

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA MECÁNICA**

**Proyecto técnico previo a la obtención de título de.
INGENIEROS MECÁNICOS**

**TEMA:
EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y DUREZA DEL
ACERO AISI/SAE 4140, TRATADO TÉRMICAMENTE POR TEMPLE Y
REVENIDO.**

**AUTORES:
JEFERSON DANILO CARVAJAL GUALOTO
JUAN ANDRÉS GARZÓN ANDRADE**

**TUTOR:
MILTON SALOMÓN JAMI LEMA**

Quito, agosto del 2019

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros Jeferson Danilo Carvajal Gualoto, con documento de identificación N°1717852501 y Juan Andrés Garzón Andrade, con documento de identificación N°1721038345 manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado. “EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y DUREZA DEL ACERO AISI/SAE 4140, TRATADO TÉRMICAMENTE POR TEMPLE Y REVENIDO”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Jeferson Danilo Carvajal Gualoto

C.I. 1717852501



Juan Andrés Garzón Andrade

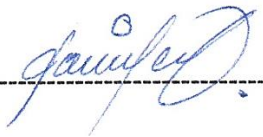
C.I. 1721038345

Quito, Agosto del 2019

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y DUREZA DEL ACERO AISI/SAE 4140, TRATADO TÉRMICAMENTE POR TEMPLE Y REVENIDO”, realizado por Jeferson Danilo Carvajal Gualoto y Juan Andrés Garzón Andrade, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, agosto del 2019



Milton Salomón Jami Lema

C.I.: 1707254171

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTO

Dedico este trabajo a mi familia, por el enorme apoyo y sacrificio lo que ha hecho posible alcanzar mi propósito. Sé que siempre contaré con ellos en cualquier circunstancia de la vida y estoy consciente que sin su apoyo nada de esto se hubiese hecho realidad.

Agradezco a mi compañero Juan Garzón por el incondicional apoyo durante la elaboración de proyecto, equipo de trabajo de la empresa ILPM Cia. Ltda y tutores que a más de ser docentes fueron verdaderamente guías y mentores que han sabido impartir sus enseñanzas y conocimientos, permitiendo que esta investigación sea concluida, sobre todo aquellas personas que de una u otra manera han sido un sustento para hacer realidad mis objetivos, agradezco en especial a Dios y a mis padres quienes supieron guiar cada paso de mi vida estudiantil.

Jeferson Danilo Carvajal Gualoto

Agradezco a Dios primeramente por permitirme cumplir una meta propuesta al empezar esta etapa de mi vida, por darme sabiduría y paciencia en momentos difíciles, agradezco a mi familia en especial a mis Padres y abuelitos quienes han sido parte importante quien con sus valores sus consejos y su apoyo infinito en momentos buenos y malos me han ayudado para ser cada día mejor, a mi hermano quien me ha brindado siempre su apoyo. A mi novia Yarixa y familia Por su apoyo incondicional y enseñarme a seguir luchando cada día por las metas y sueños propuestas.

Al igual que a mi compañero Jeferson Carvajal por su trabajo y dedicación para culminar y poder cumplir las metas propuestas y a todo el personal de la empresa ILPM Cia. Ltda quienes me han brindado su apoyo durante el trayecto del trabajo de titulación.

Agradezco al docente de la universidad Politécnica Salesiana por los conocimientos impartido durante la etapa estudiantil en especial a nuestro tutor Milton Jami quien con sus conocimientos hemos podido sacar adelante este trabajo.

Juan Andrés Garzón Andrade

ÍNDICE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR	ii
DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTO	iii
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN	xiv
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	xv
JUSTIFICACIÓN.....	xvi
OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	xvii
CAPÍTULO I.....	1
ACERO AISI / SAE 4140.....	1
1.1. Características del acero AISI 4140.....	1
1.1.1. Composición química del acero AISI 4140	1
1.1.2. Efecto de los elementos aleantes en el acero AISI/SAE 4140	2
1.1.3. Aplicación del acero AISI/SAE 4140	3
1.2. Tratamiento térmico	4
1.2.1. Temple.....	5
1.2.2. Revenido.....	5
1.3. Lubricantes especiales para tratamiento térmico	6
1.3.1. IBERTEM 34	6
1.3.2. IBERTEM 99-F.....	7
1.4. Designación y clasificación de los aceros.....	7
1.5. Diagrama Hierro – Carbono.....	8
1.5.1. Diagrama de transformación de enfriamiento continuo	9
1.5.2. Constituyentes	11

1.6.	Fundamentación legal	12
1.7.	Ensayos de Dureza	13
1.7.1.	Rangos y magnitudes de las probetas para el ensayo	14
1.8.	Ensayo de tracción	15
1.9.	Ensayo metalográfico.....	17
1.9.1.	Documentos relacionados.....	18
1.9.2.	Probetas metalográficas.....	18
1.9.3.	Método de preparación	18
1.9.4.	Determinación de tamaño de grano	20
1.9.5.	Ataque químico de las muestras metalográficas	21
1.9.6.	Medición y tipo de inclusiones.....	21
CAPÍTULO II		24
MATERIALES, METODOS Y PROCEDIMIENTOS		24
2.1.	Fabricación de especímenes para ensayos	24
2.1.1.	Probetas de tracción.....	24
2.1.2.	Probetas para metalografías, dureza y composición química.....	26
2.2.	Tratamiento térmico de temple y revenido	27
2.3.	Medición de durezas	28
2.4.	Procedimiento de ensayo de tracción.....	31
2.5.	Procedimiento de ensayo metalográfico	35
2.5.1.	Montaje de la muestra	35
2.5.2.	Esmerilado de las probetas	35
2.5.3.	Método de preparación según ASTM E 3	36
2.5.4.	Pulido final	36
2.5.5.	Ataque químico	37
CAPÍTULO III.....		40
ANÁLISIS DE RESULTADOS		40

3.1.	Composición química del acero AISI/SAE 4140.....	40
3.2.	Propiedades mecánicas - Ensayo de tracción.....	40
3.3.	Propiedades mecánicas – Ensayo de dureza	42
3.4.	Ensayo metalográfico.....	44
3.5.	Tratamiento térmico	46
3.5.1.	Resultado de ensayo de tracción posterior al revenido	49
3.5.2.	Resultado de ensayo de dureza posterior al tratamiento térmico	54
3.5.3.	Análisis comparativo de las muestras	60
3.5.4.	Resultados metalográficos.....	60
3.6.	Temple con escalonamiento.....	66
CAPITULO IV		69
COSTOS.....		69
4.1.	Análisis comparativo.....	69
4.2.	Costos.....	71
CONCLUSIONES		72
RECOMENDACIONES		73
BIBLIOGRAFÍA.....		74
ANEXOS.....		76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de aceros en la carrocería	3
Figura 2. Representación gráfica de un tratamiento térmico.	4
Figura 3. Temperatura de revenido vs Resistencia mecánica	6
Figura 4. Diagrama Hierro-Carbono	9
Figura 5. Diagrama de enfriamiento continuo para un acero $\geq 0,38\% C$	10
Figura 6. Diagrama CCT para un acero de 0,38 %C	10
Figura 7. Fases del acero (0,38 a 0,43% de carbono)	12
Figura 8. Esquema de la medición de dureza Rocwell	13
Figura 9. Mordazas para máquina de ensayo de tracción.	15
Figura 10. Dimensionamiento de probeta de tracción según ASTM E8	16
Figura 11. Curva Esfuerzo- Deformación.....	17
Figura 12. Sentido de desbaste para pasar de una lija a otra	18
Figura 13. Pulidora de probetas metalográficas.....	19
Figura 14. Microscopio metalográfico invertido micros AUSTRIA.	19
Figura 15. Tamaño de grano mediante método de comparación de Imágen	21
Figura 16. Inclusiones tipo A según ASTM E45	22
Figura 17. Inclusiones tipo B según ASTM E45	23
Figura 18. Inclusiones tipo C según ASTM E45	23
Figura 19. Inclusiones tipo D según ASTM E45	23
Figura 20. Dimensionamiento de las probetas para ensayo de tracción	24
Figura 21. Maquinado de probetas de tracción.	25
Figura 22. Probetas de tracción para tratamiento térmico.	25
Figura 23. Cortadora de cinta automática, método de corte en frío.....	26
Figura 24. Probetas para ensayos de dureza (A) y metalografía (B)	26
Figura 25. Hornos para temple (A) y revenido (B) Nabertherm.....	27

Figura 26. Tratamiento térmico	28
Figura 27. Medición de dureza en material base AISI/SAE 4140	29
Figura 28. Durómetro de banco propiedad de ILPM Cia. Ltda	30
Figura 29. Separación mínima entre indentación.....	31
Figura 30. Control dimensional de las probetas de tracción.....	32
Figura 31. Máquina para ensayo de tracción	33
Figura 32. Proceso de rotura de las muestras de acero AISI/4140 bonificado.	33
Figura 33. Esquema de límite de fluencia por método de desfase.....	34
Figura 34. Curva de ensayo Mediante Software Max Test.....	34
Figura 35. Preparación de probetas metalográficas	36
Figura 36. Pulido final en el paño y alúmina 0,3 μm	37
Figura 37. Método de interpretación de imagen PAX-IT	38
Figura 38. Implementación de equipo para análisis micro estructural	38
Figura 39. Muestras ensayadas previo al tratamiento.....	41
Figura 40. Curva de Esfuerzo vs Deformación de T1 MB	42
Figura 41. Curva de esfuerzo vs deformación de T2 MB.....	42
Figura 42. Inclusiones acero AISI/SAE 4140 bonificado.....	44
Figura 43. Microestructura del acero AISI 4140 bonificado	45
Figura 44. Formación de ferrita acicular y presencia de ferrita equiaxial	45
Figura 45. Detalle del tratamiento térmico de temple.....	46
Figura 46. Diagrama tiempo vs temperatura de austenización	47
Figura 47. Grano austenítico acero AISI 4140 templado a 850 °C	48
Figura 48. Gráfica de temple y revenido a 540°C del acero AISI 4140	49
Figura 49. Curva de esfuerzo vs deformación revenido a 540 °C	50
Figura 50. Gráfica de temple y revenido a 590 °C	51
Figura 51. Curva de esfuerzo vs deformación revenido a 590°C	52

Figura 52. Gráfica de temple y revenido a 640°C	53
Figura 53. Curva de esfuerzo vs deformación revenido a 640 °C	53
Figura 54. Dureza vs Temperatura de revenido 540°C.....	55
Figura 55. Dureza vs Temperatura de revenido 590 °C.....	57
Figura 56. Dureza vs Temperatura de revenido 640 °C.....	58
Figura 57. Inclusiones del acero AISI/SAE 4140 revenido a 540 °C.....	60
Figura 58. Inclusiones del acero AISI 4140 revenido a 540 °C.....	61
Figura 59. Martensita revenida a 540 °C del acero AISI 4140	62
Figura 60. Inclusiones del acero AISI 4140 revenido a 590°C.....	62
Figura 61. Inclusiones del acero AISI 4140 revenido a 590°C.....	63
Figura 62. Martensita revenida, muestra TT3 (A) y muestra TT4 (B)	63
Figura 63. Inclusiones del acero AISI 4140 revenido a 640°C.....	64
Figura 64. Inclusiones del acero AISI 4140 revenido a 640 °C.....	65
Figura 65. Martensita revenida a 640 °C del acero AISI 4140	65
Figura 66. Temple con escalonamiento	66
Figura 67. Temple y revenido a 300°C del acero AISI 4140.....	67
Figura 68. Esfuerzo vs deformación AISI/SAE 4140 revenido a 300°C.....	68
Figura 69. Resistencia a la tracción vs temperatura de revenido	69
Figura 70. Dureza vs temperatura de revenido AISI 4140	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades mecánicas del acero AISI/SAE 4140	1
Tabla 2. Valores promedio en porcentaje de composición química	2
Tabla 3. Parámetros del diagrama de revenido vs resistencia mecánica	6
Tabla 4. Designación de los aceros AISI/SAE	7
Tabla 5. Composición química de aceros designación AISI/SAE	8
Tabla 6. Relación entre resistencia a la tracción y dureza	14
Tabla 7. Tipos de dureza y su aplicación	14
Tabla 8. Limitación de dureza y dimensional de los durómetros.....	15
Tabla 9. Nomenclatura para probetas de tracción según ASTM E8	16
Tabla 10. Especificaciones de máquina pulidora de probetas.....	19
Tabla 11. Especificaciones de microscopio metalográfico	20
Tabla 12. Especímenes empleados para los ensayos	28
Tabla 13. Rango dimensional de las probetas	29
Tabla 14. Especificaciones del durómetro de banco	30
Tabla 15. Especificación de la máquina de tracción	32
Tabla 16. Caracterización de la etapa de pulido y tiempos de trabajo	36
Tabla 17. Solución implementada en el ataque químico de aceros al carbono.....	38
Tabla 18. Composición química del material base AISI 4140.....	40
Tabla 19. Geometría de la probeta de tracción.....	41
Tabla 20. Resultado del ensayo de tracción AISI 4140 bonificado	41
Tabla 21. Valores de dureza obtenidos en el acero AISI/SAE 4140 bonificado	43
Tabla 22. Detalles de las inclusiones del acero AISI/SAE 4140	44
Tabla 23. Características del proceso de temple	46
Tabla 24. Valores de dureza AISI 4140 Temple a 850 °C.....	48

Tabla 25. Resistencia mecánica del acero AISI/SAE 4140 revenido a 540 °C	50
Tabla 26. Resistencia mecánica del acero AISI/SAE 4140 revenido a 590 °C	52
Tabla 27. Resistencia mecánica del acero AISI/SAE 4140 revenido a 640°C	54
Tabla 28. Valores de dureza del acero AISI 4140 revenido a 540 °C	55
Tabla 29. Dureza del acero AISI 4140 revenido a 590 °C.....	57
Tabla 30. Dureza del acero AISI 4140 revenido a 640 °C.....	59
Tabla 31. Características de las inclusiones del acero AISI 4140.....	60
Tabla 32. Características de las inclusiones del acero AISI 4140 Muestra TT2.....	61
Tabla 33. Características de las inclusiones del acero AISI 4140 Muestra TT3.....	62
Tabla 34. Características de las inclusiones del acero AISI 4140 Muestra TT4.....	63
Tabla 35. Características de las inclusiones del acero AISI 4140 Muestra TT5.....	64
Tabla 36. Características de las inclusiones del acero AISI 4140 Muestra TT6.....	65
Tabla 37. Parámetros y tiempos de austenización	66
Tabla 38. Dureza con temple escalonado a 850 °C y revenido 300 °C.....	67
Tabla 39. Resistencia mecánica del acero AISI 4140 revenido a 300°C	68
Tabla 40. Costos del proyecto	71

RESUMEN

En el Capítulo I, se habla sobre las características del acero AISI/SAE 4140 que deben ser tomadas en cuenta para la fabricación de piezas y partes de la industria automotriz y el efecto de los aleantes en el acero que resultan ser de gran importancia antes de realizar un tratamiento térmico.

En el Capítulo II, menciona acerca de los métodos que se emplean para realizar el tratamiento térmico de temple y revenido además de los métodos de ensayos de dureza y resistencia a la tracción para la obtención de resultados conjuntamente con el uso e implementación de normas para cada ensayo. Se describe las características de los equipos empleados para los diferentes ensayos.

En el Capítulo III de la investigación hablaremos sobre el proceso llevado a cabo para el tratamiento térmico del acero AISI/SAE 4140 templado a 850°C y revenido a 300°C, 540°C, 590°C y 640°C. Se evaluaron las propiedades químicas y mecánicas llegando al punto de realizar ensayos de tracción, dureza y análisis microestructural de las muestras tomando en cuenta las normas de ensayo correspondientes permitiendo obtener resultados suficientes para hacer una comparación entre las variables propuestas.

En el Capítulo IV, de los valores obtenidos mediante los ensayos realizados se plantea la comparación de los valores y evaluación de resultados, donde se concluyó que la resistencia a la tracción y dureza del acero AISI/SAE 4140 aumenta conforme disminuye la temperatura de revenido.

Palabras claves: ensayo de tracción, revenido, temple

ABSTRACT

In the chapter I, we talk about the characteristics of AISI/SAE 4140 steel that should be taken into account for the manufacture of pieces and parts of the automotive industry and the effect of alloying on steel that are of great importance before perform a heat treatment.

In the Chapter II, it mentions about the methods that are used to carry out the tempering and tempering heat treatment, in addition to the methods of tests of hardness and resistance to the traction for the obtaining of results together with the use and implementation of norms for each trial. The characteristics of the equipment used for the different tests are described.

In the chapter III of the investigation we will talk about the process carried out for the thermal treatment of AISI / SAE 4140 steel quenched at 850 ° C and tempered at 300°C, 540 ° C, 590 ° C and 640 ° C. The chemical and mechanical properties were evaluated, reaching the point of performing tensile tests, hardness and microstructural analysis of the samples, taking into account the corresponding test standards allowing obtaining sufficient results to make a comparison between the proposed variables.

In the chapter IV, of the values obtained through the tests carried out, the comparison of the values and evaluation of results is considered, where it was concluded that the tensile strength and hardness of the AISI / SAE 4140 steel increases as the tempering temperature decreases.

Keywords: traction test, tempering, quenching

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, uno de los materiales más usados para construcción de maquinaria es el acero AISI/SAE 4140 que son de mayor demanda en nuestro país, considerando que existe una gran variedad de materiales que pueden satisfacer las necesidades de la industria, pero al no tener una información completa del acero o de los beneficios que puede brindar en cuanto a la calidad, no se los puede seleccionar.

Es evidente que los aceros y otros materiales dentro de la ingeniería mecánica están sujetos a grandes esfuerzos, de manera que es necesario realizar un estudio de las propiedades mecánicas que permitan determinar si el material ha sido seleccionado de manera adecuada y que cumpla con las especificaciones del fabricante, así como el uso e implementación al que se encuentre planificado.

El presente trabajo describirá de manera experimental el tratamiento térmico de temple y revenido del acero AISI/SAE 4140 para evaluar las propiedades mecánicas del acero antes y después del tratamiento térmico, no obstante en la actualidad la información que se requiere acerca de las propiedades mecánicas de los aceros es la que se obtiene de los catálogos de las dos casas comerciales con mayor disponibilidad de aceros en el sector industrial Ivan Bohman y aceros del Ecuador Bohler que distribuye variedad de aceros en el sector industrial.

La utilización del acero AISI 4140 se ha diversificado y extendido para satisfacer la demanda de las diferentes industrias que los utilizan como repuestos, especialmente para la industria automotriz, generación de energía y extracción de petróleo. Ciertamente la industria automotriz le da mucha importancia a la selección del material y requieren que ciertas piezas y repuestos cumplan las especificaciones y requerimientos como alta resistencia a la tracción, resistencia a la torsión, alta absorción de energía y durabilidad.

Si bien es cierto que el tipo de servicio o aplicación que brinda el acero AISI 4140, no es suficiente implementar este tipo de acero sin antes haber aplicado algún tratamiento térmico.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las empresas de la industria local utilizan constantemente piezas y partes para repuestos de maquinarias y elementos en el sector automotriz de manera que no existe un control sobre la información aplicada a estos elementos mecánicos sobre las propiedades mecánicas, químicas y en ciertas ocasiones análisis microestructural del acero AISI/SAE 4140 al aplicar un tratamiento térmico, en varios casos no cumplen con el requerimiento solicitado por el cliente, muchas de las veces el acero sufre cambios micro estructurales viéndose afectado por la temperatura debido a los ciclos de trabajo o agentes externos, por otro lado cuando un elemento en la industria automotriz fabricado con este tipo de acero se fractura, es necesario realizar un remplazo del repuesto por completo y no resulta factible aplicar soldadura de reparación debido a los daños que puede sufrir la microestructura del acero, por lo cual es necesario dar a conocer los parámetros de fabricación y análisis de las propiedades mecánicas antes de usar o implementar en elementos y repuestos de la industria mecánica.

JUSTIFICACIÓN

Las aplicaciones del acero en la industria nacional con tratamientos térmicos que son aplicados como temple y revenido han permitido mejorar las propiedades mecánicas esto hace que se pueda seleccionar el tipo de acero de acuerdo al elemento de fabricación o aplicación al que es sometido el material, por lo que en el presente proyecto investigativo pretende dar a conocer a profundidad el cambio microestructural y de las propiedades mecánicas del acero AISI/SAE 4140 luego de aplicar el tratamiento térmico de temple y revenido.

Es importante indicar que, en los catálogos de la empresa Böhler S.A. da como recomendación después de realizar el temple y revenido trabajar con una dureza de 52-54 HRC para una mayor optimización del acero AISI/SAE 4140.

Este trabajo se realiza con el fin de estudiar y comprobar con diferentes ensayos a varias temperaturas de los respectivos tratamientos térmicos de temple y revenido hasta llegar a los valores indicados del acero AISI/SAE 4140.

OBJETIVOS DEL PROYECTO

OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la resistencia a la tracción y dureza del acero AISI/SAE 4140, tratado térmicamente por temple y revenido.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar las propiedades mecánicas de tracción y dureza del acero AISI/SAE 4140 en estado de suministro los cuales son usados en componentes de la industria local
- Fabricar las probetas de sección circular según las especificaciones del acero AISI/SAE 4140 y conforme a los parámetros de la norma ASTM E-8 y ASTM E-18 para ensayos de tracción y dureza respectivamente.
- Establecer el tratamiento térmico de temple a 850°C y revenido a 300°C, 540°C, 590°C y 640°C.
- Determinar las propiedades mecánicas del acero AISI/SAE 4140 posterior al tratamiento térmico desarrollado, ejecutando los ensayos de tracción y dureza correspondientes.
- Comparar los resultados de tracción y dureza alcanzados previo y posterior al tratamiento térmico, corroborando que los valores se encuentren dentro de los parámetros estándar de aceros Böhler S.A.
- Establecer el análisis económico respecto al uso e implementación de un acero AISI/SAE 4140 en estado de suministro y tratado térmicamente por temple y revenido.

CAPÍTULO I

ACERO AISI / SAE 4140

1.1. Características del acero AISI 4140

Es un acero bonificado con aleación cromo - molibdeno (Cr - Mo), posee alta resistencia a la tracción y torsión en medianas y pequeñas secciones. Gracias al contenido de molibdeno es insensible a la fragilidad por revenido y templeable superficialmente. [1]

La empresa de Aceros Bohler del Ecuador S.A, distribuye y entrega el acero AISI/SAE 4140 en estado bonificado y que a su vez posee valores de resistencia mecánica como resistencia ultima a la tracción de (90 a 105) kg/mm² y (900 a 1050) MPa, límite de fluencia de (70 a 90) kg/mm², límite de elongación de 10 % mínimo y dureza de suministro promedio de (25 a 30) HRC. [1]

En la Tabla 1 se puede observar las propiedades mecánicas del acero AISI/SAE 4140 en estado bonificado considerando que se va a emplear un diámetro de 22,20mm, el cual dispone y suministra la empresa de Aceros Bohler del Ecuador S.A.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del acero AISI/SAE 4140 [1]

Diámetro [mm]	Límite de fluencia [N/mm ²]	Resistencia a la tracción [N/mm²]	Elongación [%]	Resistencia al impacto [J]
16 a 40	750	1100 a 1200	11	35
40 a 100	650	900 a 1100	12	35

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

1.1.1. Composición química del acero AISI 4140

La composición química del acero se lo realiza con la finalidad de obtener un resultado porcentual de los elementos aleantes que compone el acero AISI/SAE 4140, los valores se los obtiene a partir del método de prueba estándar para análisis de carbono y aceros de baja aleación mediante OES (Espectrometría de Emisión Óptica por chispa). [2]

Este método de ensayo para el análisis espectro métrico de los metales y aleaciones está destinado al cumplimiento de las especificaciones del acero relacionado con lo que se establece en las normas ASTM para distintos tipos de acero, las pruebas deben

ser realizadas por analistas calificados para realizar procedimientos de laboratorio sin que exista peligro al manejar el equipo.

Una descarga controlada se produce entre el plano superficial del espécimen y contra electrodo. El radiante de la energía de las líneas analíticas seleccionadas se convierte en eléctrica. [3]

La energía por tubos fotomultiplicadores son almacenados en condensadores donde la descarga se termina en un nivel predeterminado acumulado. Al final del periodo de integración, la carga en cada condensador se mide y se registra como una energía relativa. [3]

A continuación, se presenta una tabla de los valores de composición química del acero con designación AISI/SAE 4140, conforme a lo establecido en el manual de aceros especiales Bohler del Ecuador, los valores están expresados en porcentaje como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores promedio en porcentaje de composición química [1]

AISI/SAE	%C	%Mn	%Si	%Ni	%Cr	Mo
4140	0,38-0,45	0,60-0,90	0,40	--	0,90-1,20	0,15-0,30

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

1.1.2. Efecto de los elementos aleantes en el acero AISI/SAE 4140

El contenido de cromo, manganeso, silicio y molibdeno añaden al acero AISI/SAE 4140 resistencia a la torsión, el fosforo y el azufre con menos de 0,040% están presentes en todo el acero y son considerados como impurezas.

- **Cromo:** Es un elemento soluble que se encuentra ilimitadamente en la ferrita y como consecuencia produce un ligero endurecimiento del material y el incremento de la resistencia a la corrosión, la solubilidad del cromo en fase austenítico depende del porcentaje de carbono del acero. [4]
- **Molibdeno:** La solubilidad de este elemento es mayor en la ferrita que en la austenita por lo que tiende a formar carburos muy estables a elevadas temperaturas. En consecuencia este elemento aleante aumenta la templabilidad de forma más eficiente que el cromo y elimina la fragilidad del proceso de revenido aumentando la dureza y mejorando la resistencia ala fluencia. [4]

- **Manganeso:** El manganeso se encuentra presente en todos los aceros ya que de esta forma neutraliza la acción muy negativa a consecuencia de la presencia del azufre y el oxígeno. Adicionalmente el manganeso incrementa la resistencia mecánica y la templabilidad. [4]

En porcentajes que superan el 11 % de manganeso, la microestructura del acero se hace austenítico aumentando la resistencia última a la tracción y se vuelve resistente al desgaste progresivo sin perder la ductilidad.

