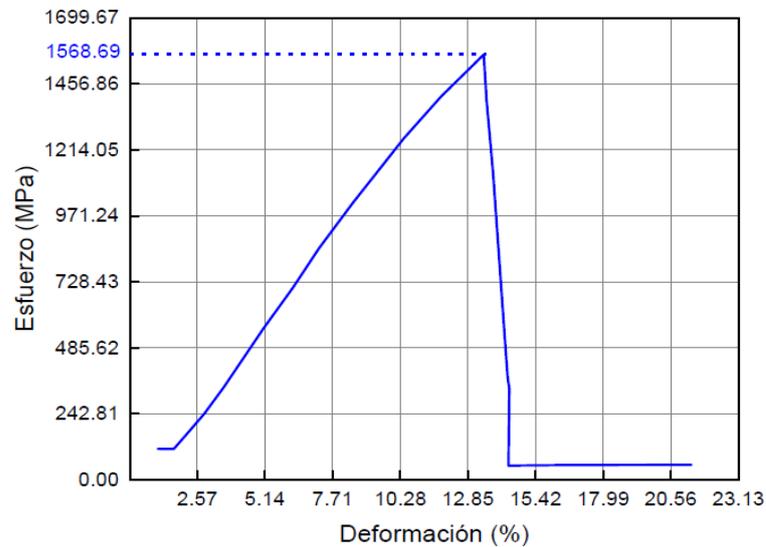


Gráfico 5-3. Curva Esfuerzo - Deformación para el Acero AISI 4140 a 750 °C templado en agua a 15°C

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

En el Tabla 7-3, se observa que la resistencia a la tracción para el Acero AISI 4140 a 750° en donde no se evidencia la formación de martensita corresponde a 1568.69 MPa, soportando una carga máxima de 194050.02 N antes de llegar a la fractura, con una deformación de 2,24%, lo que quiere decir que el material si se deforma elásticamente aunque su valor no sea representativo, por el comportamiento de la curva Esfuerzo - Deformación (ver gráfico 5-3), se trata de un material frágil.

Para una longitud de martensita de 0.0189 mm la resistencia a la tracción es de 1589,74 MPa, soportando una carga máxima de 194050.02 N antes de llegar a la fractura, con una deformación de 5,50%, como indica la Tabla 7-3, esto quiere decir que el material si se deforma elásticamente, por el comportamiento de la curva Esfuerzo - Deformación (ver gráfico 6-3), se trata de un material frágil lo que se justifica también por la alta dureza del material, en este caso el valor de la resistencia a la tracción coincide con la resistencia a la fractura, condición que es característica de los materiales frágiles.

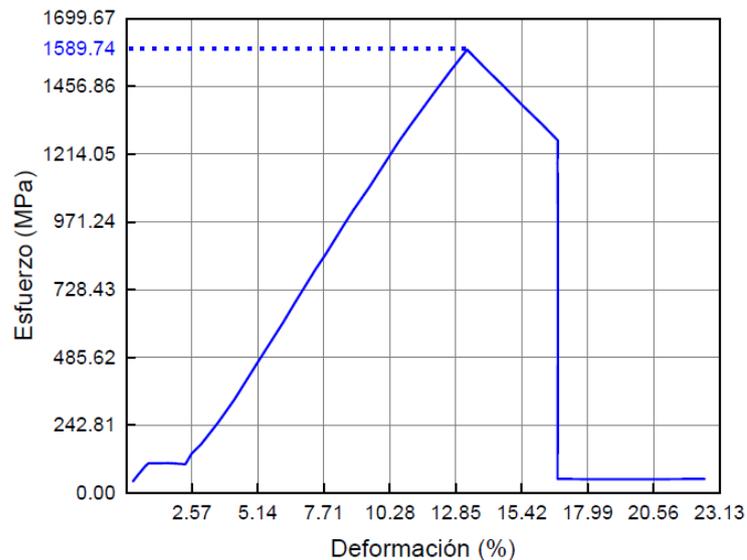


Gráfico 6-3. Curva Esfuerzo - Deformación para el Acero AISI 4140 a 800 °C templado en agua a 15°C

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

Para una longitud de martensita de 0.0267mm la resistencia a la tracción es de 1542.09MPa, soportando una carga máxima de 193200.02 N antes de llegar a la fractura, con una deformación de 4.10%, como indica la tabla 7-3, esto significa que el material si se deforma elásticamente, por el comportamiento de la curva Esfuerzo - Deformación (ver gráfico 7-3), se trata de un material frágil y eso se justifica también por la dureza alta del material, en este caso el valor de la resistencia a la tracción coincide con la resistencia a la fractura.

Para el Acero AISI 4140, templado a 15°C, se obtiene una resistencia a la tracción máxima de 1589.74 MPa que corresponde a la longitud de martensita de 0.0189 mm y una resistencia mínima de 1542.09 MPa para una aguja de 0.0267 mm, por lo que se puede decir que la resistencia a la tracción no depende de las longitud de las agujas de martensita, ya que los resultados no varían considerablemente si se cambia el tamaño de las agujas de martensita.

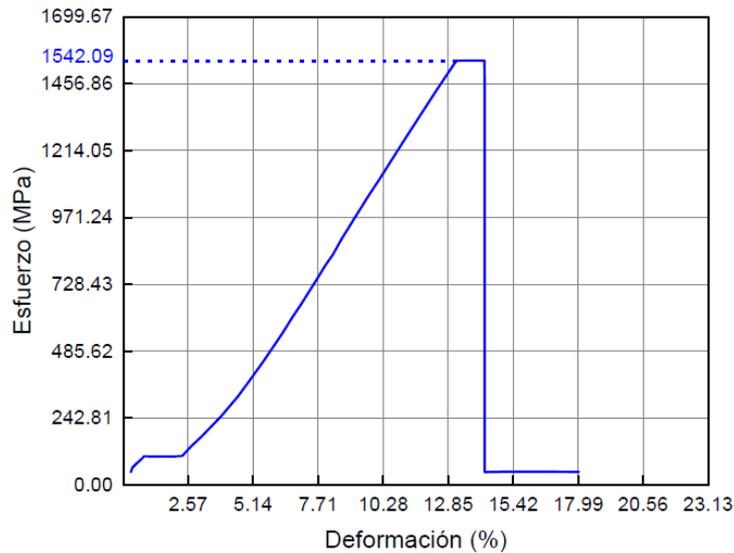


Gráfico 7-3. Curva Esfuerzo - Deformación para el Acero AISI 4140 a 900 °C templado en agua a 15°C

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

Tabla 7-3: Resultados del ensayo de tracción para el acero AISI 440 Templado en Agua a 15°C

Temperatura de austenización	Longitud Martensita (mm)	Longitud Final(mm)	Fuerza Máxima (N)	Fuerza rotura (N)	Fuerza de fluencia (N)	Resistencia a la tracción (MPa)	Límite fluencia (MPa)	% Elongación (Calculado)
750	-	51.12	194050,02	193850,02	14500	1568,69	117,22	2,24
800	0.0189	52.75	201700,02	201700,02	14250	1589,74	112,31	5,50
900	0.0267	52.05	193200,02	193200,02	13800	1542,09	110,15	4,10

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

3.6.2.2. Resultados del ensayo de tracción para el acero ASIS 4140 templado en agua a 0°C

En el Tabla 8-3, se observa como varían los resultados del ensayo de tracción para las diferentes longitudes de martensita del Acero AISI 4140 templado en agua a 0°C.

Para una longitud de martensita de 00.0267 mm la resistencia a la tracción es de 1448.80 MPa, soportando una carga máxima de 180650.02 N antes de llegar a la fractura, con una deformación de 2.04%, como indica la tabla 8-3, esto significa que el material si se deforma elásticamente y

que por el comportamiento de la curva Esfuerzo - Deformación (ver gráfico 8-3), se trata de un material frágil lo que se justifica también por la alta dureza del material, en este caso el valor de la resistencia a la tracción coincide con la resistencia a la fractura, condición que es característica de los materiales frágiles.

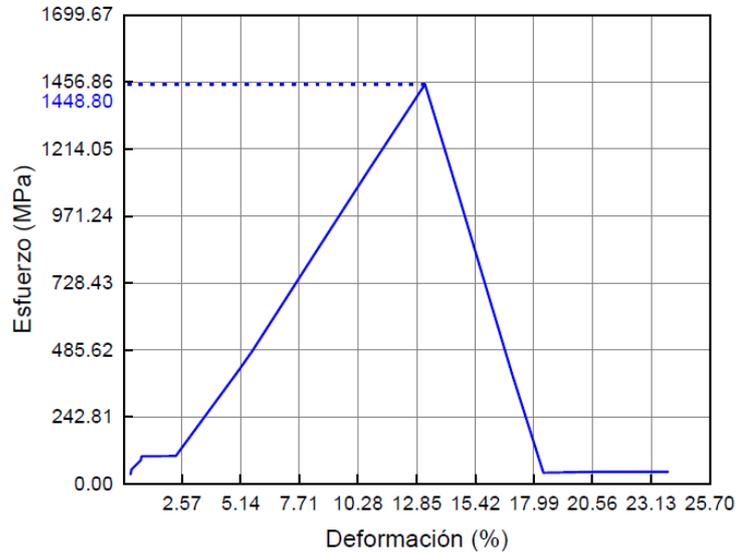


Gráfico 8-3. Curva Esfuerzo - Deformación para el Acero AISI 4140 a 750 °C templado en agua a 0°C

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

Para una longitud de martensita de 0.0318 mm la resistencia a la tracción es de 2349.83 MPa, soportando una carga máxima de 293000.03N antes de llegar a la fractura, con una deformación de 5.56%, como indica la tabla 8-3, esto significa que el material si se deforma elásticamente y que por el comportamiento de la curva Esfuerzo - Deformación (ver gráfico 9-3).

