



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**ANÁLISIS METALGRÁFICO DE LAS ESTRUCTURAS RESULTANTES DE
TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE ACEROS DE MEDIANO CARBONO AISI-SAE 1036 Y 1045
Y SU RELACIÓN CON LA DUREZA DE LOS MISMOS**

Evelyn Andrea Castillo Herrera

Asesorado por el Dr. Sc. Ing. Roberto Alejandro Aguilar Rivas

Guatemala, abril de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS METALGRÁFICO DE LAS ESTRUCTURAS RESULTANTES DE
TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE ACEROS DE MEDIANO CARBONO AISI-SAE 1036 y 1045
Y SU RELACIÓN CON LA DUREZA DE LOS MISMOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

EVELYN ANDREA CASTILLO HERRERA

ASESORADO POR EL DR. SC. ING. ROBERTO ALEJANDRO AGUILAR

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, ABRIL DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gomez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Enrique Chicol Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
EXAMINADOR	Ing. Héctor Alexander Juárez Reyes
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ANÁLISIS METALGRÁFICO DE LAS ESTRUCTURAS RESULTANTES DE
TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE ACEROS DE MEDIANO CARBONO AISI-SAE 1036 y 1045
Y SU RELACIÓN CON LA DUREZA DE LOS MISMOS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería mecánica, con fecha 10 de octubre de 2012.



Evelyn Andrea Castillo Herrera



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Guatemala 27 de Octubre 2017

Ingeniero Roberto Guzmán Ortiz
Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Guzmán,

Por la presente, le estoy informando que he procedido con la revisión final de trabajo de graduación titulado **“ANÁLISIS METALOGRAFICO DE LAS ESTRUCTURAS RESULTANTES DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE ACEROS DE MEDIANO CARBONO AISI-SAE 1036 Y 1045 Y SU RELACIÓN CON LA DUREZA DE LOS MISMOS”**, realizado por la estudiante de Ingeniería Mecánica Evelyn Andrea Castillo Herrera, registro académico 200615119, CUI 2590 88617 1415, quien contó con la asesoría del suscrito.

El trabajo se desarrolló dentro del marco del “Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas” de la Escuela de Ingeniería Mecánica, a cargo del suscrito, por lo que cuenta con mi total aprobación. En tal virtud, estoy solicitándole darle el trámite correspondiente.

Atentamente,

Dr. Sc. Ing. Roberto A. Aguilar Rivas

Colegiado N° 862

Ing. Roberto A. Aguilar Rivas
COLEGIADO No. 862

Ref.E.I.M.061.2018

El Coordinador del Área de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS METALOGRAFICO DE LAS ESTRUCTURAS RESULTANTES DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE ACEROS DE MEDIANO CARBONO AISI-SAE 1036 Y 1045 Y SU RELACIÓN CON LA DUREZA DE LOS MISMOS**, desarrollado por la estudiante **Evelyn Andrea Castillo Herrera**, CUI **2590886171415**, Registro Académico **200615119** recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Julio César Campos Paiz
Coordinador Área de Materiales
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, febrero 2017

/aej

Ref.E.I.M.124.2018

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área de Materiales de Ingeniería del trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS METALGRÁFICO DE LAS ESTRUCTURAS RESULTANTES DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE ACEROS DE MEDIANO CARBONO AISI-SAE 1036 Y 1045 Y SU RELACIÓN CON LA DUREZA DE LOS MISMOS**, desarrollado por la estudiante **Evelyn Andrea Castillo Herrera**, CUI **2590886171415**, Registro Académico **200615119** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala abril de 2018

/aej



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS METALGRÁFICO DE LAS ESTRUCTURAS RESULTANTES DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE ACEROS DE MEDIANO CARBONO AISI-SAE 1036 Y 1045 Y SU RELACIÓN CON LA DUREZA DE LOS MISMOS** presentado por la estudiante universitaria: **Evelyn Andrea Castillo Herrera**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, abril de 2018

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por guiarme durante mis años académicos y bendecirme con un logro fundamental en mi vida.
Mi madre Sonia Herrera	Por nunca perder la fe en mí, apoyarme incondicionalmente durante mi trayecto de estudios y ser mi mayor fortaleza de vida.
Mi padre Víctor Castillo	Que desde el cielo me envía sus bendiciones y fuerzas para vencer los obstáculos que atravieso en mi vida.
Mi tío Álvaro Urizar	Por el apoyo y la paciencia que me ha brindado durante tantos años.
Mi hermana Sonia	Por ser en mí vida uno de los mejores ejemplos de esfuerzo, perseverancia, trabajo, amor, y superación.
Mi hermana Zoila	Por ser en mí vida uno de los mejores ejemplos de amor, fortaleza, lucha, compasión y superación.
Mis sobrinos	Eliza, Erick, Julio Cesar y Martin por ser una inspiración en mi vida.

Mi familia

Por todo el apoyo y los consejos brindados.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi alma mater y permitir mi desarrollo académico.
Faculta de Ingeniería	Por proporcionarme los conocimientos y la formación necesaria durante el desarrollo de mi carrera.
A todos los docentes	Por sus enseñanzas, su dedicación y su tiempo en el transcurso de mi carrera.
Doctor Roberto Aguilar	Por ser el apoyo máximo en la culminación de mi carrera y por ser un ejemplo de investigación y trabajo a seguir.
Ing. Miguel Zacarías e Ing. Sergio López	Por brindarme una amistad incondicional desde los inicios de mi carrera, por siempre tener fe en mí y apoyarme en la culminación de mi carrera.
Amigos de mi carrera	Fernando Valle, Karen Meinicke, Jessica Juárez, Joanne Delgado, Helen Godoy, Fabiola Ramírez, Héctor Zapeta, Rodrigo Ventura y Eduardo Godoy.
Mario Colindres	Por todo el apoyo brindado durante el proceso de finalización de mi trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. CONCEPTOS BÁSICOS DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS Y LOS ACEROS	1
1.1. Clasificación de los aceros	1
1.2. Diagrama hierro-carbono.....	2
1.3. Constituyentes microscópicos de los aceros	6
1.3.1 Austenita.....	6
1.3.2 Ferrita	7
1.3.3 Cementita	7
1.3.4 Martensita.....	7
1.3.5 Perlita	10
1.3.6 Bainita.....	10
1.4. Tratamientos térmicos	10
1.4.1 Normalizado.....	11
1.4.2 Recocido.....	15
1.4.3 Temple.....	17
1.4.4 Martempering.....	18
1.4.5 Austempering.....	19
1.4.6 Revenido.....	20

1.5.	Curvas de transformación isotérmica de aceros al carbono TTT (temperatura, tiempo y transformación).....	22
1.6.	Ensayo de dureza	25
2.	ACEROS SELECCIONADOS PARA EL ESTUDIO EXPERIMENTAL....	31
2.1.	AISI – SAE 1036	31
2.2.	AISI – SAE 1045	34
3.	ENSAYO METALOGRAFICO	39
3.1.	Procedimiento de preparación de una muestra metalográfica.....	39
3.2.	Análisis metalográfico	41
4.	DESARROLLO PRÁCTICO EXPERIMENTAL DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS	43
4.1.	Preparación de las probetas AISI-SAE 1045 Y AISI-SAE 1036 previo a los tratamientos térmicos.....	43
4.2.	Tratamientos aplicados a las probetas AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045	43
	4.2.1 Temple	43
	4.2.2 Temple con posteriores revenidos	48
	4.2.3 Proceso de normalizado en los aceros AISI-SAE 1036 Y AISI-SAE 1045	52
	4.2.4 Recocido de los aceros AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045	56
4.3.	Preparación de las probetas AISI-SAE 1036 Y AISI-SAE 1045 previo al estudio metalográfico aplicado a probetas a estudiar	57
4.4.	Ensayo de dureza	60
4.5.	Análisis metalográfico	64

4.5.1	Temple con enfriamiento en agua de los aceros AISI-SAE 1036 Y AISI-SAE 1045.....	64
4.5.2	Temple con enfriamiento por agua con revenido de dos horas a 400 °C....	65
4.5.4	Temple con enfriamiento en agua de los aceros AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045 con posterior revenido de dos horas a 600 °C	66
4.5.5	Temple con enfriamiento en aceite de los aceros AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045.....	67
4.5.6	Temple con enfriamiento en aceite y posterior revenido de dos horas a 400 °C de los aceros AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045.....	68
4.5.7	Temple con enfriamiento en aceite y posterior revenido de dos horas a 600 °C de los aceros AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045.....	69
4.5.8	Normalizado de los aceros AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045.....	70
4.5.9	Recocido de los aceros AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045.....	73
CONCLUSIONES		75
RECOMENDACIONES.....		79
BIBLIOGRAFÍA.....		81

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama Hierro Carbono	5
2.	Gráfica Ms para BCC de acero al carbono de fase martensita	8
3.	La dureza de martensita en función del contenido de carbono	9
4.	Intervalo de recocido, normalización y endurecimiento para aceros al carbono.	12
5.	Tratamiento térmico del acero.....	13
6.	Presentación esquemática de la influencia de la temperatura de austenización en el tamaño de grano después de normalizado.....	14
7.	Esquema de la diferencia entre la estructura perlítica, debido al recocido y al normalizado.....	15
8.	Diagrama de transformación esquemática para temple y revenido.....	21
9.	Transformación isotérmica de un acero 1080	23
10.	Diagrama esquemático de transformación para el martempering.	24
11.	Diagrama esquemático de transformación para el austempering.	25
12.	Tabla de requisitos de tracción para aceros de refuerzo de concreto	34
13.	Proceso temple enfriado en agua de los aceros AISI-SAE 1036 Y AISI-SAE 1045.....	44
14.	Proceso de temple enfriado en aceite de los aceros AISI-SAE 1036 Y AISI-SAE 1045.....	45
15.	Extracción de probetas del horno.....	46
16.	Enfriamiento de probeta en aceite.....	47
17.	Enfriamiento de probeta en agua	47

18.	Proceso de temple enfriado en agua y revenido a 400°C de los aceros AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045	48
19.	Proceso de temple enfriado en aceite y revenido a 400°C de los aceros AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045	49
20.	Proceso de temple enfriado en agua con revenido a 600°C de los aceros AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045	50
21.	Proceso de temple enfriado en aceite y revenido a 600°C de los aceros AISI-SAE 1036 y AISI-SAE1045	51
22.	Extracción de probetas del horno.....	52
23.	Proceso de normalizado	53
24.	Enfriamiento al aire de probetas	55
25.	Enfriamiento de probetas al aire	55
26.	Proceso de recocido	56
27.	Representación visual de lo obtenido después del desbaste en las probetas.....	58
28.	Método correcto para lijar las probetas	59
29.	Muestra de la superficie al cambiar de grado de lija.	59
30.	Ensamblaje de pulidora con mesa para pulir probetas con óxido de aluminio	60
31.	Medidor de dureza PCE-2500.....	63
32.	Medición de durezas de probetas	64
33.	Imágenes comparativas de temple enfriado en agua.....	65
34.	Micrografías comparativas de temple enfriado en agua con revenido de dos horas a 400°C	66
35.	Micrografías comparativas de temple enfriado en agua con posterior revenido de dos horas a 600°C	67
36.	Micrografías comparativas temple enfriado en aceite	68
37.	Micrografías comparativas de temple enfriado en aceite con posterior revenido de dos horas a 400°C	69

38.	Micrografías comparativas de temple enfriado en aceite con posterior revenido de dos horas a 600°C.....	70
39.	Comparación de micrografías de normalizado 100x	71
40.	Comparación de micrografías de normalizado 400x	72
41.	Comparativa de micrografías de normalizado 1000x	72
42.	Comparación de micrografías de recocido 400x	73
43.	Comparación de micrografías de recocido de probetas de acero AISI- SAE 1036 y AISI-SAE 1045 a 1000x de aumento.....	74

TABLAS

I.	Coeficiente promedio de expansión	31
II.	Conductividad Térmica.....	32
III.	Calor Específico	32
IV.	Propiedades mecánicas	32
V.	Composición química	33
VI.	Coeficiente promedio de expansión	35
VII.	Conductividad Térmica.....	35
VIII.	Calor específico.....	35
IX.	Propiedades mecánicas	36
X.	Composición química acero 1045	36
XI.	Solución química para ataque de probeta	41
XII.	Temperatura de normalizado para aceros al carbono	54
XIII.	Durezas obtenidas del acero AISI-SAE 1036.....	61
XIV.	Durezas obtenidas del acero AISI-SAE 1045.....	62

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
S	Azufre
C	Carbono
Fe₃C	Cementita
FCC	Estructura cúbica centrada en las caras
BCC	Estructura cúbica de cuerpo centrada
P	Fósforo
°C	Grados Celsius
Mg	Manganeso
Si	Silicio
A_{cm}	Temperatura límite para acero a la cual sucede la precipitación del carbono en hierro

GLOSARIO

Acicular	Estructura con tendencia de forma de aguja.
Acritud	Propiedad de un metal que se traduce en un aumento de dureza y resistencia debido a la deformación en frío.
Alotropía	Propiedad de los metales de cambiar su estructura cristalina en función de la temperatura a la que se presentan.
Austenizar	Proceso en el cual el acero a una temperatura determinada forma austenita.
Dendrítico	Estructura con ramificaciones repetitivas.
Transformación isotérmica	Transformación de estructura que sucede a una temperatura constante.

RESUMEN

El acero es una aleación de hierro-carbono y otros componentes según el uso y las propiedades que quiera dársele. El elemento más relevante lo constituye el carbono que es el elemento más importante ya que define drásticamente sus propiedades según su porcentaje de contenido.

Una de las formas de modificar las propiedades de los aceros consiste en aplicarle tratamientos térmicos. Estos tratamientos térmicos tienen por objeto mejorar las propiedades y características de los aceros. Consisten en calentar y mantener piezas o herramientas de acero a temperaturas adecuadas durante cierto tiempo y enfriarlas luego en condiciones convenientes.

Los tratamientos térmicos aplicados a los aceros seleccionados son: normalizado, recocido, temple y revenido. El normalizado es un tratamiento que se aplica en piezas que se encuentran en estado de suministro. Se aplica con el propósito de lograr una estructura granular más homogénea. El recocido se aplica para ablandar el acero o regenerar la estructura para eliminar tensiones internas. Consiste en calentamientos a temperaturas adecuadas y enfriamientos lentos. El temple se aplica con el propósito de austenizar el acero total o parcialmente y luego enfriarlo bruscamente para obtener un material con mayor dureza y resistencia mecánica. El revenido se aplica para lograr un cambio de la dureza por mejor ductilidad y mayor tenacidad.

En el presente caso, los tratamientos térmicos mencionados se han aplicado a los aceros AISI-SAE 1036 y 1045 los cuales se han preparado siguiendo las normas correspondientes para el estudio metalográfico, donde se

pueden observar las distintas estructuras causadas por el contenido de carbono y los distintos tratamientos térmicos aplicados también, podrán ver los resultados de las distintas durezas obtenidas para cada acero.