1.1.3. Aplicación del acero AISI/SAE 4140

En la industria automotriz se han implementado diversos tipos de acero entre los cuales se tiene: de primera generación, segunda generación (Industria automotriz), tercera generación. Estos aceros de tercera generación se han estado investigando, pero no se encuentran disponibles en la actualidad. [5]

Los aceros martensíticos corresponden a los aceros de la segunda generación y se caracterizan por la transformación de la Austenita en martensita, a pesar que esta contiene diminuta cantidad de fases de ferrita o bainita, actualmente son los más empleados en los vehículos, utilizándose principalmente para el refuerzo del parachoques, puertas, vigas de intrusión, ampollas de umbrales, travesaño lateral, línea del cinturón refuerzos, manantiales y clips. [5]

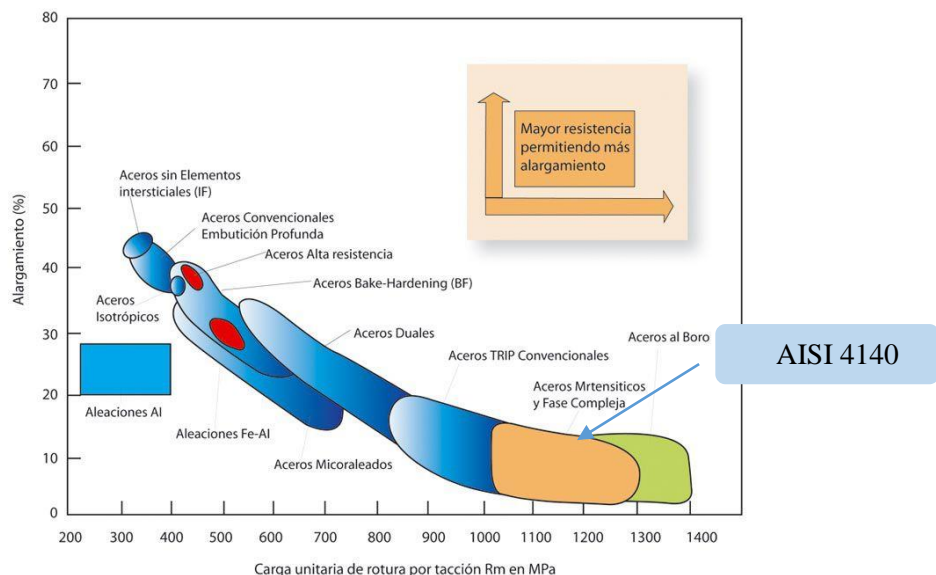


Figura 1. Tipos de aceros en la carrocería [5]

1.2. Tratamiento térmico

Para inducir un tratamiento térmico a un acero se debe tomar en consideración tres aspectos muy importantes los cuales corresponden a la temperatura de calentamiento, tiempo de permanencia y velocidad de enfriamiento. El objetivo de realizar un tratamiento térmico es mejorar las propiedades mecánicas y químicas del acero dependiendo del uso o aplicación de la herramienta. Los tratamientos térmicos más empleados son el temple, recocido, revenido y el normalizado. Todos estos procedimientos están relacionados con la descomposición de la Austenita, es por esta razón que uno de los primeros procedimientos es calentar el acero a la temperatura donde se obtenga 100 % de Austenita.

El tiempo y la temperatura son los factores principales que hay que plantearse siempre de antemano, de acuerdo con la composición del acero y la morfología que se desea obtener.

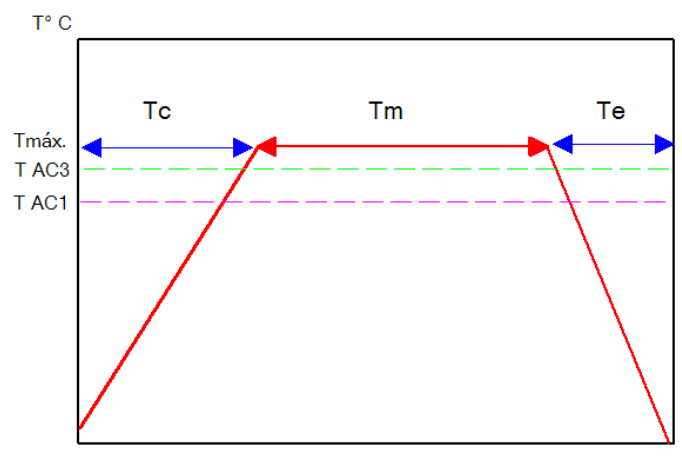


Figura 2. Representación gráfica de un tratamiento térmico.

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

En la Figura anterior se muestra gráficamente un tratamiento térmico sencillo donde se puede visualizar el T_c que se trata del tiempo de calentamiento, T_m es el tiempo de sostenimiento y finalmente T_e es el tiempo de enfriamiento, existen dos valores de temperatura durante el calentamiento que son importantes conocer, se trata de la temperatura AC_1 es aquella en la que empieza a aparecer el constituyente conocido como Austenita $723^{\circ}C$, mientras que la temperatura AC_3 conocida como la temperatura en la que toda la masa del acero se ha transformado completamente en

Austenita entre los 723 °C y 1148 °C, los valores definitivos de estas temperaturas varían de acuerdo a la proporción de carbono que contiene el acero.

1.2.1. Temple

Este tratamiento tiene como finalidad elevar la dureza del acero para incrementar su durabilidad en uso. En el caso de los aceros especiales como el AISI/SAE 4140 el porcentaje de carbono supera el 0,30 % lo cual en efecto existe suficiente carbono para ocupar los espacios de la estructura cubica de cara centrada (FCC) y en consecuencia se puede alcanzar elevadas durezas, la temperatura de temple viene determinada por el fabricante y es necesario mantener durante un espacio de tiempo a la temperatura designada para el acero seguido de un enfriamiento brusco en aceite o en agua a una velocidad superior a la crítica de temple para obtener por transformación una elevación de dureza. [1]

La temperatura para el temple del acero AISI/SAE 4140 es de 820 °C a 850 °C para un medio de enfriamiento en agua, si el medio de enfriamiento se da en aceite o en baño de sales con temperatura de 180 °C a 120 °C, se recomienda realizar el temple en un rango de temperaturas de 830°C a 860 °C. [1]

1.2.2. Revenido

Su finalidad principal es disminuir las tensiones causadas por el choque térmico del temple, con lo que estabiliza la estructura martensítica inestable, es recomendable realizar el revenido inmediatamente después del temple, ya que la estructura del acero tiende a volver a su estado natural, pudiendo ser causa de fisuras. [6]

El revenido en el acero AISI/SAE 4140 se establece en un rango de temperaturas de 540 a 680 °C y se debe realizar inmediatamente después del temple, se debe efectuar el enfriamiento al aire.

Del diagrama de revenido que se tiene para el acero AISI/SAE 4140 podemos determinar la temperatura necesaria para la dureza que se requiere y la resistencia mecánica como se muestra en la Figura 3.

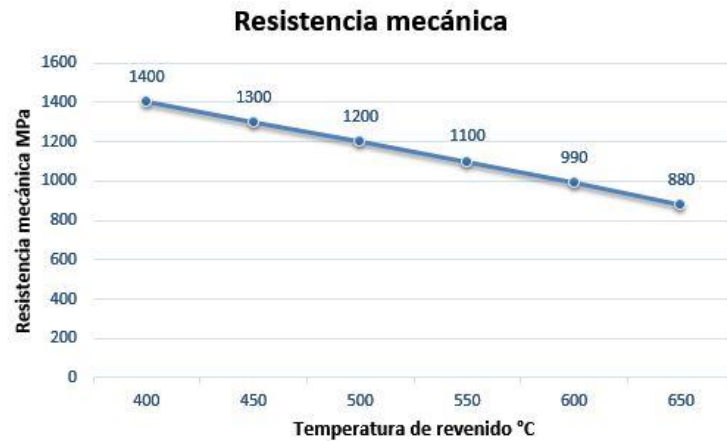


Figura 3. Temperatura de revenido vs Resistencia mecánica [1]

Tabla 3. Parámetros del diagrama de revenido vs resistencia mecánica [1]

Tipo de acero	
AISI 4140 – V320	
Temperatura de temple	850°C
Temperatura de revenido	540 a 680 °C
R_m	Resistencia a la tracción MPa

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Los factores de mayor influencia durante el revenido son los siguientes: la velocidad de enfriamiento (es prudente que el enfriamiento no se haga tan rápido) y sobre todo hay que tomar en cuenta las dimensiones de la pieza (la duración de un revenido es acorde al tamaño del espécimen que sea tratado tomando en cuenta como recomendación de 1 a 2 horas por cada 25,4 mm de diámetro).

1.3. Lubricantes especiales para tratamiento térmico

Los aceites para temple son aceites especialmente elaborados dependiendo el tipo de tratamiento al que está destinado. Para un buen templado es fundamental utilizar un excelente aceite de temple, en este sentido se ha desarrollado dos productos específicos para este tipo de tratamientos, se describen a continuación. [7]

1.3.1. IBERTEM 34

Se trata de un aceite mineral refinado de petróleo y viscosidad media. Estos les proporcionan las propiedades necesarias para superar las condiciones requeridas en el temple rápido del acero. [8]

Aceite de baja viscosidad, que proporciona media velocidad de enfriamiento, que otorga temple duros.

De característica lavable es recomendado para obtener una adecuada limpieza en piezas templadas que deben someterse a un revenido posterior.

1.3.2. IBERTEM 99-F

Aceite de temple elaborados a partir de bases minerales, especialmente refinados y aditivos. [8]

Aceite mineral refinado, de elevada viscosidad y bajo punto de inflamación, utilizado en baños normalizadores de tensiones, revenidos en piezas de aceros forjados estampados previamente templados.

Otro de los factores importantes al realizar un tratamiento térmico de temple, es la temperatura, donde se especifica que para un templado en frío es necesario utilizar un baño de aceite a 80 °C máximo, recomendado para aceros al carbón y de baja aleación, aceros para rodamientos. [7]

1.4. Designación y clasificación de los aceros

La norma AISI (Instituto Americano de Hierro y Acero) y SAE (Sociedad de Ingenieros de Automoción) proporcionan sistemas de designación que usan un número de cuatro o cinco dígitos. Las especificaciones para los distintos tipos de aceros de acuerdo con lo que establece la norma AISI, pueden incluir un prefijo mediante letras para indicar el proceso de manufactura, las mismas designaciones numéricas que son especificadas por el SAE. [9]

En la siguiente tabla se muestra algunas designaciones de los aceros AISI/SAE:

Tabla 4. Designación de los aceros AISI/SAE [10]

Designación	Tipos de Aleación
13XX	Aceros con 1,75% de Mn (1,5-2%)
15XX	Aceros al manganeso (1,0-1,65%)
23XX	Aceros al níquel, 3,5% de Ni (3,25-3,75%)
25XX	Aceros al níquel, 5% de Ni (4,75-5,25%)
31XX	Aceros al níquel-Cromo, 1,25% Ni y 0,65% Cr
33XX	Aceros al níquel-Cromo, 3,5% Ni y 1,60% Cr

40XX	Aceros al molibdeno, 0,25% Mo
41XX	Aceros con Cr (0,4-1,2%), Mo (0,08-0,25%)
43XX	Aceros al Ni-Cr-Mo (1,8%Ni, 0,65%Cr, 0,25%Mo)
44XX	Molibdeno, (0,4-0,53%)
45XX	Molibdeno, (0,55%)
46XX	Níquel- Molibdeno, (1,8%Ni, 0,2%Mo)

Resulta imposible determinar el número exacto de composiciones del acero y otras variaciones que existen actualmente. Por lo tanto, cualquier clasificación rígida es imposible. Sin embargo, los aceros se dividen arbitrariamente en cinco grupos, lo que ha resultado en general satisfactorio para la comunidad metalúrgica. [11]

El acero AISI/SAE 4140 es un acero de aleación que contiene 0,40 % C, adicional a esto se puede observar otros elementos aleantes como se representa en la Tabla 5 para distintos aceros con designación AISI/SAE sujetos a la norma ASTM A29. [12],[11]

Tabla 5. Composición química de aceros designación AISI/SAE [12]

AISI/SAE	%C	%Mn	%Si	%Ni	%Cr	Mo
4140	0.38-0.43	0.75-1.00	0.15-0.30	--	0.80-1.10	0.15-0.25
4340	0.38-0.43	0.60-0.80	0.15-0.30	1.65-2	0.70-0.90	0.20-0.30

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

1.5. Diagrama Hierro – Carbono

Es un diagrama donde se representa el comportamiento de la aleación de hierro y carbono con relación al porcentaje de carbono presente en el acero, así como la temperatura influyente para el tratamiento. [6]

El diagrama de la Figura 4 señala los diferentes constituyentes y estructuras que tiene el acero, dependiendo de su porcentaje de carbono como en el caso del acero AISI/SAE 4140 con un porcentaje de carbono entre 0,38 % y 0,43 % las estructuras varían durante el calentamiento, en la practica el uso de este diagrama ayuda a determinar la temperatura de austenización de acuerdo al contenido de carbono del acero.

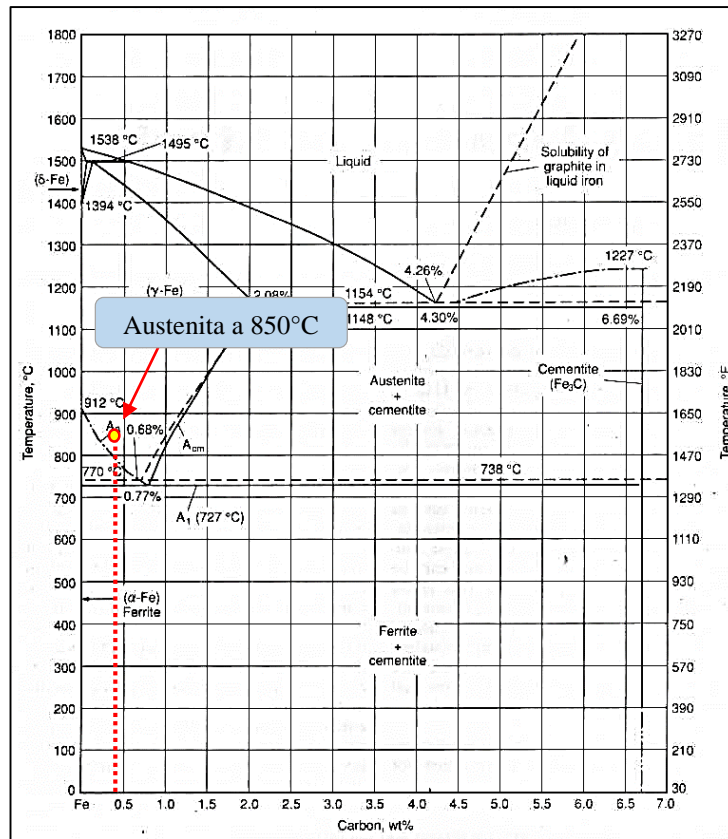


Figura 4. Diagrama Hierro-Carbono [6]

Para obtener resultados de microestructuras deseados se logran controlando los cambios de temperatura en los que una fase o combinación de fases es estable (produciendo así cambios en la microestructura o distribución de las fases estables). El diagrama de fase de equilibrio de hierro-carbono es la base sobre la cual se sustenta todo el tratamiento térmico del acero, este diagrama define las regiones en las cuales se encuentra el contenido de carbono y temperatura donde las diversas fases en el acero son estables, así como los límites de equilibrio entre los campos de fase. [6],[13]

1.5.1. Diagrama de transformación de enfriamiento continuo

Muchos de los tratamientos térmicos realizados en el acero se llevan a cabo por enfriamiento continuo en lugar de retención isotérmica, y como resultado, se han desarrollado diámetros que representan la transformación de la Austenita en el enfriamiento a varias velocidades. El último tipo de diagrama para un acero dado se refiere como un diagrama de enfriamiento continuo (CCT) o diagrama de transformación de enfriamiento. En general, el enfriamiento continuo desplaza el inicio de la transformación de Austenita a temperaturas más bajas y en períodos más

prolongados [6]. El diagrama de la Figura 5 representa la curva de enfriamiento continuo para un acero de tipo AISI / SAE 4140.

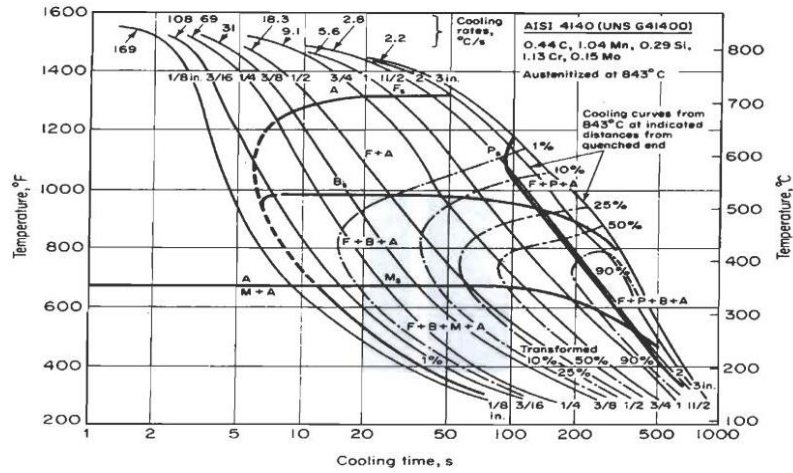


Figura 5. Diagrama de enfriamiento continuo para un acero $\geq 0,38\% \text{ C}$ [6]

Los diagramas de CCT relacionan la microestructura con el diámetro de la barra, por lo tanto, permiten una evaluación directa no solo de la posibilidad de producir una dureza máxima en una barra de un diámetro determinado, sino también de la capacidad de producir estructuras enfriadas al aire a temperatura ambiente o normalizada con microestructuras de ferrita-perlita, de baja dureza. [6]

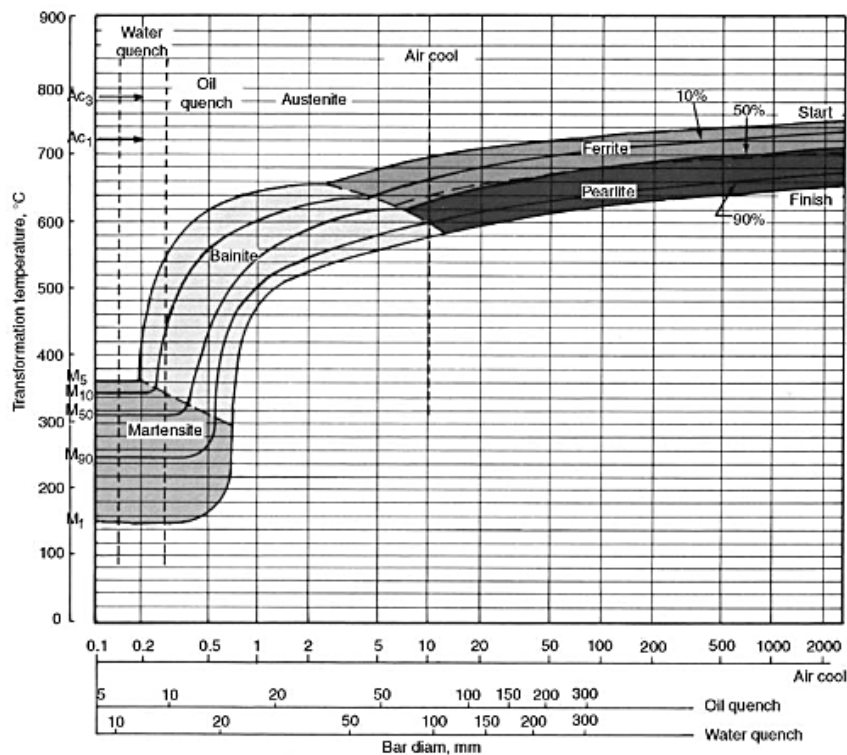


Figura 6. Diagrama CCT para un acero de 0,38 %C [6]

Debe recordarse que las microestructuras son las que estarían presentes en el centro de las barras, y que pueden existir gradientes de dureza y microestructuras entre el centro y la superficie de las barras debido a las variaciones de la velocidad de enfriamiento entre esos puntos. También debe esperarse alguna variación en las microestructuras de las representadas en los diagramas de CCT debido a las variaciones químicas dentro de los límites de especificación de un grado del acero, variaciones en la austenización y/o diferentes grados de agitación durante el enfriamiento con agua o aceite. [6]

1.5.2. Constituyentes

En el acero se observa pequeñas masas vistas al microscopio, denominadas como constituyentes entre los cuales tenemos. [11]

- **Ferrita α :** Es el constituyente más blando y dúctil, tiene una dureza de 90 Brinell y se caracteriza por ser magnética. [14]
- **Cementita:** Es un compuesto químico de carburo de hierro (Fe_3C), con una dureza de 700 Brinell, está considerado como el constituyente más duro y frágil del acero, es magnético hasta los 210 °C luego de cual pierde su magnetismo. [14]
- **Perlita:** Compuesta por el 86 % de ferrita y el 13,5 % de cementita, con una dureza de 200 Brinell, la estructura laminar de la perlita se forma por un enfriamiento muy lento; son laminas alternadas de cementita y ferrita. [14]
- **Austenita γ :** Es una solución sólida de carbono en hierro en cristales cubico de cara centrada, por lo que tiende a ser el constituyente más denso del acero su formación empieza sobre la temperatura crítica de 723 °C, su dureza es de 40 HRC y no es magnética. [14]
- **Martensita:** Este constituyente se obtiene a partir de un enfriamiento violento de la Austenita obtenida por calentamiento además es una solución sólida sobresaturada en hierro, es un constituyente inestable por lo es necesario realizar el revenido, su dureza varía entre (50 a 68) HRC y es magnética. [14]
- **Bainita:** Se forma por la transformación isotérmica de la austenita entre las temperaturas de 250 °C y 550 °C, este temple isotérmico tiene como finalidad formar bainita a partir de la austenita y no como el temple donde se forma martensita, esto se le confiere al acero mayor tenacidad. [14]

El acero AISI 4140 es un acero hipo eutectoide debido a que este posee un porcentaje de carbono entre 0,022% y 0,77%. El enfriamiento de una aleación de esta composición está representado en el descenso a lo largo de la vertical yy' de la Figura 7. Hacia los 850°C, punto C , la microestructura consta enteramente de granos de fase γ (Austenítico), como está esquematizado en la Figura. En el punto d de la región bifásica $\alpha+\gamma$ (Ferrita y austenita), a unos 775°C, estas fases coexisten, según indica el esquema micro estructural. La microestructura presente en estos aceros hipo eutectoide consiste de ferrita y perlita, los cambios de microestructura se muestran a continuación en la Figura 7. [14]

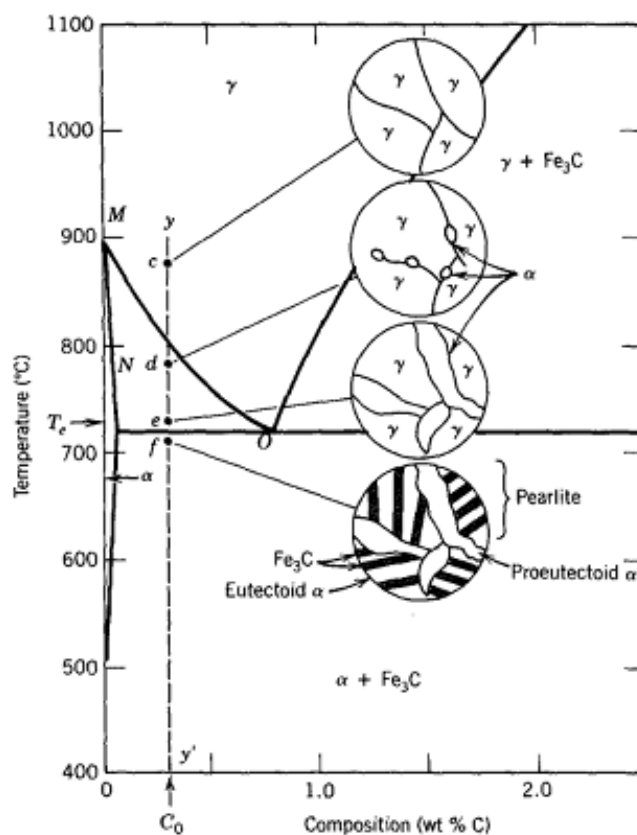


Figura 7. Fases del acero (0,38 a 0,43% de carbono) [14]

1.6. Fundamentación legal

La normativa en la cual se sustentará el tema de investigación sobre el estudio planteado y se llevara a cabo los ensayos correspondientes en el acero AISI/SAE 4140, es la siguiente:

- ASTM E-3: Especificación estándar para la preparación de muestras metalográficas.

- ASTM E-18: Métodos de prueba estándar para determinar la dureza de Rockwell de los materiales metálicos.
- ASTM E-8: Método de prueba estándar para ensayo de tracción de materiales metálicos.
- ASTM E-112: Método de prueba para determinación de tamaño promedio de grano.
- ASTM A 370: Métodos de prueba estándar y definiciones de ensayos mecánicos de productos de acero.