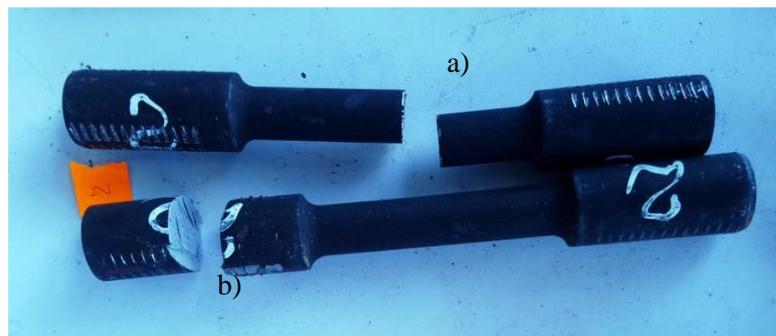


Figura 7-3: Fractura en el ensayo de tracción a) dentro de la zona calibrada b) fuera de la zona calibrada

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

A estos resultados se los ha considerado como atípicos, ya que varía mucho la resistencia a la tracción con el resto de los resultados obtenidos, su principal razón es que la fractura durante el ensayo de tracción para algunas muestras sucedió fuera de la zona calibrada (50mm) como se puede observar en la Figura 7-3.

En este caso lo idóneo sería desechar las probetas en donde la fractura ocurre fuera de la zona calibrada y repetir el ensayo.

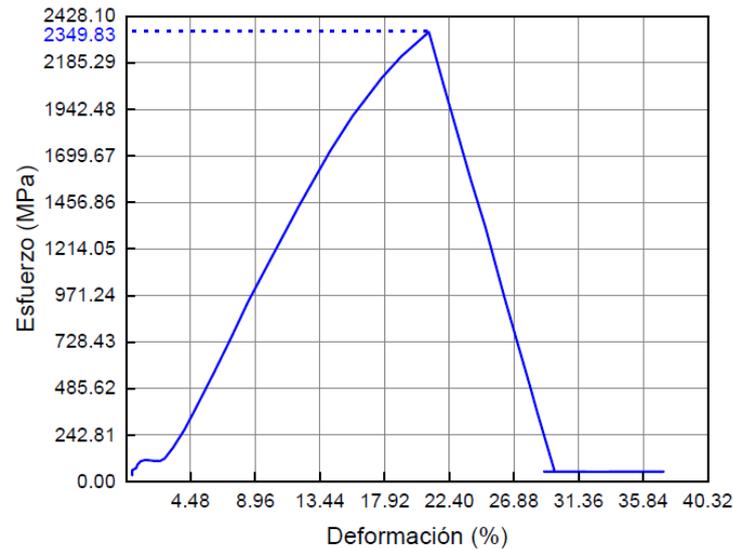


Gráfico 9-3. Curva Esfuerzo - Deformación para el Acero AISI 4140 a 800 °C templado en agua a 0°C

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

Cuando la longitud de martensita es de 0.0378 mm la resistencia a la tracción es de 1451.30 MPa, soportando una carga máxima de 293000.03N antes de llegar a la fractura, con una deformación de 3.20%, como indica la tabla 8-3, esto significa que el material si se deforma elásticamente y que por el comportamiento de la curva Esfuerzo - Deformación (ver gráfico 10-3), se trata de un material frágil lo que se justifica también por la dureza alta del material, en este caso el valor de la resistencia a la tracción coincide con la resistencia a la fractura, condición que es característica de los materiales frágiles.

Finalmente ara el Acero AISI 4140, templado a 0°C, se obtiene una resistencia a la tracción máxima de 1451.30 MPa que corresponde a la longitud de martensita de 0.0378 mm y una resistencia mínima de 1448.80 MPa para una aguja de 0.0225 mm, descartando los resultados para la martensita de 0.0318 mm, por su comportamiento atípico, una vez más se puede decir que la resistencia a la tracción no depende de las longitud de las agujas de martensita, ya que los resultados no varían considerablemente si se cambia el tamaño de las agujas de martensita.

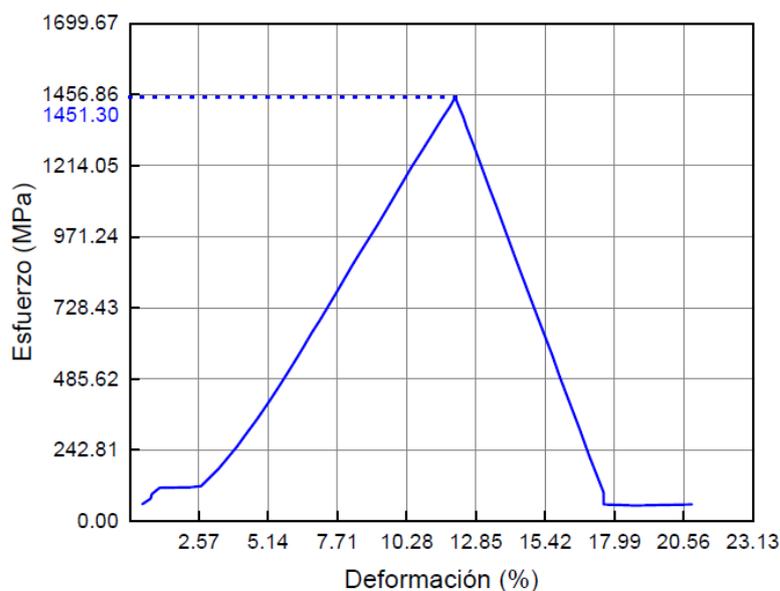


Gráfico 10-3. Curva Esfuerzo - Deformación para el Acero AISI 4140 a 900 °C templado en agua a 0°C

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

Tabla 8-3: Tracción en el Acero AISI 4140 templado en agua a 0°C

T (°C)	Longitud Final (mm)	Longitud Martensita (mm)	Fuerza Máxima (N)	Fuerza rotura (N)	Fuerza de fluencia (N)	Resistencia a la tracción (MPa)	Límite fluencia (MPa)	% Elongación (Calculado)
750	51,020	0.0267	180650,02	180650,02	12950	1448,80	103,86	2,04
800	52,780	0.0318	293000,03	293000,03	15150	2349,83	121,50	5,56
900	51,600	0.0378	181250,02	181250,02	14150	1451,30	113,30	3,20

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

3.6.2.3. Resultados del ensayo de tracción para el acero ASIS 4340 templado en agua a 15°C

Para una longitud de martensita de 0.0225 mm la resistencia a la tracción es de 1749.35 MPa, soportando una carga máxima de 223000.05 N antes de llegar a la fractura, con una deformación de 6.80 %, como indica la tabla 9-3, esto significa que el material si se deforma elásticamente y que por el comportamiento de la curva Esfuerzo - Deformación (ver gráfico 11-3), se trata de un material frágil lo que se justifica también por la alta dureza del material, en este caso el valor de la resistencia a la tracción coincide con la resistencia a la fractura, condición que es característica de los materiales frágiles.

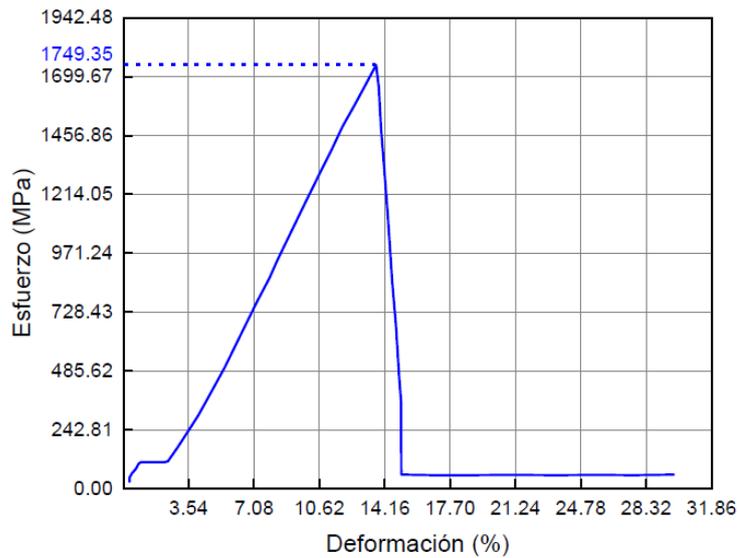


Gráfico 11-3. Curva Esfuerzo - Deformación para el Acero AISI 4340 a 750 °C templado en agua a 15°C

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

Cuando la longitud de martensita es de 0.0318 mm la resistencia a la tracción es de 1905.21 MPa, soportando una carga máxima de 243250.05 N antes de llegar a la fractura, con una deformación de 3.36 %, como indica la tabla 9-3, por el comportamiento de la curva Esfuerzo - Deformación (ver gráfico 12-3), se trata de un material frágil.