OBJETIVOS

General

Aplicar algunas de las metodologías establecidas por normas ASTM para la realización de ensayos de tratamientos térmicos y la obtención, observación y análisis de micrografías de las estructuras cristalinas resultantes.

Específicos

1. Realizar tratamientos térmicos específicos que se señalan en el contenido del presente trabajo, en el laboratorio de metalurgia y metalografía de la EIM mediante los procedimientos adecuados en probetas de acero de medio carbono AISI-SAE 1045 y AISI-SAE 1036 según normas ASTM utilizando los equipos e insumos necesarios.
2. Identificar las características metalográficas y de dureza, de las probetas ensayadas de los aceros AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se desarrolla dentro de los lineamientos de investigación de la Escuela de Ingeniería Mecánica, específicamente, en el área de metalurgia y metalografía. Puntualmente, en lo atinente al área de tratamientos térmicos de los aceros. El endurecimiento del acero, o el cambio de sus propiedades metalúrgicas, puede lograrse a través de 3 aspectos importantes, a saber:

- Por medio de la manipulación de la composición química durante su fabricación en los hornos respectivos que para el efecto se emplean.
- Por medio de trabajo mecánico en frío y/o recristalización.
- Por medio de los tratamientos térmicos que se fundamentan en la recristalización.

Las estructuras del acero en cualquiera de los estados que se obtengan tienen una relación directa con las características señaladas por los diagramas de equilibrio y, fundamentalmente, con el comportamiento alotrópico de dicho metal, que no es más que la propiedad de modificar su estructura cristalina según las temperaturas a las que se somete. De igual manera, estas características pueden ser consideradas como resultantes de tratamientos termodinámicos cuasiestáticos. Sin embargo, de sobra es conocido que a través de diferentes velocidades de enfriamiento con relación a las temperaturas a las que se someten, se obtienen estructuras fuera de equilibrio. Esto se analiza durante el desarrollo del trabajo; se toma en cuenta que las

estructuras en estado normal, específicamente, de los aceros al carbono consisten en: ferrita o hierro alfa, perlita y cementita o carburo de hierro; a pesar de que es una estructura fuera de equilibrio, se analiza como una fase terminal de equilibrio.

Complementariamente, las estructuras más importantes fuera de equilibrio con las que el ingeniero tropieza cotidianamente son principalmente: perlita, fina o gruesa, vainita superior o inferior, martensita, en diferentes grados dependiendo de las características de la austenita que les da origen.

Con base en lo anterior se han orientado los objetivos del presente trabajo hacia la obtención intencionada de las estructuras referidas, a través del método científico, por medio de ensayos experimentales; se realiza un control lo más exacto posible de las variables externamente controlables: las temperaturas de tratamiento, las composiciones químicas de los materiales específicos y las velocidades de enfriamiento; se analiza como resultado la caracterización de las fases metalográficas presentes después de cada ensayo.

Para el logro de los objetivos referidos, se ha recurrido al empleo de materiales existentes en el mercado nacional: AISI-SAE 1045 y ASTM A615 grado 60, conocido también como AISI-SAE 1036, y su relación con su dureza. De esta manera, el trabajo se desarrolla mediante dos aspectos sustantivos: un análisis teórico de los aspectos fundamentales de los tratamientos térmicos y de las características físico-químicas de los aceros referidos; se complementan con el análisis metalográfico de ensayos empíricos realizados en el laboratorio de metalurgia de la Escuela de Ingeniería Mecánica a través de los siguientes capítulos.

Con base en lo anterior, de acuerdo a los procedimientos de investigación experimental del método científico, es posible obtener las estructuras deseadas.

1. CONCEPTOS BÁSICOS DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS Y LOS ACEROS

1.1. Clasificación de los aceros

El acero es una aleación de hierro-carbono y otros componentes según el destino y las propiedades que quiera dársele. Siempre están presentes en este, el manganeso (Mn) y el silicio (Si), como principales aleantes; el fósforo (P) y el azufre (S), que en la mayoría de los casos se consideran impurezas.

El componente más importante de los aceros es el carbono; y la aleación presenta dos estructuras cristalinas por debajo de la temperatura de fusión. La primera estructura es llamada BCC y que es una estructura cúbica de cuerpo centrado, estable por debajo de la temperatura de 912 °C y entre 1 394 °C a 1 538 °C, según el diagrama de hierro carbono especificado en la figura 1. La primera estructura se denomina ferrita alfa y la segunda, ferrita delta, respectivamente. Entre las temperaturas de 912 °C y 1 394 °C se encuentra la otra estructura cristalina estable que es FCC, o sea, una estructura cúbica centrada en las caras, conocida también como hierro gamma que de igual forma se puede observar en el diagrama de hierro-carbono.

El contenido de los elementos varía de acuerdo a los distintos fabricantes, pero siempre en porcentajes muy bajos. El contenido de carbono se mantiene en niveles bajos para aceros que requieren de alta ductilidad, tenacidad y buena soldabilidad; y en niveles más altos cuando se requiere alta dureza, resistencia a la fatiga y resistencia al desgaste.

Según el ASM Metals Handbook, los aceros se pueden clasificar como de bajo carbono con un contenido de 0,005 % a 0,2 % C; de mediando carbono con contenido de 0,2 % a 0,5 % C; y de alto carbono con un contenido mayor a 0.5 % C.

Al incluir otro u otros elementos aparte del fósforo, azufre, manganeso y silicio, a la composición del acero se constituyen los aceros aleados. Estos últimos se clasifican como de baja aleación, cuando los otros elementos suman menos de 8 % y de alta aleación cuando los otros elementos suman más de 8 %.

1.2. Diagrama hierro-carbono

El diagrama de hierro carbono es un diagrama de equilibrio que ha sido de amplio estudio dado que el acero es uno de los materiales más utilizados en la vida actual. Este diagrama muestra los rangos de composición del acero y las temperaturas en las cuales se dan las fases estables austenita, ferrita y la mezcla de estas que se explicarán más adelante. Esto es dado a que el acero es un elemento alotrópico, lo que significa que puede existir en más de un tipo de estructuras cristalinas dependiendo la temperatura a la que se encuentre y los tratamientos térmicos aplicados.

Para comprender el principio de los tratamientos térmicos se hace necesario comprender el diagrama de equilibrio de hierro-carbono.

El acero, como se mencionó anteriormente, es manufacturado disolviendo carbono en hierro. El hierro puro funde a una temperatura de 1 538 °C y a esta temperatura el carbono fácilmente se disuelve generando una solución, la cual al enfriarse genera una solución sólida, donde los átomos de carbono ya están

disueltos en hierro puro. A temperatura mayor a 727 °C, la disolución es llamada austenita y a bajas temperaturas se tiene la fase llamada ferrita. Cuando la aleación contiene menos de 2.1% en peso de carbono, se tiene acero, y entre 2,1 % y 6,67 % de carbono se obtienen las fundiciones. En el presente caso nos referimos al rango específico de los aceros.

Existen tres puntos fijos en los que se dan las reacciones isotérmicas siendo estos:

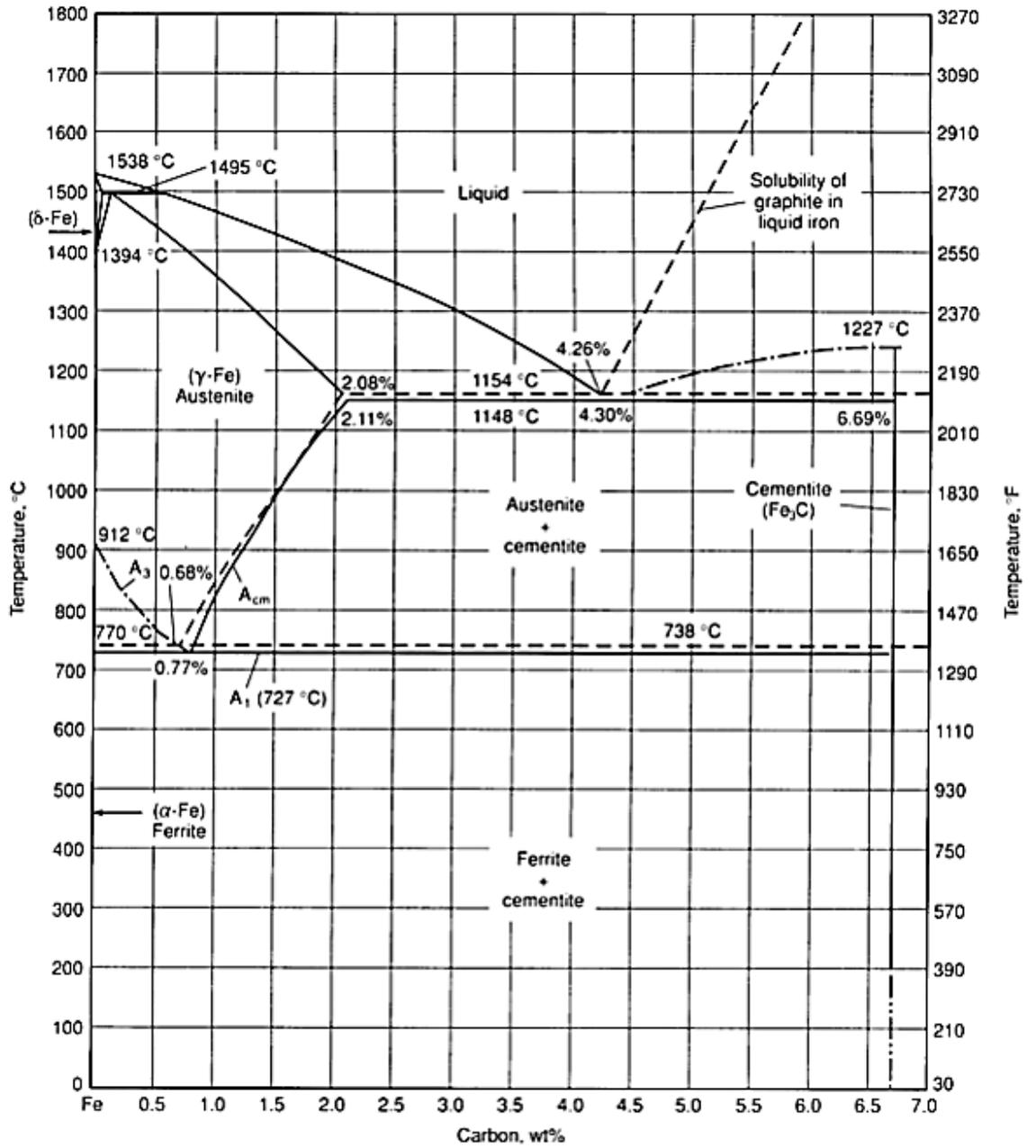
- A 1 493 °C, para la composición Fe 0,18 % C se da la reacción peritética.
- A 1 147 °C con una composición de Fe 4,3 % C se da la reacción eutéctica.
- A 723 °C con una composición de Fe 0,8 % C se da la reacción euctectoide.

Para mejor comprensión del diagrama se delimitan las temperaturas de reacción de la forma siguiente:

- A1: la línea de temperatura euctectoide la cual muestra la temperatura mínima a la que precipita la austenita. Se conoce también como la temperatura crítica inferior que delimita la transformación de las estructuras perlita a austenita.
- A3: la línea de temperatura mínima para la precipitación de austenita, en las regiones de carbono o euctectoides < 0,8 % C. Se conoce también como temperatura crítica superior y delimita la transformación completa a austenita en el calentamiento

- Acm: la temperatura límite para aceros de alto carbono a la cual sucede precipitación del carburo de hierro (Fe_3C), o cementita en el enfriamiento.

Figura 1. Diagrama hierro-carbono



Fuente: ASM International. *Metals handbook*. p. 212.

1.3. Constituyentes microscópicos de los aceros

El desempeño de los aceros depende, en su gran mayoría, de las propiedades que se asocian con sus microestructuras, refiriéndose a las distribuciones y a las morfologías de las distintas fases que se constituyen en un plano macroscópico.

Las fases son características de las diferentes estructuras cristalinas, señaladas anteriormente, y otras que se verán más adelante.

En el acero pueden estar presentes dos o más fases, en el estado sólido, por lo que este se compone de distintas estructuras cristalinas dependiendo del contenido de carbono, del proceso de manufactura o de los distintos tratamientos térmicos aplicados.

A continuación, se mencionarán las distintas fases presentes en los aceros.

1.3.1 Austenita

Es la fase correspondiente a la disolución total del carbono en hierro, su estructura es CCC, y precipita, en el calentamiento a las temperaturas A_{c3} y A_{cm} .

Esta fase se produce cuando el acero es calentado a una temperatura superior a la temperatura crítica superior A_{cm} que dependerá del %C. La austenita no existe después del enfriamiento, pero es sumamente importante a altas temperaturas.

La metalografía de una austenita variará por su composición química, específicamente su contenido de carbono.

1.3.2 Ferrita

El nombre metalográfico del hierro en el acero es ferrita. Esta estructura en aceros de bajo carbono tiene una metalografía en donde se observan granos claramente delimitados uno del otro. Su característica mecánica importante es la alta ductilidad.

El hierro existe en dos formas alotrópicas: BCC cúbico centrado en el cuerpo y FCC cúbico centrado en las caras. Ferrita es la forma alotrópica BCC. A baja temperatura, como se puede observar en la figura 1 del diagrama hierro carbono, se presenta como hierro alfa y a una alta temperatura mayor la línea Acm su forma alotrópica se llama hierro delta.

1.3.3 Cementita

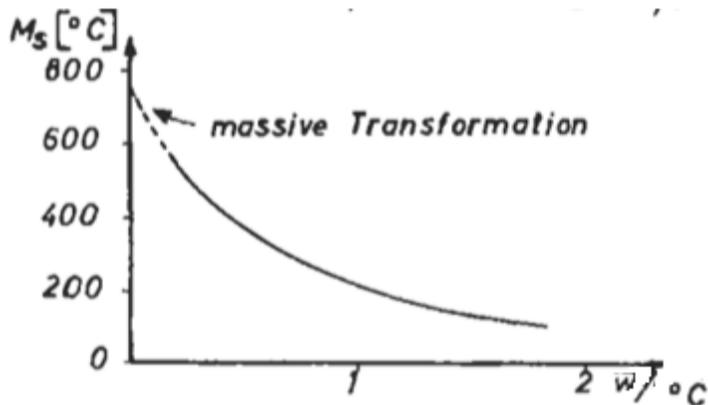
Es el nombre metalográfico que se le otorga al carburo de hierro con denominación Fe_3C . Este tiene una estructura cristalina ortorrómbica. Esta estructura es de alta dureza y fragilidad. Es el constituyente más duro en las aleaciones hierro-carbono. Por consiguiente, es la estructura responsable de la dureza de estas aleaciones en estado normalizado o recocido.