1.7. Ensayos de Dureza

Se define como la resistencia a la que se oponen los materiales a ser penetrados por otros más duros. La determinación precisa de dureza del acero depende del método de medida, es decir de la manera en que el material se deforma durante el ensayo. Entre los métodos que se pueden emplear para la determinación de dureza de materiales metálicos, los más usados son los de penetración estática, en estos ensayos se apoya un penetrador de geometría normalizada sobre la superficie pulida del material bajo la acción de una carga prefijada, finalmente y de forma empírica la dureza se determina en función de las dimensiones de la huella producida.

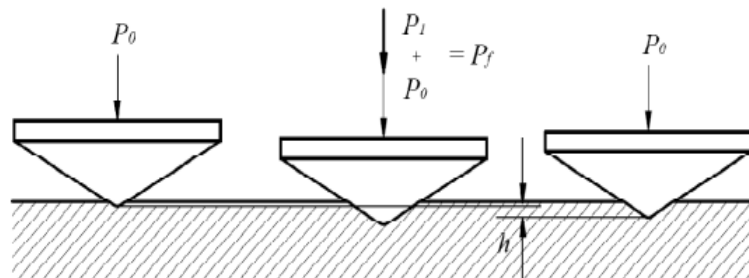


Figura 8. Esquema de la medición de dureza Rockwell [15]

La dureza de un material es inversamente proporcional al tamaño de la huella que deja un penetrador en la superficie, tomando en cuenta que el tamaño de la huella en dos aceros de distinto material cambia totalmente, en consecuencia, la probeta que tenga una mayor huella de penetración es la que proporciona una menor dureza, por el contrario, el material donde la huella es menor indica que este adquiere un valor de dureza más elevado. [15]

En la Tabla 7 se tiene las dimensiones y especificaciones de los penetradores y cargas utilizar de acuerdo al tipo de material, en el caso del acero AISI/SAE 4140, es necesario usar la escala de medición en Rockwell C y con un indentador tipo cono de diamante el cual está estimado para un acero de alta resistencia. [15]

Se puede relacionar los valores de dureza con la resistencia a la tracción obtenida R_m , mediante el uso de la Tabla 6, para aceros de baja o media aleación.

Tabla 6. Relación entre resistencia a la tracción y dureza [16]

R_m (MPa)	HRC
1250	37
1210	36
1170	35
1140	34
1100	33
1070	31
1040	30
1010	29
980	28
950	27

Tabla 7. Tipos de dureza y su aplicación [15]

Escala de medición	Penetrador	Carga [Kg]	Aplicación
Rockwell A	Cono de diamante	60	Materiales muy duros
Rockwell B	Bola de 1/6 plg	100	Acero de baja resistencia
Rockwell C	Cono de diamante	150	Acero de alta resistencia

Los ensayos de dureza en el acero AISI/SAE 4140 se realizar de acuerdo a la norma ASTM E18 “Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials”.

1.7.1. Rangos y magnitudes de las probetas para el ensayo

Los rangos a ser determinados en el ensayo de dureza varían dependiendo de la escala en la cual se mida la probeta. [15]

En la siguiente Tabla 8 se plantean las limitaciones de uso del durómetro de banco y del durómetro portátil (Rango de dureza y Rango de espesor de la probeta) para materiales metálicos. Si se requiere medir las probetas en una escala diferente a las de la Tabla 7, se realiza la conversión según la norma ASTM A370 para determinar si se encuentra dentro del rango de trabajo de los durómetros. [15],[17]

Tabla 8. Limitación de dureza y dimensional de los durómetros

Tipo de material	Rango de dureza			
	Durómetro de Banco		Durómetro Portátil	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Aceros blandos, fundiciones, aceros maleables.	20 HRB	95 HRB	70HB	220HB
Aceros duros, aceros con aleación de titanio, acero templable	20 HRC	60 HRC	20 HRC	60 HRC

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

1.8. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción permite obtener información sobre la capacidad de un acero para soportar la acción de cargas estáticas, se lo realiza con la máquina universal para ensayos de tracción. La versatilidad del ensayo radica en el hecho de que permite medir los límites de proporcionalidad, límite de fluencia, resistencia ultima a la tracción y el porcentaje de elongación. [16]

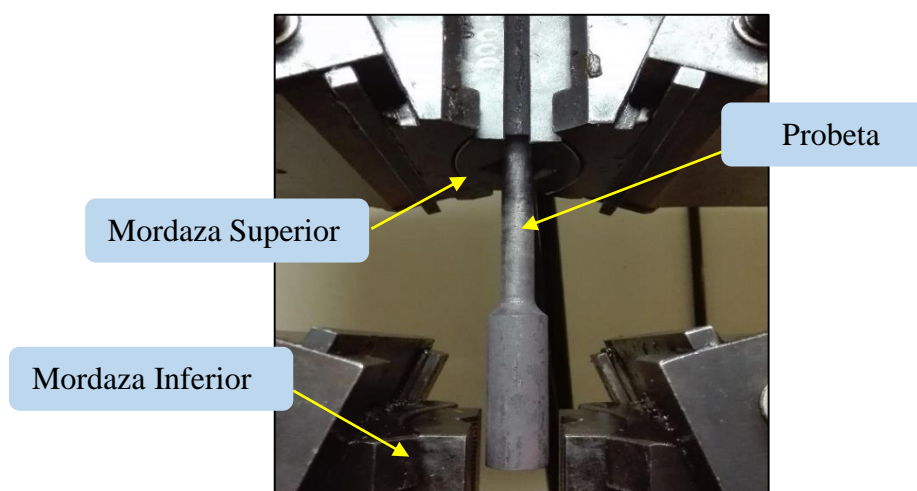


Figura 9. Mordazas para máquina de ensayo de tracción.
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

El ensayo de tracción se lo realiza alargando una probeta de geometría normalizada con longitud inicial L_0 , que se encuentra sujeta a las mordazas de la máquina según se puede observar en la Figura 9. [16]

Para la elaboración de las probetas de prueba pueden utilizarse como referencia las dimensiones y geometrías especificadas en la norma ASTM E-8 para la fabricación de las probetas de sección circular como en el caso del acero AISI/SAE 4140 y para otros campos de aplicación como procedimiento de soldadura y control de calidad de distintos tipos de aceros en los cuales es necesario emplear otras dimensiones que se encuentran detalladas en la norma ASTM E-8.

La Figura 10 presenta el dimensionamiento de las probetas de tracción para sección circular. [18]

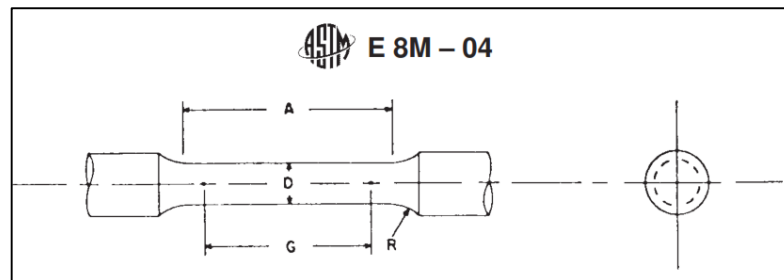


Figura 10. Dimensionamiento de probeta de tracción según ASTM E8 [18]

Tabla 9. Nomenclatura para probetas de tracción según ASTM E8 [18]

Nomenclatura	Significado	Dimensión
G	Distancia entre marcas	$62,5 \pm 0,1$ mm
A	Longitud de sección reducida	75 mm
D	Diámetro de sección reducida	$12,5 \pm 0,2$ mm
R	Radio de filete	10mm

La probeta de tensión debe ser ensayada bajo cargas axiales de tensión, al iniciarse el ensayo el material se deforma elásticamente; esto significa que si la carga es suspendida la muestra recupera su longitud inicial, el material sobrepasa el límite elástico, una vez que haya sobrepasado el límite de proporcionalidad donde se puede visualizar el cambio de orientación de la curva con la presencia de límite de fluencia (continua o discontinua) y el material no recupera su longitud inicial.

El esfuerzo alcanza su máximo valor de resistencia cuando el material presenta una estricción o cuello para lo cual significa que existe una reducción localizada en el área de la sección transversal en la que se concentra todo el alargamiento posterior, una vez formado este cuello el esfuerzo disminuye al aumentar la deformación, hasta que la probeta se fractura.

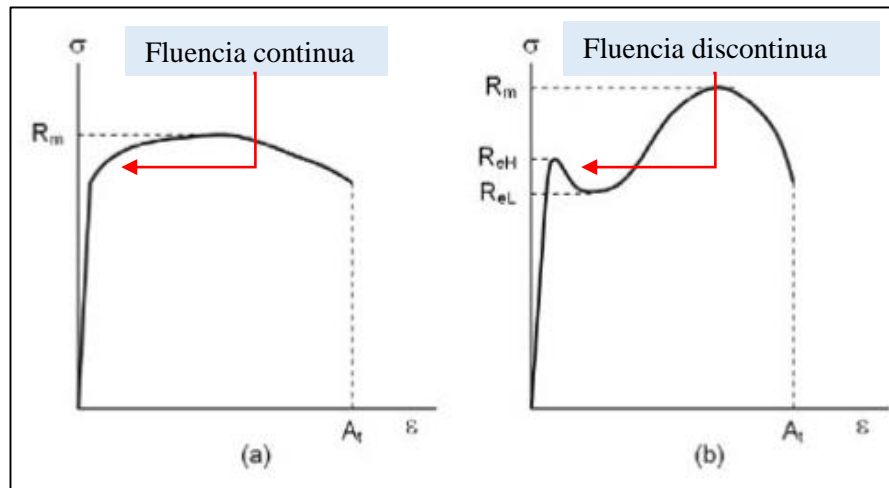


Figura 11. Curva Esfuerzo- Deformación.
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Los diagramas obtenidos, denominados diagramas de Esfuerzo-Deformación, presentan generalmente el trazado mostrado en la Figura 11, en donde R_m es el esfuerzo máximo en tensión, R_{eL} es la Resistencia a la fluencia inferior y R_{eH} es la resistencia a la fluencia superior. Se destaca que en materiales con ausencia de una fluencia discontinua, R_{eL} y R_{eH} coinciden en el mismo punto (R_m). El trazado o forma de una curva Esfuerzo-Deformación dependerá de las propiedades de resistencia y capacidad de deformación del material.

1.9. Ensayo metalográfico

En la investigación y el control de calidad industrial, la interpretación de la microestructura del acero es una fuente imprescindible para el conocimiento de sus propiedades mecánicas, físicas y tecnológicas [19]. La metalografía es la ciencia que estudia la estructura y composición de un acero o aleaciones ferrosas relacionadas con sus propiedades mecánicas y físicas, el objetivo principal es observar a nivel micro estructural las características y formación de los constituyentes, inclusiones, orientación del conformado mecánico y tamaño de grano. [19]

1.9.1. Documentos relacionados

Los documentos relacionados para el método de ensayo metalográfico son: ASTM E-45 “Método estándar para determinación y conteo de inclusiones”, ASTM E-112 “Métodos estándar para la determinación de tamaño de grano” y ASTM E-3 “Guía estándar para la preparación de especímenes metalográficos”.

1.9.2. Probetas metalográficas

Las probetas para el análisis metalográfico se preparan adecuadamente, ya que una preparación defectuosa puede originar imperfecciones o estructuras que no tengan ningún tipo de relación con la estructura real del acero, es así como uno de los factores más importantes que influyen sobre el método de preparación de las muestras es el cuidado con que se debe manejar durante todo el proceso, ya que una simple partícula puede dañar la superficie de análisis. [19]

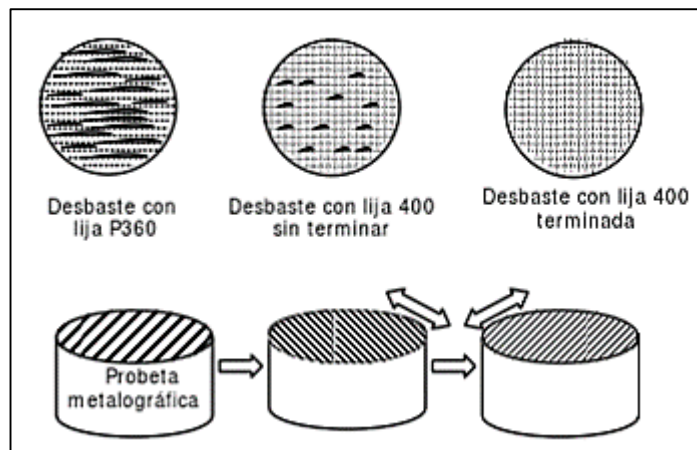


Figura 12. Sentido de desbaste para pasar de una lija a otra [19]

1.9.3. Método de preparación

Se realizará el pulido metalográfico de las muestras del acero AISI/SAE 4140 en estado bonificado (estado de suministro) en la máquina pulidora de probetas metalográficas como de muestra en la Figura 13, designada e identificada como EQP-01 propiedad de ILPM Cia. Ltda.



Figura 13. Pulidora de probetas metalográficas.
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

A continuación, se detalla las especificaciones de la máquina que se emplea para el pulido de las probetas metalográficas.

Tabla 10. Especificaciones de máquina pulidora de probetas

Detalle	Características
Nombre del equipo	Metallographic Specimen Grinder Polisher
Marca	Jinan Heng Si Sheng Da Instrument
Modelo	MP-2B
Serie	20121203

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

El equipo para la evaluación de las probetas metalográficas se lo realiza mediante el uso de microscopio invertido con un rango de (50 a 1000) aumentos. La Figura 14 muestra el equipo para llevar a cabo el análisis microscópico.

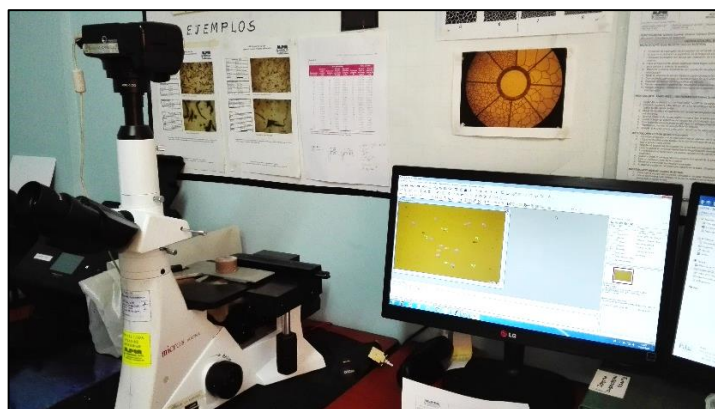


Figura 14. Microscopio metalográfico invertido micros AUSTRIA.
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

La siguiente tabla representa las especificaciones técnicas del microscopio Invertido, las cuales se deberán tomar en cuenta antes de la preparación y el análisis de las probetas metalográficas del acero AISI/SAE 4140.

Tabla 11. Especificaciones de microscopio metalográfico

Especificaciones técnicas microscopio ENS-07	
Detalle	Características
Nombre del equipo	Microscopio Invertido
Marca	micros AUSTRIA
Modelo	Gold MCX1700
Serial	4-100072
Rango de Medición	50x - 1000x

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

1.9.4. Determinación de tamaño de grano

El ensayo metalográfico en el acero AISI /SAE 4140 se realiza mediante el método estándar para la determinación del tamaño de grano según ASTM E112, la norma describe distintos métodos para la determinación del tamaño de grano de las cuales se va emplear únicamente el método de comparación de imagen. [20]

1.9.4.1. Método de comparación de imagen

El método de comparación viene a ser el más fácil y no tan preciso, sin embargo, no deja de ser confiable. Consiste en comparar la figura obtenida luego del barrido de la muestra con una serie de imágenes patrones las cuales representan los distintos tamaños de grano, se debe escoger la figura que mejor se ajuste a la figura capturada de la muestra en la pantalla. En este método la medición viene expresada en un número de tamaño de grano de acuerdo a la norma ASTM E 112 el cual empieza en # 1 y termina en # 8, siendo el # 1 el tamaño de grano más grande y el # 8 el tamaño de grano más pequeño. [20]

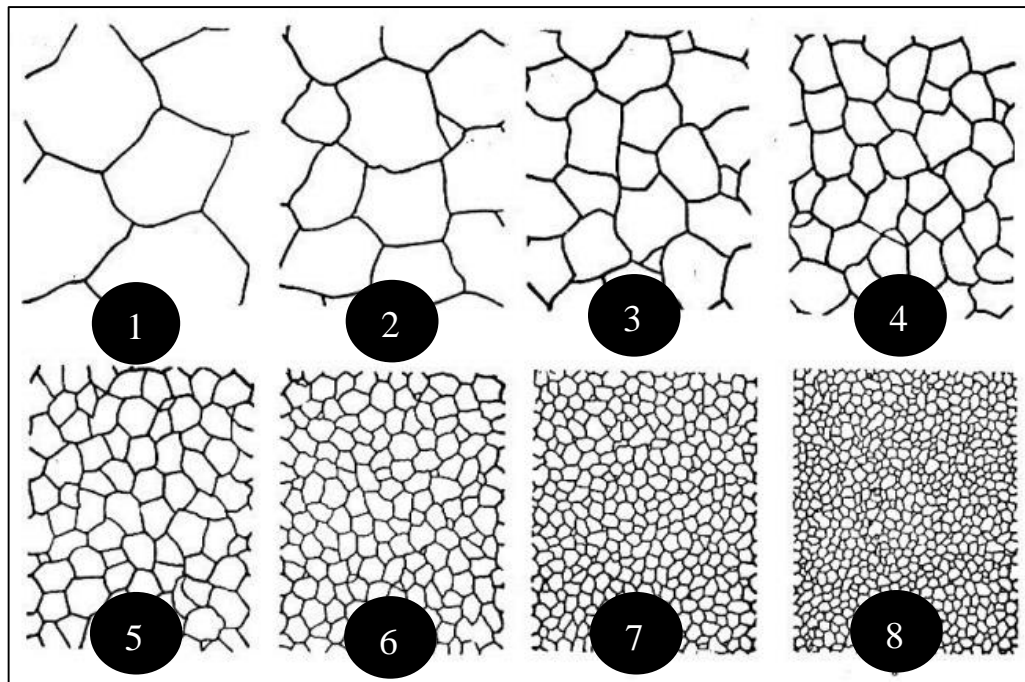


Figura 15. Tamaño de grano mediante método de comparación de Imágen [20]

1.9.5. Ataque químico de las muestras metalográficas

El ataque químico en probetas metalográficas es de suma importancia ya que permite revelar la microestructura de una superficie especular. El ataque químico revela el tamaño de grano, segregación y disposición de fases. El estudio de lo mencionado anteriormente permitirá llegar a las conclusiones acerca del tratamiento térmico o esfuerzos mecánicos a los que ha sido sometido el acero.

Para el ataque químico se necesita una superficie sin irregularidades ya que esto permitirá que los resultados no se distorsionen. Este proceso se lo debe realizar por inmersión del material en una solución química previamente elegida, el tiempo de ataque varía con respecto al tipo de acero que se esté manipulando.

El nital es una solución de alcohol metílico y ácido nítrico cuya concentración varía de (2 a 5) % dependiendo del tipo de acero y el contenido de carbono. El compuesto previamente mencionado quema la martensita presente en el acero revelando los bordes de grano y definiendo la martensita en todo su aspecto.

1.9.6. Medición y tipo de inclusiones

La determinación del tipo y cantidad de inclusiones es fundamental cuando se trata de comparar procesos de conformado e inclusive en control de calidad de materiales,

estos agentes extraños ajenos a la estructura metálica y que proviene de la desoxidación del acero son en muchos casos los causantes de rupturas en producto laminado. Esto se debe a que las inclusiones no permiten que el acero se uniforme y en efecto genera concentraciones de esfuerzos alrededor de los mismos lo cual provoca que cuando el material es esforzado por una zona de alto nivel este falle. Es por esta razón que la norma involucrada ASTM E 45 explica cómo medirlos y clasificarlos para determinar si el acero se encuentra sucio o no. [21]

En conformidad con la norma ASTM E 45 cabe recalcar que las inclusiones son clasificadas en 4 tipos de acuerdo a su morfología y a su escala de grises, las inclusiones posteriormente expuestas son producto de la desoxidación del acero y la precipitación de sulfuros durante la fase de solidificación. [21]

1.9.6.1. Tipo A

Se refiere a sulfuros y están separados de las inclusiones tipo B, C y D debido a su escala de grises, es porque los óxidos reflejan menos luz que los sulfuros. Comúnmente los sulfuros pueden ser cadenas alargadas.

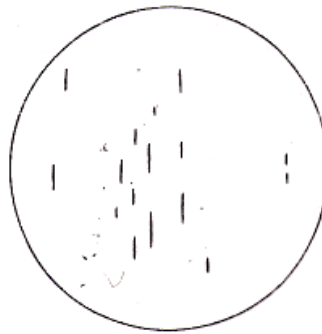


Figura 16. Inclusiones tipo A según ASTM E45 [21]

1.9.6.2. Tipo B

Este tipo de inclusión es parte de una cadena discontinua lo que quiere decir es que existen 3 o más inclusiones alargadas en el plano de laminación. Estas inclusiones tienen un desfase menor a 15 μ m y una separación menor a 40 μ m.

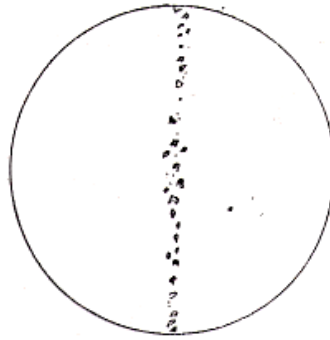


Figura 17. Inclusiones tipo B según ASTM E45 [21]

1.9.6.3. Tipo C

Estas inclusiones se caracterizan por ser cadenas solidas esto quiere decir que es una inclusión alargada en el sentido de laminación.

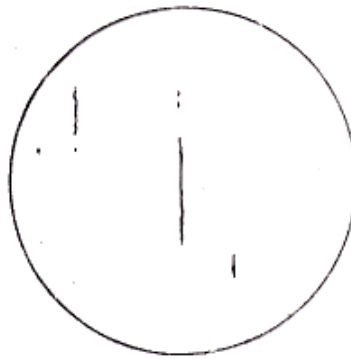


Figura 18. Inclusiones tipo C según ASTM E45 [21]

1.9.6.4. Tipo D

Son conocidos como óxidos globulares, estos no son alargados y tampoco forman cadenas entre sí, únicamente están dispersos a lo largo de la morfología de la muestra.

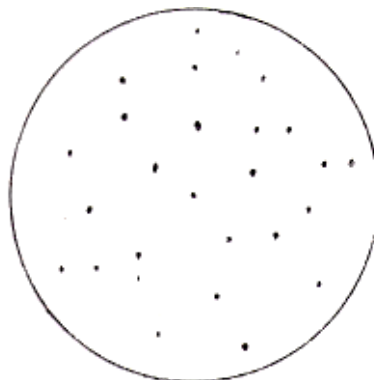


Figura 19. Inclusiones tipo D según ASTM E45 [21]

CAPÍTULO II

MATERIALES, METODOS Y PROCEDIMIENTOS

2.1. Fabricación de especímenes para ensayos

2.1.1. Probetas de tracción

Las probetas deben ser fabricadas bajo las condiciones y especificaciones de la norma ASTM E8 para método de prueba estándar para ensayo de tracción de materiales metálicos. Las medidas correspondientes se encuentran especificadas en la Figura 20.

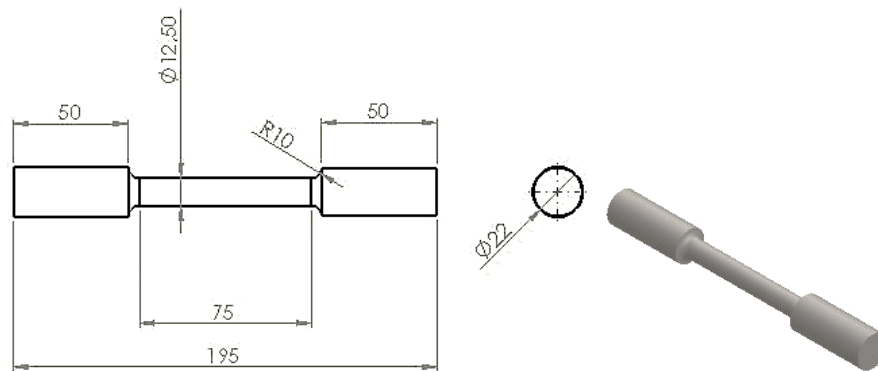


Figura 20. Dimensionamiento de las probetas para ensayo de tracción [18]

Las probetas para ensayo de tracción están conformadas por un total de 8 probetas las cuales serán divididas e identificadas con relación al proceso del material ya sea en estado de suministro (bonificado) de las cuales se extraerán dos muestras de material base y 6 probetas restantes para llevar a cabo el tratamiento térmico de temple y revenido a las temperaturas especificadas, se extraen dos muestras para la temperatura de 300 °C, 540 °C, 590 °C y 640 °C, estas son las variables de la temperatura de revenido (rangos establecidos por Bohler S.A).

El maquinado de las probetas de tensión tiene por finalidad remover las zonas afectadas térmicamente durante cualquier etapa de fabricación de tal manera que se fabrica las probetas en base a la normativa utilizada, para lo cual se requiere la utilización de una máquina herramienta con desprendimiento de viruta.



Figura 21. Maquinado de probetas de tracción.
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Las probetas de tensión deben ser preparadas con radios de curvatura comprendidos entre la zona de transición de la sección reducida y la zona de sujeción, con la finalidad de evitar la rotura del material en concentradores de esfuerzo geométricos con ángulos rectos, esquinas o bordes con defectos del maquinado; para ello se recomienda el uso adecuado de la máquina herramienta propiedad de la empresa Maquinarias LAMA S.A.