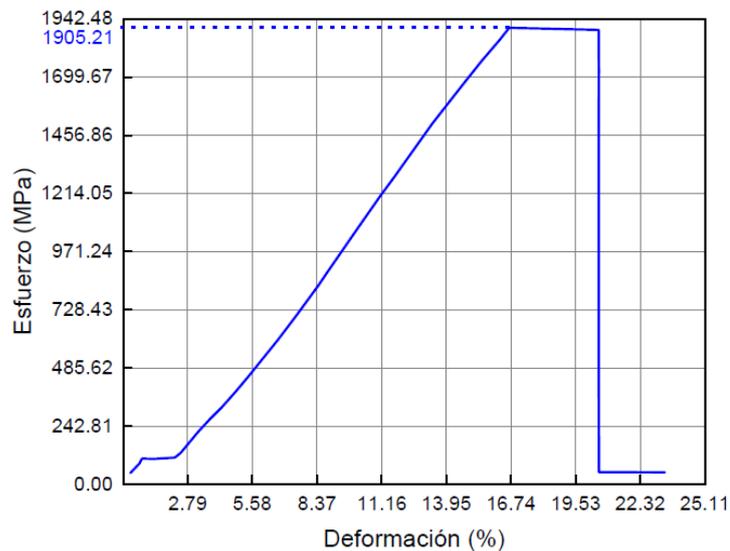


Gráfico 12-3. Curva Esfuerzo - Deformación para el Acero AISI 4340 a 800 °C templado en agua a 15°C

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

Cuando la longitud de martensita es de 0.0378 mm la resistencia a la tracción es de 1443.04 MPa, soportando una carga máxima de 182800.02 N antes de llegar a la fractura, con una deformación de 1.12% como indica la tabla 9-3, esto significa que el material si se deforma elásticamente y que por el comportamiento de la curva Esfuerzo - Deformación (ver gráfico 13-3), se trata de un material frágil lo que se justifica también por la dureza alta del material, en este caso el valor de la resistencia a la tracción coincide con la resistencia a la fractura, condición que es característica de los materiales frágiles.

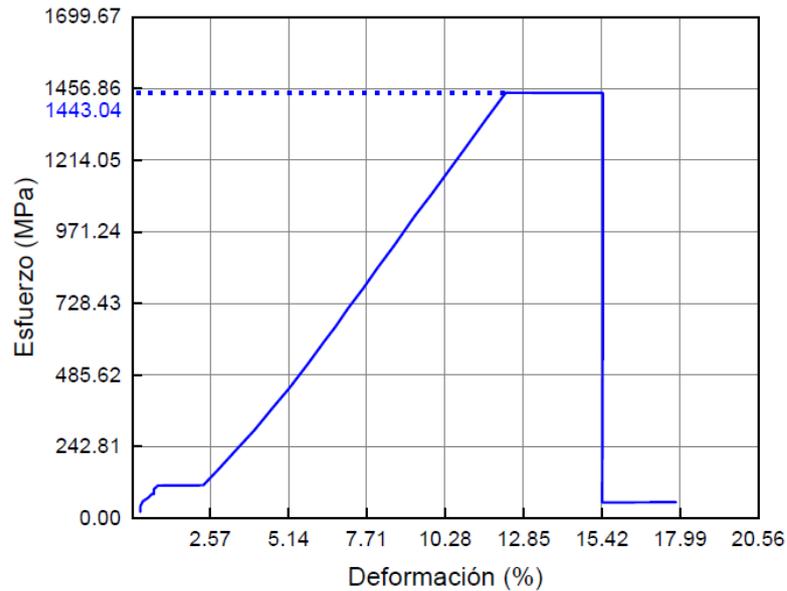


Gráfico 13-3. Curva Esfuerzo - Deformación para el Acero AISI 4340 a 900 °C templado en agua a 15°C

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

Tabla 9-3: Tracción en el Acero AISI 4340 templado en agua a 15°C

T (°C)	Longitud Martensita (mm)	Longitud Final (mm)	Fuerza Máxima (N)	Fuerza rotura (N)	Fuerza de fluencia (N)	Resistencia a la tracción (MPa)	Límite fluencia (MPa)	% Elongación (Calculado)
750	0.0225	52,500	223000,05	223000,05	14250	1749,35	111,79	6,80
800	0.0318	51,680	243250,05	242400,05	14250	1905,21	111,61	3,36
900	0.0378	50,560	182800,02	182800,02	14050	1443,04	110,91	1,12

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

Finalmente ara el Acero AISI 4340, templado a 15°C, se obtiene una resistencia a la tracción máxima de 1905.21 MPa que corresponde a la longitud de martensita de 0.0318 mm y una resistencia mínima de 1443.04 MPa para una aguja de 0.0378 mm, se puede decir que la

resistencia a la tracción no depende de la longitud de las agujas de martensita, ya que los resultados no varían en función a la microestructura martensítica.

En el Tabla 9-3, se observa como varían los resultados del ensayo de tracción para las diferentes longitudes de martensita del Acero AISI 4340 templado en agua a 15°C.

3.6.2.4. Resultados del ensayo de tracción para el acero AISI 4340 templado en agua a 0°C

En el Tabla 10-3, se observa como varían los resultados del ensayo de tracción para las diferentes longitudes de martensita del Acero AISI 4340 templado en agua a 15°C.

Para una longitud de martensita de 0.0267 mm la resistencia a la tracción es de 1629.34 MPa, soportando una carga máxima de 207050.05 N antes de llegar a la fractura, con una deformación de 0.88%, como indica la tabla 10-3, esto significa que el material si se deforma elásticamente pero es insignificante, por el comportamiento de la curva Esfuerzo - Deformación (ver gráfico 14-3), se trata de un material frágil lo que se justifica también por la alta dureza del material, en este caso el valor de la resistencia a la tracción coincide con la resistencia a la fractura, condición que es característica de los materiales frágiles.

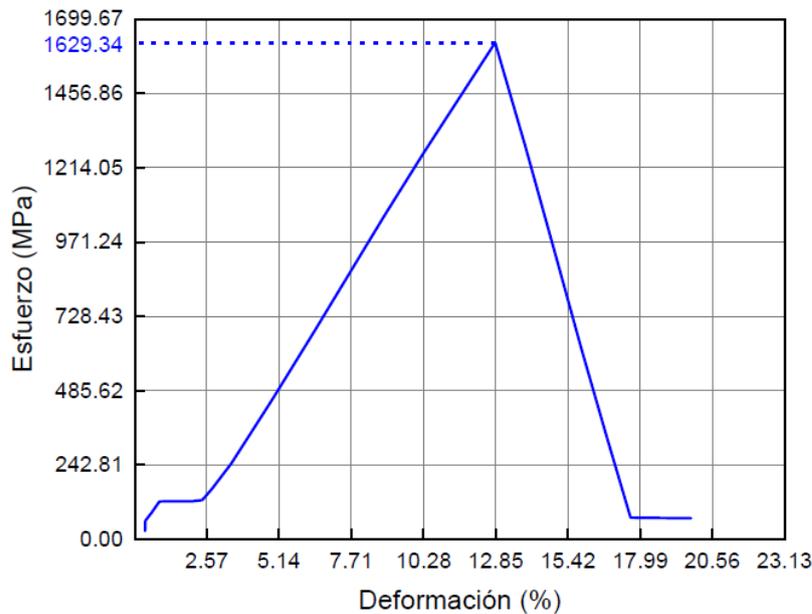


Gráfico 14-3. Curva Esfuerzo - Deformación para el Acero AISI 4340 a 750 °C templado en agua a 15°C

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

Cuando la longitud de martensita es de 0.0318 mm la resistencia a la tracción es de 1905.49. MPa, soportando una carga máxima de 244050.05 N antes de llegar a la fractura, con una deformación

de 1.96 %, como indica la tabla 10-3, esto significa que el material si se deforma elásticamente y que por el comportamiento de la curva Esfuerzo - Deformación (ver gráfico 15-3), se trata de un material frágil lo que se justifica también por la alta dureza del material, en este caso el valor de la resistencia a la tracción coincide con la resistencia a la fractura, condición que es característica de los materiales frágiles.

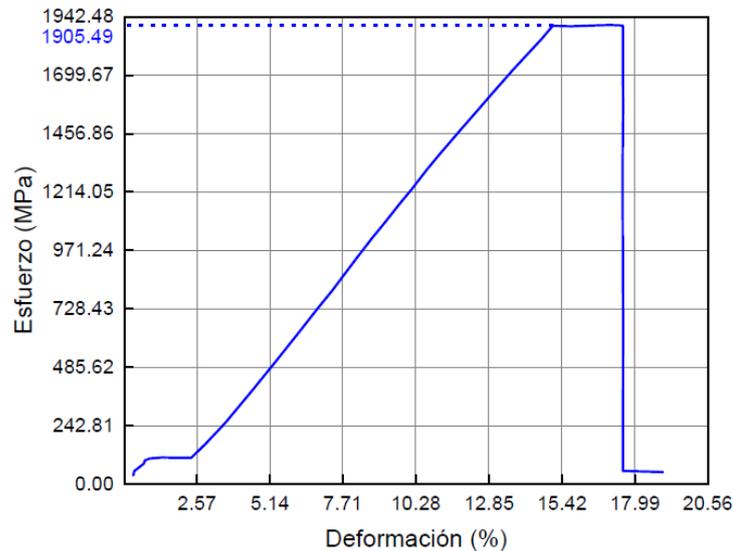


Gráfico 15-3. Curva Esfuerzo - Deformación para el Acero AISI 4340 a 750 °C templado en agua a 15°C

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

Cuando la longitud de martensita es de 0.0378 mm la resistencia a la tracción es de 1392.52 MPa, soportando una carga máxima de 176400.02 N antes de llegar a la fractura, con una deformación de 2.38% como indica la tabla 10-3, esto significa que el material si se deforma elásticamente y que por el comportamiento de la curva Esfuerzo - Deformación (ver gráfico 16-3), se trata de un material frágil lo que se justifica también por la dureza alta del material, en este caso el valor de la resistencia a la tracción coincide con la resistencia a la fractura, condición que es característica de los materiales frágiles.

Finalmente ara el Acero AISI 4340, templado a 0°C, se obtiene una resistencia a la tracción máxima de 1905.49 MPa que corresponde a la longitud de martensita de 0.0318 mm y una resistencia mínima de 1392.52 MPa para una aguja de 0.0378 mm, se puede decir que la resistencia a la tracción no depende de las longitud de las agujas de martensita, ya que los resultados no varían considerablemente si se cambia el tamaño de las agujas de martensita.