1.3.4 Martensita

Si la austenita es enfriada lo suficientemente rápido para que no se dé una reacción de la transformación bajo una difusión controlada, se logra que la estructura cristalina donde FCC se vuelva altamente inestable y se transforme a

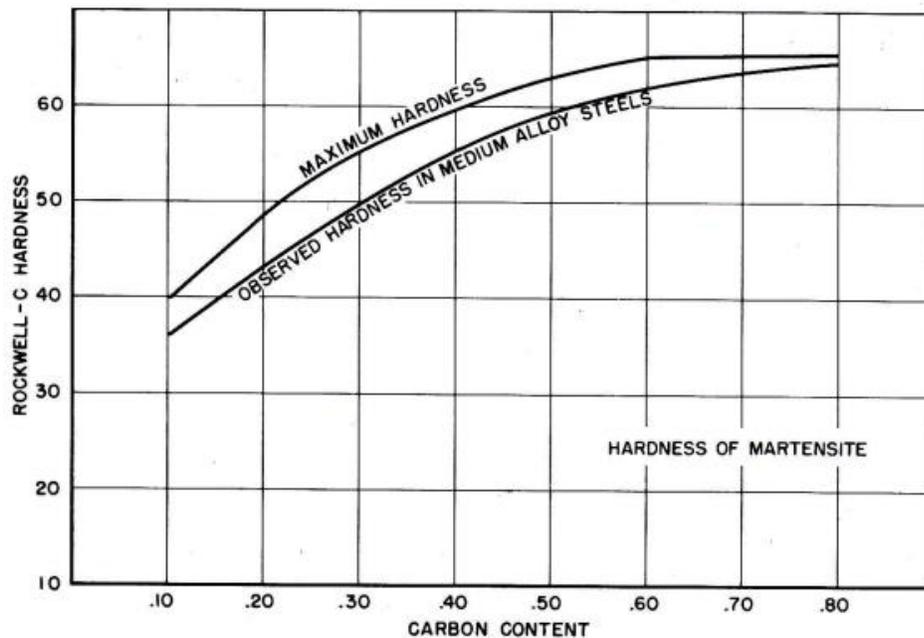
una estructura cristalina BCC sobresaturada de carbono en hierro alfa, a la que se le otorga el nombre de martensita. La velocidad mínima de enfriamiento requerido para la formación de martensita varía dependiendo la composición de cada acero. La temperatura a la cual comienza la transformación sin difusión se designa como M_s , mostrado en la figura 2. La martensita es una la microestructura de alta dureza y a la vez una de alta fragilidad. La dureza variará dependiendo con la velocidad de enfriamiento y su contenido de carbono, como se muestra en la figura 3.

Figura 2. **Gráfica M_s para BCC de acero al carbono de fase martensita**



Fuente: AVNER, Sydney. *Introducción a la metalurgia básica*. p. 412.

Figura 3. **La dureza de martensita en función del contenido de carbono**



Fuente: Association of Iron and Steel Engineers. *The making, shaping and treating of steel*. p. 588.

La velocidad mínima de enfriamiento requerido para la formación de martensita varía ampliamente dependiendo de la composición del acero. Esta fase es la que le proporciona la mayor dureza a todos los tipos de acero tratados térmicamente.

Está formada por una solución sólida sobresaturada de carbono. En la transformación martensítica no se da ninguna difusión. Esta fase se adquiere a través de un enfriamiento rápido suficiente para suprimir la difusión controlada de austenita en ferrita, perlita y bainita.

La cantidad obtenida de martensita en la mayoría de los casos depende de la relación temperatura-transformación y no depende de la relación tiempo-

temperatura, es decir, que es un cambio de microestructura que se da de inmediato y la transformación depende principalmente de la temperatura desde la cual se provoca el enfriamiento.

1.3.5 Perlita

Cuando un acero eutectoide de 0,8 % C es enfriado lentamente desde donde la austenita es estable, toda la ferrita y cementita se precipitan juntas en una característica laminar llamada perlita, constituida por láminas alternas de ferrita y cementita. Con contenido mayor o inferior de 0,8 % C, la perlita también se forma con enfriamiento lento, pero el exceso de ferrita o cementita precipita primero usualmente como delimitación de grano, donde a su vez queda lo que se llama austenita retenida entre granos. Cuando la transformación a perlita se lleva a cabo a temperaturas más bajas que la eutectoide, al disminuir la temperatura de transformación el espaciamiento laminar se torna menor, a su vez, la dureza incrementa directamente proporcional con el menor espaciamiento.

1.3.6 Bainita

La transformación a bainita se da en un rango de temperatura de 230 °C y 535 °C. Difiere de forma muy notoria de la perlita dada la forma acicular que presenta. Normalmente, posee una dureza intermedia entre la perlita y martensita.

1.4. Tratamientos térmicos

En los metales se aplican operaciones que conllevan calentamiento en ciertas condiciones dentro de ciertos límites de temperatura y duración para alcanzar propiedades deseadas, así como también conlleva distintos procesos de enfriamiento ya sea un enfriamiento rápido, lento o en escalas en el cual no existe intervención alguna de trabajo mecánico.

Los tratamientos térmicos tienen por objeto mejorar las propiedades y características de los aceros; consisten en calentar y mantener piezas o herramientas de acero a temperaturas adecuadas durante cierto tiempo y enfriarlas luego en condiciones convenientes. De esta forma se modifica la estructura microscópica de los aceros, se verifican transformaciones físicas y a veces cambios en la composición del metal.

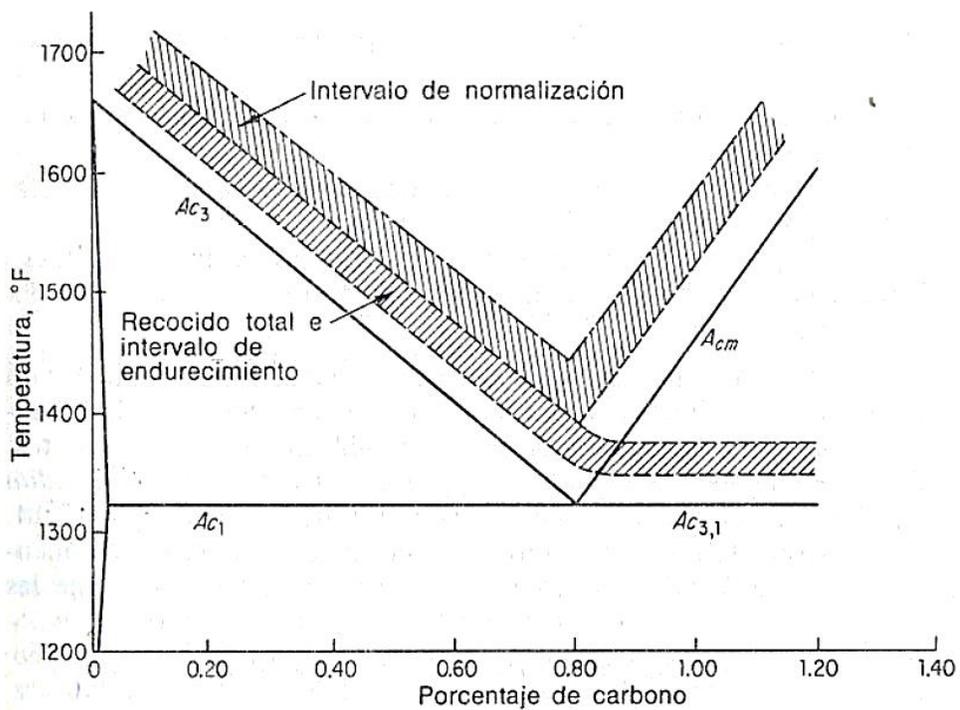
Al aplicar tratamientos térmicos a los metales variando la temperatura se puede modificar la estructura cristalina sin modificar la composición química. Estas modificaciones no se pueden observar a simple vista sino es necesario llevar a cabo pruebas metalográficas en probetas preparadas para ello. A continuación, se explican diversos tratamientos térmicos comúnmente utilizados en la industria metalmeccánica.

1.4.1 Normalizado

El normalizado es un tratamiento que se aplica en piezas que se encuentran en estado de suministro. Se aplica en piezas con el propósito de lograr una estructura granular más homogénea, la que a su vez lleva a conseguir propiedades físicas mejoradas y se logran mejores acabados en el momento del maquinado, a la vez que se consigue una pieza más dura y fuerte. También, se utiliza para refinar las estructuras dendríticas en piezas de

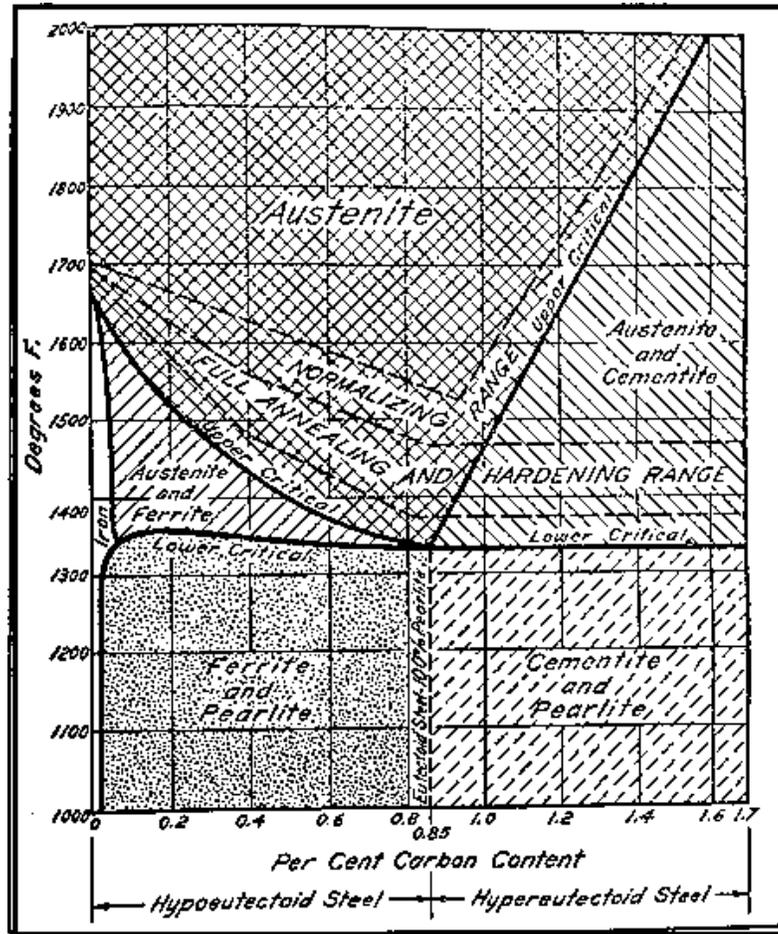
fundición. El normalizado se lleva a cabo al elevar la temperatura aproximadamente 35° sobre la línea A_{cm} que muestra la figura 4.

Figura 4. **Intervalo de recocido, normalización y endurecimiento para aceros al carbono**



Fuente: AVNER, Sydney. *Introducción a la metalurgia básica*. p. 256.

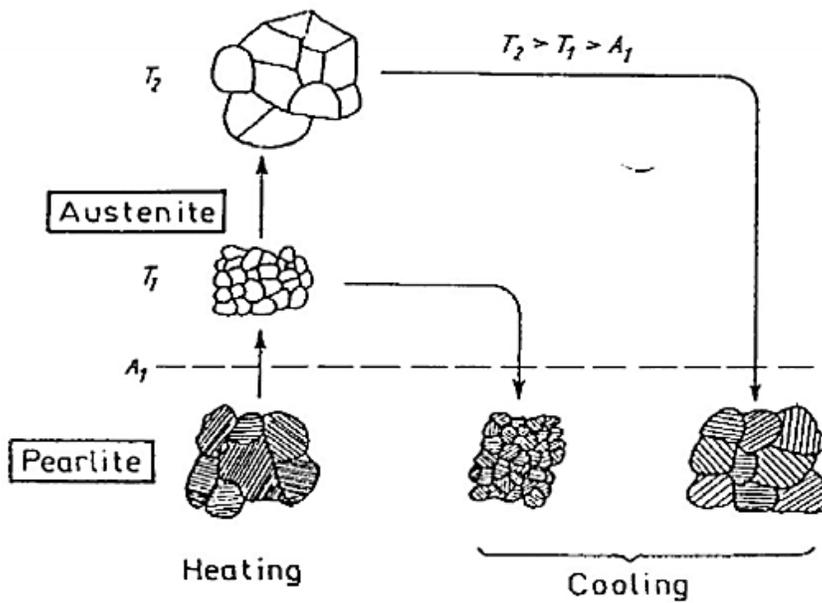
Figura 5. Tratamiento térmico del acero



Fuente: OBERG, Erick. *Machinery's handbook*. p.1 929.

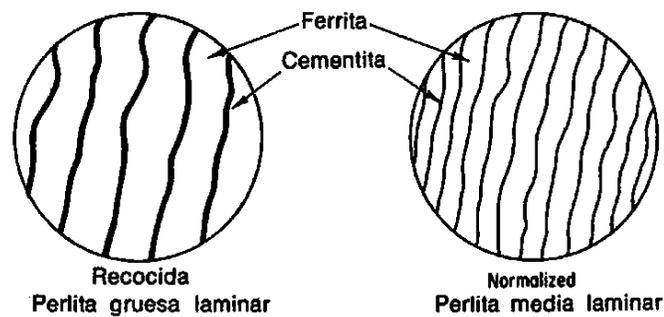
El normalizado se diferencia del recocido principalmente por el método de enfriamiento. En el caso del normalizado, el acero se enfría sacando la pieza del horno y permitiéndole enfriarse al aire libre, donde no debe haber circulación de aire. Este método de enfriamiento limita el crecimiento del grano mejorando las propiedades mecánicas más que en el proceso de recocido; y además, el acabado de la superficie en un artículo normalizado es con frecuencia superior al del recocido al maquinarse, ya que la alta ductilidad de este último da, con frecuencia, lugar a una falta de homogeneidad en la superficie.

Figura 6. Presentación esquemática de la influencia de la temperatura de austenización en el tamaño de grano después de normalizado.



Fuente: CLAVIJO, Luis Alberto. *Cómo varía el tamaño de grano en los aceros después de un tratamiento térmico*. <http://www.mecanicc.co/2014/03/como-varia-el-tamano-de-grano-en-los.html>. Consulta: 5 de agosto de 2016.

Figura 7. **Esquema de la diferencia entre la estructura perlítica, debido al recocido y al normalizado**



Fuente: AVNER, Sydney. *Introducción a la metalurgia básica*. p. 258.