Por otra parte, las probetas que no requieren tratamiento térmico son mecanizadas de acuerdo a los lineamientos especificados en la norma ASTM E8 y de acuerdo a las dimensiones indicadas en la Figura 20 para pasar al procedimiento de ensayo de tracción directamente.



Figura 22. Probetas de tracción para tratamiento térmico.
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

2.1.2. Probetas para metalografías, dureza y composición química

Las probetas de acero AISI/SAE 4140 para ensayos de metalografía, dureza y composición química al igual que las probetas de tracción deben ser extraídas mediante métodos de corte en frío, evitando cualquier tipo de afectación térmica.

Se realiza los cortes de manera automática mediante una cortadora de cinta para después rectificar la superficie de análisis mediante el uso de papel abrasivo (lijas) #120, #240 y #320 únicamente para las probetas que son empleadas en el ensayo de dureza, de manera que las demás probetas requieren otro método de preparación.



Figura 23. Cortadora de cinta automática, método de corte en frío
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón



Figura 24. Probetas para ensayos de dureza (A) y metalografía (B)
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

2.2. Tratamiento térmico de temple y revenido

Se utiliza como material de estudio el acero AISI/SAE 4140 de sección circular con diámetro nominal de 22 mm suministrado por la empresa Aceros Bohler del Ecuador S.A. Los resultados de composición química fueron verificados mediante el método de espectrometría de emisión óptica en el laboratorio de materiales de la empresa ILPM Cia. Ltda.

Se realiza el tratamiento térmico de las probetas en las instalaciones de la Universidad Politécnica Salesiana en un horno tipo mufla de marca Nabertherm Modelo N7/H y controlador de temperatura digital.

En el tratamiento de temple, las probetas de acero son austenizadas a 850 °C durante una hora y enfriadas en aceite refinado de petróleo de baja velocidad de enfriamiento y a temperatura ambiente. A continuación se realiza el revenido de las probetas a 3 temperaturas diferentes y se dejan enfriar al aire a temperatura ambiente 21°C, las temperaturas establecidas para el revenido son: 300 °C, 540 °C, 590 °C y 640 °C, el número de probetas que se utilizada para el tratamiento térmico del acero se determina en la Tabla 12 y con sus respectivas identificaciones.

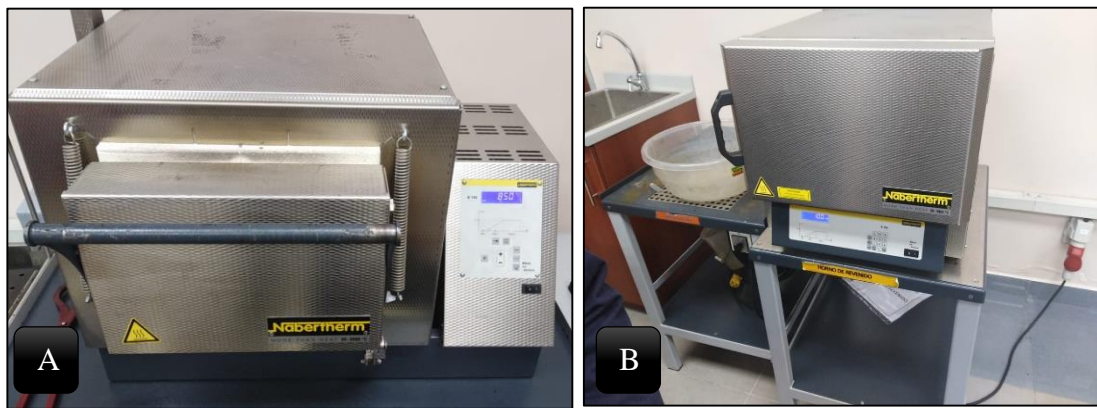


Figura 25. Hornos para temple (A) y revenido (B) Nabertherm
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Se realiza el tratamiento térmico de temple en 6 probetas en las cuales se mantiene la misma temperatura de austenización de 850 °C y con tiempo de sostenimiento de una hora, sin escalonamiento y con medio de enfriamiento en aceite a temperatura ambiente.



Figura 26. Tratamiento térmico
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Una vez enfriadas las probetas luego del proceso de temple se realiza el revenido de acuerdo a los lineamientos establecidos por los autores, las temperaturas de revenido varían como se muestra en la Tabla 12 y con un tiempo de sostenimiento de 1 hora para todas las probeta, luego de culminar el proceso de revenido para cada probeta se las deja enfriar al aire.

Tabla 12. Especímenes empleados para los ensayos

Identificación	T ° de revenido [°C]	Tracción	Dureza	Metalografía	N° de probetas
TT1	540	1	1	1	3
TT2	540	1	1	1	3
TT3	590	1	1	1	3
TT4	590	1	1	1	3
TT5	640	1	1	1	3
TT6	640	1	1	1	3
TT7	300	1	1	1	3
TT8	300	1	1	1	3

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

2.3. Medición de durezas

No existe un tamaño o forma estandarizados con los que se pueda elaborar una probeta de ensayo, únicamente debe constituir una muestra del elemento a ensayar. Cabe destacar que los ensayos de dureza que se realiza en una localización específica de una parte o elemento pueden no representar las características físicas de la parte entera de dicho elemento.

Como regla general debe considerarse un espesor mínimo de probeta capaz de soportar la carga de indentación aplicada sin presentar rastros de deformación en la superficie

opuesta a la ensayada. Una buena aproximación establece que el espesor de pared debe ser al menos diez veces mayor a la profundidad de indentación. [9]

Cuando la superficie sobre la cual se llevará a cabo la indentación no sea lisa debe ser maquinada o pulida con un material abrasivo (lijas desde número 120 hasta la 600), de tal forma que la clase de rugosidad se halle aproximadamente en N5 (0,4 μ m) y así evitar que posibles irregularidades puedan dar indicaciones falsas en los valores de dureza.

Hay que destacar que se debe evitar el sobrecalentamiento de la superficie a ser ensayada para evitar posibles alteraciones en su microestructura, de manera que se debe llevar a cabo métodos de corte en frío en el caso de que la morfología de la pieza así lo requiera para evitar dichas alteraciones.

Se debe procurar que la superficie a ser ensayada se encuentre completamente perpendicular al eje vertical del indicador. La Tabla 13 muestra el rango dimensional de la probeta.

Tabla 13. Rango dimensional de las probetas

Rango de espesor de probeta			
Durómetro de banco ENS-01		Durómetro portátil ENS-02	
Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
2 mm	150 mm	2 mm	Ilimitado

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

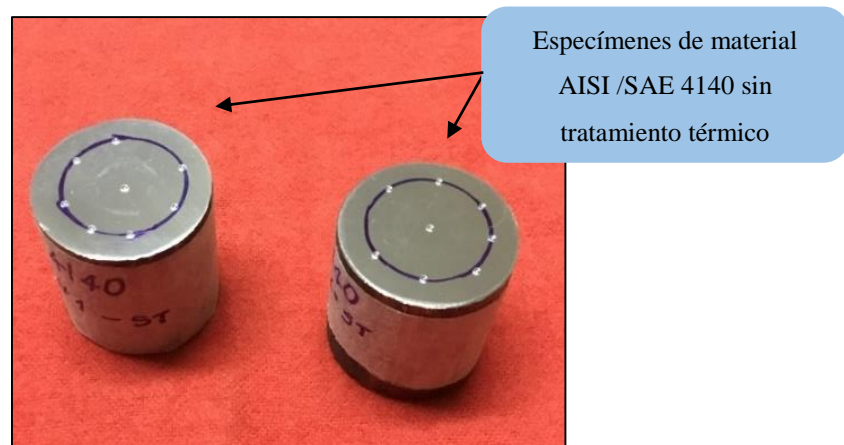


Figura 27. Medición de dureza en material base AISI/SAE 4140

La dimensión máxima de la probeta obtenida para el durómetro de banco ENS-01 es de 20 mm, se refiere a la altura de la probeta. Sin embargo, el ancho no debe sobrepasar las dimensiones de la altura. [9]



Figura 28. Durómetro de banco propiedad de ILPM Cia. Ltda
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Las especificaciones del equipo propiedad de la empresa ILPM Cia. Ltda donde se lleva a cabo los ensayos de dureza del acero AISI/SAE 4140, se encuentran detallados en la Tabla 14.

Tabla 14. Especificaciones del durómetro de banco

Durómetro de banco ENS-01	
Nombre del equipo	Durómetro de banco
Marca	Jinan Heng Si Sheng Da Instrument
Modelo	HR-150A
Serial	20121203
Rango de medición escala C	20 - 70 HRC
Apreciación	0,5

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Las muestras son identificadas de acuerdo a las variantes del tratamiento térmico, evitando posibles confusiones al momento de realizar el análisis de dureza de cada uno de los especímenes extraídos del acero en estado bonificado (suministro) y después del tratamiento de temple y revenido.

Las condiciones de temperatura durante el ensayo deben ser dentro de los límites de (10 a 35) °C. [9] Para la metodología de ensayo y conforme a los métodos de análisis realizados internamente se establece que la probeta debe ser apoyada de manera segura y que el desplazamiento de la superficie sea el mínimo posible.

Se verifica que la superficie a ser ensayada se encuentre lo más perpendicular posible al eje vertical del indentador. Como regla general se tomarán un total de siete valores de dureza de la superficie a medir, eliminando dos valores, el mayor y menor o simplemente dos valores en los que se identifique una desviación estándar no considerable. Los valores de dureza conllevan al promedio de las cinco mediciones restantes las cuales son registradas y analizadas en base a los lineamientos de la empresa ILPM Cia. Ltda.

No obstante, es necesario considerar que la distancia entre una indentación y el borde de la probeta preparada o la distancia entre indentación, no debe ser menor a las distancias mostradas en la Figura 29.

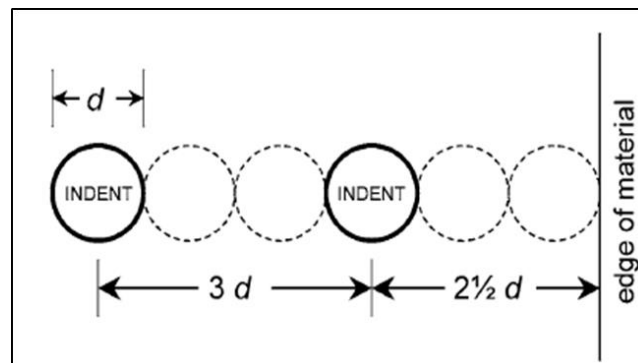


Figura 29. Separación mínima entre indentación [9]

2.4. Procedimiento de ensayo de tracción

El ensayo de tracción se procede a realizar en las instalaciones de ILPM Cia. Ltda. En la máquina de ensayo ENS-09 con las especificaciones adecuadas tomando en cuenta las medidas de precaución antes de realizar el ensayo para evitar posibles accidentes.

- Realizar el trazado de la longitud inicial a considerar para la determinación del porcentaje de elongación del acero, para ello se utiliza un patrón de trabajo con divisiones de 0 mm a 25 mm hasta los 100 mm.
- Tomar las dimensiones de la probeta de tensión a ensayar, en este caso se toma en consideración únicamente el diámetro de la sección reducida.

- En conformidad con el reglamento interno de la empresa ILPM Cia. Ltda, es recomendable, realizar 3 mediciones para cada dimensión de la probeta en las posiciones “Extremo, centro y extremo” próximas a las líneas trazadas previamente para determinar el porcentaje de elongación del material.
- Únicamente será considerado la menor de las tres mediciones tomadas para el cálculo de área de la sección transversal (El valor de área será automáticamente calculado por el software).
- Se debe colocar la probeta en las mordazas adecuadas (Mordazas en V) para probetas de sección circular.
- Durante el tiempo de ejecución del ensayo se debe observar que no existan posibles deslizamientos de la probeta con respecto a las mordazas.
- La máquina de tracción se detiene automáticamente una vez finalizado el ensayo (Fractura completa).



Figura 30. Control dimensional de las probetas de tracción
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Tabla 15. Especificación de la máquina de tracción

Máquina de ensayo de tensión ENS-09	
Nombre del equipo	Máquina de tracción
Marca	Jinan Hensgrand Instrument
Modelo	WAW-600D
Capacidad	0-600kN

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

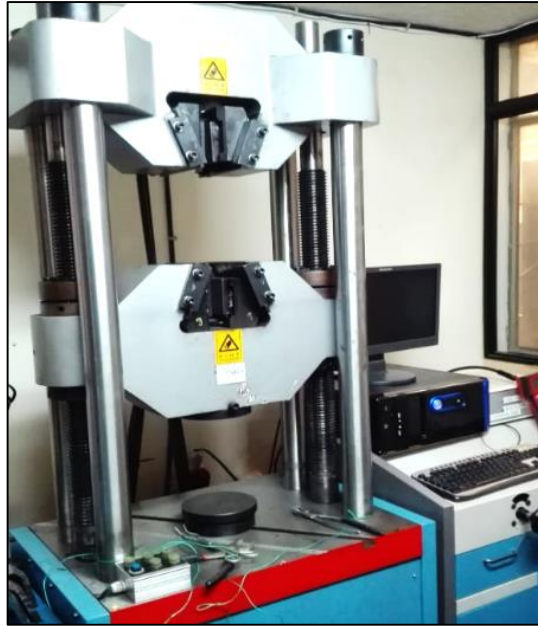


Figura 31. Máquina para ensayo de tracción
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

La velocidad de ensayo puede ser en base a la razón de alargamiento, razón de aplicación de carga o razón de la separación del cabezal durante el ensayo y cualquiera de los métodos puede ser utilizado durante el ensayo, tomando en cuenta referencias, normativas internas y establecidas en base a la experiencia del personal de ILPM Cia. Ltda.



Figura 32. Proceso de rotura de las muestras de acero AISI/4140 bonificado.
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Para la determinación de la resistencia a la fluencia del acero AISI/SAE 4140 se utiliza el método de desfase establecido por el software de manera automática, tomando como referencia dos puntos localizados a lo largo del campo lineal y proporcional del material. Ver Figura 33.

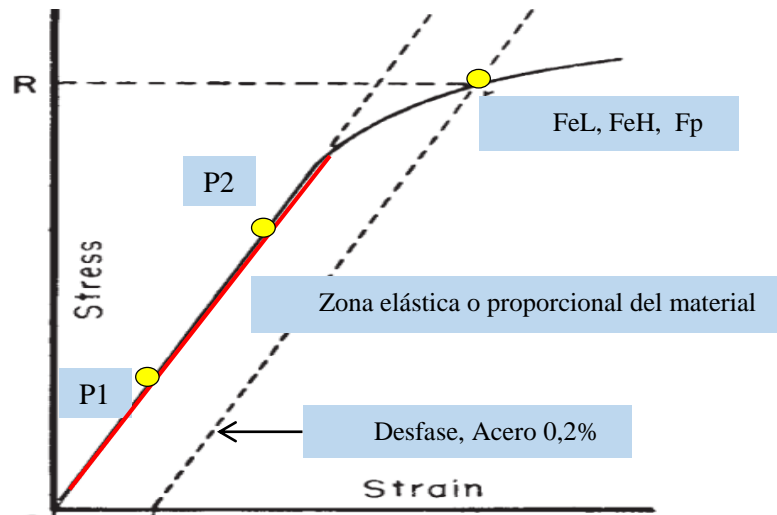


Figura 33. Esquema de límite de fluencia por método de desfase
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

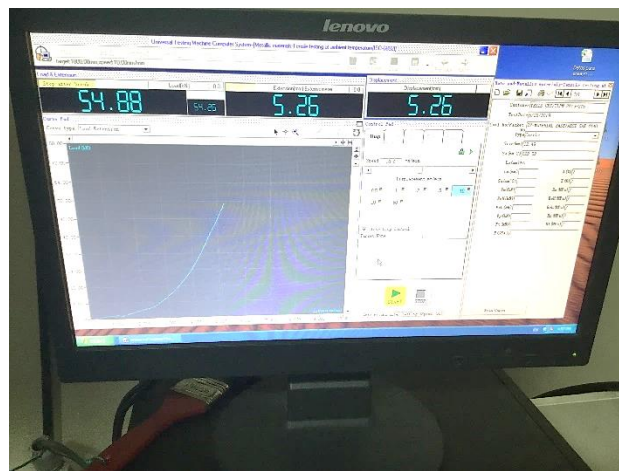


Figura 34. Curva de ensayo Mediante Software Max Test
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Los resultados son registrados y tabulados conforme a los procedimientos internos de la empresa ILPM Cia. Ltda. Se lleva a cabo el análisis de los valores obtenidos durante el ensayo de las probetas previas y posteriores al tratamiento térmico de temple y revenido.

2.5. Procedimiento de ensayo metalográfico

La norma ASTM E3, establece los lineamientos para la preparación de probetas metalográficas y plantea que para un acero de sección circular el tamaño de la muestra por conveniencia debe estar entre los (12 a 25) mm conjuntamente de una altura no mayor para ser manipulado convenientemente.

2.5.1. Montaje de la muestra

Existen ocasiones en las que es ventajoso montar la muestra para el esmerilado y el pulido. Requiere montar la muestra si estas son extremadamente pequeñas, frágiles y amorfas.

Entre los tipos recomendados de montaje es muy usual que se lo realice mediante moldes plásticos moldeables a base de resina, los cuales son preparados a temperatura ambiente. Estas resinas consisten en dos o más componentes que deben mezclarse como se muestra a continuación:

- Colocar 40 gr de resina en el recipiente mezclador
- Agregar 10 gr de rellador en el recipiente mezclador
- Mezclar hasta obtener una mezcla homogénea
- Agregar 0.5 gr del iniciador en la mezcla de la resina y el rellador
- Mezclar hasta conseguir una mezcla homogénea de color verdoso
- Colocar la mezcla en el molde metálico que contiene la porción de material a pulir
- Dejar solidificar y enfriar el montaje.

2.5.2. Esmerilado de las probetas

En cuanto a la preparación de la superficie de examinación es necesario llevar a cabo el proceso de lijado y pulido de la siguiente manera mediante el uso de equipos automáticos como se muestra en la Figura 13, este método será realizado en base a resultados obtenidos por pruebas realizadas con diferentes variables de acuerdo a los procedimientos internos desarrollados en los laboratorios de ILPM Cia. Ltda.

- Preparar las lijas número 120, 240, 320, 400, 600, 1200 para cada una de las etapas de rectificado. El uso de las lijas en la pulidora debe hacerse desde #120 y terminar con #1200.
- Se recomienda que las lijas número 120 y 240 no sean usadas por más de 5 minutos. Los números de lijas restantes pueden ser usadas por un tiempo de 10 minutos.

- La lija #120 es usada con el objetivo de aplanar una zona irregular o con la finalidad de remover secciones dañadas nivelando la superficie a este proceso se lo conoce como el esmerilado grueso.

Tabla 16. Caracterización de la etapa de pulido y tiempos de trabajo

Operación de rectificando	Numeración (P)	Grano (μm)	Tiempo de lijado	RPM
Grueso	120	125	5 min	500
	240	58,5	5 min	500
Fino	320	46,2	10 min	500
	400	35	10 min	500
	600	25,8	10 min	400
	1200	15,3	10 min	350

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

2.5.3. Método de preparación según ASTM E 3

Para la rectificación de las probetas de metalográficas se utiliza la norma ASTM E-3, la cual detalla tipo de lijas, tiempos específicos de preparación y las revoluciones por minuto (RPM) recomendadas por la misma, como se muestra en la Figura 35.

Surface	Lubricant	Abrasive Type/Size ANSI (FEPA)	Time sec.	Force ^A N(lbf)	Platen RPM ^B
Planar Grinding paper/stone	water	120–320 (P120–400) grit SiC/Al ₂ O ₃	15–45	20–30 (5–8)	200–300 ^C
Fine Grinding paper	water	240 (P220) grit SiC	15–45	20–30 (5–8)	200–300
	water	320 (P500) grit SiC	15–45	20–30 (5–8)	200–300
	water	600 (P1200) grit SiC	15–45	20–30 (5–8)	200–300
Rough Polishing low/no nap cloth	compatible lubricant	6 μm diamond	120–300	20–30 (5–8)	100–150
Final Polishing med./high nap cloth synthetic suede ^E	compatible lubricant	1 μm diamond	60–120	10–20 (3–5)	100–150
	water	0.04 μm colloidal silica or 0.05 μm alumina	30–60	10–20 (3–5)	100–150

Figura 35. Preparación de probetas metalográficas [22]

2.5.4. Pulido final

La etapa de pulido consiste en usar dos tipos de paños especiales para la remoción de impurezas y un acabado tipo espejo, para lo cual es necesario emplear como elemento abrasivo una solución de alúmina alfa de (un micrón) 1 μm y con agua de la misma

manera otra con alúmina de $0,3\mu\text{m}$ y agua, cada paño debe ser empleado con distinto tipo de abrasivo anteriormente descrito.

El pulido con el primer paño y empleando el uso de alúmina de $1\mu\text{m}$ se lo realiza en un tiempo aproximado de 3 minutos como máximo a una velocidad de 200 RPM y 150 RPM para el siguiente paño empleando alúmina de $0,3\mu\text{m}$ durante un tiempo de 3 minutos aproximadamente conjuntamente con un ligero goteo de agua durante el proceso.

Este método es desarrollado en base a los procesos y la experiencia del personal de la empresa ILPM Cia. Ltda y en base a lo establecido por la norma ASTM E-3.

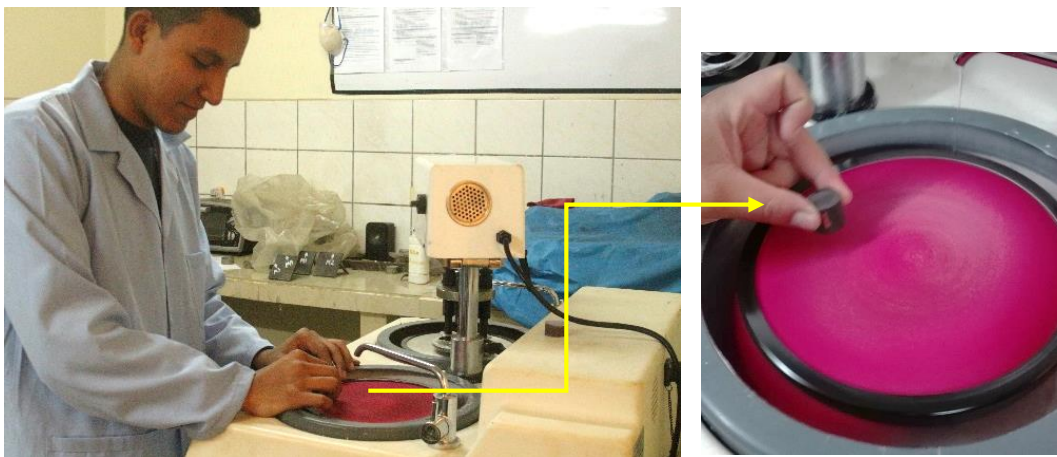


Figura 36. Pulido final en el paño y alúmina $0,3\mu\text{m}$
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

2.5.5. Ataque químico

Previo a la realización del ataque químico se toma en consideración los riesgos y el sistema de protección para el uso e implementación de los reactivos, posteriormente se toma la muestra para el ataque y se aplica la solución dependiendo del tipo de acero que se emplea, para este caso se trata de un acero al carbono por lo que se aplica dos gotas de nital 2 sobre la superficie pulida y controlando el tiempo de ataque de la probeta ya que este depende directamente del tipo de acero y el contenido de carbono (tiempo recomendado de 20 segundos para el ataque químico), finalmente se eliminan las impurezas de alúmina con el uso de agua y alcohol metílico.

A continuación, se presenta una tabla experimental del uso e implementación de los ácidos para el ataque metalográfico y en conformidad con los parámetros internos de los laboratorios de ILPM Cia. Ltda.

Tabla 17. Solución implementada en el ataque químico de aceros al carbono

Material	Solución	Contenido
Acero al carbono	Nital 2	196 Mililitros de Alcohol puro
		4 mililitros de ácido nítrico

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Las inclusiones en una superficie pulida y preparada adecuadamente son vistas en un microscopio metalúrgico de alta calidad Figura 14. La Figura de campo debe ser capturada mediante cámara fotográfica adecuada y transferida a una pantalla de análisis.

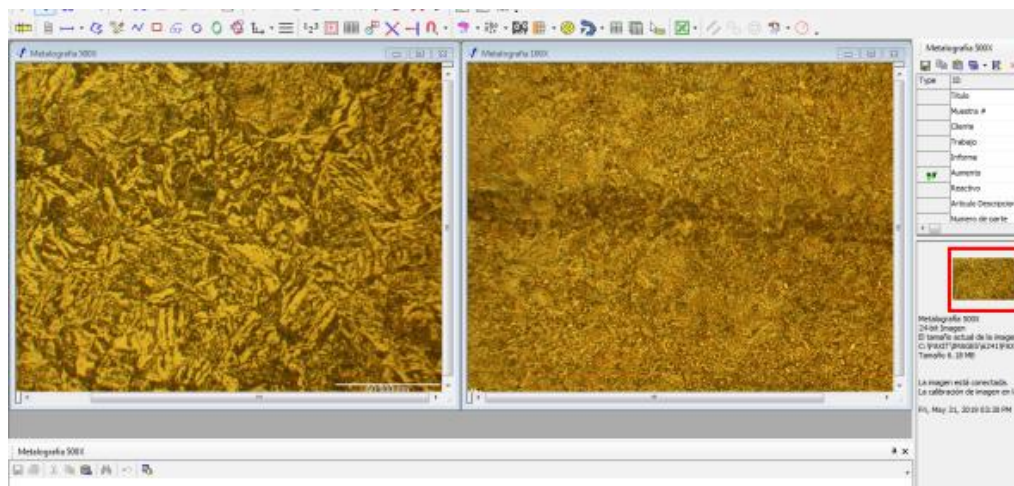


Figura 37. Método de interpretación de imagen PAX-IT
Elaborado por: Jeferson & Juan



Figura 38. Implementación de equipo para análisis micro estructural
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Un software de análisis se utiliza para evaluar el contenido de inclusiones en el material. Es necesario utilizar un programa para separar las inclusiones de acuerdo al tipo y espesor para desarrollar el cálculo de severidad. El software debe ser capaz de almacenar los resultados y generar el reporte de ensayo.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Composición química del acero AISI/SAE 4140

El análisis de composición química se realiza con el equipo de espectrometría por chispa Bruker Q2ION de las instalaciones de la empresa ILPM Cia. Ltda, mediante una probeta extraída del material base del acero AISI/SAE 4140, los resultados están expresados en la Tabla 18, los cuales son evaluados y comparados con aquellos valores suministrados por la empresa de aceros Böhler del ecuador S.A. y en conformidad con lo que establece la norma ASTM A29.