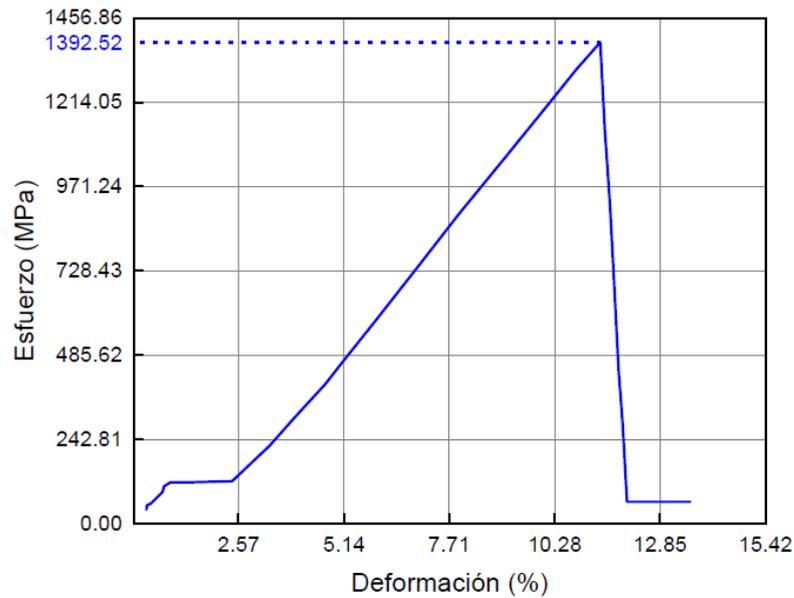


Gráfico 16-3. Curva Esfuerzo - Deformación para el Acero AISI 4340 a 750°C templado en agua a 15°C

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

Tabla 10-3: Tracción en el Acero AISI 4140 templado en agua a 0°C

T (°C)	Longitud Martensita (mm)	Longitud Final (mm)	Fuerza Máxima (N)	Fuerza rotura (N)	Fuerza de fluencia (N)	Resistencia a la tracción (MPa)	Límite fluencia (MPa)	% Elongación (Calculado)
750	0.0267	50,440	207050,05	207050,05	15600	1629,34	122,76	0,88
800	0.0318	50,980	244050,05	244050,05	14050	1905,49	109,70	1,96
900	0.0378	51,190	176400,02	176400,02	15250	1392,52	120,39	2,38

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

En todas las tablas de resultados se observa que existe un valor para la deformación elástico, sin embargo, son valores pequeños que no influyen mucho en la curva esfuerzo – Deformación

Para apreciar de mejor manera la influencia de las longitudes de las agujas de martensita en las propiedades mecánicas de los Aceros AISI 4140 y AISI 4340, se realiza un gráfico que relaciona, la longitud de la martensita, la tracción y la dureza del material de acuerdo con la Tabla 11-3.

Tabla 11-3: Resultados de los ensayos de Dureza y Tracción en función a la longitud de las agujas de martensita

Muestra	Temperatura (°C)	Longitud Martensita (mm)	Dureza (HRC)	Tracción (MPa)
AISI 4140 Temple en agua a 15°C	750	0	47.6	1568.69
	800	0.0189	54.6	1589.74
	900	0.0267	57.4	1542.09
AISI 4140 Temple en agua a 0°C	750	0.0267	47.4	1448.8
	800	0.0318	51.8	2349.83
	900	0.0378	54.4	1451.3
AISI 4340 Temple en agua a 15°C	750	0.0225	52.1	1610.06
	800	0.0318	56.4	1905.21
	900	0.0378	60.2	1443.04
AISI 4340 Temple en agua a 0°C	750	0.0267	45.8	1629.34
	800	0.0318	54.2	1905.49
	900	0.0378	57.6	1392.52

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

En el Gráfico 17-3 observamos el comportamiento de la Tracción y la Dureza en función a la longitud de las agujas de martensita del Acero AISI 4140, las barras en color verde representan los resultados del ensayo de tracción para las muestras templadas a 15°C, se puede apreciar que el comportamiento de la resistencia no varía considerablemente, a diferencia de la dureza representada por la línea azul, que tiene un comportamiento lineal alcanzando una dureza máxima de 57.4 HRC para una longitud de 0.0267 mm de martensita, lo que quiere decir que a medida que la longitud de la martensita aumenta la dureza en las muestras se incrementa.

Las barras de color tomate representan los resultados del ensayo de tracción para las muestras templadas a 0°C, en este caso el resultado para una longitud de martensita de 0.0318 mm, es atípico ya que varía considerablemente con respecto a los otros resultados, como se explicó en la figura 7-3, la fractura de la probeta durante el ensayo de tracción se da fuera de la zona calibrada, esta podría ser la razón por la cual el resultado está fuera de la tendencia del comportamiento de la resistencia a la tracción, para las otras longitudes de martensita de 0.0267 mm y 0.0378, la resistencia no varía notablemente, se puede decir que se mantiene constante, mientras dureza tiene el mismo comportamiento de las muestras templadas a 15°C alcanzando una dureza máxima de 54.4 HRC para una longitud de 0.0378mm.

Con lo explicado anteriormente se puede decir que la dureza depende de la longitud de las agujas de martensita, sucediendo lo contrario con la resistencia a la tracción que no varía mucho por lo que su comportamiento no depende de la longitud de las agujas de martensita.

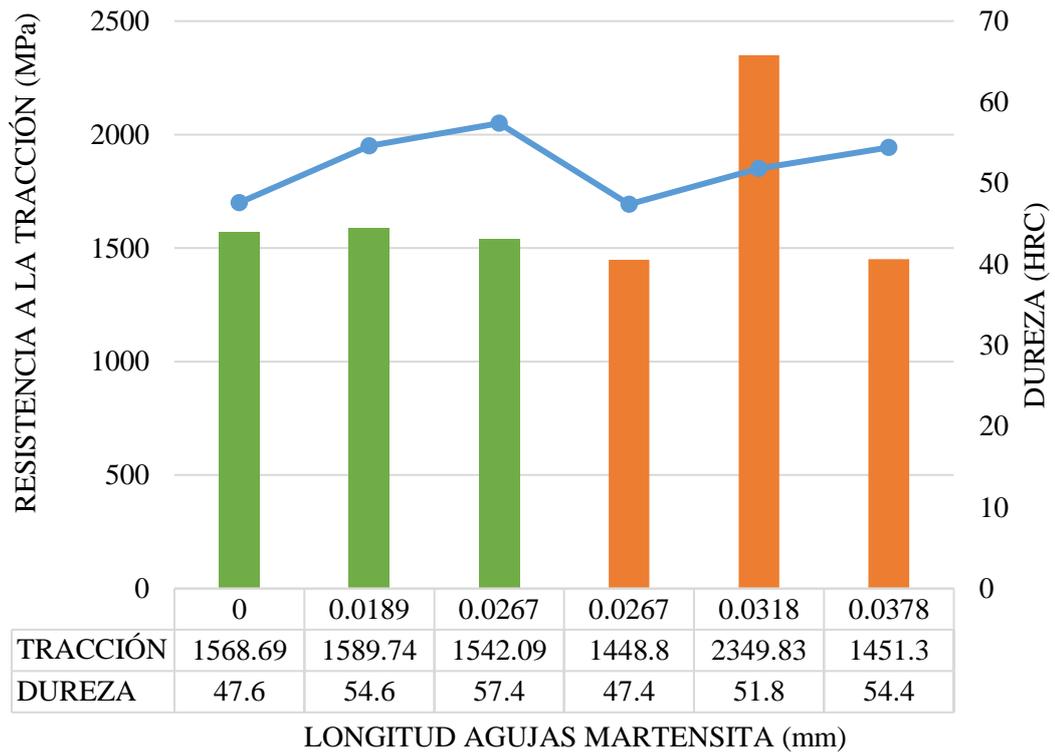


Gráfico 17-3. Comportamiento de la resistencia a la Tracción y Dureza en función a las agujas de martensita del Acero AISI 4140 Templado a 15°C y 0°C

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

En el Gráfico 17-3 observamos el comportamiento de la Tracción y la Dureza en función a la longitud de las agujas de martensita del Acero AISI 4340, las barras en color amarillo representan los resultados del ensayo de tracción para las muestras templadas a 15°C, se puede apreciar que el comportamiento de la resistencia varía pero no de forma lineal, a diferencia de la dureza representada por la línea azul, que a medida que la longitud de la martensita aumenta la dureza en las muestras se incrementa por lo que si tiene un comportamiento lineal alcanzando una dureza máxima de 60.2 HRC para una longitud de 0.0378 mm.

Las barras de color morado representan los resultados del ensayo de tracción para las muestras templadas a 0°C, los resultados tanto de la tracción como la dureza tienen el mismo comportamiento que las muestras templadas a 15°C, la tracción varía pero no en forma lineal a diferencia de la dureza que a medida que la longitud de la martensita aumenta la dureza en las muestras se incrementa por lo que si tiene un comportamiento lineal alcanzando una dureza máxima de 57.6 HRC para una longitud de 0.0378 mm de martensita.

Con lo explicado anteriormente, al igual que las muestras de acero AISI 4140, se puede decir que la dureza depende de la longitud de las agujas de martensita, sucediendo lo contrario con la

resistencia a la tracción, cuyo comportamiento es independiente de la longitud de las agujas de martensita.