1.4.2 Recocido

Cuando se aplica un trabajo mecánico, se produce una distorsión de los cristales que crea tensiones internas; y entonces, se encuentran muchas veces con un fenómeno de endurecimiento llamado acritud. Esto hace al material duro y frágil, dificultando la finalización del proceso de trabajo. Para eliminar este efecto, se aplica el tratamiento térmico llamado recocido. Según Apraiz J (1949), el objetivo principal es ablandar el acero o regenerar la estructura para eliminar tensiones internas y consiste en calentamientos a temperaturas adecuadas y enfriamientos lentos.

Existen tres tipos de recocido:

- Recocido de proceso

Al aplicar un trabajo en frío en los aceros, estirado o forja, la acritud desarrollada es alta. En este caso se procede a aplicar un recocido de proceso para aliviar tensiones residuales y para ablandar el metal para que puedan ser modificadas las piezas con herramientas de corte.

En este proceso, pueden restituirse los cristales a condiciones primitivas, es decir, regresar los granos como estaban en estado de suministro mediante un calentamiento lento ligeramente más elevado que la temperatura crítica superior y seguido de un enfriamiento también muy lento. Los cristales vuelven a sus dimensiones originales desapareciendo las tensiones internas, la fragilidad y la dureza; en condiciones regeneradas para aplicar otros procesos en donde se hace necesaria la recristalización del material para continuar con los ciclos de deformación plástica.

El tiempo para llevar a cabo un recocido de proceso es bastante corto dado que la temperatura del recocido de proceso es levemente inferior a la línea crítica inferior y superior a la línea de temperatura de recristalización.

- Variaciones estructurales

Cuando se calienta un acero templado, la martensita que es una estructura inestable, se transforma en otras estructuras un tanto más blandas cuanto mayor es la temperatura alcanzada. Desaparece completamente la martensita si se mantiene el acero a 50 °C por encima del punto crítico Ac3. Si después de cumplirse de esta condición se procede a un enfriamiento muy lento, el acero adquiere la estructura estable que tenía antes del temple.

- Recocido de esferoidización

Se recurre a este tratamiento de alivio de tensiones cuando la dureza superficial es tal que la maquinabilidad de herramientas se dificulta, y para un mejor trabajo de maquinar en frío. En el proceso de recocido de esferoidización, la cementita perlítica que está presente en un acero se torna globular a temperaturas por debajo de la transformación alotrópica de la austenita. De manera más puntual, lo que ocurre en el acero es que las láminas de cementita se separan de las láminas de ferrita en forma esferoidal que produce una estructura más blanda, lo cual hace posible su maquinación.

- Recocido de regeneración

Este recocido consiste en aplicar un calentamiento hasta una temperatura de austenización y mantenerla durante un tiempo adecuado para asegurar la homogenización de la austenita seguido de un enfriamiento lento que se lleva a cabo en el horno.

Este tratamiento tiene por objetivo reblandecer el acero y lo hace produciendo una estructura que es favorable para cualquier procedimiento de mecanizado.

Para aceros de bajo a mediano carbono se eleva la temperatura +20 °C a +40 °C por encima de la temperatura Ac₃. En aceros hipoeutectoides se obtiene una ferrita con un tamaño de grano relativamente gruesa en una proporción que indica equilibrio y perlita gruesa que conduce una dureza baja.

1.4.3 Temple

El propósito principal del temple es austenizar el acero total o parcialmente, manteniendo esa temperatura para luego enfriarlo a una

velocidad suficientemente rápida, para que no se de una transformación en las temperaturas superiores al rango de martensita para obtener una fracción significativa de martensita en la estructura dado que no se puede lograr una estructura completamente martensítica. Al tener martensita se obtiene un material con mayor dureza y resistencia mecánica dado que es una estructura metaestable.

Para aceros hipoeutectoides, la temperatura de austenización oscila entre 40 °C y 60 °C por encima de la temperatura Ac3.

Al obtener mayor dureza se eleva la fragilidad lo cual obliga a realizar procesos posteriores para aliviar parcialmente dichas características.

1.4.4 Martempering

La transformación a martensita, que se obtiene con un enfriamiento rápido, es acompañada de resultados de altas tensiones. Una modificación al temple conocido como martempering que ayuda a minimizar estas tensiones después del temple. En la práctica el martempering, generalmente, consiste en realizar el temple en un baño de sal a una temperatura por encima de Ms mostrado en la figura 10 hasta conseguir una homogeneización en temperatura y al final enfriar por aire hasta temperatura ambiente. La transformación a martensita ocurre durante el enfriamiento lento con aire tranquilo. Se da un enfriamiento en aire tranquilo dado que hay susceptibilidad alta de fractura mientras se da la formación de martensita si el enfriamiento es muy rápido.

Para aplicar el martempering se requiere de una buena templabilidad del acero dado que el enfriamiento inicial no es muy rápido.

Este proceso aplicable a piezas con geometría compleja y de espesores relativamente pequeños como ejes, árbol de levas, eslabones de cadenas o engranajes y piezas de alto carbono con mayor susceptibilidad a fisuración por temple.

1.4.5 Austempering

Al igual que el martempering, ayuda a minimizar tensiones residuales y tiene como ventaja que se obtiene una mayor tenacidad con mayor dureza.

Consiste en un enfriamiento lo suficientemente rápido para que no se den transformaciones de alta temperatura del acero, desde la temperatura de austenización hasta una temperatura de 230 °C a 400 °C y permitiendo que se lleve a cabo una transformación isotérmica seguido por un enfriamiento al aire; el cual es la diferencia primordial con martempering que no logra una transformación isotérmica, sino que solo una homogenización de temperatura y un enfriamiento desde ese punto.

El propósito es obtener una transformación a la estructura de bainita, dado que se consigue a través del mantener la temperatura en la región de bainita inferior antes del enfriamiento final. Esta estructura proporciona una resistencia similar a la martensita, pero con una ductilidad superior. La transformación a bainita no debe ser muy grande.

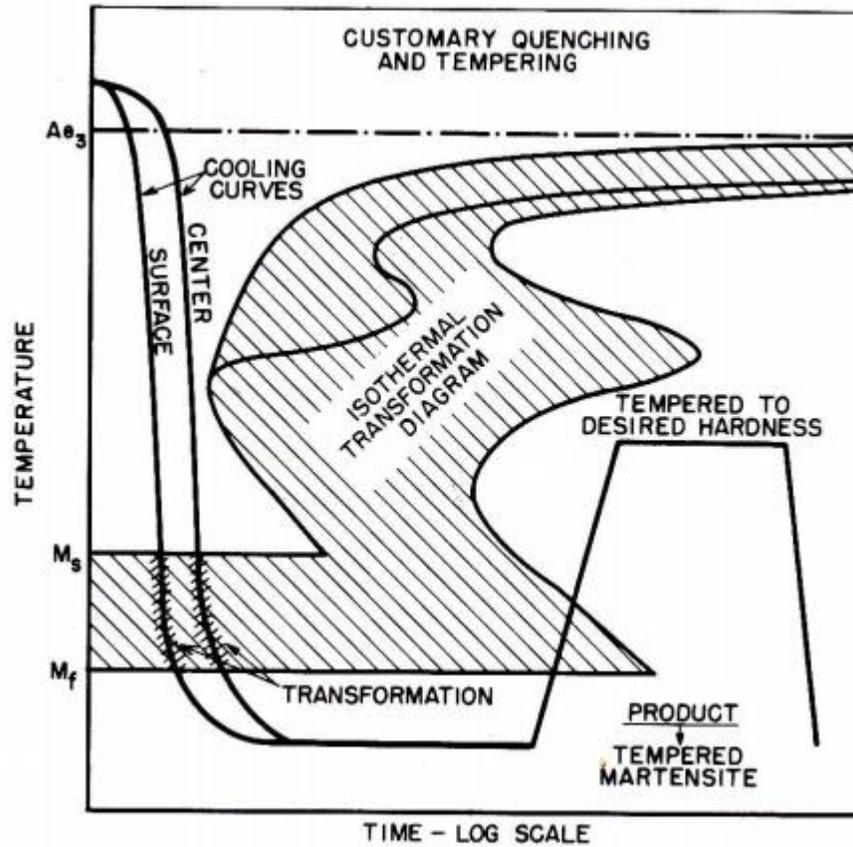
La aplicación es para piezas de sección pequeña y geometría complicada donde es necesario una mínima distorsión, alta dureza y alta tenacidad. Por ejemplo, arandelas, ganchos de sujeción para polipasto o barras estabilizadoras.

1.4.6 Revenido

La martensita obtenida por temple posee una alta dureza dado la sobresaturación de carbono en el hierro. La alta dureza viene acompañada de alta fragilidad y una insuficiencia de tenacidad lo cual para muchas aplicaciones no es apto. Por este motivo, es necesario aplicar un revenido elevando la temperatura por debajo de la temperatura crítica inferior A1 por cierto tiempo para lograr un intercambio de dureza por mejor ductilidad y mayor tenacidad que se obtiene por la precipitación de carbono de la martensita sobresaturada. El revenido, también, disminuye las tensiones residuales provocadas por la austenita retenida.

Las principales variables asociadas al revenido que afectan la microestructura de los aceros son: temperatura de revenido, tiempo de permanencia en horno y tiempo de enfriamiento del acero.

Figura 8. Diagrama de transformación esquemática para temple y revenido



Fuente: Association of Iron and Steel Engineers. *The making, shaping and treating of steel*. p. 1259.

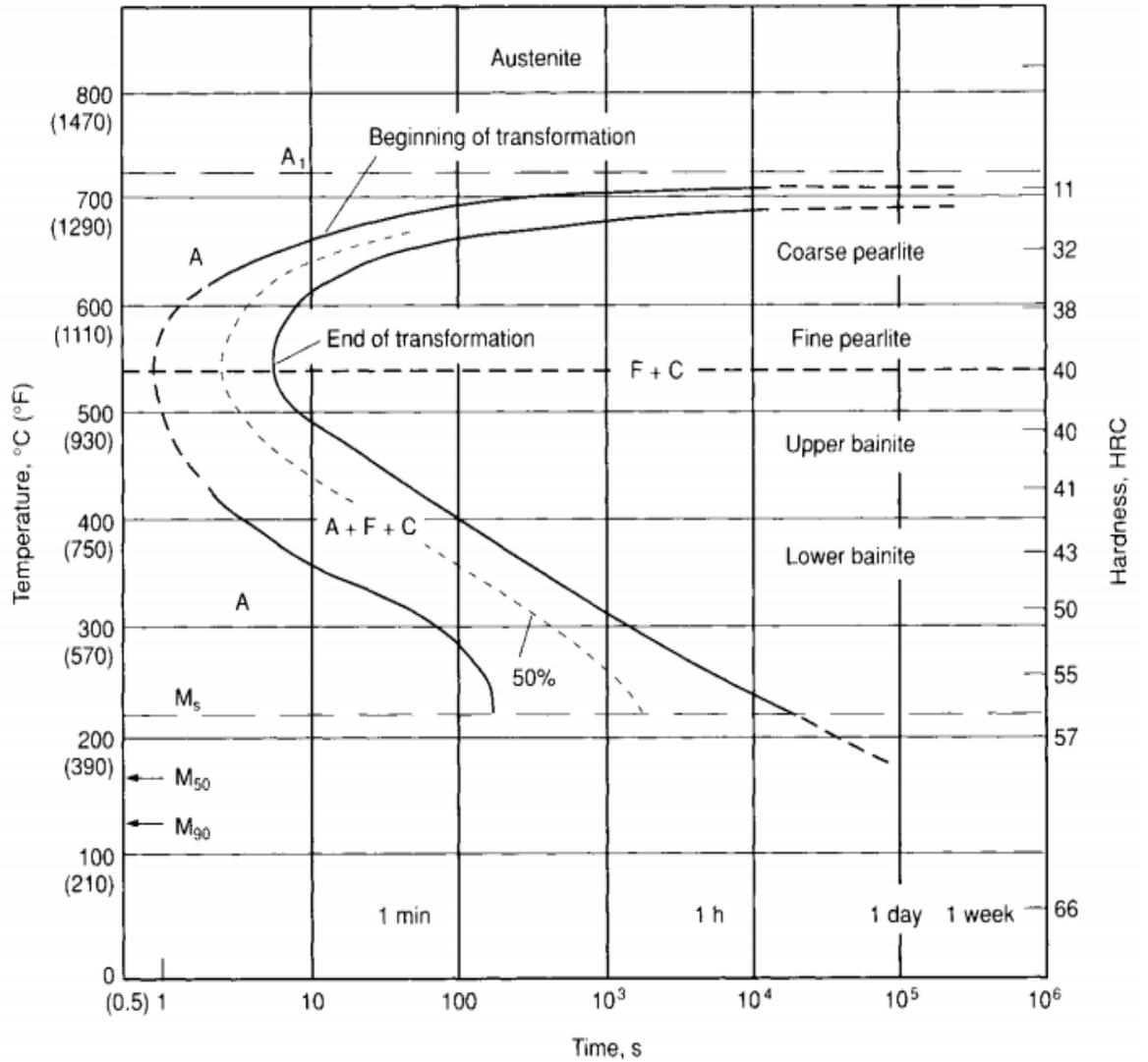
1.5. Curvas de transformación isotérmica de aceros al carbono TTT (temperatura, tiempo y transformación)

Las curvas de transformación isotérmica ayudan a comprender las transformaciones alotrópicas de las aleaciones y aceros al carbono, las cuales se llevan a cabo en los distintos tratamientos térmicos expuestos anteriormente. En estos diagramas, como se observa en la figura 9, se aprecia el tiempo necesario para que dé inicio la transformación alotrópica y el tiempo necesario para que se complete. Para las distintas composiciones químicas las curvas tienen variaciones. Su principal aplicación es para los tratamientos de temple incluyendo martempering y austempering.

La mayoría de las estructuras que se observan en la práctica se originan en procesos de enfriamiento continuo lo cual no permite relacionar las estructuras con las temperaturas a las cuales se producen. Esto es debido a que en un enfriamiento continuo se producen mezclas de estructuras originadas a temperaturas diferentes. Por esto, para saber que estructura aparece a una temperatura dada, el enfriamiento continuo se reemplaza por un tratamiento isotérmico.