Tabla 18. Composición química del material base AISI 4140

Estampa	C	Si	Mn	Mo	Cr	P	S
Muestra MB	0,40	0,24	0,78	0,17	1,00	<0,003	0,0033
ASTM A29	0,38-0,43	0,15-0,35	0,75-1	0,15-0,25	0,80-1,10	<0,035	<0,040

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

El análisis de composición química de la muestra MB presenta porcentajes de elementos químicos correspondientes a un acero de tipo AISI/SAE 4140 en estado bonificado de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM A29 (Especificación estándar para barras de acero, carbono y aleaciones).

3.2. Propiedades mecánicas - Ensayo de tracción

Los ensayos de tensión se realizan en las instalaciones de ILPM Cia. Ltda con la máquina universal de ensayos de marca Jinan Hensgrand Instrument y modelo WAW-600D con capacidad de 600 kN, siguiendo los lineamientos de acuerdo a la norma ASTM A370 y ASTM E8 para la fabricación de los especímenes.

De esta manera se obtiene los valores de resistencia última a la tracción, límite elástico y alargamiento para el acero AISI/SAE 4140 sin tratamiento térmico, mediante la implementación de dos muestras las cuales se detallan a continuación en la Tabla 20.

El ensayo se realiza a temperatura ambiente 20°C y humedad relativa de 66%, las probetas están identificadas como T1 MB (tensión #1 de material base) y T2 MB

(tensión #2 de material base), correspondientes al material base. En la Tabla 19 se detalla el valor geométrico de las probetas previo al ensayo de tracción.

Tabla 19. Geometría de la probeta de tracción

Probeta	Diámetro Menor [mm]	Longitud Inicial [mm]	Longitud Final [mm]
T1-MB	12,52	50,00	57,89
T2-MB	12,49	50,00	56,80

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Tabla 20. Resultado del ensayo de tracción AISI 4140 bonificado

Denominación de probeta	Área [mm ²]	Límite de fluencia [MPa]	Resistencia a la tracción [MPa]	Elongación 50mm [%]
T1-MB	123,11	963	1077	16
T2-MB	122,52	896	1008	14

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Los resultados que se obtiene a partir del ensayo de tracción revelan que los valores de la muestra corresponden a un acero de designación AISI/SAE 4140 en cumplimiento con las especificaciones de la empresa de aceros Bohler del ecuador S.A. En la Figura 40 y la Figura 41 se detalla la curva de esfuerzo en MPa (Mega pascales) vs deformación en porcentaje.



Figura 39. Muestras ensayadas previo al tratamiento
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

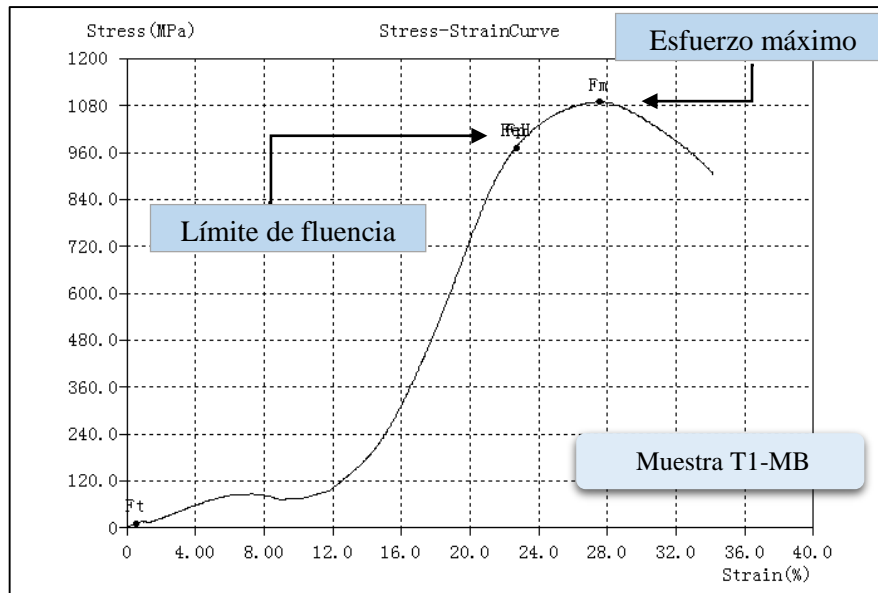


Figura 40. Curva de Esfuerzo vs Deformación de T1 MB
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

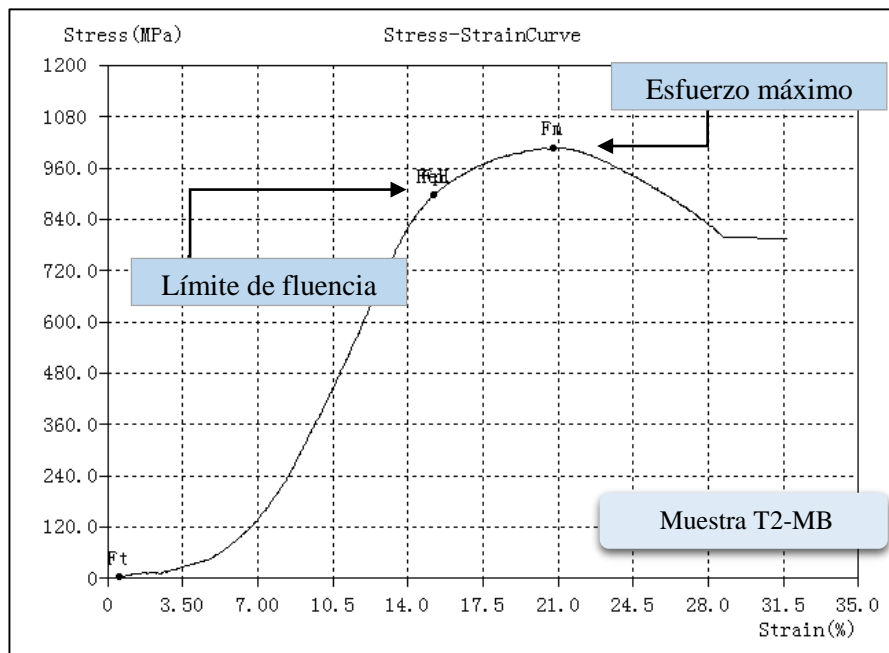


Figura 41. Curva de esfuerzo vs deformación de T2 MB
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

3.3. Propiedades mecánicas – Ensayo de dureza

Mediante el ensayo de dureza que se realiza a las probetas las cuales se denominan como T1 MB y T2 MB se obtiene valores que están ilustrados en la Tabla 21. Para realizar el ensayo de dureza de AISI/SAE 4140 se obtiene 7 puntos medidos en la escala (HRC) Rockwell C de los cuales se descartan 2 valores (máximo y mínimo).

Tabla 21. Valores de dureza obtenidos en el acero AISI/SAE 4140 bonificado

Denominación de probeta	M 1	M 2	M 3	M4	M5	Promedio	Desviación Estándar
T1-MB	26,5	27	27	26,5	27	28,60	0,27
T2-MB	32	31	31,5	31,5	31,5	31,50	0,35

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Los valores de dureza obtenidos a partir del material base del acero AISI/SAE 4140, revelan valores promedios de 28,60 HRC y 31,50 HRC respectivamente, los cuales cumplen con los valores establecidos en el rango de (25 a 30) HRC, estandarizados por la empresa de aceros Böhler S.A.

Se utiliza la ecuación (1) de la media aritmética, para obtener el promedio de la T1-MB usando los puntos de dureza de la Tabla 21.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$
$$\bar{x} = \frac{26,5 + 27 + 27 + 26,5 + 27}{5}$$
$$\bar{x} = 28,60 \text{ HRC}$$

La ecuación (2) representa la desviación estándar para el cálculo de la muestra T1.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (1)$$
$$\sigma = \sqrt{\frac{0,09 + 0,04 + 0,04 + 0,09 + 0,04}{4}}$$
$$\sigma = 0,27$$

Usando la ecuación (1) se obtiene los valores promedio de dureza en la muestra T2.

$$\bar{x} = \frac{32 + 31 + 31,5 + 31,5 + 31,5}{5}$$
$$\bar{x} = 31,50 \text{ HRC}$$

Usando la ecuación (2) se obtiene la desviación estándar de los valores de la muestra T2.

$$\sigma = \sqrt{\frac{0,25 + 0,25 + 0 + 0 + 0}{4}}$$

$$\sigma = 0,35$$

3.4. Ensayo metalográfico

Se realiza la medición de inclusiones en el acero AISI 4140 en estado bonificado, con la finalidad de conocer el tipo de inclusión que tiene el acero.



Figura 42. Inclusiones acero AISI/SAE 4140 bonificado
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Tabla 22. Detalles de las inclusiones del acero AISI/SAE 4140

DENOMINACIÓN	ESPECIFICACION
Identificación de la muestra	Acero AISI/SAE 4140 / S.T. T
Aumento	100X
Inclusión Máxima (µm)	16,57
Tipo de inclusión	Tipo D Oxido Globular
Severidad Delgada	1 ½ Uno y Medio
Severidad Gruesa	1 ½ Uno y Medio
Norma	ASTM E-45

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

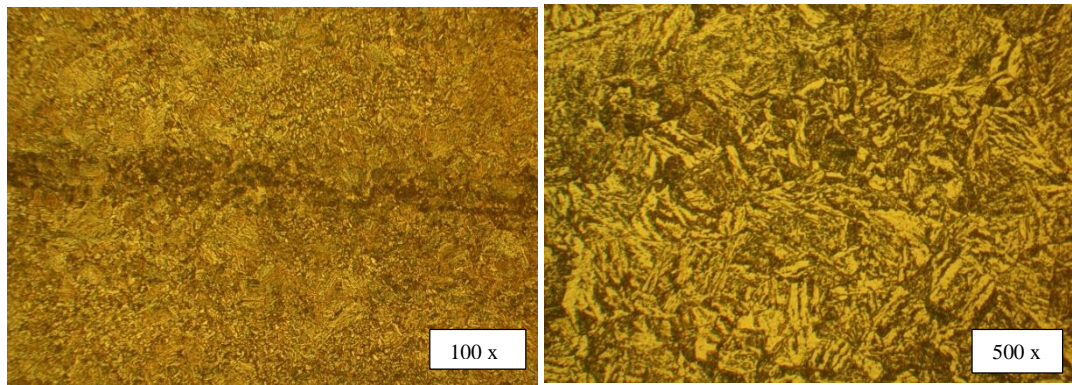


Figura 43. Microestructura del acero AISI 4140 bonificado
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

La muestra del acero AISI/SAE 4140 es previamente atacada con Nital 2 para observar con claridad la microestructura.

El análisis metalográfico que se realiza en las muestras de Acero AISI/SAE 4140 de material base sin tratamiento térmico revela que la muestra corresponde a un acero de medio contenido de carbono, con microestructura de tipo Ferrítico Perlítico. El tamaño de grano es #7 según la clasificación ASTM E112.

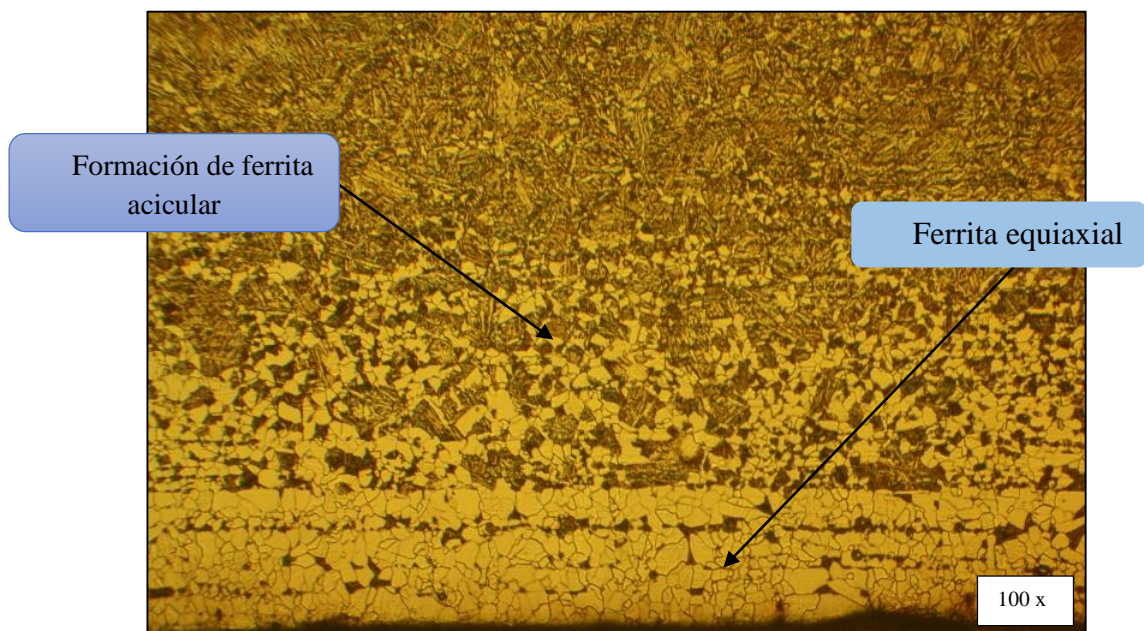


Figura 44. Formación de ferrita acicular y presencia de ferrita equiaxial
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

En la Figura 44 se observa la formación de ferrita acicular en la matriz y decarburización del material con microestructura alargada producto del enfriamiento rápido aplicado, adicionalmente se logra evidenciar la segregación del material en dirección del conformado mecánico y la presencia de ferrita equiaxial en los bordes del acero mientras que en el centro se forma progresivamente la ferrita acicular.

3.5. Tratamiento térmico

El tratamiento térmico se desarrolla en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana, donde se involucran variables como: temperatura, medio de enfriamiento y tiempo de sostenimiento. Es importante comprender que no es recomendable introducir las probetas al horno cuando este alcanza una temperatura elevada.

El tratamiento térmico de temple se lo realiza sin escalonamiento con medio de enfriamiento en aceite a temperatura ambiente. La temperatura de austenización que se alcanza es de 850 °C, en la Tabla 23 se muestra las características del ensayo y manejo de los tiempos en el horno.



Figura 45. Detalle del tratamiento térmico de temple
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Tabla 23. Características del proceso de temple

Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Observación
0	19	Temperatura inicial
0-85	850	Temperatura de austenización
85-145	850	Estabilidad de temperatura de temple
145-148	19	Enfriamiento en aceite

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Una vez que termina el proceso de temple, las probetas se introducen en el horno para revenido variando las temperaturas, la empresa de aceros Bohler del Ecuador S.A realiza los tratamientos térmicos de temple y revenido con la finalidad de obtener distintos valores de dureza de acuerdo al requerimiento del cliente realizando variaciones en cuanto a las temperaturas de revenido.

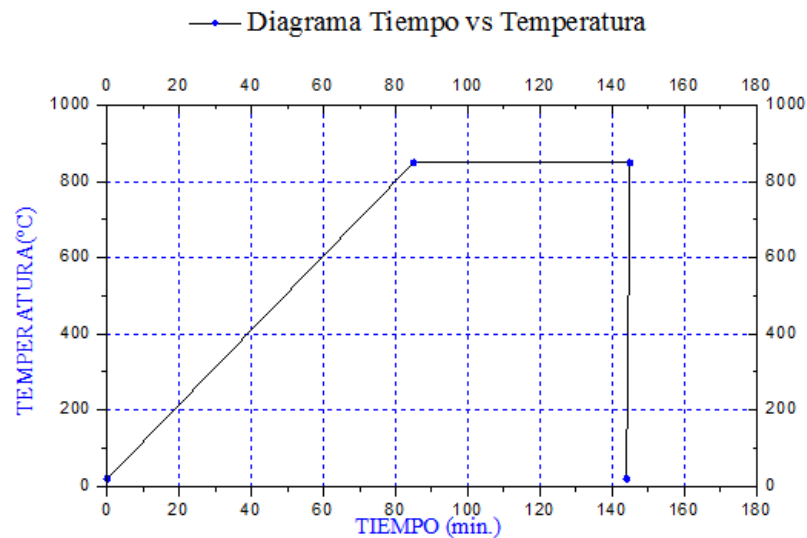


Figura 46. Diagrama tiempo vs temperatura de austenización
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

El diagrama de temple que se representa en la Figura 46, indica el tiempo de austenización de las muestras el cual alcanza una temperatura de 850 °C, en un tiempo de 85 minutos. Debido a las dimensiones de las probetas de diámetro 20mm, se determina un tiempo de 1 hora de permanencia en el horno una vez alcanzado los 850 °C, es importante conocer que en las muestras escogidas para el temple no requieren uniformidad durante el calentamiento, en efecto no se crean fuertes tensiones internas que pueden dar lugar a grietas y roturas, en el caso de tener probetas que superan 50 mm de espesor se procura realizar un escalonamiento durante la etapa de austenización.

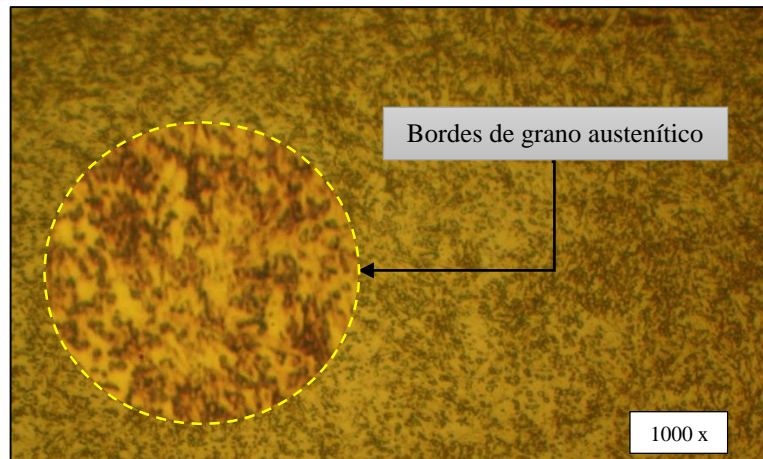


Figura 47. Grano austenítico acero AISI 4140 templado a 850 °C
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

La Figura 47, corresponde al acero AISI/SAE 4140 templado y con medio de enfriamiento en aceite a temperatura ambiente el tamaño de grano encontrado corresponde a # 9 mediante método de comparación de Figura.

Por otra parte, la velocidad de enfriamiento es una de las variables que define el tamaño de grano austenítico, asimismo a partir de los 720 °C durante el calentamiento el tiempo necesario para que el centro de las probetas alcance la temperatura deseada aumenta debido al calor que absorbe el acero para que se efectúe la transformación de la perlita en Austenita.

Se realiza la medición de dureza alcanzable del acero posterior al tratamiento térmico de temple a 850°C, las condiciones de ensayo son de 20 °C, ± 68 % HR; las medidas son tomadas en el durómetro de banco con indentador cónico de diamante y en escala HRC (Rockwell C).

Tabla 24. Valores de dureza AISI 4140 Temple a 850 °C

Probeta	M1	M2	M3	M4	M5	Promedio	Desviación estándar
Temple 850 °C	55	55,50	54,50	56	54	55	0,79
Böhler	54 a 56 HRC						

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Los puntos de dureza obtenidos de la muestra AISI/SAE 4140, posterior al tratamiento térmico de temple a 850 °C, cumplen con los valores de dureza estándar de la empresa de aceros Böhler S.A, obteniendo un valor promedio de 55 HRC y se encuentra dentro del rango permitido.

La dureza incrementa en 23,5 HRC, de (31,5 a 55) HRC cuando se mantiene en enfriamiento durante 15 segundos y la temperatura de tratamiento isotérmico es de 850°C.

3.5.1. Resultado de ensayo de tracción posterior al revenido

Se realiza el tratamiento térmico en dos probetas de tracción de sección circular, la Figura 48 representa el diagrama de tratamiento térmico de temple a 850 °C y revenido a 540 °C.

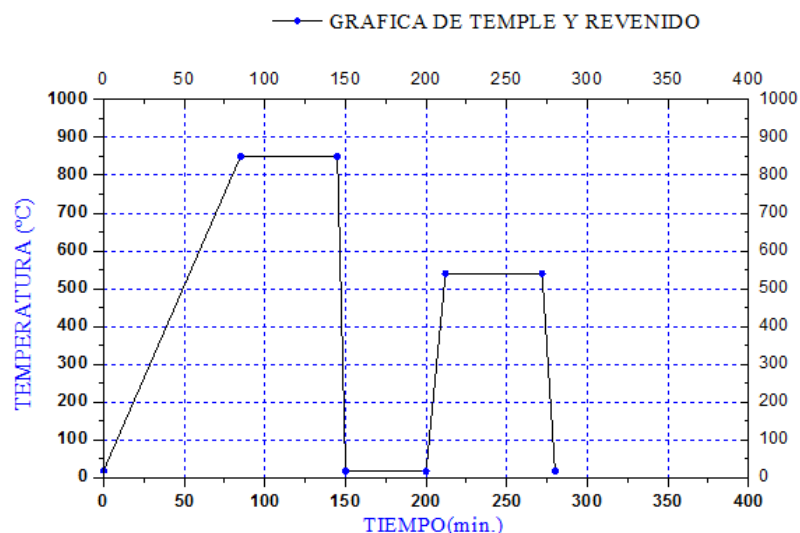


Figura 48. Gráfica de temple y revenido a 540°C del acero AISI 4140
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Los valores representados en la curva de esfuerzo deformación, mostrados en la Figura 49, cumplen con los resultados establecidos por la empresa de aceros Böhler S.A y que corresponden a un acero AISI/SAE 4140 de medio contenido de carbono tratado térmicamente por temple y revenido a temperatura de 540 °C.

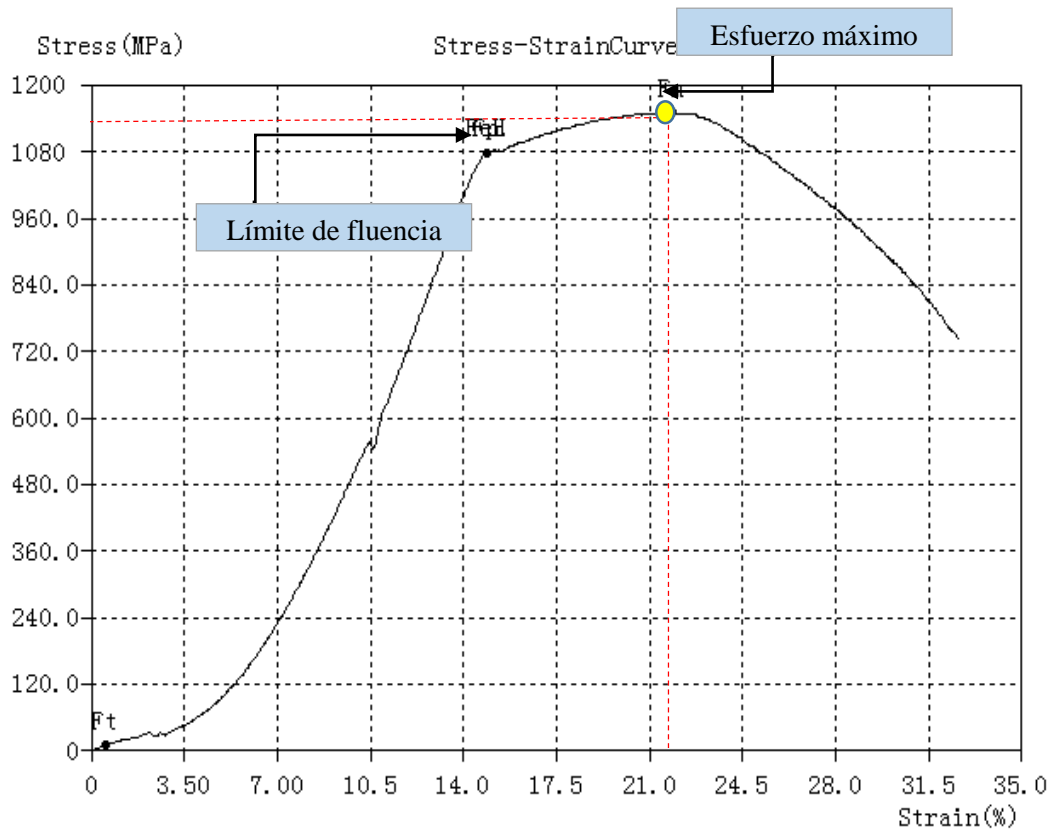


Figura 49. Curva de esfuerzo vs deformación revenido a 540 °C
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

En la siguiente tabla se tiene los valores que son producto del ensayo de tracción realizado en las muestras de acero AISI/SAE 4140.