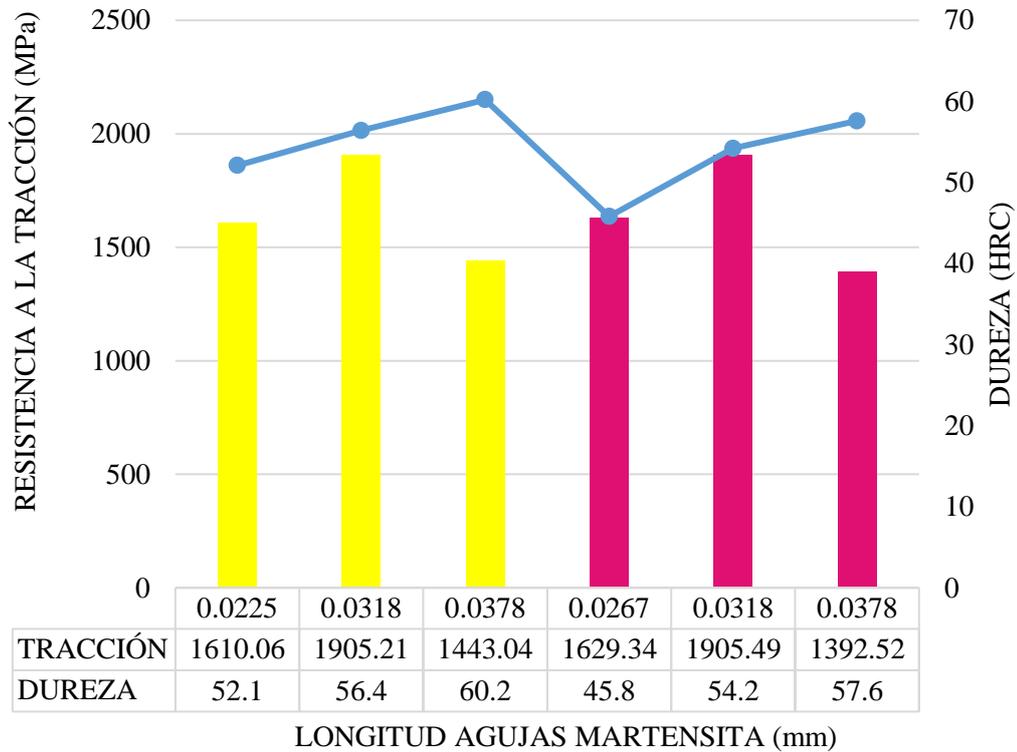


Gráfico 18-3. Comportamiento de la resistencia a la Tracción y Dureza en función a las agujas de martensita del Acero AISI 4340 Templado a 15°C y 0°C

Realizado por: Aguirre, Diana; 2019

3.7. Planteamiento del procedimiento para el cálculo de la longitud de Martensita

Para plantear el procedimiento que permita determinar la longitud de las agujas de martensita se decide trabajar con el programa ejecutable ImageJ de licencia gratuita, útil para el análisis de muestras metalográficas.

1. Escalar la imagen

El programa ImageJ con la herramienta SetScale, permite escalar la imagen en función a la longitud conocida de las muestras metalográficas, esto, con la finalidad de obtener medidas reales y no hacer uso de factores de conversión en función a la ampliación de la imagen.

- Abrir la imagen en el programa ImageJ
- Trazar una línea sobre el patrón de medida de la imagen, que será la longitud conocida
- Presionar la letra M, para guardar la longitud tomada en una tabla de resultados ImageJ

- En el menú Analyze, seleccionar la opción Set Scale
- En el cuadro de dialogo Set Scale se ingresan los siguientes valores y presionamos ok:

Distance in pixels: es la longitud de la línea trazada

Know distance: longitud del patrón de medida

Unit of lenght: es la unidad en la que se desea trabajar

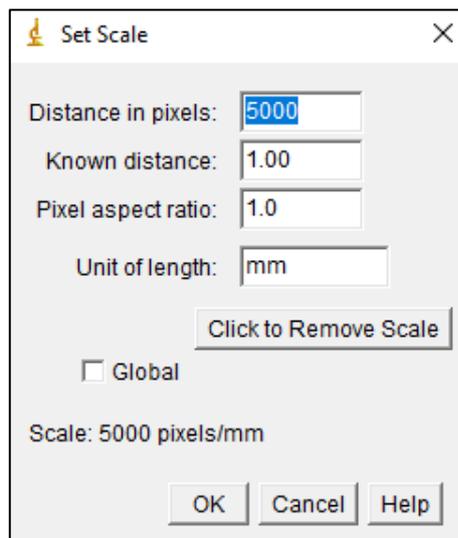


Figura 8-3. Herramienta Set Scale

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

A partir de ahora todas las medidas que se tomen serán reales y estarán en las unidades que se desea trabajar

2. Calcular el número de muestras que se deben tomar

$$n = \frac{Z^2 p(1 - p)}{e^2} \quad (1-3)$$

Donde:

n = número de muestras que se deben tomar

z = según el nivel de confiabilidad

p = proporción de elementos que poseen la característica de interés (%M)

e = error máximo tolerable

Para el cálculo de número de muestras, en este caso, el número de agujas de martensita que se deben medir se tendrá en cuenta las siguientes consideraciones:

Se trabajará con un nivel de confiabilidad del 95%, por lo tanto, Z es igual a 1.96

El error máximo tolerable será del 10% considerando la complejidad de la imagen

Para calcular el porcentaje de la proporción de elementos con las mismas características de las muestras, se procede a determinar el porcentaje de martensita en las muestras, de la siguiente manera:

- Ir al menú Image >> Adjust >> Threshold.

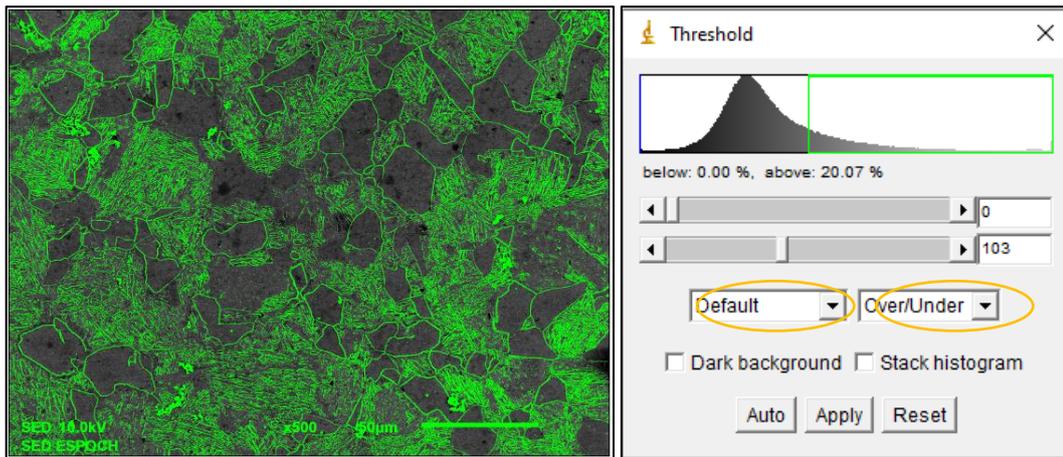


Figura 9-3. Herramienta Thershold (Porcentaje de fases).

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

- En el cuadro de diálogo de la herramienta Threshold, seleccionar las opciones Default y Over/Under

Con la herramienta Threshold se puede variar el contraste, lo que permite diferenciar la microestructura martensítica (color verde) de la austenita (color gris), y devuelve el porcentaje de las fases presentes, como se puede observar en la curva del cuadro de diálogo Threshold, este porcentaje corresponde a la porción de elementos que cumplen con la misma característica en el total de la muestra y será reemplazado en la ecuación para el cálculo de numero de muestras.

- Calcular el número de medidas que se debe tomar

3. Calcular la longitud promedio de las agujas de martensita

$$Lp = \frac{La_1 + La_2 + La_3 + \dots + La_n}{n} \quad (2-3)$$

Donde:

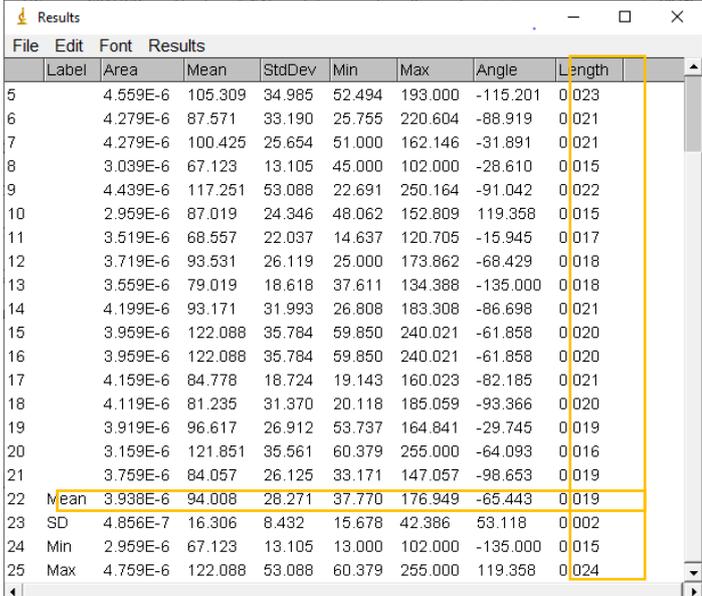
La = longitud de la aguja

Lp = longitud promedio

n= número de muestras

Para calcular el promedio de las muestras se suman las longitudes tomadas y se divide para el número de mediciones, otra aplicación del programa ImageJ, es que permite calcular el promedio de las mediciones de manera casi automática, para esto se debe:

- Trazar una línea sobre la aguja de martensita de extremo a extremo
- Presionar la letra M, para guardar el dato en una tabla de resultados que arroja el programa
- Repetir los enunciados anteriores según el número de muestras que se deba tomar
- Seleccionar la opción Resultados >> Summarize, y al final de la tabla de los resultados aparece el promedio de las longitudes y otros resultados que para este procedimiento no son de interés como la desviación estándar, los valores máximos y mínimos.