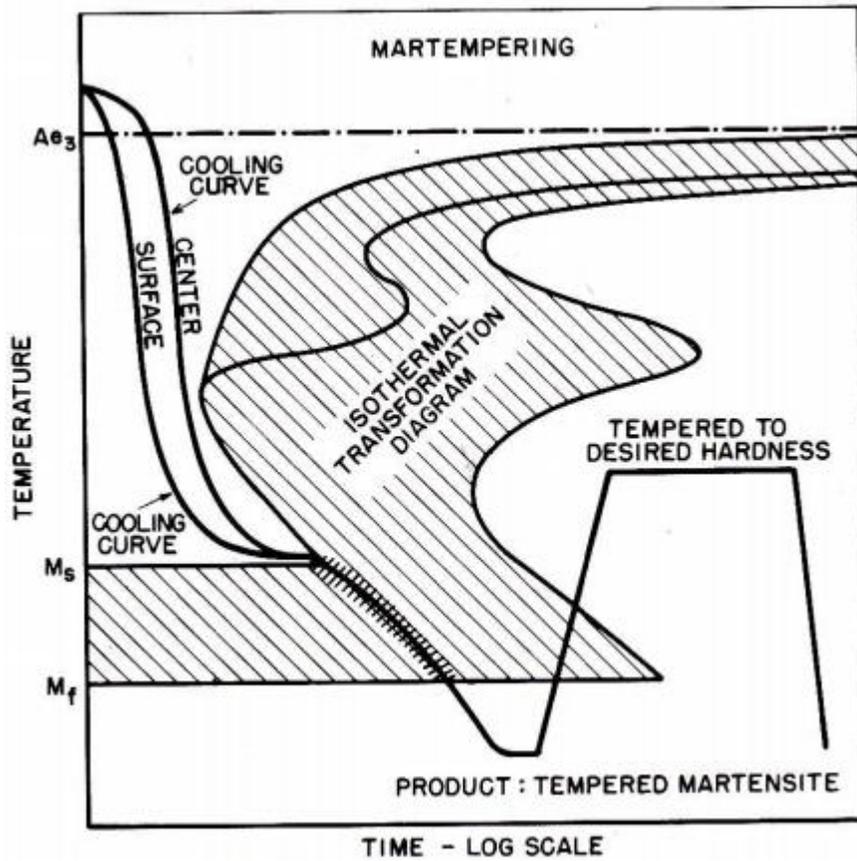
Los tratamientos isotérmicos permiten conocer la cinética de la transformación y para ello se mantiene una probeta por cierto tiempo en un baño que esté a la temperatura de la estructura que se quiera estudiar seguido de un enfriamiento rápido en agua fría. En la figura 9 se observan las zonas en donde se forman las distintas estructuras a distintas temperaturas: Austenita arriba de 723 °C Perlita gruesa y perlita fina por debajo de 723 °C, bainita superior y bainita inferior entre 230 °C y 500 °C y martensita por debajo de 230 °C para el ejemplo de un acero 1080.

Figura 9. Transformación isotérmica de un acero 1080



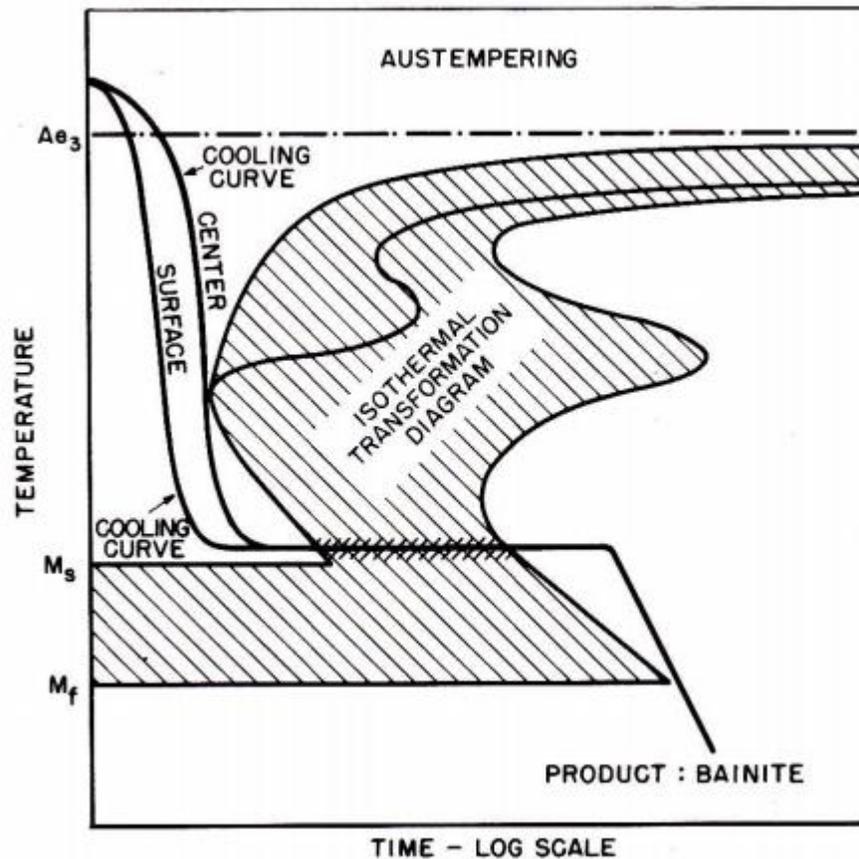
Fuente: ASM International. *Metals handbook* p. 215.

Figura 10. Diagrama esquemático de transformación para el martempering



Fuente: Association of Iron and Steel Engineers. *The making, shaping and treating of steel* p. 1262.

Figura 11. Diagrama esquemático de transformación para el austempering



Fuente: Association of Iron and Steel Engineers. *The making, shaping and treating of steel*. p. 1262.

1.6. Ensayo de dureza

El ensayo de dureza, según el ASM Metals Handbook 2005, define como la habilidad de un material a resistir una penetración o deformación permanente al entrar en contacto con un indentador bajo carga. Una prueba de dureza

consiste en penetrar un material de dureza mucho mayor y de conocida geometría y propiedades en el material de prueba de dureza menor.

Existen distintas escalas con las cuales se cuantifica la dureza por medio de la deformación obtenida en la superficie. Se encuentra la necesidad de ensayos de dureza principalmente para comparación entre distintos materiales o para visualizar la diferencia de durezas con los distintos tratamientos térmicos. Ayuda también a detectar la uniformidad de un material, lo cual lo hace un procedimiento muy utilizado.

Existen 4 tipos de ensayos de dureza aceptados a nivel internacional:

- Ensayo de brinell

En este ensayo el elemento indentador de dureza alta que se utiliza para la penetración es una bola esférica usualmente hecho de acero templado de diámetro de 10 mm y es forzado a penetrar la prueba de ensayo bajo una carga definida. El tamaño de la penetración resultante proporciona una medida de dureza. El tamaño de penetración es determinado por una medición especial que es microscópica y varía entre una y otra máquina de ensayos de dureza. La profundidad del indentador puede ser medido por un dispositivo adjunto al indentador.

La dureza Brinell es obtenida por la relación de carga aplicada sobre el área de indentación.

$$HB = \frac{P}{A}$$

Donde:

- P es la carga en kilogramos
- A es el área de indentación en la superficie del material en milímetros

Otra forma de determinar la dureza es por la relación de diámetros entre la bola indentadora y el de la superficie donde se hizo la indentación.

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

Donde:

- P está expresado en kilogramos
- D y d están expresados en milímetros

La determinación de la dureza por el método Brinell está limitada para ciertos materiales; si se aumenta su dureza la bola esférica sufre deformaciones que hace lo que los valores obtenidos no sean correctos.

- Ensayo Rockwell

El principio de penetración es similar al ensayo de Brinell dado que también se mide la dureza por la resistencia a la penetración. Este es el ensayo más utilizado dado la precisión y versatilidad de la prueba. A diferencia del ensayo Brinell, el ensayo de rockwell permite el ensayo de piezas delgadas y

durezas superiores y utiliza bolas de acero y de diamante para llevar a cabo las penetraciones.

El método Rockwell difiere del de Brinell en que no determina la dureza en función de la superficie de impresión sino en función de la profundidad de penetración y también la carga aplicada no es continua, debido a que actúan dos cargas diferentes: una inicial y otra adicional cuyo valor varía dependiendo el penetrador.

No se cuenta con una relación matemática, sino se determina la dureza por medio de un dial indicador en la máquina de ensayo que mide la penetración.

- Ensayo Vickers

Este ensayo al igual que el ensayo de Brinell mide la resistencia a la penetración, pero difiere en que utiliza un indentador con punta de poliedro regular de diamante y se aplican distintas magnitudes de carga. Se mide la dureza con respecto a la diagonal indentada en la pieza de ensayo y el área superficial marcada.

$$VH = 1,854 \frac{P}{D^2}$$

Donde:

- P es la carga aplicada en kilogramos
- D es el promedio de las diagonales medidas en milímetros.

La ventaja principal de la forma de poliedro es que se obtienen geométricamente indentaciones similares sin importar la carga aplicada lo cual no se obtiene con la punta de esfera.

- Ensayo Leeb

En la actualidad, existe otro tipo de medición de dureza llamado Leeb. Se define por la relación entre la velocidad de rebote de un cuerpo percutor con respecto a su velocidad de percusión multiplicada por 1 000. Una mayor dureza en la superficie del material se corresponde con una velocidad de rebote más alta. La dureza Leeb establece una relación directa con sus condiciones de dureza respecto a: HB, HV, HRC.

El cuerpo percutor, que está equipado con un carburo metálico, impacta con la pieza y rebota. El rebote y la velocidad de impacto se miden a 1mm de la superficie de la pieza de la siguiente forma: el imán Hill que está integrado produce una tensión directamente proporcional a la velocidad de impacto. Los valores de dureza Leeb se calculan con la siguiente fórmula:

$$HL= 1000x(Vb/Va)$$

Donde:

- HL es el valor en Leeb,
- Vb es la tensión producida durante el rebote del cuerpo percutor
- Va es la tensión producida durante el impacto del cuerpo percutor

Los valores de dureza Leeb se pueden convertir en otras escalas directamente como HV, HRC, HRB y HB.

2. ACEROS SELECCIONADOS PARA EL ESTUDIO EXPERIMENTAL

2.1. AISI – SAE 1036

- Propiedades Termodinámicas

Tabla I. **Coefficiente promedio de expansión**

Grado AISI- SAE	Tratamiento o Condición	Coeficiente de expansión $\mu\text{m}/\text{m}^*\text{K}$ en $^{\circ}\text{C}$						
		20- 100	20- 200	20- 300	20- 400	20- 500	20- 600	20- 700
1036	Recocido	11,1	11,9	12,7	13,4	14,0	14,4	14,8

Fuente: ASM International. *Metals handbook*. p. 327.

Tabla II. **Conductividad térmica**

Grado AISI- SAE	Tratamiento o Condición	Conductividad W/m*K en °C						
		0	100	200	300	400	500	600
1036	Recocido		50,8					

Fuente: ASM International. *Metals handbook*. p. 330.

Tabla III. **Calor específico**

Grado AISI- SAE	Tratamiento o Condición	Calor Específico J/Kg*K en °C						
		50- 100	200- 250	250- 300	300- 350	350- 400	400- 450	450- 500
1036	Recocido	486	519				586	

Fuente: ASM International. *Metals handbook*. p. 331.

- Propiedades mecánicas en estado de suministro

Tabla IV. **Propiedades mecánicas**

Proceso de manufactura	Resistencia a la tracción (PSI)	Límite elástico (PSI)	Elongación en 2 plg. (%)	Reducción de área (%)	Dureza Brinell
Rolado en caliente	83 000	45 500	16	40	163
Estirado en frío	92 000	77 500	12	35	187

Fuente: Gerdau. *Estimated mechanical properties*. http://www.gerdaumacsteel.com/media-center/mdb/general_information/estimated_mechanical_properties_and_machinability_of_aisi_and_sae_carbon_steel_bars.shtml. Consulta: 5 de noviembre de 2016.

- Composición química

Tabla V. **Composición química**

Grado AISI- SAE	Carbono (C)	Manganeso (Mn)	Fósforo	Azufre
1036	0,30-0,37	1,20-1,50	0,040	0,050

Fuente: OBERG, Erik. *Machinery's handbook*. p. 1897.

- Aplicaciones

Entre los materiales de construcción, el acero es de suma importancia dado que combina la resistencia mecánica, su capacidad de ser trabajado, su disponibilidad y su bajo costo. Los aceros estructurales pueden ser utilizados en estructuras como edificios y puentes.

Los aceros que utilizan el carbono como elemento principal en la aleación y que cumplen las especificaciones de propiedades de la norma ASTM A615 son considerados aceros para refuerzo estructural del concreto. Entre estos aceros se encuentran los aceros de baja aleación. Según la figura 11, el acero 1036 cumple con las especificaciones ASTM A615.

Figura 12. **Tabla de requisitos de tracción para aceros de refuerzo de concreto**

	Grade 40 [280] ^A	Grade 60 [420]	Grade 75 [520] ^B
Tensile strength, min, psi [MPa]	60 000 [420]	90 000 [620]	100 000 [690]
Yield strength, min, psi [MPa]	40 000 [280]	60 000 [420]	75 000 [520]
Elongation in 8 in. [203.2 mm], min, %:			
Bar Designation No.			
3 [10]	11	9	...
4, 5 [13, 16]	12	9	...
6 [19]	12	9	7
7, 8 [22, 25]	...	8	7
9, 10, 11 [29, 32, 36]	...	7	6
14, 18 [43, 57]	...	7	6

^AGrade 40 [280] bars are furnished only in sizes 3 through 6 [10 through 19].

^BGrade 75 [520] bars are furnished only in sizes 6 through 18 [19 through 57].

Fuente: ASTM International. *Standard specification for deformed and plain carbon Steel bars for concrete reinforcement. Norma ASTM A615. p.3.*

2.2. AISI – SAE 1045

- Propiedades termodinámicas

Tabla VI. **Coefficiente promedio de expansión**

Grado AISI- SAE	Tratamiento o condición	Coeficiente de expansión $\mu\text{m}/\text{m}^*\text{K}$ en $^{\circ}\text{C}$						
		20- 100	20- 200	20- 300	20- 400	20- 500	20- 600	20- 700
1045	Recocido	11,6	12,3	13,1	13,7	14,2	14,7	15,1

Fuente: ASM International. *Metals handbook*. p. 327.

Tabla VII. **Conductividad Térmica**

Grado AISI- SAE	Tratamiento o condición	Conductividad $\text{W}/\text{m}^*\text{K}$ en $^{\circ}\text{C}$						
		0	100	200	300	400	500	600
1045	Recocido		50,8					

Fuente: ASM International. *Metals handbook*. p. 330.

Tabla VIII. **Calor específico**

Grado AISI- SAE	Tratamiento o condición	Calor específico $\text{J}/\text{Kg}^*\text{K}$ en $^{\circ}\text{C}$						
		50-100 $^{\circ}\text{C}$	200-250 $^{\circ}\text{C}$	250-300 $^{\circ}\text{C}$	300-350 $^{\circ}\text{C}$	350-400 $^{\circ}\text{C}$	400-450 $^{\circ}\text{C}$	450-500 $^{\circ}\text{C}$
1036	Recocido	486	519				586	

Fuente: ASM International. *Metals handbook*. p. 331.