Tabla 25. Resistencia mecánica del acero AISI/SAE 4140 revenido a 540 °C

Denominación de probeta	Diámetro [mm]	Límite de fluencia [MPa]	Resistencia a la tracción [MPa]	Elongación 50mm [%]
TT1 Revenido 540°C	12,48	1078	1151	17
TT2 Revenido 540°C	12,5	1075	1142	18

Böhler S.A. Rm = 1100 MPa, mín.

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

A continuación, se realiza el tratamiento térmico de temple en aceite a la temperatura de 850 °C y una temperatura de revenido a 590 °C con un tiempo de sostenimiento de 1 hora. Usando la ecuación (1) se calcula el promedio del límite de fluencia de las dos muestras TT1 y TT2.

$$\bar{x}_{FeL} = \frac{1078+1075}{2}$$

$$\bar{x}_{FeL} = 1076,5 \text{ MPa}$$

Cálculo del promedio de resistencia última a la tracción de las muestras TT1 y TT2 usando la ecuación (1).

$$\bar{x}_{Rm} = \frac{1151+1142}{2}$$

$$\bar{x}_{Rm} = 1146,5 \text{ MPa}$$

Se realiza el tratamiento térmico en dos probetas de tracción de sección circular, la Figura 50 representa el diagrama de tratamiento térmico de temple a 850 °C y revenido a 590 °C.

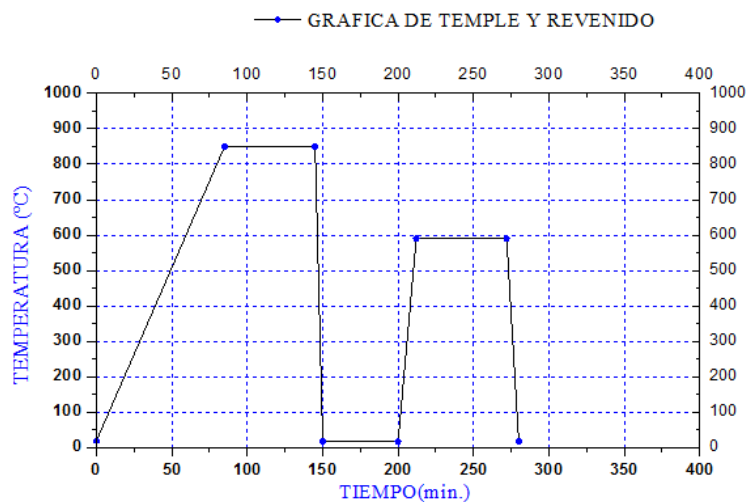


Figura 50. Gráfica de temple y revenido a 590 °C
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Los valores representados en la curva de esfuerzo deformación, cumplen con los resultados establecidos por la empresa de aceros Böhler S.A y que corresponden a un acero AISI/SAE 4140 de medio contenido de carbono tratado térmicamente por temple y revenido a temperatura de 590 °C.

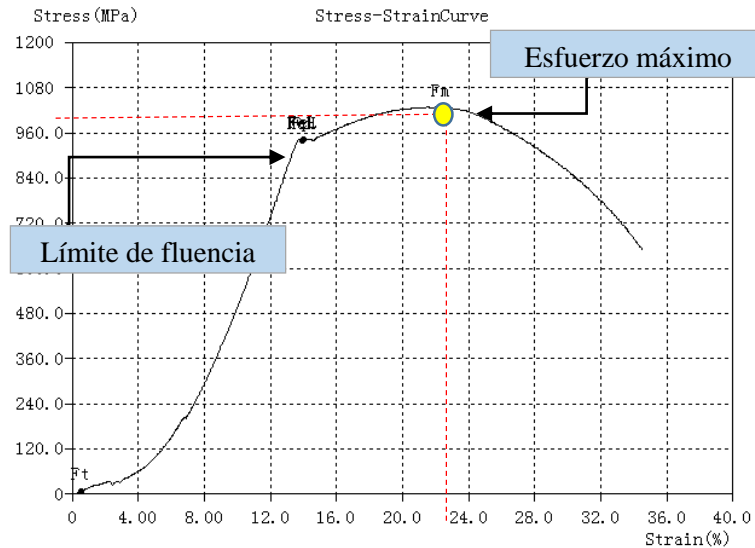


Figura 51. Curva de esfuerzo vs deformación revenido a 590°C
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Tabla 26. Resistencia mecánica del acero AISI/SAE 4140 revenido a 590 °C

Denominación de probeta	Diámetro [mm]	Límite de fluencia [MPa]	Resistencia a la tracción [MPa]	Elongación 50mm [%]
TT3 Revenido 590°C	12,49	943	1028	18
TT4 Revenido 590°C	12,47	947	1032	15
Böhler S.A.		Rm = 1000 MPa, mín.		

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Usando la ecuación (1) se obtiene el valor promedio del límite de fluencia de la muestra TT3 y TT4 con revenido a 590 °C

$$\bar{x}_{FeL} = \frac{943 + 947}{2}$$

$$\bar{x}_{FeL} = 945 \text{ MPa}$$

Usando la ecuación (1) se calcula el promedio de resistencia última a la tracción de las muestras TT3 y TT4

$$\bar{x}_{Rm} = \frac{1028 + 1032}{2}$$

$$\bar{x}_{Rm} = 1030 \text{ MPa}$$

Se realiza el tratamiento térmico en dos probetas de tracción de sección circular, la Figura 52 representa el diagrama de tratamiento térmico de temple a 850 °C y revenido a 640 °C.

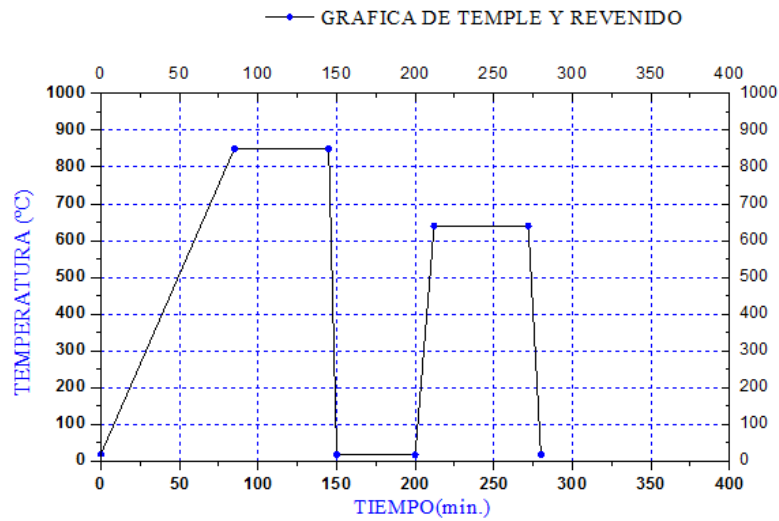


Figura 52. Gráfica de temple y revenido a 640°C
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

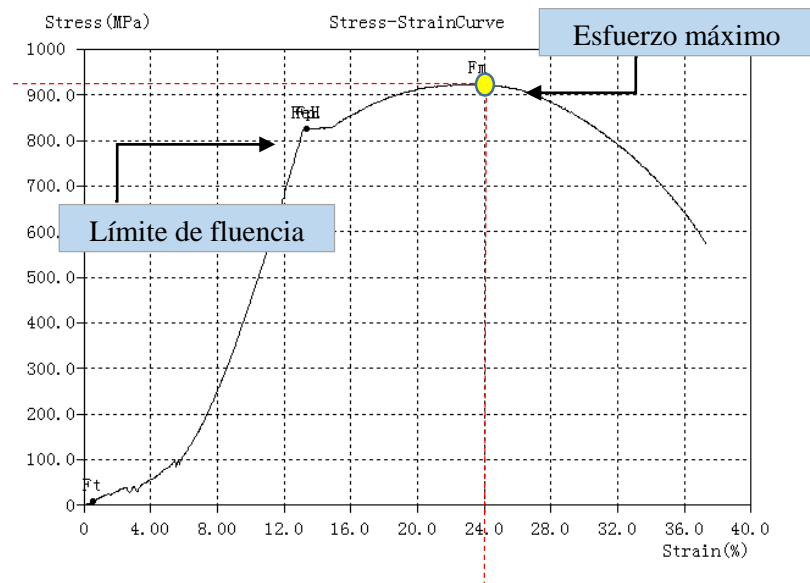


Figura 53. Curva de esfuerzo vs deformación revenido a 640 °C
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Los valores representados en la curva de esfuerzo deformación, cumplen con los resultados establecidos por la empresa de aceros Böhler S.A y que corresponden a un acero AISI 4140 de medio contenido de carbono tratado térmicamente por temple y revenido a temperatura de 640 °C.

Tabla 27. Resistencia mecánica del acero AISI/SAE 4140 revenido a 640°C

Denominación de probeta	Diámetro [mm]	Límite de fluencia [MPa]	Resistencia a la tracción [MPa]	Elongación 50mm [%]
TT5 Revenido 640°C	12,49	824	924	20
TT6 Revenido 640°C	12,5	822	920	23
Böhler S.A.			Rm = 890 MPa, mín.	

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Usando la ecuación (1) se obtiene el valor promedio del límite de fluencia de la muestra TT5 y TT6 con revenido a 640 °C

$$\bar{x}_{FeL} = \frac{824 + 822}{2}$$

$$\bar{x}_{FeL} = 823 \text{ MPa}$$

Usando la ecuación (1) se calcula el promedio de resistencia última a la tracción de las muestras TT5 y TT6

$$\bar{x}_{Rm} = \frac{924 + 920}{2}$$

$$\bar{x}_{Rm} = 922 \text{ MPa}$$

3.5.2. Resultado de ensayo de dureza posterior al tratamiento térmico

Los valores promedio de dureza se obtienen a partir de la toma de 5 mediciones en las muestras de acero AISI/SAE 4140, las condiciones de ensayo se encuentran en 20°C, ±69 % HR y los resultados se encuentran expresados en la Tabla 28.

La empresa de aceros Böhler S.A, establece distintos valores de dureza que se obtienen con relación a la temperatura de revenido, del mismo modo que son comparados con los valores adquiridos a partir de los ensayos que realizados en la empresa ILPM Cia. Ltda, la curva de dureza vs temperatura de revenido se encuentra representado en la Figura 54.

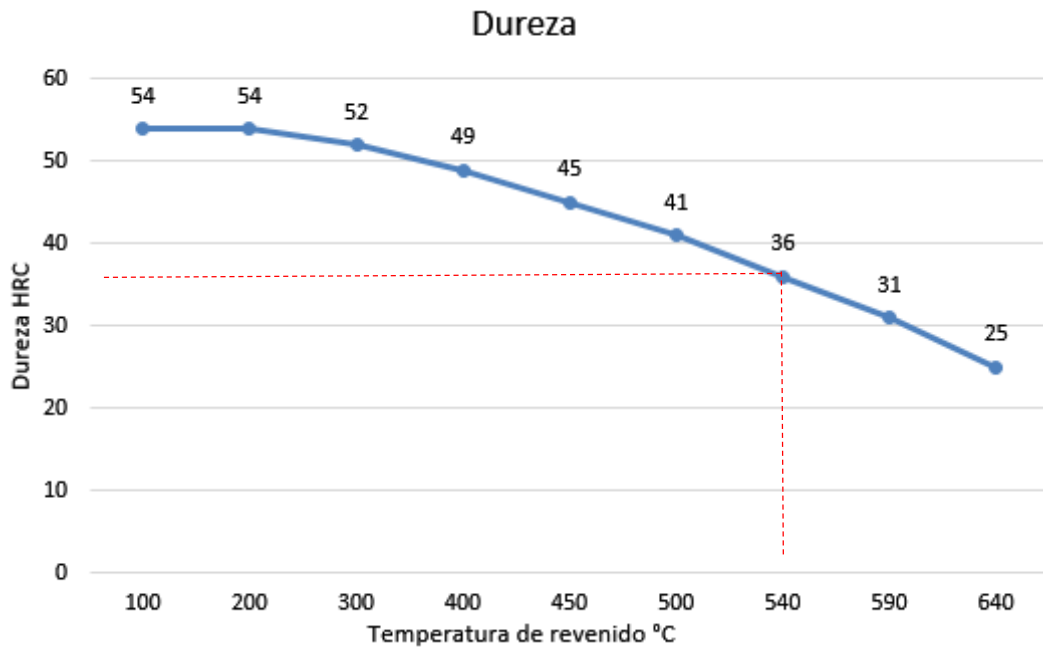


Figura 54. Dureza vs Temperatura de revenido 540°C [1]

Tabla 28. Valores de dureza del acero AISI 4140 revenido a 540 °C

Denominación de probeta	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	Promedio	Desviación Estándar
TT1 Revenido 540 °C	35,50	36	36	37,5	36,5	36,30	0,76
TT2 Revenido 540 °C	36	36,5	36	36	36,5	36,20	0,27
Límites Böhler S.A.						36 HRC	

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Los valores de dureza en la Tabla 28 se encuentran dentro de los parámetros establecidos por la empresa de aceros Böhler S.A y evidencian que el acero corresponde a la designación AISI/SAE 4140 templado y revenido a 540 °C con valor promedio de dureza 36,30 HRC y 36,20 HRC. Se utiliza la ecuación de la media aritmética (1), para obtener el promedio de la TT1 usando los puntos de dureza de la tabla con revenido a 540°C.

$$\bar{x} = \frac{35,5 + 36 + 36 + 37,5 + 36,5}{5}$$

$$\bar{x} = 36,30 \text{ HRC}$$

Cálculo de la desviación estándar para la muestra TT1 con revenido a 540°C, usando la ecuación (2).

$$\sigma = \sqrt{\frac{0,64 + 0,09 + 0,09 + 1,44 + 0,04}{4}}$$

$$\sigma = 0,76$$

Usando la ecuación (1) se obtiene los valores promedio de dureza en la muestra TT2.

$$\bar{x} = \frac{36 + 36,5 + 36 + 36 + 36,5}{5}$$

$$\bar{x} = 36,20 \text{ HRC}$$

Usando la ecuación (2) se obtiene la desviación estándar de los valores de la muestra TT2.

$$\sigma = \sqrt{\frac{0,04 + 0,09 + 0,04 + 0,04 + 0,09}{4}}$$

$$\sigma = 0,27$$

Los valores de dureza en la Tabla 29 se encuentran dentro de los parámetros establecidos por la empresa de aceros Böhler S.A y evidencian que el acero corresponde a la designación AISI/SAE 4140 templado y revenido a 590 °C con valor promedio de dureza 33,40 HRC y 33,60 HRC.

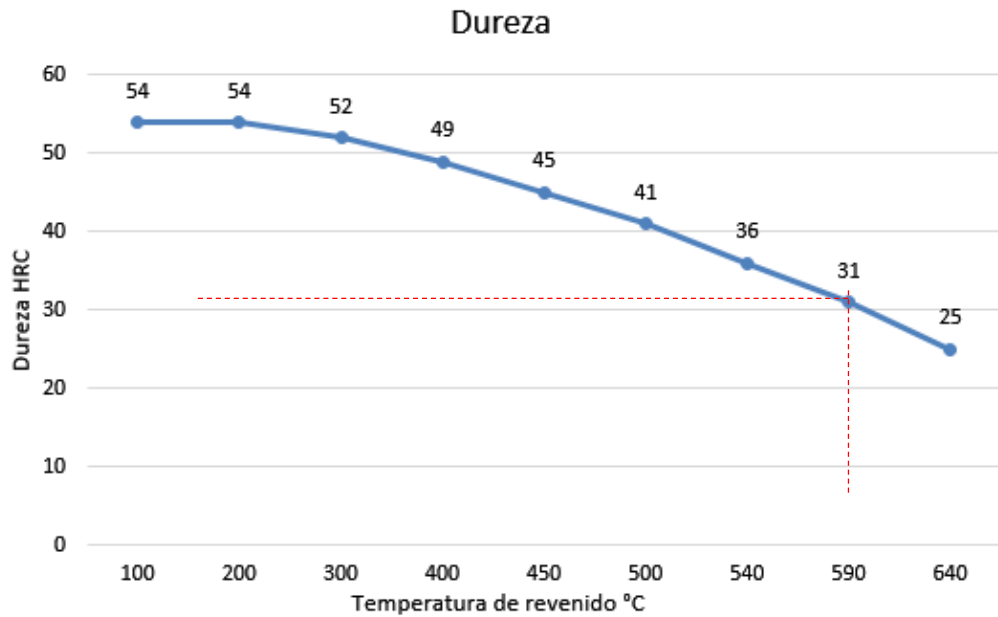


Figura 55. Dureza vs Temperatura de revenido 590 °C [1]

Tabla 29. Dureza del acero AISI 4140 revenido a 590 °C

Denominación de probeta	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	Promedio	Desviación Estándar
TT3 Revenido 590°C	34	33	32,5	33,5	34	33,40	0,65
TT4 Revenido 590°C	34,5	33,5	33	33	34	33,60	0,65
Límites Böhler S.A.						31 HRC	

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Se utiliza la ecuación de la media aritmética (1), para obtener el promedio de la TT3 usando los puntos de dureza de la tabla con revenido a 590°C.

$$\bar{x} = \frac{34 + 33 + 32,5 + 33,5 + 34}{5}$$

$$\bar{x} = 33,40 \text{ HRC}$$

Cálculo de la desviación estándar para la muestra TT3 con revenido a 590°C, usando la ecuación (2).

$$\sigma = \sqrt{\frac{0,36 + 0,16 + 0,81 + 0,01 + 0,36}{4}}$$

$$\sigma = 0,65$$

Usando la ecuación (1) se obtiene los valores promedio de dureza en la muestra TT4.

$$\bar{x} = \frac{34,5 + 33,5 + 33 + 33 + 34}{5}$$

$$\bar{x} = 33,60 \text{ HRC}$$

Usando la ecuación (2) se obtiene la desviación estándar de los valores de la muestra TT4.

$$\sigma = \sqrt{\frac{0,81 + 0,01 + 0,36 + 0,36 + 0,16}{4}}$$

$$\sigma = 0,65$$

Los valores de dureza en la Tabla 30 se encuentran dentro de los parámetros establecidos por la empresa de aceros Böhler S.A y evidencian que el acero corresponde a la designación AISI/SAE 4140 templado y revenido a 640 °C con valor promedio de dureza 28,60 HRC y 28,80 HRC.

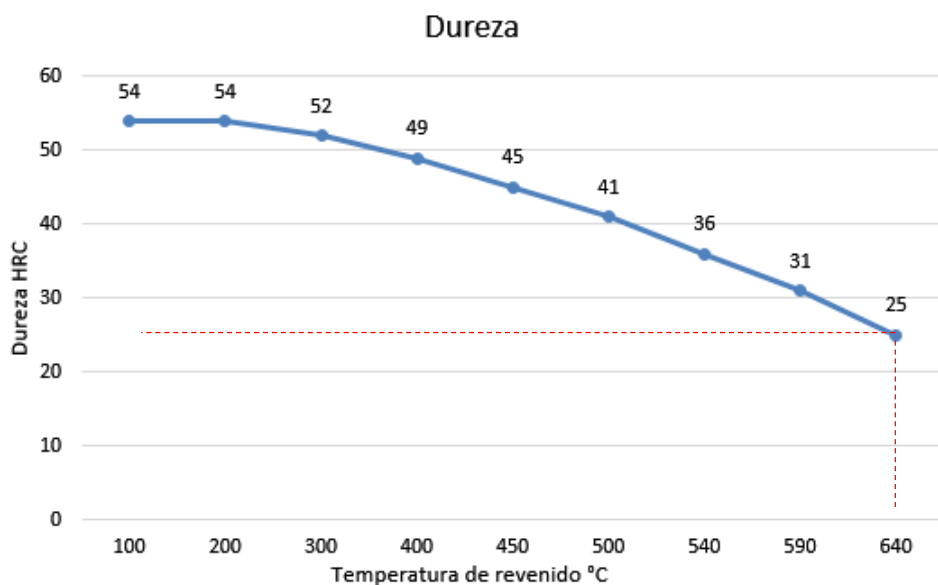


Figura 56. Dureza vs Temperatura de revenido 640 °C [1]

Tabla 30. Dureza del acero AISI 4140 revenido a 640 °C

Denominación de probeta	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	Promedio	Desviación Estándar
TT5 Revenido 640°C	28	30	28,5	28,5	28	28,60	0,82
TT6 Revenido 640°C	29	28	30	28	29	28,80	0,84
Límites Böhler S.A.						25 HRC	

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Se utiliza la ecuación de la media aritmética (1), para obtener el promedio de la TT5 usando los puntos de dureza de la tabla con revenido a 640°C.

$$\bar{x} = \frac{28 + 30 + 28,5 + 28,5 + 28}{5}$$

$$\bar{x} = 28,6 \text{ HRC}$$

Cálculo de la desviación estándar de la muestra TT5 con revenido a 640°C, usando la ecuación (2).

$$\sigma = \sqrt{\frac{0,36 + 1,96 + 0,01 + 0,01 + 0,36}{4}}$$

$$\sigma = 0,82$$

Usando la ecuación (1) se obtiene los valores promedio de dureza en la muestra TT6

$$\bar{x} = \frac{29 + 28 + 30 + 28 + 29}{5}$$

$$\bar{x} = 28,80 \text{ HRC}$$

Usando la ecuación (2) se obtiene la desviación estándar de los valores de la muestra TT6

$$\sigma = \sqrt{\frac{0,04 + 0,64 + 1,44 + 0,64 + 0,04}{4}}$$

$$\sigma = 0,84$$

3.5.3. Análisis comparativo de las muestras

Se realiza el análisis comparativo de las muestras que fueron sometidos a tratamiento térmico de temple y revenido donde se evidencia el cambio microestructural y el cambio de fase del acero.

3.5.4. Resultados metalográficos

Se obtiene los resultados de las metalografías posteriores al tratamiento térmico y se detalla a continuación mediante análisis microscópico.

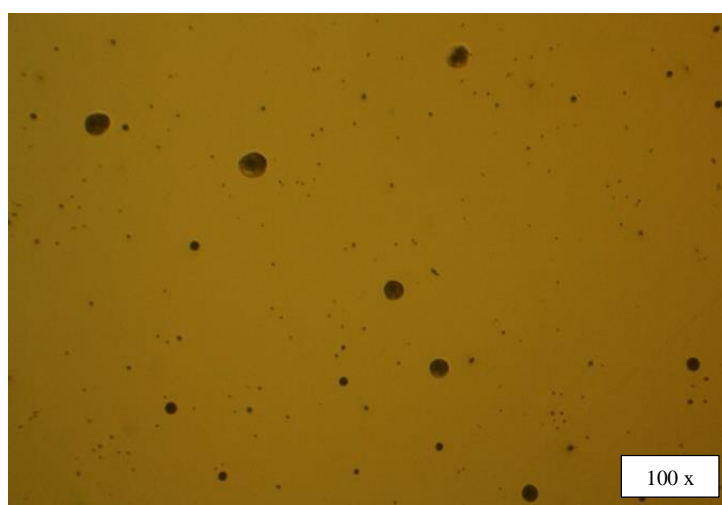


Figura 57. Inclusiones del acero AISI/SAE 4140 revenido a 540 °C
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Tabla 31. Características de las inclusiones del acero AISI 4140

Denominación	Especificación
Identificación de la muestra	TT1-Rev 540 °C
Aumento	100 X
Inclusión Máxima (μm)	42,21
Tipo de inclusión	Tipo D Oxido Globular
Severidad Delgada	2 Dos
Severidad Gruesa	1 uno
Norma	ASTM E-45

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

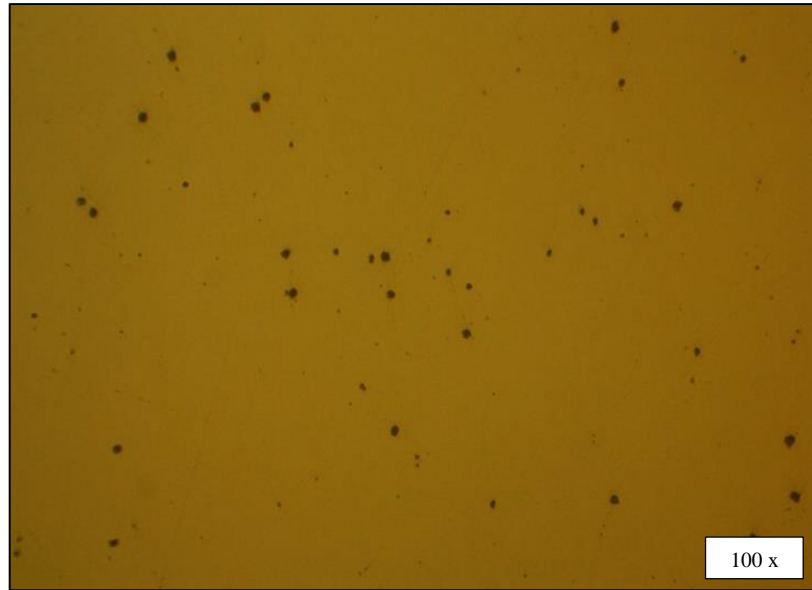


Figura 58. Inclusiones del acero AISI 4140 revenido a 540 °C
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Tabla 32. Características de las inclusiones del acero AISI 4140 Muestra TT2

Denominación	Especificación
Identificación de la muestra	TT2-Rev 540 °C
Aumento	100 X
Inclusión Máxima (μm)	15,49
Tipo de inclusión	Tipo D Oxido Globular
Severidad Delgada	1½ Uno y medio
Severidad Gruesa	1½ Uno y medio
Norma	ASTM E-45

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

El análisis metalográfico realizado en las muestras identificadas como acero AISI/SAE 4140 (TT1 Y TT2 Rev 540 °C) con tratamiento térmico a una temperatura de temple a 850 °C y revenido a 540 °C en las cuales se determina que la muestra corresponde a un acero de medio contenido de carbono, aleado, y de microestructura de tipo martensita revenida gruesa.