File	Edit	Font	Results						
	Label	Area	Mean	StdDev	Min	Max	Angle	Length	
5		4.559E-6	105.309	34.965	52.494	193.000	-115.201	0.023	
6		4.279E-6	87.571	33.190	25.755	220.604	-88.919	0.021	
7		4.279E-6	100.425	25.654	51.000	162.146	-31.891	0.021	
8		3.039E-6	67.123	13.105	45.000	102.000	-28.610	0.015	
9		4.439E-6	117.251	53.088	22.691	250.164	-91.042	0.022	
10		2.959E-6	87.019	24.346	48.062	152.809	119.358	0.015	
11		3.519E-6	68.557	22.037	14.637	120.705	-15.945	0.017	
12		3.719E-6	93.531	26.119	25.000	173.862	-68.429	0.018	
13		3.559E-6	79.019	18.618	37.611	134.388	-135.000	0.018	
14		4.199E-6	93.171	31.993	26.808	183.308	-86.698	0.021	
15		3.959E-6	122.088	35.784	59.850	240.021	-61.858	0.020	
16		3.959E-6	122.088	35.784	59.850	240.021	-61.858	0.020	
17		4.159E-6	84.778	18.724	19.143	160.023	-82.185	0.021	
18		4.119E-6	81.235	31.370	20.118	185.059	-93.366	0.020	
19		3.919E-6	96.617	26.912	53.737	164.841	-29.745	0.019	
20		3.159E-6	121.851	35.561	60.379	255.000	-64.093	0.016	
21		3.759E-6	84.057	26.125	33.171	147.057	-98.653	0.019	
22	Mean	3.938E-6	94.008	28.271	37.770	176.949	-65.443	0.019	
23	SD	4.856E-7	16.306	8.432	15.678	42.386	53.118	0.002	
24	Min	2.959E-6	67.123	13.105	13.000	102.000	-135.000	0.015	
25	Max	4.759E-6	122.088	53.088	60.379	255.000	119.358	0.024	

Figura 10-3. Tabla de resultados – ImageJ

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

Finalmente, el valor promedio será la longitud de las agujas de martensita en la muestra analizada.

4. Cálculo del error

Para validar el resultado se debe:

- Calcular el tamaño de grano austenítico, mediante cualquier procedimiento que indica la Norma ASTM E112 Determinar el diámetro promedio del grano, el mismo que corresponde a la longitud de las agujas de martensita

- Calcular el porcentaje de error, se ha considerado un margen de error tolerable hasta el 10%

$$\%error = \frac{|L_d - L_p|}{L_p} * 100 \quad (3-3)$$

Donde:

Ld: Longitud en función al tamaño de grano ASTM

Lp: longitud promedio

A continuación, se realiza un ejemplo con una muestra al azar, para aplicar el procedimiento planteado.

3.8. Cálculo de la longitud promedio de para el Acero AISI 4140 a 800°C, templado en agua a 15°C

1. Escalar la imagen

Abrir el programa ImageJ >> File >> Open >> Seleccionar una imagen >> Abrir

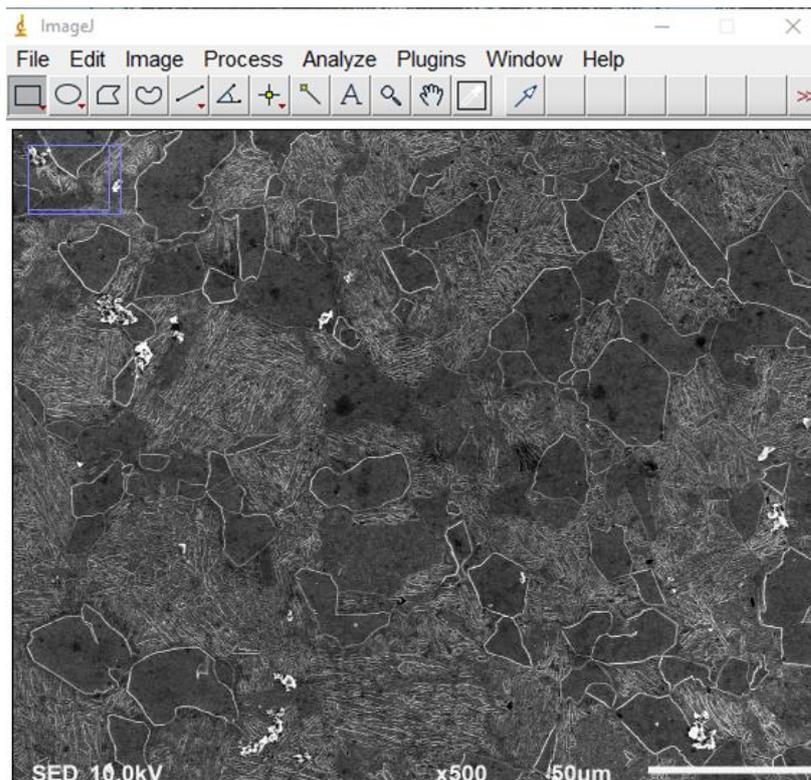


Figura 11-3: Imagen insertada en ImageJ

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

- Trazar una línea sobre el patrón de medida de la imagen

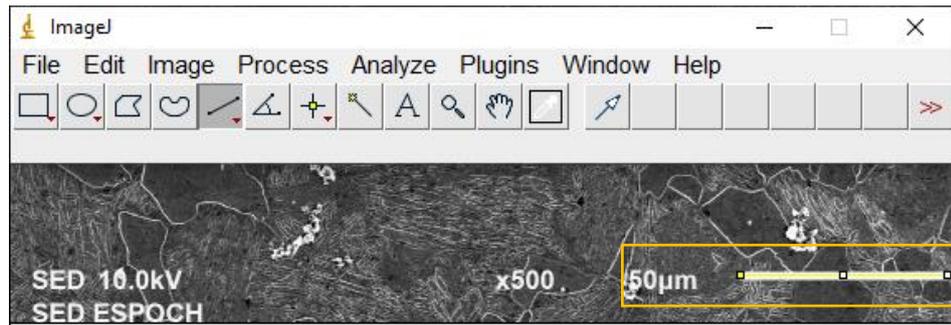


Figura 12-3: Patrón de medida

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

- Presionar la letra M, para guardar la longitud tomada en una tabla de resultados ImageJ

	Area	Mean	StdDev	Min	Max	Angle	Length
1	251	244.024	6.816	155.222	250.956	-0.229	250.004

Figura 13-3: Tabla de resultados

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

La longitud tomada estará en pixeles que es la unidad de medida estándar del programa

- En el menú Analyze, seleccionar la opción Set Scale

Analyze >> Set Scale

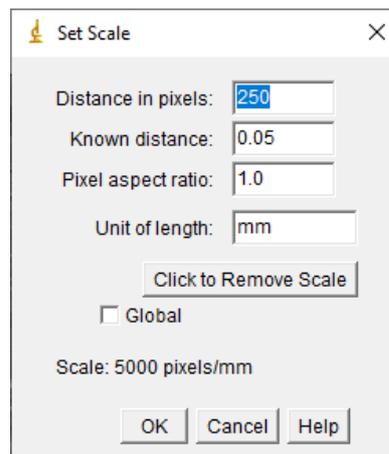


Figura 14-3: Set Scale

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

En el cuadro de dialogo aparece automáticamente la longitud en pixeles del patrón medida

- En el cuadro de dialogo Set Scale se ingresan los siguientes valores y presionamos ok:

Ingresamos los valores conocidos:

Know distance: Longitud del patrón de la medida (depende del sistema de unidades)

Unit of lenght: de acuerdo con el sistema de unidades que se desee trabajar

Para este caso se han transformado los micrómetros a milímetro, quedando nuestra escala Pixeles/mm y se podrá observar que las unidades de la imagen ahora serán milímetros.

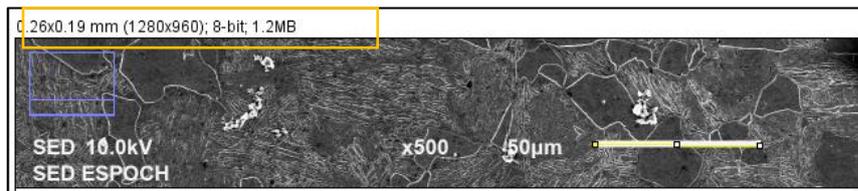


Figura 15-3: Sistema de unidades

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

2. Calcular el número de muestras que se deben tomar (Ecuación 1-3)

$$n = \frac{Z^2 p(1-p)}{e^2}$$

Donde:

n = número de muestras que se deben tomar

z = según el nivel de confiabilidad

p = proporción de elementos que poseen la característica de interés (%M)

e = error máximo tolerable

Porcentaje de Martensita (p)