- Propiedades mecánicas en estado de suministro

Tabla IX. **Propiedades mecánicas**

Proceso de manufactura	Resistencia a la tracción (PSI)	Límite elástico (PSI)	Elongación en 2 plg. (%)	Reducción de área (%)	Dureza Brinell
Rolado en caliente	82,000	45,000	16	40	163
Estirado en frío	91,000	77,000	12	35	179

Fuente: Gerdau. *Estimated mechanical properties*. http://www.gerdaumacsteel.com/media-center/mdb/general_information/estimated_mechanical_properties_and_machinability_of_aisi_and_sae_carbon_steel_bars.shtml. Consulta: 5 de noviembre de 2016.

- Composición química

Tabla X. **Composición química acero 1045**

Grado AISI-SAE	Carbono (C)	Manganeso (Mn)	Fósforo	Azufre
1045	0,43 – 0,50	0,60 – 0,90	0,040	0,050

Fuente: OBERG, Erik. *Machinery's handbook*. p. 1897.

- Aplicaciones

Según Suministros Técnicos S.A., el acero 1045 es utilizado en estado de suministro cuando su resistencia y dureza son necesarias. Este acero puede ser forjado con martillo o bien sometido a tratamientos térmicos de

endurecimiento y así obtener durezas y tenacidad que lo hacen adecuado para fabricación de diversos componentes de maquinaria como lo son ejes, piñones, cuñas, manivelas, chavetas, pernos, tuercas, cadenas, engranajes de baja velocidad, bielas, pasadores y cigüeñales o bien al ser forjado en frío puede ser utilizado para la fabricación de herramientas agrícolas como hachas, azadones, rastrillos, y picas.

3. ENSAYO METALGRÁFICO

La metalografía microscópica estudia las características estructurales y composición de metales y aleaciones con el fin de observar y determinar características: fases presentes, forma, tamaño y distribución de los granos para determinar el contenido de carbono y los tratamientos térmicos a los cuales se ha sometido un acero o una aleación. Así mismo, se puede determinar si existen fallas en los aceros fabricados, aunque si encontrar fallas fuera el objetivo, se utilizan otros métodos para encontrarlas.

Muchas normas o especificaciones contienen los requerimientos con respecto a una microestructura y un ensayo metalográfico puede ser utilizado para inspeccionar que la norma se ha cumplido. Adicional a esto un propósito importante es un estudio para el desarrollo de aceros y aleaciones.

3.1. Procedimiento de preparación de una muestra metalográfica

La norma ASTM E3 establece que, para la preparación de una muestra a ser estudiada por medios metalográficos, se procede a la obtención de una porción del material de tamaño de una pulgada de diámetro y una pulgada de altura. De acuerdo con la norma ASTM E3, se preparan probetas de acero manufacturado en Guatemala, en el caso del AISI-SAE 1036, e importado, en el caso del AISI-SAE 1045; se cortan probetas de una pulgada de diámetro por una pulgada de altura. Este procedimiento se lleva a cabo minimizando el daño a la estructura del acero y para ello se utiliza sierra manual con algún grado de lubricación que indica la norma ASTM E3. Este proceso minimiza la alteración

de la estructura del acero. Una vez obtenidos los cortes de dicha altura se procede a la preparación de la muestra previo al ensayo metalográfico.

La preparación de la muestra consiste en el pulido de una superficie plana hasta lograr una superficie que no muestra líneas de corte o líneas de pulido y que se asemeja a un espejo.

Para lograr la superficie deseada, primero se lleva a cabo un desbaste en la cara transversal colocando la probeta en un torno con el propósito de lograr primero una superficie a 90° del cuerpo longitudinal. Luego, se procede a pulir la probeta con papeles abrasivos desde un grano grueso hasta un grano muy fino. Comenzando con un papel abrasivo número 100. Se coloca agua en el papel esmeril y se comienza a pulir la probeta obteniendo líneas de pulido en una sola dirección. Cuando se observen líneas en una sola dirección se procede girar a la probeta 90° y se comienza a pulir con papel abrasivo de grano más fino. Cuando las líneas anteriores se hayan desvanecido, se procede nuevamente a pulir la probeta con papel abrasivo más fino y se gira nuevamente la probeta 90° . Se siguieron los mismos pasos anteriores hasta llegar a una hoja abrasiva de grado 2 500, aunque los procedimientos más generalizados no exceden el papel esmeril 600.

En este momento se obtiene una superficie semejante a un espejo a percepción del ojo humano. Para eliminar líneas de pulido de lija a nivel microscópico, se pule la probeta con alúmina.

Una vez obtenida una superficie libre de marcas de pulido se procede a un ataque químico de la probeta. El ataque químico de la superficie previamente pulido tiene como objetivo revelar las características estructurales de la muestra a nivel microscópico. Se crea un contraste de color selectivo de un

constituyente en la microestructura por medio de la oxidación de una capa delgada de la probeta lo cual revela su microestructura.

El ataque químico se puede llevar a cabo por medio de inmersión de la cara pulida en una solución química seleccionada dependiendo del material a atacar indicado por la norma ASTM E-307. Para acero se puede utilizar una solución de ácido nítrico al 2 % conocido también como nital o ácido pícrico conocido como picral. Para efectos de este estudio se utilizará nital al 2 %.

Tabla XI. **Solución química para ataque de probeta**

Nombre del Reactivo	Composición	Aplicaciones
Ácido Nítrico (Nital 2%)	Ácido nítrico2 cm ³ . Alcohol100 cm ³ .	Aceros, Hierros, Fundiciones
Ácido Pítrico (Picral)	Ácido pícrico4 grs. Alcohol100 cm ³ .	Aceros de baja aleación

Fuente: *Conocimiento de materiales.*

http://190.105.160.51/~material/materiales/lab/guia_metalograf%EDa.pdf Consulta: 14 de diciembre de 2016.

3.2. Análisis metalográfico

En el análisis metalográfico se exponen al ojo humano las estructuras que se revelan mediante el ataque químico de las probetas. Durante este proceso metalográfico se determinan las estructuras observadas. Cada proceso térmico altera dicha estructura según el diagrama de hierro-carbono expuesto en el capítulo 1. Este análisis permite determinar si el acero ha sido procesado

correctamente siendo un paso crítico para determinar la confiabilidad de los aceros. Así mismo, el análisis metalográfico ayuda a determinar las causas de las fallas por corrosión si es que estas estuvieran presentes.

4. DESARROLLO PRÁCTICO EXPERIMENTAL DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS

4.1. Preparación de las probetas AISI-SAE 1045 Y AISI-SAE 1036 previo a los tratamientos térmicos

Como primer paso y según lo expuesto anteriormente, se procedió a cortar las barras de aceros en secciones de aproximadamente 1 pulgada vertiendo agua como agente enfriador. Todas las secciones fueron cortadas con sierra manual para evitar una transformación de estructura en las superficies a estudiar. Con las superficies irregulares se procedió a llevar a cabo el desbaste para obtener una superficie a 90° en la relación de la longitud de las probetas. Esto se hizo montando las probetas en uno de los tornos que se encuentran en el laboratorio de materiales de la facultad de ingeniería mecánica. Adicional, se utilizaron las herramientas de corte y se eliminaron las marcas creadas por el corte con sierra dejando una superficie plana y lista para pulir más adelante. Posteriormente, se llevaron a cabo los tratamientos térmicos descritos a continuación.

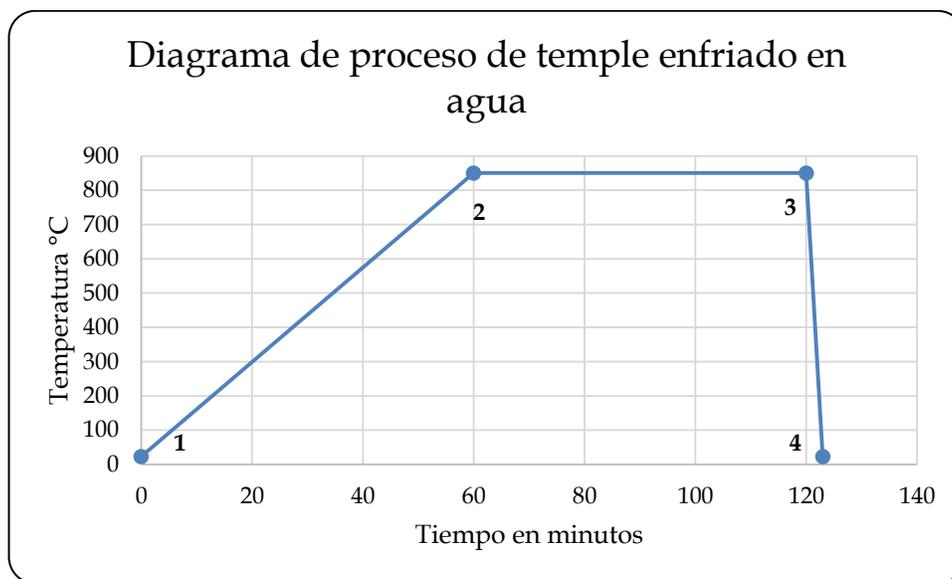
4.2. Tratamientos aplicados a las probetas AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045

4.2.1 Temple

En la figura 13 se muestra el proceso llevado a cabo dentro del horno y fuera de este para realizar el temple. Este tratamiento térmico y todos los

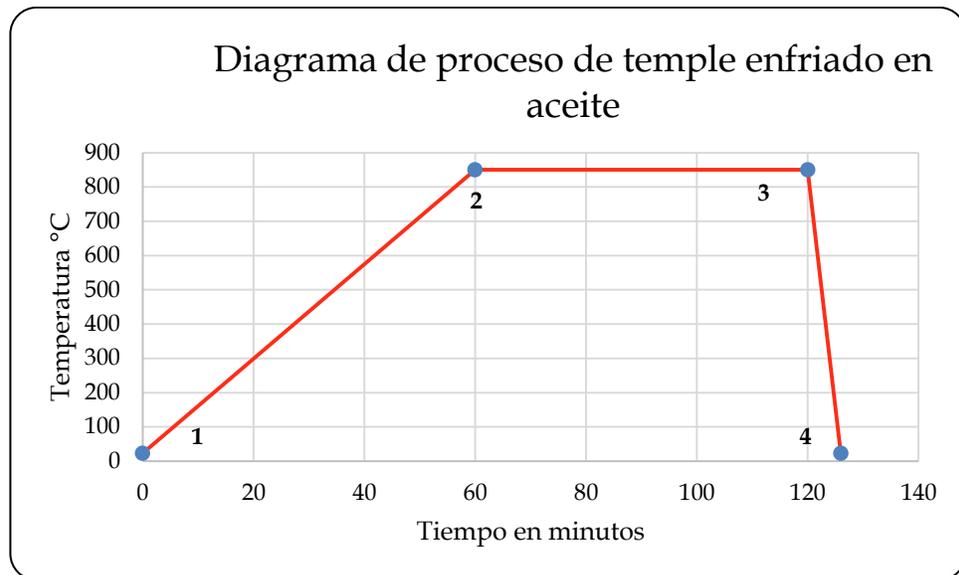
descritos a continuación fueron realizados en el laboratorio de metalurgia y metalografía de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 13. **Proceso de temple enfriado en agua de los aceros AISI-SAE 1036 Y AISI-SAE 1045**



Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Proceso de temple enfriado en aceite de los aceros AISI-SAE 1036 Y AISI-SAE 1045**



Fuente: elaboración propia.

En las figuras 15 y 16 se muestran los diagramas que describen el proceso de temple. En el punto 1 de ambos diagramas se muestra el punto inicial donde las probetas se encuentran a 23 °C que corresponde a la temperatura ambiente. Se colocaron las probetas AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045 dentro de cajas llenas de carbón para evitar una descarburación de las mismas y se introdujeron de esa manera al horno.

En el punto 2, se muestra que en una hora la temperatura se elevó a 850 °C, la temperatura correspondiente de temple para estos aceros. Del punto 2 al punto 3 se mantuvieron las probetas a 850 °C una hora de permanencia para permitir una homogeneización de proceso. Posteriormente para llegar al punto 4 de la gráfica se procedió a dos enfriamientos distintos.

En la figura 13 se muestra que se llevó a cabo un enfriamiento por agua que duró 3 minutos. En la figura 14 se muestra un tiempo mayor de enfriamiento dado que fue enfriado por aceite el cual duró 6 minutos. El enfriamiento por aceite tarda más ya que el aceite se calienta más rápido que el agua y debido a su viscosidad.

Figura 15. **Extracción de probetas del horno**



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Enfriamiento de probeta en aceite**



Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Enfriamiento de probeta en agua**

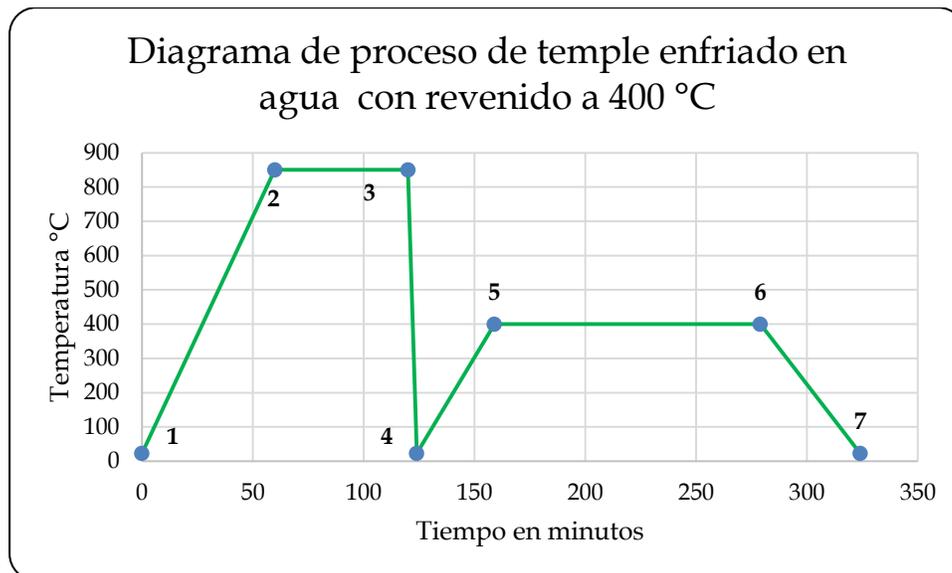


Fuente: elaboración propia.