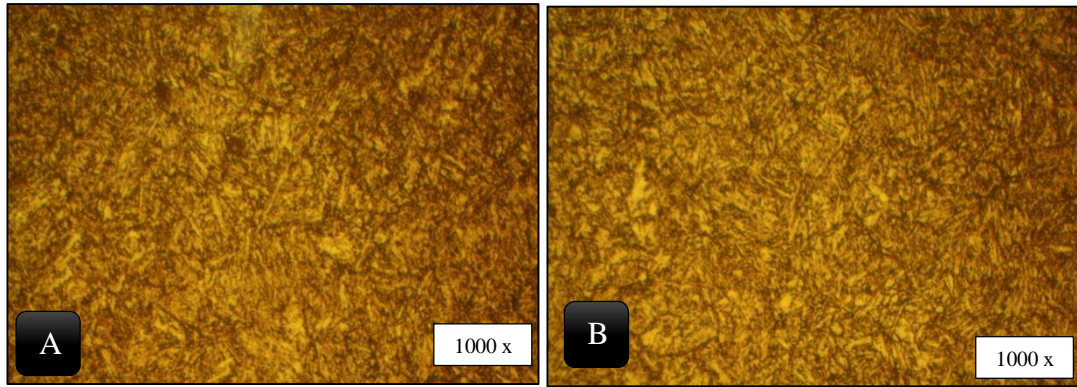


Figura 59. Martensita revenida a 540 °C del acero AISI 4140
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón



Figura 60. Inclusiones del acero AISI 4140 revenido a 590°C
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Tabla 33. Características de las inclusiones del acero AISI 4140 Muestra TT3

Denominación	Especificación
Identificación de la muestra	TT3-Rev 590 °C
Aumento	100 X
Inclusión Máxima (µm)	17,32
Tipo de inclusión	Tipo D Oxido Globular
Severidad Delgada	1½ Uno y medio
Severidad Gruesa	1 Uno
Norma	ASTM E-45

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

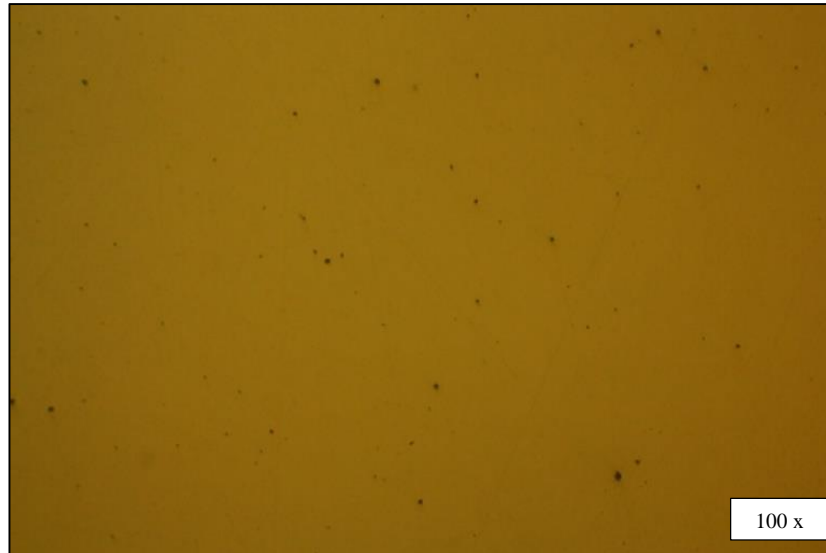


Figura 61. Inclusiones del acero AISI 4140 revenido a 590°C
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Tabla 34. Características de las inclusiones del acero AISI 4140 Muestra TT4

Denominación	Especificación
Identificación de la muestra	TT4-Rev 590 °C
Aumento	100 X
Inclusión Máxima (µm)	9,71
Tipo de inclusión	Tipo D Oxido Globular
Severidad Delgada	3 tres
Severidad Gruesa	1 uno
Norma	ASTM E-45

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

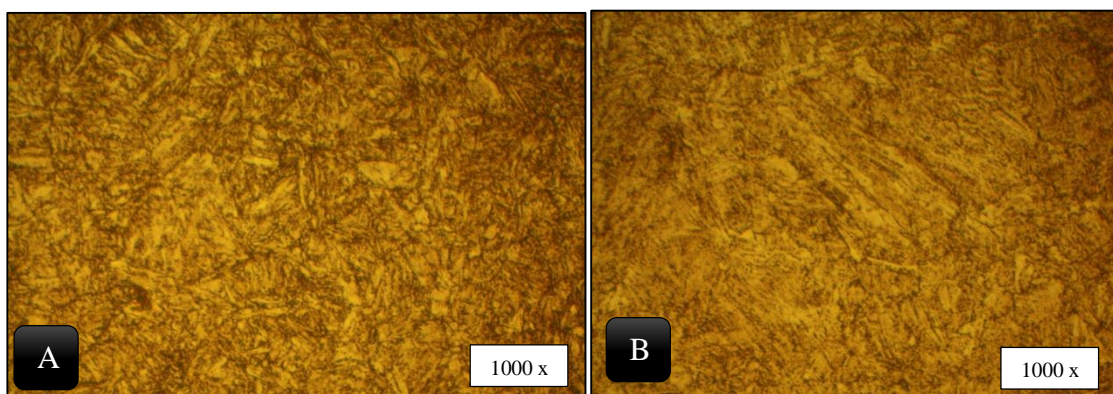


Figura 62. Martensita revenida, muestra TT3 (A) y muestra TT4 (B)
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

El análisis metalográfico realizado en las muestras identificadas como Acero AISI/SAE 4140 (TT3 Y TT4 Revenido a 590 °C) con tratamiento térmico a una

temperatura de temple a 850 °C y revenido a 590 °C en las cuales se determina que la muestra corresponde a un acero de medio contenido de carbono, aleado, y de microestructura de tipo martensita revenida. Existe un bajo porcentaje de martensita o disminución de la fase martensítica por efecto de temperatura.

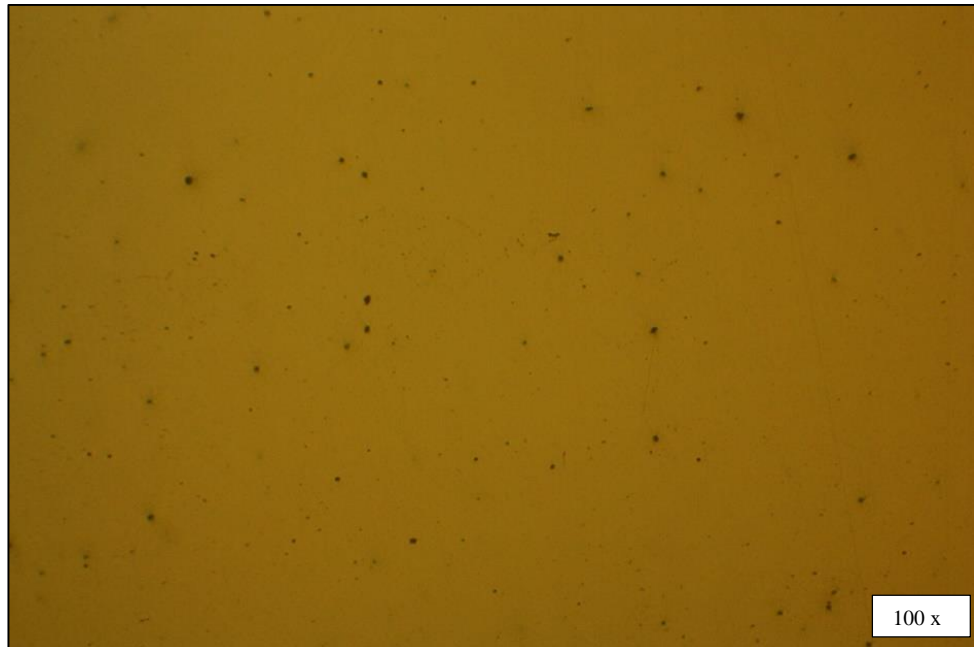


Figura 63. Inclusiones del acero AISI 4140 revenido a 640°C
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Tabla 35. Características de las inclusiones del acero AISI 4140 Muestra TT5

Denominación	Especificación
Identificación de la muestra	TT5-Rev 640 °C
Aumento	100 X
Inclusión Máxima (µm)	11,50
Tipo de inclusión	Tipo D Oxido Globular
Severidad Delgada	2 ½ Dos y media
Severidad Gruesa	1 ½ uno y medio
Norma	ASTM E-45

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

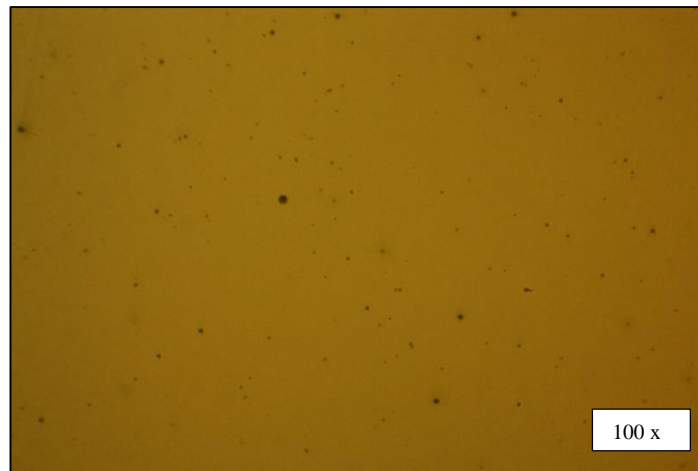


Figura 64. Inclusiones del acero AISI 4140 revenido a 640 °C

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Tabla 36. Características de las inclusiones del acero AISI 4140 Muestra TT6

Denominación	Especificación
Identificación de la muestra	TT6-Rev 640 °C
Aumento	100 X
Inclusión Máxima (µm)	15,38
Tipo de inclusión	Tipo D Oxido Globular
Severidad Delgada	2 media
Severidad Gruesa	½ medio
Norma	ASTM E-45

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

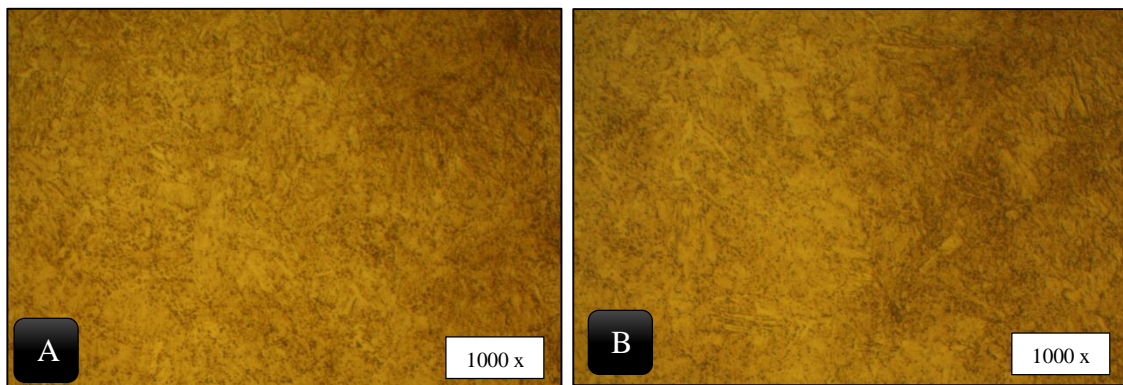


Figura 65. Martensita revenida a 640 °C del acero AISI 4140

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

El análisis metalográfico realizado en las muestras identificadas como Acero AISI/SAE 4140 (TT1 Y TT2 Rev 640 °C) con tratamiento térmico a una temperatura de temple a 850 °C y Revenido a 640 °C en las cuales se determina que la muestra corresponde a un acero de medio contenido de carbono, aleado, y de microestructura de tipo martensita revenida. A nivel microestructural se observa que la martensita se

va desvaneciendo y se encuentra más fina en comparación con las muestras de revenido a 540 °C.

3.6. Temple con escalonamiento

Se realiza el temple con escalonamiento en las instalaciones de la empresa ILPM Cia. Ltda, en las probetas de acero AISI/SAE 4140 los parámetros que se toman en cuenta durante el tratamiento son: Temperatura de austenización a 850 °C y revenido a 300 °C y tiempos de estabilidad como se muestra en la tabla a continuación.

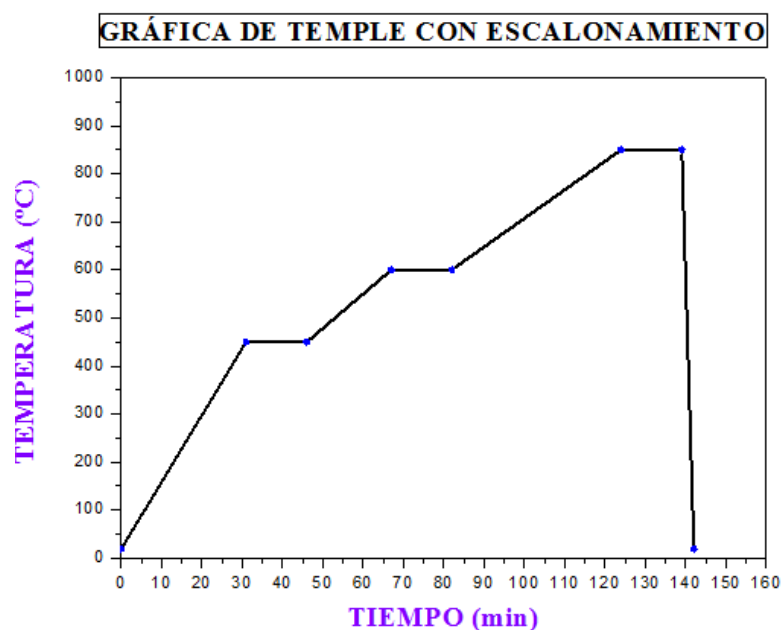


Figura 66. Temple con escalonamiento
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Tabla 37. Parámetros y tiempos de austenización

Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Observación
0	19	Temperatura inicial
31	450	Primer escalonamiento
46	450	Estabilidad de temperatura
67	600	Segundo escalonamiento
82	600	Estabilidad de temperatura
124	850	Tercer escalonamiento a temperatura final de temple.
139	850	Estabilidad de temperatura de temple
142	19	Enfriamiento en aceite

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Se realiza la medición de dureza alcanzable del acero posterior al tratamiento térmico de temple escalonado a 850 °C y revenido a temperatura de 300 °C, las condiciones de ensayo son de 20°C, ±68% HR; las medidas son tomadas en el durómetro de banco con indentador cónico de diamante y en escala HRC (Rockwell C).

Tabla 38. Dureza con temple escalonado a 850 °C y revenido 300 °C

Denominación de probeta	M 1	M 2	M 3	M4	M5	Promedio	Desviación Estándar
TT7 850°C / R 300°C/M2	55	56	55	55	55	55,40	0,52
TT8 850°C / R 300°C/M2	56	55	57	54	57	55,80	1,30
Límites Böhler S.A.					52 HRC		

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Los puntos de dureza obtenidos de la muestra AISI/SAE 4140, posterior al tratamiento térmico de temple con escalonamiento a 850 °C y revenido a 300 °C, cumplen con los valores de dureza estándar de la empresa que suministra el acero, obteniendo un valor promedio de 52 HRC y se encuentra dentro del rango permitido.

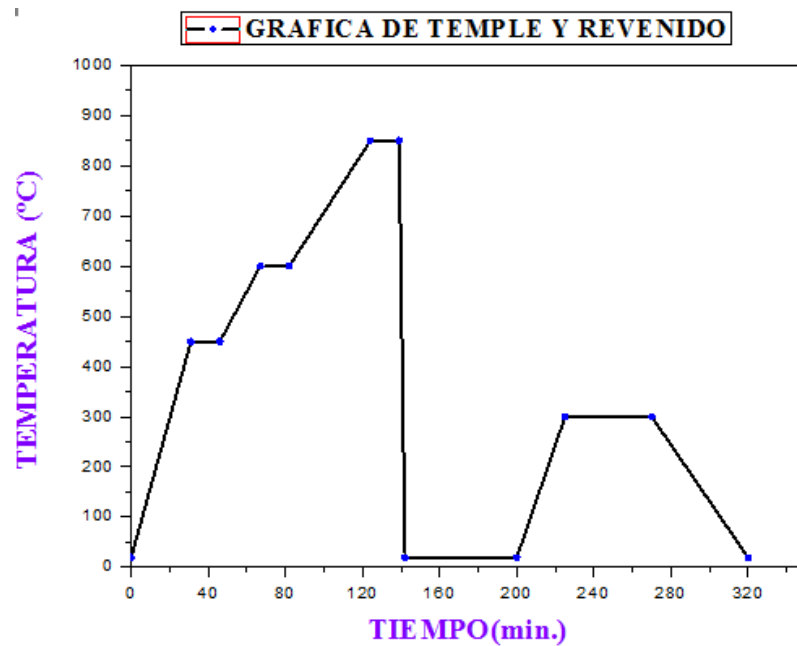


Figura 67. Temple y revenido a 300°C del acero AISI 4140
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

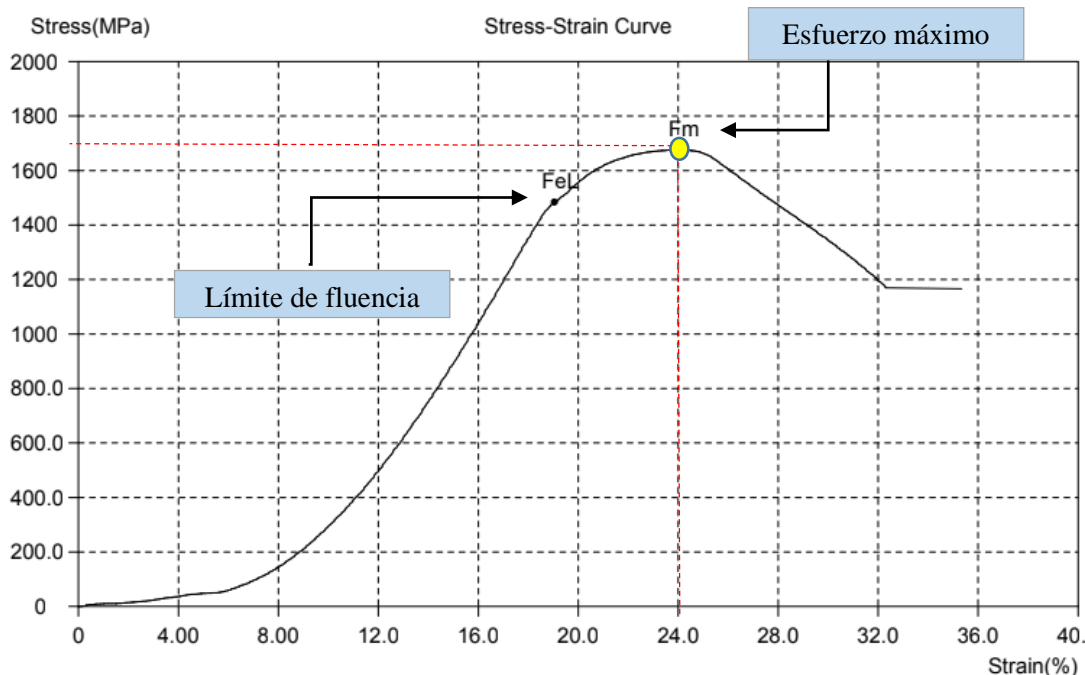


Figura 68. Esfuerzo vs deformación AISI/SAE 4140 revenido a 300°C
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Los valores representados en la curva de esfuerzo deformación, cumplen con los resultados establecidos por la empresa de aceros Böhler S.A y que corresponden a un acero AISI/SAE 4140 de medio contenido de carbono tratado térmicamente por temple escalonado y revenido a temperatura de 300 °C.

En la siguiente tabla se tiene los valores que son producto del ensayo de tracción realizado en las muestras de acero AISI/SAE 4140.

Tabla 39. Resistencia mecánica del acero AISI 4140 revenido a 300°C

Denominación de probeta	Diámetro [mm]	Límite de fluencia [MPa]	Resistencia a la tracción [MPa]	Elongación 50mm [%]
TT7-Rev 300°C	12,47	1497	1655	15
TT8-Rev 300°C	12,43	1484	1676	13
Böhler S.A.			Rm = 1550 MPa, mín.	

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

CAPITULO IV

COSTOS

4.1. Análisis comparativo

Luego de haber realizado el tratamiento térmico de temple y revenido en el acero AISI/SAE 4140 se efectúa la evaluación de los valores obtenidos:

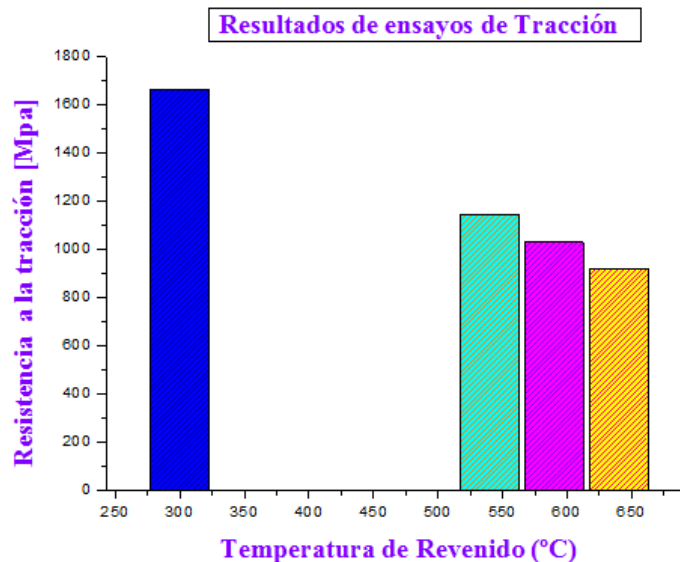


Figura 69. Resistencia a la tracción vs temperatura de revenido
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Los valores de color verde evidencia que la muestra TT1 y TT2, presenta valores de resistencia última a la tracción de (1151 y 1142) MPa para un tratamiento térmico de temple a 850 °C y revenido a 540 °C.

Las muestras TT3 y TT4 del tratamiento térmico con revenido a 590 °C presentan valores que disminuyen en 11,53 % respecto de los valores obtenidos durante el revenido a 540 °C.

Finalmente, de las muestras TT5 y TT6 se obtienen resultados de resistencia última a la tracción con una disminución no más allá del 11,68 % es decir valores de (920 a 924) MPa. Por esta razón es conveniente realizar el tratamiento térmico de temple a 850°C y con temperaturas de revenido por debajo de los 540 °C según el requerimiento o funcionalidad del elemento que se vaya a fabricar.

Los valores de color azul presentan resultados con promedio de resistencia última a la tracción de 1665,5 MPa, como resultado de un revenido a 300 °C.

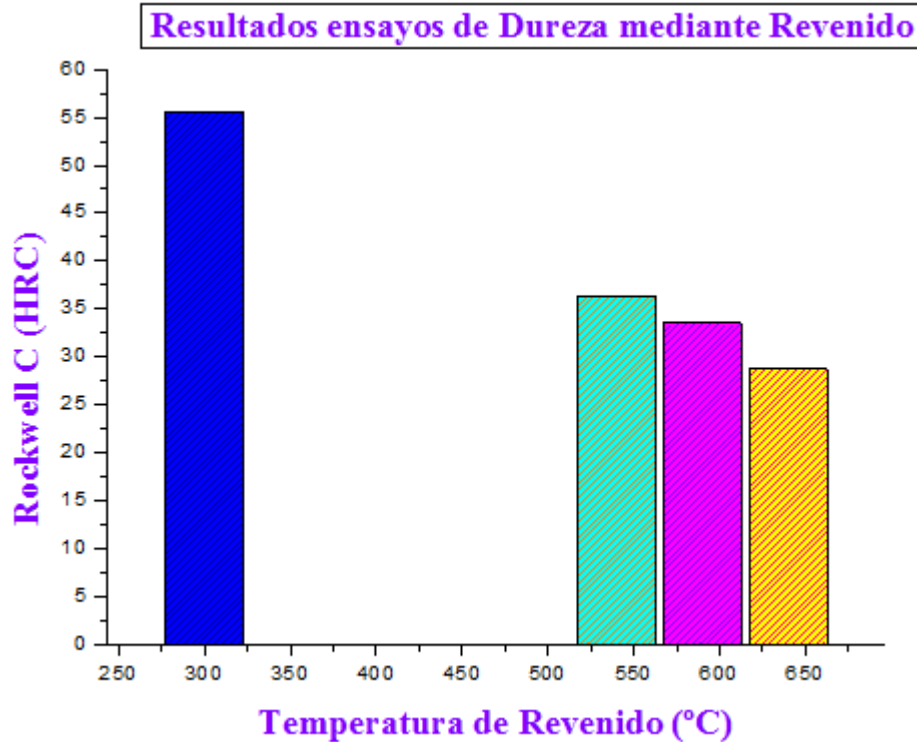


Figura 70. Dureza vs temperatura de revenido AISI 4140
Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

De los ensayos de dureza realizados en el acero AISI/SAE 4140, cabe destacar que los valores que se desea obtener depende de los requerimientos del cliente y del tipo de función al que vaya a ser sometido el elemento, sin embargo es de gran importancia mencionar que si se realiza el tratamiento térmico de temple a 850 °C y con revenido a 540 °C, 590 °C y 640 °C existe una reducción de 9,30 % en los valores de dureza conforme aumenta la temperatura de revenido.

Por esta razón si se desea realizar partes y piezas de la industria automotriz es conveniente la implementación del revenido a temperaturas por debajo de los 540 °C, como el caso de los valores obtenidos de dureza a partir de un tratamiento térmico de temple y revenido a 300 °C con resultados finales promedio de 55,60 HRC con un incremento en la dureza cerca de 44,44 % respecto de los valores con revenido a 540 °C, 590 °C y 640 °C.