- Image >> Adjust >> Threshold

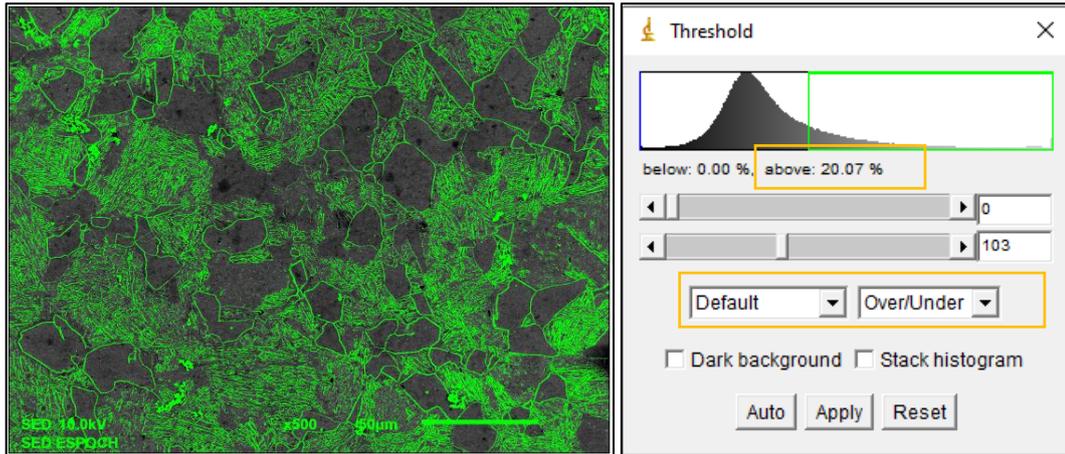


Figura 16-3: Porcentaje de martensita en las áreas verdes

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

- En el cuadro de diálogo de la herramienta Threshold, seleccionar las opciones Default y Over/Under
- Calcular el número de medidas que se debe tomar

En la Eciación 1-3, reemplazmos los valores:

Z= 1.96 (para una confiabilidad del 95%)

e=10%

p=20.07%

$$n = \frac{1.96^2(0.2007)(1 - 0.2007)}{0.1^2}$$

$$n = 61.627 \approx 62 \text{ muestras}$$

3. Calcular la longitud promedio de las agujas de martensita

$$L_p = \frac{La_1 + La_2 + La_3 + \dots + La_n}{n} \quad (2-3)$$

Donde:

La = longitud de la aguja

Lp = longitud promedio

n= número de muestras

- Trazar una línea sobre la aguja de martensita de extremo a extremo

- Presionar la letra M, para guardar el dato en una tabla de resultados que arroja el programa
- Repetir los enunciados anteriores según el número de muestras que se deba tomar

Tabla 12-3: Longitudes de las agujas de martensita

N°	Longitud	N°	Longitud	N°	Longitud
1	0.018	22	0.015	42	0.024
2	0.02	23	0.021	43	0.023
3	0.024	24	0.022	44	0.023
4	0.017	25	0.028	45	0.023
5	0.024	26	0.019	46	0.024
6	0.021	27	0.021	47	0.02
7	0.019	28	0.028	48	0.017
8	0.022	29	0.022	49	0.019
9	0.025	30	0.014	50	0.025
10	0.019	31	0.023	51	0.022
11	0.019	32	0.014	52	0.025
12	0.023	33	0.016	53	0.021
13	0.015	34	0.014	54	0.02
14	0.021	35	0.026	55	0.021
15	0.017	36	0.024	56	0.018
16	0.018	37	0.012	57	0.015
18	0.026	38	0.023	58	0.015
19	0.019	39	0.018	59	0.016
20	0.025	40	0.019	60	0.016
21	0.015	41	0.022	61	0.021
				62	0.018
20	0.025	40	0.019	60	0.016
21	0.015	41	0.022	61	0.021
				62	0.018

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

- Longitud promedio

En la tabla de resultados: Resultados >> Summarize

Mean	3.938E-6	94.008	28.271	37.770	176.949	-65.443	0.019
SD	4.856E-7	16.306	8.432	15.678	42.386	53.118	0.002
Min	2.959E-6	67.123	13.105	13.000	102.000	-135.000	0.015
Max	4.759E-6	122.088	53.088	60.379	255.000	119.358	0.024

Figura 17-3: Longitud promedio según ImageJ

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

De donde:

$$Lp = 0.019$$

5. Cálculo del error

Para validar el resultado se debe:

- Calcular el tamaño de grano austenítico, mediante cualquier procedimiento que indica la Norma ASTM E112
- Determinar el diámetro promedio del grano, el mismo que corresponde a la longitud de las agujas de martensita
- Calcular el porcentaje de error, se ha considerado un margen de error tolerable hasta el 10%

$$\%error = \frac{|L_d - L_p|}{L_p} * 100 \quad (3-3)$$

Donde:

Ld: Longitud en función al tamaño de grano ASTM

Lp: longitud promedio

Este paso se ha realizado los resultados obtenidos en la Tabla 4-3, en donde para el Acero AISI 4140 a 800°C, templado en agua a 15°C la longitud de martensita corresponde a 0.0189

Tabla 13-3: Cálculo del error

z	p	(1-p)	e	n	Long. ASTM	Long. Prom.	Error
1.96	0.2007	0.7993	0.1	62	0.0189	0.019	1%

Realizado por: Aguirre, Diana, 2019

CONCLUSIONES

- Mediante la aplicación de tratamientos térmicos específicamente el temple, se ha podido obtener distintas longitudes de martensita, esto gracias a la inestabilidad de la austenita durante el enfriamiento, lo que hace la microestructura austenítica se transforme rápidamente en martensita, concluyendo que la formación de las agujas de martensita depende de la temperatura más no del tiempo de transformación, recordando que el temple se realiza a velocidades sumamente rápidas.
- El crecimiento de las agujas de martensita depende directamente del crecimiento de los granos de austenita, al llegar al borde de un grano austenítico las agujas cambian de dirección, pero nunca sobrepasan este límite, concluyendo que la longitud promedio de las agujas de martensita principales equivalen al diámetro del grano de austenita.
- Entre el cálculo de tamaño de la longitud de las agujas de martensita mediante el tamaño de grano ASTM y el procedimiento planteado, el error está dentro del margen de error tolerable 10%, sin embargo a pesar de tener el mismo tamaño de grano hay agujas que varían, este se debe a que el porcentaje de martensita varía entre muestras, por tal razón el cálculo del número de muestras se ve afectado.
- La dureza del material depende de la longitud de la martensita, a medida que las agujas de martensita crecen, la dureza se incrementa, lo que quiere decir que si se lograra una transformación completa de la austenita en martensita la dureza alcanzaría su valor máximo en el material.
- Los resultados del ensayo de tracción no dependen de la longitud del tamaño de la aguja de martensita, los valores del esfuerzo de tracción no varían significativamente a medida que la longitud de martensita se incrementa.
- Al atribuirle mayor dureza al material este se hace más frágil, esto se puede comprobar con la curva esfuerzo deformación, en donde la resistencia a la tracción coincide con la resistencia a la fractura, siendo esta una característica propia de los materiales frágiles.

- Independientemente del tipo de microscopía que se utilice en las investigaciones, los resultados dependen netamente de la interpretación del investigador, la microscopía ofrece un sin número de información útil, que se debe discernir en base a la teoría que se ha estudiado o a los resultados de análisis anteriores, para esta investigación, fue necesario entender teóricamente la formación de la martensita, las propiedades que proporciona a los materiales, las características como la forma o el color, ayudo a identificar la estructura martensita en los aceros estudiados.

RECOMENDACIONES

- Al realizar cualquier tipo de ensayo, sea destructivo o no, se deben tomar las precauciones necesarias como el uso del equipo protección personal ya sea el uso de mandil, guantes, gafas o casco, luego verificar el estado de los equipos y el funcionamiento instalaciones eléctricas, al igual que contar los recursos necesarios para la realización del ensayo.
- Para obtener resultados confiables, se recomienda cumplir con las especificaciones que plantean cada una de las normas para la preparación de muestras metalográficas, ataque químico, medición del tamaño de grano, ensayo de dureza y tracción
- Se recomienda ampliar la investigación, pero con aceros de distinto contenido de carbono, ya que, en los materiales utilizados en esta investigación, el contenido de carbono es semejante, incluso se podría cambiar algunas de las variables implicadas en la investigación como la temperatura de austenización o medio de enfriamiento.
- Se recomienda realizar investigaciones sobre la austenita retenida, los factores que impiden que se produzca una transformación completa y cómo influye esto en las propiedades de los aceros.
- Para evitar resultados atípicos en el ensayo de tracción es recomendable ensayar en al menos tres probetas y sacar un resultado promedio, tomando en cuenta que, si la probeta se fractura fuera de la longitud calibrada, el ensayo nos sirve y hay que repetir.
- Para medir la dureza del material se recomienda tomar algunas mediciones antes del número de mediciones que se vayan a promediar, esto a fin de que el equipo se estabilice.

BIBLIOGRAFÍA

ALLAUCA, F. Influencia de la Microestructura sobre las Propiedades Mecánicas en Varillas de Acero (Trabajo de titulación) (Grado). Escuela Superior politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica. Riobamba - Ecuador. 2011. pp. 20-43

APONTE, J.A. & VILLAZÓN, H.A. "Aspectos básicos de los materiales usados en ingeniería". *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 11, (2001) (Colombia) pp. 35-40. ISSN 0124-8170. DOI 10.18359/rcin.1352.

APPOLD, H. et al., 2002. *Tecnología De Los Metales para profesiones técnico mecánicas*. Eschborn-Republica Federal de Alemania: Reverté. 2002. pp. 29-39

ASHBY, M.F. & JONES, D.R.H. *Engineering Materials 2: And Introduction to Microstructures, Processing and Design*. 3^a ed. Butterworth-Heinemann: ELSEVIER. 2005. ISBN 9780750663816, pp. 90-95

ASHBY, M.F. & JONES, D.R.H. *Materiales para ingeniería 1: Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño*. 2^a ed.: Butterworth-Heinemann: Editorial Reverté. 2008 ISBN 9788429172553. pp. 91-99

ASM INTERNATIONAL. *Introduction to Hardness testing*. En: H. CHANDLER 2^{da} ed. 1999.