4.2.2 Temple con posteriores revenidos

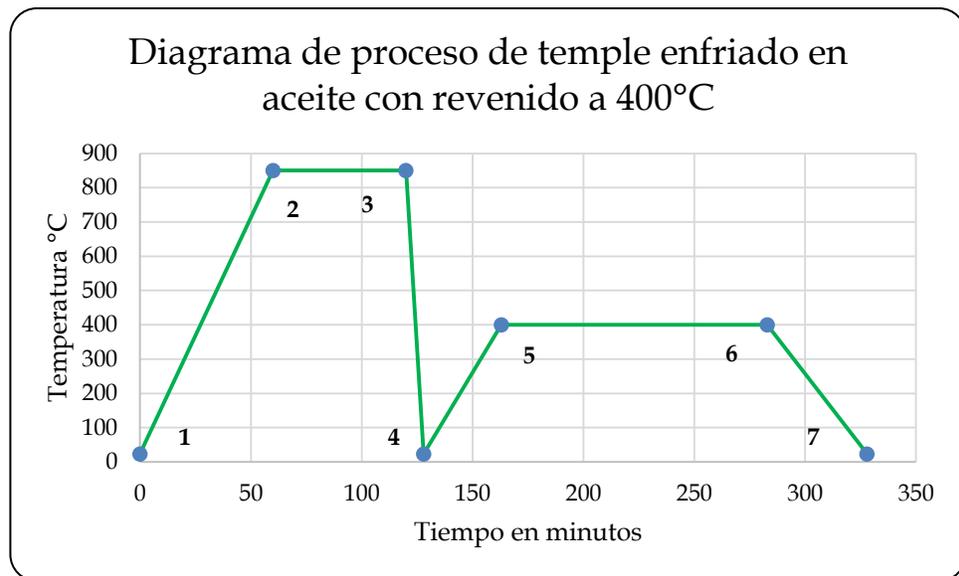
Tomando como base el temple y ambos enfriamientos en aceite y en agua, adicionalmente, se llevaron a cabo revenidos a 400 °C y a 600 °C. En las figuras 18, 19, 20 y 21 se describen estos procesos.

Figura 18. **Proceso de temple enfriado en agua y revenido a 400 °C de los aceros AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045**



Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Proceso de temple enfriado en aceite y revenido a 400 °C de los aceros AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045**



Fuente: elaboración propia.

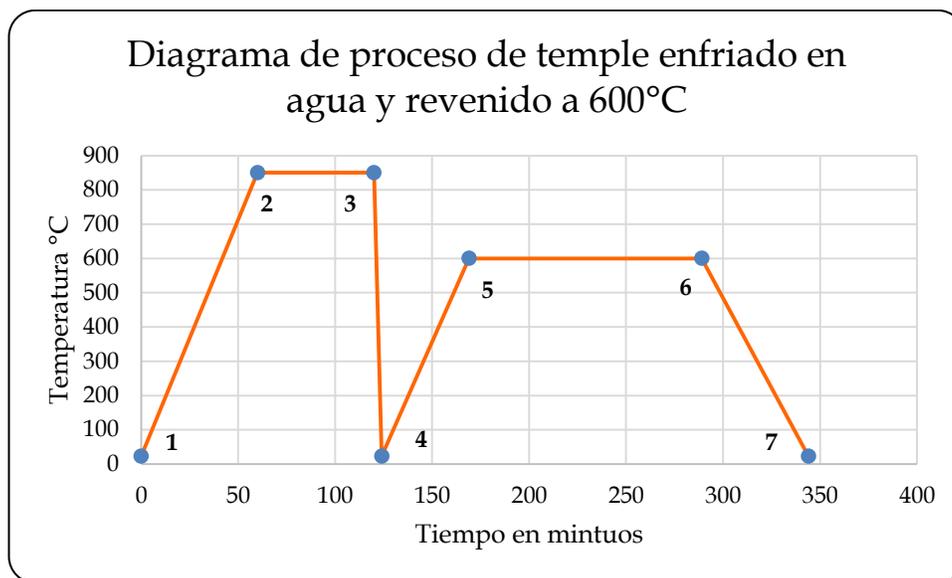
En las figuras 18 y 19 se muestran los diagramas del proceso de temple con enfriamiento en agua y aceite llevando a cabo un revenido posterior a 400 °C.

En el punto 1 se encuentran las probetas a temperatura ambiente de 23 °C. En el punto 2 se dio un tiempo de permanencia de una hora a 850 °C para homogeneización de la temperatura en la probeta. En la figura 19 se muestra un enfriamiento en agua con duración de 3 minutos y en la figura 20 un enfriamiento en aceite con duración de 6 minutos que reduce nuevamente la temperatura a 23 °C.

En el punto 5 se muestra nuevamente una elevación de temperatura a 400°C dando un tiempo de permanencia de dos horas para completar la

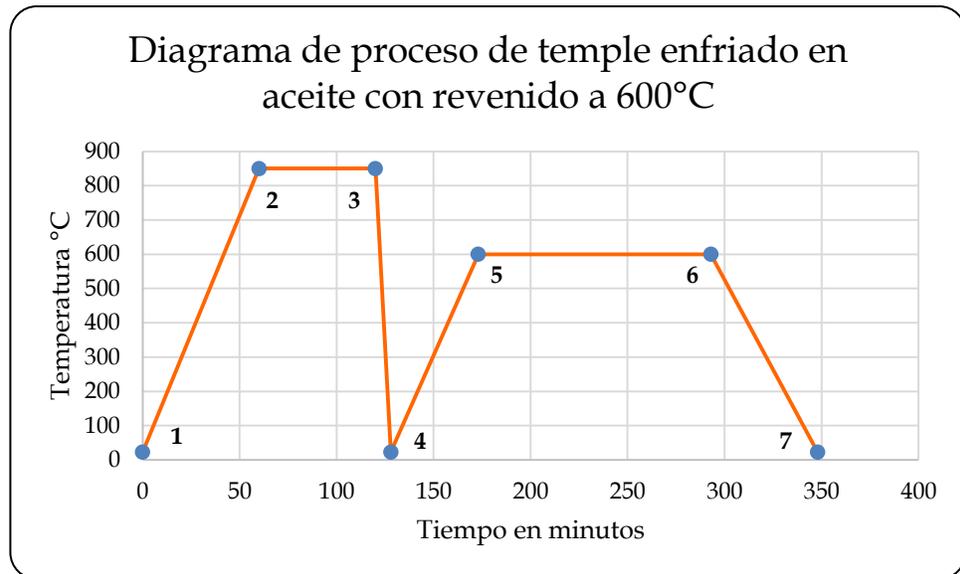
homogeneización de la temperatura. Según el contenido de carbono de ambos aceros AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045, la temperatura correspondiente de revenido es entre 450 °C y 650 °C. El revenido provee una mejora en la resistencia del acero y en su tenacidad. A su vez, se reduce la dureza del acero.

Figura 20. **Proceso de temple enfriado en agua con revenido a 600 °C de los aceros AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045**



Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Proceso de temple enfriado en aceite y revenido a 600 °C de los aceros AISI-SAE 1036 y AISI-SAE1045**



Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Extracción de probetas del horno**

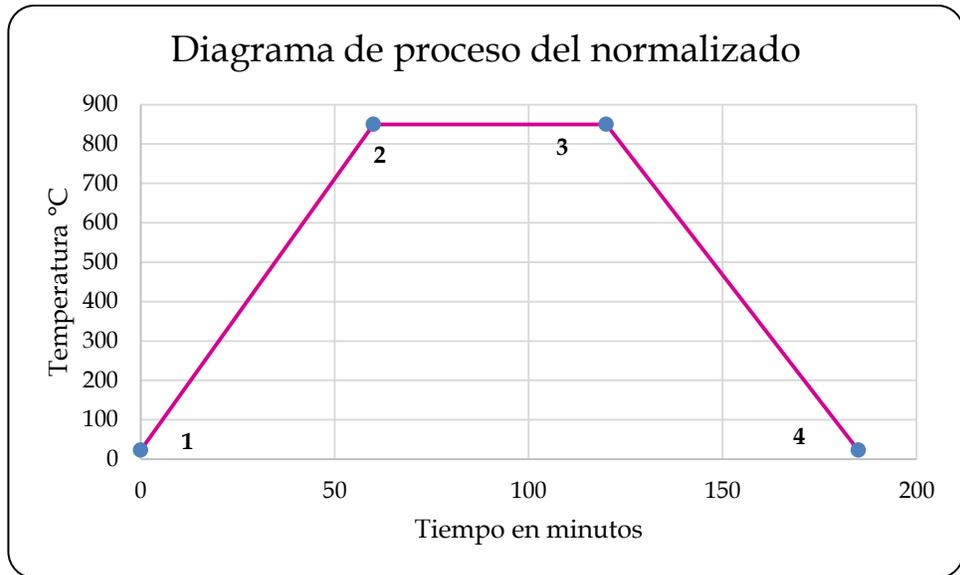


Fuente: elaboración propia.

4.2.3 Proceso de normalizado en los aceros AISI-SAE 1036 Y AISI-SAE 1045

En esta sección se describe el proceso de normalizado llevado a cabo en el laboratorio. En la figura 23 se muestra el diagrama donde en el punto 1 se encuentran las probetas a temperatura ambiente, en el punto 2 una elevación a 850 °C el cual tomó 60 minutos para alcanzar. En el punto 3 se muestra el punto de permanencia de una hora para homogeneización de la temperatura. El caso especial de este tratamiento es el enfriamiento el cual se lleva a cabo al aire. El punto 4 muestra el enfriamiento lento de 70 minutos. Este tratamiento térmico se lleva a cabo para producir un acero más duro y más fuerte que uno obtenido por recocido. En muchos casos el normalizado puede ser tratamiento final.

Figura 23. **Proceso de normalizado**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Temperatura de normalizado para aceros al carbono**

Grade	Temperature ^(a)	
	°C	°F
Plain carbon steels		
1015	915	1675
1020	915	1675
1022	915	1675
1025	900	1650
1030	900	1650
1035	885	1625
1040	860	1575
1045	860	1575
1050	860	1575
1060	830	1525
1080	830	1525

Fuente: ASM International. *Metals handbook*. p. 85.

Figura 24. **Enfriamiento al aire de probetas**



Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Enfriamiento de probetas al aire**

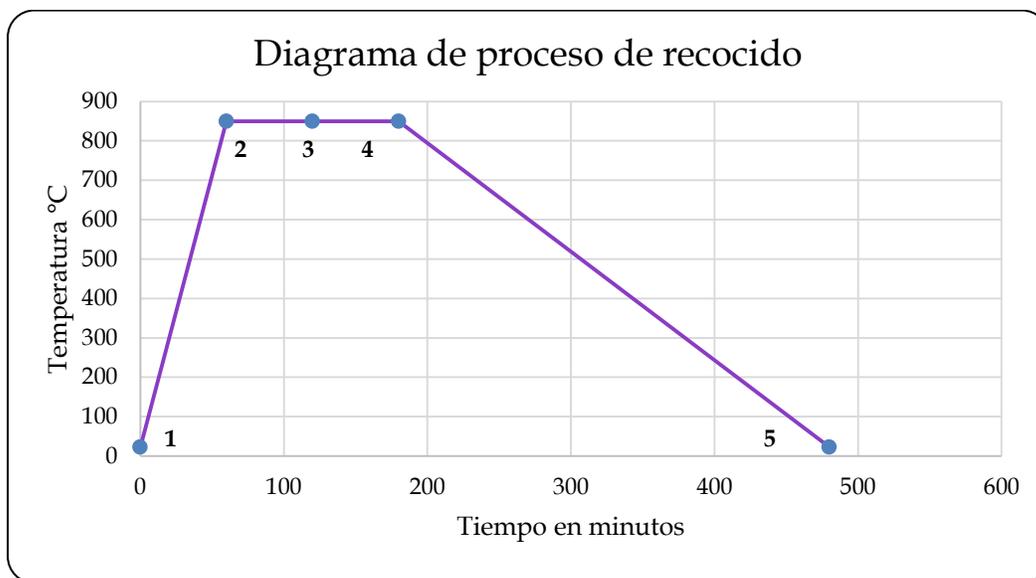


Fuente: elaboración propia.

4.2.4 Recocido de los aceros AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045

En la figura 26 se muestra el proceso de recocido. En el punto 1 se muestran las probetas a temperatura ambiente. En el punto dos se elevó la temperatura a 850 °C después de una hora. En este caso, el tiempo permanencia se muestra en el punto 4 que fueron dos horas. Este tratamiento térmico se finaliza con un enfriamiento en el horno, el cual tomó 5 horas para reducir nuevamente la temperatura a 23 °C.

Figura 26. **Proceso de recocido**



Fuente: elaboración propia.

4.3. Preparación de las probetas AISI-SAE 1036 Y AISI-SAE 1045 previo al estudio metalográfico aplicado a probetas a estudiar

El procedimiento para el análisis metalográfico conlleva una serie de pasos, los cuales son detallados a continuación.

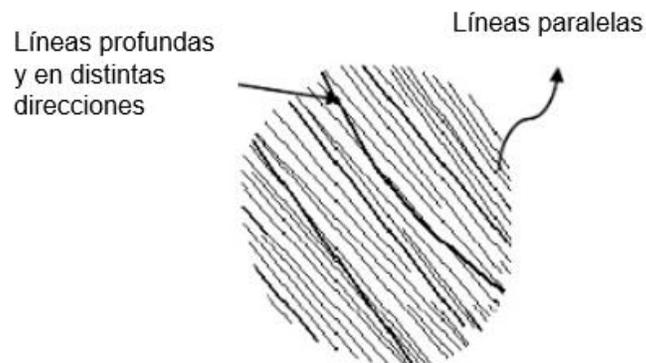
Anteriormente, se cortaron las barras de acero con una altura de aproximadamente una pulgada y se hizo desbaste para obtener una superficie plana. Posteriormente, se llevaron a cabo los tratamientos térmicos elegidos. Y como siguiente paso se prepararon las superficies de las probetas de manera que pudieran ser vistas bajo el microscopio.

A continuación, se procedió a iniciar el pulido con papel abrasivo conocido de grado 80 para el desbaste grueso. Este procedimiento se llevó a cabo hasta desaparecer las marcas del desbaste de tal manera que quedaron únicamente líneas paralelas como se muestra en la figura 29. Al llegar a este punto se procedió a utilizar lija de grano 100 girando la probeta 90° hasta desaparecer las marcas creadas al utilizar lija de grano 80 como se muestra en la figura 30.

Como siguiente paso se giró nuevamente la probeta 90° y se lijó con papel abrasivo de grano 400 repitiendo el mismo procedimiento de desaparecer las marcas creadas por la lija de grado 100. Durante este proceso se vertió agua constantemente para no modificar la estructura por las altas temperaturas generadas por frotar el acero contra la lija. De este mismo modo se procedió a utilizar lija de grado 600, 1 000, 1 200, 1 500, 2 000 y por último 2 500. Una vez utilizada la lija de grado 2 500 y haber obtenido casi un espejo se procedió al último paso el cual requirió el ensamblaje de una pulidora la cual se muestra en la figura 30.