4.2. Costos

El costo estimado para la elaboración del proyecto se representa en la Tabla 40.

Tabla 40. Costos del proyecto

Rubro	Cantidad de probetas	Costo unitario [\$]	Costo total [\$]
Material base	12	4	48
Fabricación de probetas de tracción	10	20	200
Tratamientos térmicos	20	20	400
Análisis de propiedades mecánicas			
Medición de dureza	10	30	300
Composición química	1	20	20
Ensayos de tracción	10	40	400
Metalografías	11	50	550
Costo total			\$1.918

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Los ensayos de tracción, composición química, dureza y metalografías son entregados y evaluados por la empresa ILPM Cia. Ltda, la cual garantiza la efectividad de los ensayos realizados. Los mismos que son realizados por los autores: Jeferson Carvajal y Juan Garzón en las mismas instalaciones.

Por lo que si se desea plantear el tratamiento térmico para una línea de fabricación ejemplo: árbol de transmisión para Kia Grand Carnival con un costo de \$ 200 por unidad resulta fiable la implementación de un tratamiento térmico.

CONCLUSIONES

El acero AISI/SAE 4140 suministrado por la empresa de aceros Böhler del Ecuador., mediante la aplicación de ensayos destructivos de tracción y dureza, revela que las muestras presentan valores de resistencia ultima a la tracción de 1077 MPa y 1008 MPa y mediante al análisis de dureza se obtiene un resultado promedio de 26,80 HRC y 31,50 HRC, los cuales cumplen con las especificaciones para un acero de medio contenido de carbono en estado bonificado.

Las probetas para los ensayos de dureza y tracción fueron realizados de manera que no exista ningún cambio microestructural y en base a los criterios de la norma ASTM E8 y ASTM E18 para la elaboración de especímenes de ensayos destructivos, manteniendo un estricto control dimensional y evitando errores de lectura.

El tratamiento térmico de temple a 850 °C y revenido a 300 °C, 540 °C, 590 °C y 640 °C, realizado a las probetas de acero AISI/SAE 4140 el cual se llevó a cabo en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana, dio como resultado una dureza de 55 HRC en estado de temple con medio de enfriamiento en aceite.

Las propiedades mecánicas del acero AISI/SAE 4140 mediante el tratamiento térmico desarrollado, con temple de 850 °C y revenido a 540 °C dan como resultado un valor de resistencia ultima a la tracción de 1151 MPa y 1142 MPa con una dureza promedio de 36,30 HRC y 36,20 HRC. Para la temperatura de revenido a 590 °C los valores de resistencia ultima a la tracción obtenidos son de 1028 MPa y 1032 MPa con una dureza de 33,40 HRC y 33,60 HRC, revenido a 640 °C, una resistencia a la tracción de 924 MPa y 920 MPa y una dureza de 28,60 HRC y 28,80 HRC.

La resistencia última a la tracción de las probetas con revenido a 300°C obtiene resultados favorables de 1665,5 MPa con dureza promedio de 55,60 HRC.

Se observa la disminución de las propiedades mecánicas de dureza tracción del acero AISI/SAE 4140 al aumentar la temperatura de revenido, las mismas que cumplen con los valores estipulados por la empresa de aceros Böhler del Ecuador.

El presupuesto del tratamiento térmico y ensayos destructivos corresponde a un monto global de \$ 1918.

RECOMENDACIONES

Tomar en cuenta las propiedades mecánicas iniciales de tracción y dureza del acero AISI/SAE 4140, en estado de suministro para convalidar que se trata del mismo tipo de acero que se requiere para el análisis.

Los resultados obtenidos en esta investigación no se pueden generalizar para todo proveedor ya que depende de la calidad de suministro del acero.

Durante la fabricación de las muestras de acero AISI/SAE 4140, se recomienda evitar el sobrecalentamiento del acero en la zona de sección reducida ya que se trata de la sección crítica y de mayor importancia para el análisis.

Se recomienda realizar el tratamiento térmico de temple a 850 °C y revenido a 300 °C para incrementar la resistencia mecánica y dureza del acero AISI/SAE 4140 y para cargas axiales que superan los 1300 MPa.

De acuerdo a lo experimentado se recomienda realizar un análisis comparativo de las propiedades mecánicas del acero AISI/SAE 4140 frente a otro acero que cumpla la misma función en área de la industria.

BIBLIOGRAFÍA




- [1] Aceros especiales BOHLER S.A, “42 CrMo4-SAE 4140,” 2015.
- [2] ASTM E415, *Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry*. 2016, pp. 1–11.
- [3] ASTM E1086, *Standard Test Method for Analysis of Austenitic Stainless Steel by Spark Atomic*. 2010.
- [4] L. C. Rivas and L. F. Petro, “Efecto de la temperatura de revenido en la microestructura y las propiedades mecánicas del acero,” Universidad de Córdoba, 2016.
- [5] Y. Weng, H. Dong, and Y. Gan, Eds., “Advanced Steels,” 2011. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-17665-4>. [Accessed: 23-Jun-2019].
- [6] G. Krauss, *Steels : Processing, Structure, and Performance*, 2nd ed., vol. 1. Materials Park: ASM International, 2015.
- [7] BBC Lubricantes, “Lubricantes Industriales para temple,” 2010. [Online]. Available: <https://www.bbclubricantes.com.ar/blog/tag/aceite-para-temple>. [Accessed: 16-Jun-2019].
- [8] REPSOL, “Grasas especiales: aceites para templar, desmoldear y más | Repsol.” [Online]. Available: <https://www.repsol.com/es/productos-y-servicios/lubricantes/industria/gama-aceites-especiales/index.cshtml>. [Accessed: 28-Jul-2019].
- [9] D. V Edmonds and E. Pereloma, *Phase Transformations in Steels : Diffusionless Transformations, High Strength Steels, Modelling and Advanced Analytical Techniques*, 2nd ed., vol. 1. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012.
- [10] W. Vladimir and M. Castro, “Estudio del tratamiento termico sub-cero mediante la aplicación de dióxido de carbono sólido en los aceros AISI 1045 y AISI 4140, y su incidencia en las propiedades mecánicas,” Universidad Técnica de Ambato, 2015.
- [11] J. L. Dossett and H. E. Boyer, *Practical Heat Treating*, 2nd ed., vol. 1. Materials

Park, Ohio: ASM International, 2006.

- [12] ASTM A29, *Standard Specification for Steel Bars , Carbon and Alloy , Hot-Wrought , General Requirements for*, vol. i. 2006, pp. 1–16.
- [13] H. Baker, *ASM handbook: Alloy phase diagrams*, Reimpresa., vol. 3. ASM International, 1992.
- [14] S. Avner, *Introducción a la metalurgia física*, 2nd ed., vol. 1. México, 1988.
- [15] ASTM E18, *Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials*, vol. 3. 1981.
- [16] V. M. Blázquez Martínez, V. Lorenzo Esteban, and B. del Río López, *Ingeniería y ciencia de los materiales metálicos*, vol. 1. Madrid, SPAIN: Dextra Editorial, 2014.
- [17] ASTM A370, *For Standard Test Methods and Definitions Products Mechanical Testing of Steel. .*
- [18] ASTM E8, *Materials Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic*. 1997, pp. 1–24.
- [19] J. J. Rodríguez Alonso, *Ensayos físicos y fisicoquímicos*. Barcelona, SPAIN: Cano Pina, 2009.
- [20] ASTM E112, *For Standard Test Methods Size Determining Average Grain*. 2012, pp. 1–27.
- [21] ASTM E45, *Steel Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of*. 2007.
- [22] ASTM. E3, *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*, vol. 3, no. March. 1995.

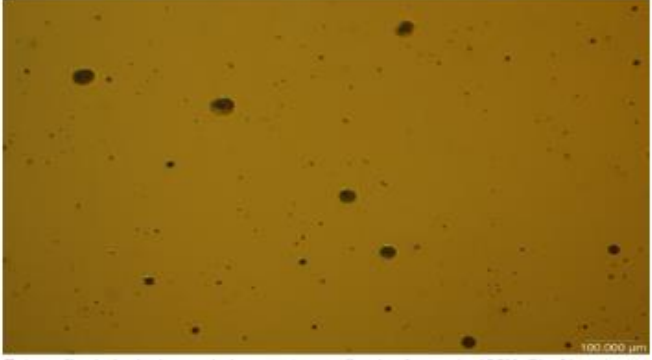
ANEXOS

Anexo 1: Reporte de inclusiones material base AISI/SAE 4140

REPORTE DE INCLUSIONES			
ASTM E45-11a METODO A / ASTM E1245			
Equipo:	ENS-07 Microscopio Metalográfico Micros	Temperatura:	21 ± 3°C
Calibración:	17/04/2018	Humedad:	60 ± 10%
INFORME:	ILPM 2019-275		
			
Fotografía de Inclusiones de la muestra analizada. Aumento 100X. Sin Ataque. Nota: El conteo de inclusiones se realiza en 0.50mm ² tomados del centro del área total presentanda (Según ASTM E45)			
DATOS DE LA PROBETA			
Denominación:	Inclusiones 100X	Area Total de Imagen (mm ²)	0,97
Muestra:	Acero AISI/SAE 4140 / S.T.T	Inclusiones en 0.50mm ²	20
Cliente	Jeferson Carvajal / Juan Garzón	De acuerdo a ASTM E45	
Trabajo	Control de calidad	Porcentaje (%) Inclusiones	0,08%
Informe	ILPM 2019-275	Area Inclusiones (um ²)	729,06
Aumento	100X Micros Canon	Inclusion Máxima (um)	16,57
Fecha de Reporte	31-may-2019		
CONTEO DE INCLUSIONES			
	Clasif.	TOTAL # inclusiones	
Rango	Tamaño ILPM	en 0.50mm ² a 100X	
2 um hasta 8 um	I	Delgada	2 um hasta <= 8 um
8 um hasta 13 um	II	Gruesa	8 um hasta 13 um
14um hasta 50 um	III	Sobretamaño (oversized)	14 um hasta 50 um
mas de 51 um	IV		mas de 51 um
			20
			10
			9
			1
			0
EVALUACION SEGUN ASTM E45			
Tipo de Inclusiones	Tipo D Oxido Globular		
Severidad Delgada	10	1 1/2 Uno y Medio	
Severidad Gruesa	9	1 1/2 Uno y Medio	
Elaborado por:		Aprobado por:	
ILPM CIA. LTDA.  Jeferson Carvajal ILPM Engineering		ILPM CIA. LTDA.  MSc. Patricio Estupiñán Jefe de Laboratorio	
		Cliente / Testificado por:	
		Jeferson Carvajal / Juan Garzón	
Emilio Estrada N54-138 y Oruña Sector La Kenedy Quito-Ecuador Teléfono: 02 2812094 Fax 02 2411714 Email: ilpm@ilpm-ec.com Visitenos en la Web: http://www.ilpm-ec.com			





Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Anexo 2: Reporte de inclusiones AISI/SAE 4140 revenido a 540 °C

REPORTE DE INCLUSIONES			
ASTM E45-11a METODO A / ASTM E1245			
Equipo:	ENS-07 Microscopio Metalográfico Micros	Temperatura:	21 ± 3°C
Calibración:	17/04/2018	Humedad	60 ±10%
INFORME:	ILPM 2019-275		
			
Fotografía de Inclusiones de la muestra analizada. Aumento 100X. Sin Ataque.			
<i>Nota: El conteo de inclusiones se realiza en 0.50mm² tomados del centro del área total presentanda (Según ASTM E45)</i>			
DATOS DE LA PROBETA			
Denominación	Inclusiones M1 100X	Área Total de Imagen (mm ²)	0,97
Muestra #	TT1-Rev 540 °C	Inclusiones en 0.50mm ²	34
Cliente	Jeferson Carvajal / Juan Garzón	De acuerdo a ASTM E45	
Trabajo	Tesis 4140/UPS	Porcentaje (%) Inclusiones	0,34%
Informe	ILPM 2019-275	Área Inclusiones (um ²)	3248,80
Aumento	100X Micros Canon	Inclusion Máxima (um)	42,21
Fecha de Reporte	11-jun-2019		
CONTEO DE INCLUSIONES			
Rango	Clasif. Tamaño ILPM	TOTAL # inclusiones en 0.50mm ² a 100X	34
2 um hasta 8 um	I	Delgada 2 um hasta <= 8 um	24
8 um hasta 13 um	II	Gruesa 8 um hasta 13 um	4
14um hasta 50 um	III	Sobretamaño 14 um hasta 50 um	6
mas de 51 um	IV	(oversized) mas de 51 um	0
EVALUACION SEGÚN ASTM E45			
Tipo de Inclusiones	Tipo D Oxido Globular		
Severidad Delgada	24	2 Dos	
Severidad Gruesa	4	1 Uno	
Elaborado por: ILPM CIA. LTDA. <i>Firma Autorizada</i> Juan Garzón ILPM Engineering	Aprobado por: ILPM CIA. LTDA. <i>Firma Autorizada</i> MSc. Patricio Estupiñán Jefe de Laboratorio	Cliente / Testificado por: Jeferson Carvajal / Juan Garzón	
Emilio Estrada N54-138 y Oruña Sector La Kenedy Quito-Ecuador Teléfono: 02 2812094 Fax 02 2411714 Email: ilpm@ilpm-ec.com Visitenos en la Web: http://www.ilpm-ec.com			




Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Anexo 3: Reporte de inclusiones AISI/SAE 4140 revenido a 590 °C

ILPM-RT-96		ILPM ENGINEERING CIA LTDA Ingeniería Líder en Proyectos y Materiales			
REPORTE DE INCLUSIONES					
ASTM E45-11a METODO A / ASTM E1245					
Equipo:	ENS-07 Microscopio Metalográfico Micros	Temperatura:	21 ± 3°C		
Calibración:	17/04/2018	Humedad	60 ±10%		
INFORME:	ILPM 2019-275				
					
Fotografía de Inclusiones de la muestra analizada. Aumento 100X. Sin Ataque.					
<i>Nota: El conteo de inclusiones se realiza en 0.50mm2 tomados del centro del área total presentanda (Según ASTM E45)</i>					
DATOS DE LA PROBETA					
Denominación:	Inclusiones M3 100X	Area Total de Imagen (mm2)	0,97		
Muestra #	TT3-Rev 590 °C	Inclusiones en 0.50mm2	22		
Cliente	Jeferson Carvajal / Juan Garzón	De acuerdo a ASTM E45			
Trabajo	Tesis 4140/UPS	Porcentaje (%) Inclusiones	0,09%		
Informe	ILPM 2019-275	Area Inclusiones (um2)	865,70		
Aumento	100X Micros Canon	Inclusion Máxima (um)	17,32		
Fecha de Reporte	11-jun-2019				
CONTEO DE INCLUSIONES					
Rango	Clasif. Tamaño ILPM	TOTAL # inclusiones en 0.50mm2 a 100X			
2 um hasta 8 um	I	Delgada	2 um hasta <= 8 um	12	
8 um hasta 13 um	II	Gruesa	8 um hasta 13 um	8	
14um hasta 50 um	III	Sobretamaño (oversized)	14 um hasta 50 um	2	
mas de 51 um	IV		mas de 51 um	0	
EVALUACION SEGÚN ASTM E45					
Tipo de Inclusiones	Tipo D Oxido Globular				
Severidad Delgada	12		1 1/2 Uno y Medio		
Severidad Gruesa	8		1 Uno		
Elaborado por:  ILPM CIA. LTDA. FIRMA AUTORIZADA Juan Garzón ILPM Engineering		Aprobado por:  ILPM CIA. LTDA. FIRMA AUTORIZADA MSc. Patricio Estupiñán Jefe de Laboratorio		Cliente / Testificado por: Jeferson Carvajal / Juan Garzón	
Emilio Estrada N54-138 y Oruña Sector La Kenedy Quito-Ecuador Teléfono: 02 2812094 Fax 02 2411714 Email: ilpm@ilpm-ec.com Visitenos en la Web: http://www.ilpm-ec.com					


Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Anexo 4: Reporte de inclusiones AISI/SAE 4140 revenido a 640 °C

REPORTE DE INCLUSIONES			
ASTM E45-11a METODO A / ASTM E1245			
Equipo:	ENS-07 Microscopio Metalográfico Micros	Temperatura:	21 ± 3°C
Calibración:	17/04/2018	Humedad	60 ±10%
INFORME:	ILPM 2019-275		
			
Fotografía de Inclusiones de la muestra analizada. Aumento 100X. Sin Ataque.			
<i>Nota: El conteo de inclusiones se realiza en 0.50mm² tomados del centro del área total presentanda (Según ASTM E45)</i>			
DATOS DE LA PROBETA			
Denominación:	Inclusiones M5 100X	Area Total de Imagen (mm ²)	0,97
Muestra #	TT5-Rev 640 °C	Inclusiones en 0.50mm ²	36
Cliente	Jeferson Carvajal / Juan Garzón	De acuerdo a ASTM E45	
Trabajo	Tesis 4140/UPS	Porcentaje (%) Inclusiones	0,08%
Informe	ILPM 2019-275	Area Inclusiones (um ²)	751,75
Aumento	100X Micros Canon	Inclusion Máxima (um)	11,50
Fecha de Reporte	11-jun-2019		
CONTEO DE INCLUSIONES			
Rango	Clasif. Tamaño ILPM	TOTAL # inclusiones en 0.50mm ² a 100X	36
2 um hasta 8 um	I Delgada	2 um hasta <= 8 um	26
8 um hasta 13 um	II Gruesa	8 um hasta 13 um	10
14um hasta 50 um	III Sobretamaño (oversized)	14 um hasta 50 um	0
mas de 51 um	IV	mas de 51 um	0
EVALUACION SEGÚN ASTM E45			
Tipo de Inclusiones	Tipo D Oxido Globular		
Severidad Delgada	26	2 1/2 Dos y Media	
Severidad Gruesa	10	1 1/2 Uno y Medio	
Elaborado por:	Aprobado por:	Cliente / Testificado por:	
ILPM CIA. LTDA.  FIRMA AUTORIZADA Juan Garzón ILPM Engineering	ILPM CIA. LTDA.  FIRMA AUTORIZADA MSc. Patricio Estupiñán Jefe de Laboratorio	Jeferson Carvajal / Juan Garzón	
Emilio Estrada N54-138 y Oruña Sector La Kenedy Quito-Ecuador Teléfono: 02 2812094 Fax 02 2411714 Email: ilpm@ilpm-ec.com Visitenos en la Web: http://www.ilpm-ec.com			


Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Anexo 5: Reporte composición química material base AISI/SAE 4140



ILPM-RT-34 Rev1


ILPM ENGINEERING CIA. LTDA.
Ingeniería Líder en Proyectos y Materiales



DESIGNADO

Informe/Muestra: 2019-275/ TESIS CARVAJAL-GARZON


Fecha: 06.06.2019 12:03:38	Metodo: Fe110	
Equipo: Bruker Q2ION ENS-11	Calibracion: 17/Feb/2018	
Temperatura: 20 +-3 degC	Humedad: 60 +-10 %	



**REGISTRO DE ENSAYO DE COMPOSICION QUIMICA
MEDIANTE ESPECTROMETRIA DE EMISION OPTICA POR CHISPA
ASTM E415 / ASTM E1086 / ILPM -PT-09**


	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
∅	0,407	0,248	0,78	<0,003	0,0033
∅	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Cu [%]	Al [%]
	1,001	0,179	0,031	0,011	0,028
∅	Co [%]	Nb [%]	Ti [%]	V [%]	W [%]
	0,0036	<0,005	0,0036	0,007	<0,02
∅	B [%]	Sn [%]	Fe [%]	Mg [%]	
	<0,001	0,0041	97,29	0	

Realizado por:




Firma Autorizada

Revisado por:



Ciente:




ILPM ENGINEERING CIA. LTDA. REVISADO

ILPM Cia. Ltda. ha sido evaluada por el Servicio de Acreditación Ecuatoriano (SAE) para la aprobación como organismo designado para la evaluación de la conformidad (OEC) otorgada por el MIPRO en base a la resolución 16508 para la ejecución de ensayos de Composición Química

Emilio Estrada N54-139 y Oruma (Sector La Kennedy) Quito - Ecuador
Teléfonos: 02 2812094 Fax: 022411714 E-MAIL: ilpm@ilpm-ec.com / www.ilpm-ec.com





Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Anexo 6: Reporte de dureza material base AISI/SAE 4140

 ILPM ENGINEERING CIA LTDA Ingeniería Líder en Proyectos y Materiales REPORTE DE ENSAYOS DE DUREZA							
ID DOCUMENTO ILPM-07-09 Revisión Nro. 04		NORMAS: ASTM A370/ ASTM E18/ ASTM E92 / ASTM E110			Informe No. ILPM 2019 - 275 - H		
Cliente:	TESIS UPS	Fecha de Ensayo:	29/05/2019				
Solicitado Por:	Jeferson Carvajal / Juan Garzón	Fiscalización:					
Temperatura	20°C	Humedad Relativa	69%				
Elemento Medido:	Barra 22mm / AISI/SAE 4140 - SIN TRATAMIENTO TÉRMICO						
Objetivo de ensayo:							
Control de Calidad de Material		X		Control de Soldadura			
Escala de Dureza	Brinell HB			Durómetro	ENS-01 Banco		
	Rockwell B			Sonda	N/A		
	Rockwell C	X		Calibración	12/03/2018		
	Shore D						
Probeta	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Promedio	Desviación Estandar
PROBETA#1	26,5	27,0	27,0	26,5	27,0	26,80	0,27
PROBETA#2	32,0	31,0	31,5	31,5	31,5	31,50	0,35
							
<p><i>El presente informe NO debe ser reproducido parcialmente.</i></p> <p>Certificamos que los ensayos realizados se han realizado bajo las indicaciones ASTM A370 y/o de acuerdo a lo indicado en el Procedimiento Técnico ILPM-PT-01 Métodos de ensayo para medición de dureza de materiales metálicos.</p> <p>ILPM Cia. Ltda. ha sido evaluada por el Servicio de Acreditación Ecuatoriano (SAE) para la aprobación como organismo designado para la evaluación de la conformidad (OEC) otorgada por el Ministerio de Industrias y Productividad (MIPRO), en base a la resolución 15 232 para la ejecución de ensayos de Dureza. Designación en proceso de renovación.</p> 							
Realizado por:	 Juan Garzón ILPM Engineering		Aprobado por:	 MsC. Patricio Estupiñán Jefe de Laboratorio		Cliente:	TESIS UPS

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón

Anexo 7: Reporte de ensayo de tracción material base AISI/SAE 4140

 ILPM ENGINEERING CIA LTDA Ingeniería Líder en Proyectos y Materiales		Informe No.							
<small>ID DOCUMENTO ILPM-PT-06 (Informe) Revisión No. 04</small>		ILPM 2019 - 275 - T							
REGISTRO DE ENSAYOS DE TRACCIÓN NORMAS: ASTM A370 / ASTM E8									
Cliente:	TESIS UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA	Fecha de Ensayo:	martes, 28 de mayo de 2019						
Solicitado Por:	Jeferson Carvajal / Juan Garzón	Testificado por:							
Material:	AISI /SAE 4140	Probeta elaborada por:	Jeferson Carvajal / Juan Garzón						
Equipo:	ENS-09 Máquina de ensayo de Tensión	Calibración:	09/10/2018						
Temperatura °C	20	Verificación:	09/10/2018						
		Humedad Relativa %	66						
Objetivo de ensayo:									
<input checked="" type="checkbox"/> Control de Calidad de Material		<input type="checkbox"/> Control de Soldadura							
Probeta #	Diámetro Menor	Longitud Inicial	Longitud Final	OBSERVACIONES					
	mm.	mm.	mm.						
T1-MB	12,52	50,00	57,89	MATERIAL BASE / SIN TRATAMIENTO TERMICO					
T2-MB	12,49	50,00	56,80	MATERIAL BASE / SIN TRATAMIENTO TERMICO					
Probeta #	Area	Carga de Fluencia	Limite de Fluencia Sy		Resistencia a Tracción SUT		Elongación 50mm	Localización de Rotura ¹	
	mm ² .	kN	KSI	MPa	kN	KSI	MPa		%
T1-MB	123,11	118,5	139,60	963	132,6	156,22	1077	16	NA
T2-MB	122,52	109,8	129,98	896	123,5	146,19	1008	14	NA
Observaciones:									
*Para juntas soldadas, la localización de rotura será designada por : FIS Falla Junta Soldada, FMB Falla en Material Base									
Notas:									
Anexo Curvas de Ensayo El presente Informe NO debe ser reproducido parcialmente. Certificamos que los ensayos han sido realizados bajo las Indicaciones de ASTM E8 / A370 y Procedimiento ILPM-PT-06 Ensayo de Tensión (incluye ASME IX Ed.2013, API1104, AWS D1.1 Ed. 2015)									
ILPM Cia. Ltda. ha sido evaluada por el Servicio de Acreditación Ecuatoriano (SAE) para la aprobación como organismo designado para la evaluación de la conformidad (OEC) otorgado por el Ministerio de Industrias y Productividad (MIPRO), en base a la resolución 15 232 para la ejecución de ensayos de Tensión.									
Realizado por:  Jeferson Carvajal ILPM Engineering		Aprobado por:  MSc. Patricio Estupiñán Jefe de Laboratorio		Cliente: TESIS UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA					

Emilio Estrada NS4-139 y Oruña (Sector La Kennedy) Quito-Ecuador
 Teléfono: 02 2812094 Fax 02 2411714 Email: ilpm@ilpm-ec.com Visitenos en la Web: http://www.ilpm-ec.com

Elaborado por: Jeferson Carvajal & Juan Garzón