ASTM E18-08b. *Standard test methods for Rockwell hardness of metallic materials*. 2008.. Disponible en:

ASTM E112-13. *Standard test methods for determining average grain size*. 2013 ASTM International. DOI 10.1520/E0112-13.1.4 pp. 1-28. Disponible en: <http://www.astm.org>.

ASTM E- 407-07. *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys 1*. 2015. ASTM International. Disponible en: <http://www.astm.org>..

ASTM E3-11. *Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens* 2017. ASTM International. Disponible en: <http://www.astm.org>.

ASTM E8/E8M. *Standard test methods for tension testing of metallic materials 1*. 2010. D STM International. Disponible en: <http://www.astm.org>.

BOHLER, A. *Manual de Aceros Especiales*. 2010. Colombia. [en línea] [Consulta: 20 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.constantinodelgado.com/catalogosgratis/aceros-bohler/aceros-bohler-0001>

BÖHLER, A. *Aceros Bohler Uddehikm.* 2019 [en línea]. [Consulta: 23 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.bohlerandina.com/es/products/v124sc/>.

CALLISTER, W.D. *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales* 2ª ed. Reverté 1998 ISBN 842917253X. pp. 65-78

CALLISTER, W.D. & RETHWISCH, D.G. 2016. *Ciencia e Ingeniería de Materiales.* 9ª ed.. Reverté. pp. 88-91. ISBN 9788429172515.

DAVIDSON, M.W. & ABRAMOWITZ, M. 2002. *Encyclopedia of Imaging Science and Technology.* [en línea]. Florida - Estados Unidos. [Consulta: 16 Octubre 2019]. . Disponible en: <http://microscopu.fsu.edu>. pp 1-20. DOI 10.1002/0471443395.

DAVIS, J.R. *Introduction to Tensile Testing.* 2ª ed. 2004. pp. 1-13.

FERNÁNDEZ, P.S. 2011. *Modificación superficial de materiales de carbono: grafito y grafeno.* (Trabajo de titulación)(Doctorado). Universidad de Oviedo, Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Oviedo - España. 2011. pp.3-15

FLORES, I.J.L.M. *Aceros y sus Aplicaciones* (Trabajo de titulación) (Maestría). [en línea] Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, División de Estudios de Postgrado. Monterrey - México. 1996. pp. 2-10. <http://eprints.uanl.mx/421/1/1020118272.PDF>.

GARCÍA, C.A. *Tratamientos Térmicos del Acero al Boro Utilizados para Implementación Agrícola.* (Trabajo de titulación) (Maestría). [en línea] Centro de Investigación de Materiales Avanzados. Chihuahua - México. 2013. pp. 8-16. [Consulta: 13 Diciembre 2019] Disponible en: <https://cimav.repositorioinstitucional.mx>

GARCÍA, G. 2014. *Alivio de tensiones residuales.: Tratamiento térmico vs. Vibración.* (Trabajo de titulación) (Maestría). Universidad Pública de Navarra, Escuela Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones. Pamplona - España. 2014. pp. 5-7

GRISEBACH, H. & VOLLMER, K.O. "Untersuchungen zur Biosynthese des Salicylsäuremethylesters in *Gauiheria procumbens* l". 6ª ed. (1963) (Alemania). pp. 4-6 ISBN 987-607-481-620-4.

E3-Hardness. *Tribology Handbook.* 1995. pp. E3.1.

HERRING, D.H. 2005. "Grain size and its influence on materials properties". *Industrial Heating* [en línea], (2005), pp. 1-2 [Consulta: 8 diciembre 2019]. ISSN 630.834.3017 Disponible en: https://www.academia.edu/8627997/Grain_Size_and_Its_Influence_on_Materials_Properties

KHERA, K. et al. "Investigation of the Effects of Various Heat Treatment Processes on

Microstructure & Hardness with Respect to Corrosion Behavior for Carbon Steels". *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, vol. 3, no. 6 (2014), (India). pp. 72-75

KRAUSS, G., 1999. "Martensite in steel: Strength and structure". *Materials Science and Engineering A 273-275*. (1999). pp. 40-57. ISSN 09215093. DOI 10.1016/s0921-5093(99)00288-9.

LLULLUNA, F.R.L. *Procesamiento De Imágenes Mediante Software Libre Python Para El Análisis Metalográfico En Aceros* (Trabajo de titulación) (Grado). [en línea] Escuela Politécnica Nacional, Facultad De Ingeniería Mecánica. Quito - Ecuador. 2014. pp. 25-30 [Consulta: 13 Septiembre 2019] Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7171/1/CD-5361.pdf>.

MAZÍNOVÁ, I. y FLORIAN, P. 2014. *Materials selection in mechanical design* [en línea]. Third Edit. S.l.: Elsevier Inc. [Consulta: 17 diciembre 2019]. ISBN 0 7506 6168 3. Disponible en: https://www.academia.edu/30576917/Materials_Selection_in_Mechanical_Design_3rd_Edition_-_By_Michael_F._Ashby_.

MORRIS, J.W. "The Influence of Grain Size on the Mechanical Properties of Steel". *Metallurgical Transactions* [en línea]. 1970. (United States): [Consulta: 11 diciembre 2019]. Disponible en: <http://www.osti.gov/servlets/purl/861397/>.

NUTTING, J. et al. *Encyclopaedia Britannica*, Schuman Plan | Britannica.com.Inc [en línea], (2019) [Consulta: 11 octubre 2019]. Disponible en: <https://www.britannica.com/technology/steel>.

OSPINA, R. et al. "Soldabilidad en aceros inoxidable y aceros disimiles". *Scientia et Technica*. [en línea]. 2007. (Colombia) vol. 2, no. 34, pp. 273-278. [Consulta: 1 de Enero 2020] ISSN 0122-1701. DOI 10.22517/23447214.5571. Disponible en: <https://www.redalyc.org/comocitar.oa?id=84934046>

PARODI, S. et al. 2018. "Obtaining low alloy steels with different ni contents and similar microstructures and mechanical properties". *Revista Materia*, vol. 23, no. 2. (2018). (Argentina). pp. 98. ISSN 15177076. DOI 10.1590/S1517-707620180002.0374.

PASTOR, A., 2015. *Estudio de la Transformación Martensítica, Optimización de la Microestructura y Prevención de la Rotura Frágil en Piezas Coladas de Acero X38CrMoV5-1 de Alta Resistencia* (Trabajo de titulación) (Doctorado). Universidades Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Físicas, Departamento de Física de Materiales. Madrid - España. 2015. pp 4-13

POWDERTRONIC. Tipos de horno industrial para tratamiento térmico. [en línea]. (2019)

[Consulta: 1 diciembre 2019]. Disponible en: <https://powdertronic.com/tipos-de-horno-industrial-para-tratamiento-termico/>.

ROANE, T.M. et al. 2009. "Microscopic Techniques". *Environmental Microbiology*. (2009) Elsevier Inc. pp. 157-172. ISBN 9780123705198.

SALAS, F. et al. "Influencia Del Carbono En Las Propiedades Del Acero Para Refuerzo De Hormigón". *Tecnología Química*. [en línea] 2009. (Cuba) vol. XXIX. pp. 60-69. [Consulta: 25 de Enero 2020] ISSN 0041-8420. DOI 10.1590/2224-6185.2009.0.%x. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543761008>

BUSCHOW, K. *Encyclopedia of Materials*. Science and Technology. 2ª ed. Science and Technology. 2011. pp. 6783-6787

SOLA, A. *Elaboración de un Manual para la Selección y Control de Materiales*. (Trabajo de Titulación) (Pregrado) Escuela Politécnica Nacional, Escuela de Formación de Tecnólogos. Quito - Ecuador. 2009. pp 225-240.

SORIA, M. et al. "Efecto del tratamiento térmico sobre las propiedades mecánicas y microestructura de un acero para tubería API 5CT J55". *Ingeniería, Investigación y Tecnología*. vol. 16, no. 4. (2015). pp. 539-550. ISSN 14057743. DOI 10.1016/j.riit.2015.09.006.

TECNALIA. *Ingeniería de Materiales*. (2019) [en línea]. Servicios Tecnológicos [Consulta: 21 noviembre 2019]. Disponible en: www.tecnalia.com.

TORRES, C. 2007. *Transformación Martensítica y Efecto Memoria en Materiales Micro y Nanoestructurados*. (Trabajo de Titulación) (Maestría) [en línea], pp. 88. [Consulta: 23 noviembre 2019] Disponible en: http://ricabib.cab.cnea.gov.ar/264/1/1Espinoza_Torres.pdf.

VEGA, V. et al. "Realización De La Tabla Tecnológica De Un Acero Grado 60". *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*. vol. 2, no. 4, (1999) pp. 95-122. ISSN 1682-3087.

VIDAURRI, J. *Recubrimiento Superficial por Soldadura Disminuyendo el Calor de Entrada: Implementación de la Resistencia al desgaste con Bajo Aporte Térmico* (Trabajo de Titulación) (Maestría). [en línea]. Coporación Mexicana de Investigación en materiales, División de estudios de postgrado. Saltillo - México. 2011. pp. 6-9. [Consulta: 23 noviembre 2019]. Disponible en: <https://comimsa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1022/24/1/JONATANVIDAURRI.pdf>.

WALLEY, S.M. 2012. "Historical origins of indentation hardness testing". *Materials Science and Technology*, vol. 28, no. 9-10, (2012). (United Kingdom). pp. 1028-1044. ISSN 02670836. DOI 10.1179/1743284711Y.0000000127.

ZHOU, W. et al. 2007. "Fundamentals of scanning electron microscopy (SEM)". *Scanning Microscopy for Nanotechnology: Techniques and Applications*. (2007). pp. 1-40. DOI 10.1007/978-0-387-39620-0_1.