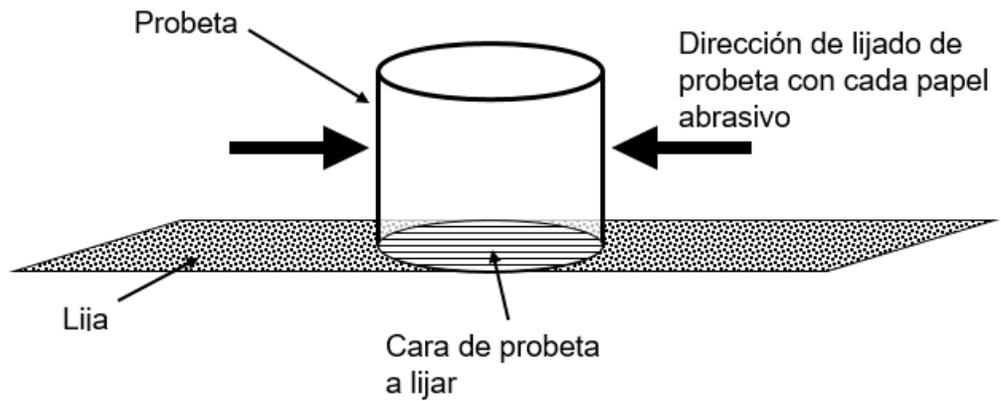
Una vez construida la pulidora se finalizó la preparación de las probetas puliendo estas con Aluminium Oxyde Powder conocido como alúmina marca presi proveniente de Francia. Este óxido de aluminio era de 0.04μ lo cual dado el grano fino proporciona una superficie sin marcas semejante a un espejo. Para llevar a cabo este proceso se agregaron en una botella tres tazas de agua por tres cucharadas de alúmina en polvo. Al tener la pulidora encendida a 800 RPM revoluciones se colocó la cara a pulir sobre una mesa ya preparada y forrada con pana y se comenzó a verter la solución de alúmina mientras la probeta hacía contacto con la pana. Al girar la pulidora y desde luego al girar la mesa forrada de pana se hizo el ultimo pulido. Este procedimiento se llevó a cabo por una hora vertiendo constantemente la solución de alúmina y agua. Al terminar este proceso se logró obtener la superficie hasta pulido espejo.

Figura 27. **Representación visual de lo obtenido después del desbaste en las probetas**



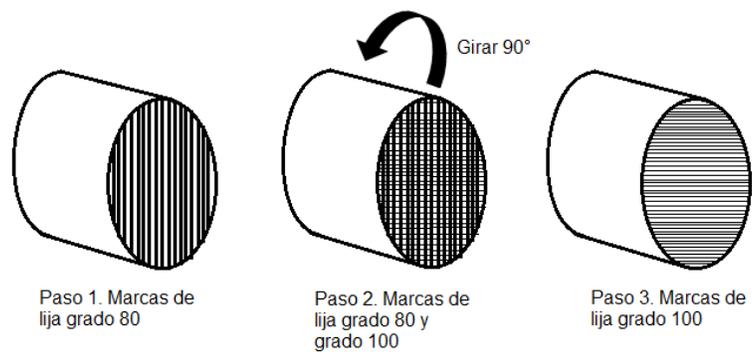
Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Método correcto para lijar las probetas**



Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Muestra de la superficie al cambiar de grado de lija**



Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Ensamblaje de pulidora con mesa para pulir probetas con óxido de aluminio**



Fuente: elaboración propia.

4.4. Ensayo de dureza

Se llevaron a cabo las mediciones de dureza con el medidor PCE-2500 el cual se muestra en la figura 32. Este medidor proporciona las durezas en medición Leeb el cual fue explicado anteriormente. A continuación, se muestra una tabla correspondiente a las durezas de las probetas obtenidas con el medidor PCE-2500 tomadas de una media de tres pruebas por probeta. Se muestran las conversiones de Leeb a HB y HRC según necesario.

Tabla XIII. Durezas obtenidas del acero AISI-SAE 1036

Medición de dureza con PCE-2500				
Tratamiento	Acero AISI-SAE 1036			
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio
Estado de suministro	171 HB	173 HB	171 HB	171.6 HB
Recocido	129 HB	130 HB	128 HB	129 HB
Normalizado	178 HB	174 HB	172 HB	174.6 HB
Temple enfriado en agua	530 HB	553 HB	516 HB	533 HB
	52,9 HRC	54,8 HRC	52,3 HRC	53,3 HRC
Temple enfriado en agua con revenido de dos horas a 400 °C	260 HB	261 HB	260 HB	260 HB
	25,2 HRC	22,2 HRC	25,7 HRC	24,3 HRC
Temple enfriado en agua con revenido de dos horas a 600 °C	151 HB	155 HB	155 HB	163,6 HB
	14 HRC	13 HRC	13 HRC	13,3 HRC
Temple enfriado en aceite	471 HB	497 HB	468 HB	478,6 HB
	46,1 HRC	49,5 HRC	47.8 HRC	47,8 HRC
Temple enfriado en aceite con revenido de dos horas a 400 °C	250 HB	265 HB	250 HB	255 HB
	23,2 HRC	26,4 HRC	22,4 HRC	24 HRC
Temple enfriado en aceite con revenido de dos horas a 600 °C	149 HB	147 HB	147 HB	148,3 HB
	13,6 HRC	14,2 HRC	13,4 HRC	13,7 HRC

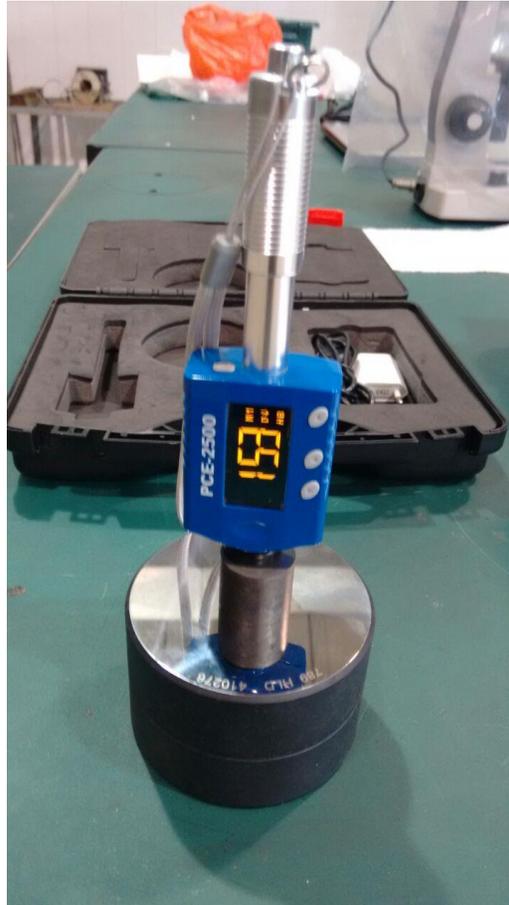
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. Durezas obtenidas del acero AISI-SAE 1045

Medición de dureza con PCE-2500				
Tratamiento	Acero AISI-SAE 1045			
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio
Estado de suministro	133 HB	138 HB	128 HB	133 HB
Recocido	103 HB	99 HB	99 HB	100.3 HB
Normalizado	117 HB	107 HB	120 HB	114.6
Temple enfriado en agua	487 HB	530 HB	497 HB	504,6 HB
	54,3 HRC	54,2 HRC	59,7 HRC	56 HRC
Temple enfriado en agua con revenido de dos horas a 400 °C	195 HB	198 HB	222 HB	205 HB
	12,7 HRC	16,9 HRC	14,1 HRC	14,5 HRC
Temple enfriado en agua con revenido de dos horas a 600 °C	137 HB	145 HB	142 HB	141,3
	12 HB	13 HB	13 HB	12.6 HB
Temple enfriado en aceite	422 HB	452 HB	419 HB	431 HB
	46,2 HRC	45,6 HRC	45,5 HRC	45,7 HRC
Temple enfriado en aceite con revenido de dos horas a 400 °C	188 HB	186 HB	201 HB	191,6 HB
	10,8 HRC	14,7 HRC	13,6 HRC	13,1 HRC
Temple enfriado en aceite con revenido de dos horas a 600 °C	129 HB	145 HB	146 HB	140 HB
	8,8 HRC	8,3 HRC	9,8 HRC	8,9 HRC

Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Medidor de dureza PCE-2500**



Fuente: elaboración propia.

Figura 32. **Medición de durezas de probetas**



Fuente: elaboración propia.

4.5. Análisis metalográfico

A continuación, se detallan los resultados y el análisis de las micrografías tomadas a las distintas probetas con distintos tratamientos térmicos aplicados.

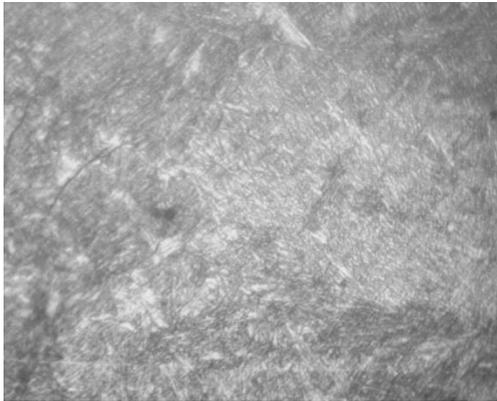
4.5.1 Temple con enfriamiento en agua de los aceros AISI-SAE 1036 Y AISI-SAE 1045

En la figura 33 se muestran los resultados de las micrografías de los aceros sometidos a temple enfriados en agua. Se observa una estructura de martensita que muestra una característica acicular. Se observa que la estructura martensítica es más densa en el caso del acero AISI-SAE 1045.

Figura 33. **Imágenes comparativas de temple enfriado en agua**

AISI-SAE 1036

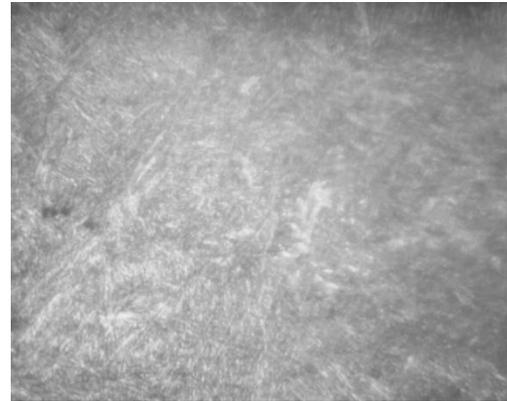
1000x



a)

AISI-SAE 1045

1000x



b)

Fuente: elaboración propia.

4.5.2 Temple con enfriamiento por agua con revenido de dos horas a 400 °C

En la figura 34 se muestran los resultados de las micrografías tomadas a los aceros sometidos a temple enfriado en agua con un posterior revenido de dos horas a 400 °C. El aspecto acicular de la estructura martensítica disminuyó en comparación a las probetas templadas. Se muestran unas estructuras con partículas más redondeadas, sin embargo, aún no globulares pero con tendencia hacia esa característica. La diferencia en el contenido de carbono entre el acero AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045 no es mucho, por lo tanto en este caso no se aprecia la diferencia entre ambas estructuras.

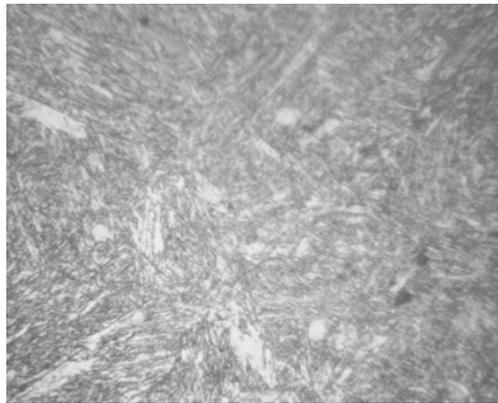
Figura 34. **Micrografías comparativas de temple enfriado en agua con revenido de dos horas a 400 °C**

AISI-SAE 1036
1000x



a)

AISI-SAE 1045
1000x



b)

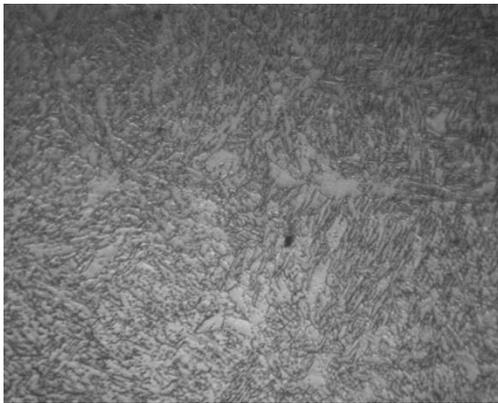
Fuente: elaboración propia.

4.5.4 Temple con enfriamiento en agua de los aceros AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045 con posterior revenido de dos horas a 600 °C

En la figura 35 se muestran los resultados de las micrografías de los aceros sometidos al tratamiento térmico de temple con enfriamiento en agua con un posterior revenido de dos horas a 600 °C. Las partículas se notan más globulares. En conclusión, puede observarse que durante el revenido a mayor temperatura se logra un cambio mayor de la martensita de forma acicular hacia la estructura de bordes más redondeados por el efecto de este tratamiento térmico.

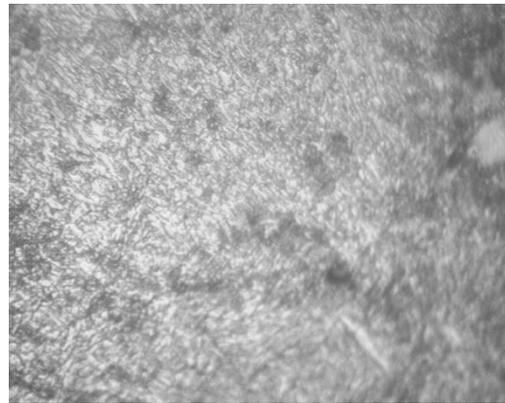
Figura 35. **Micrografías comparativas de temple enfriado en agua con posterior revenido de dos horas a 600 °C**

AISI-SAE 1036
1000x



a)

AISI-SAE 1045
1000x



b)

Fuente: elaboración propia.

4.5.5 Temple con enfriamiento en aceite de los aceros AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045

En la figura 36 se muestran los resultados obtenidos de las micrografías de los aceros sometidos al tratamiento térmico de temple enfriado en aceite. Se muestra una estructura martensítica que revela un aspecto acicular, dentro de una matriz austenítica que se muestra oscura en las micrografías.

Figura 36. **Micrografías comparativas, temple enfriado en aceite**

AISI-SAE 1036

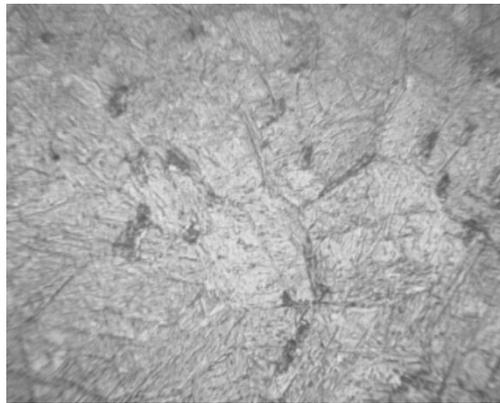
400x



a)

AISI-SAE 1045

1000x



b)

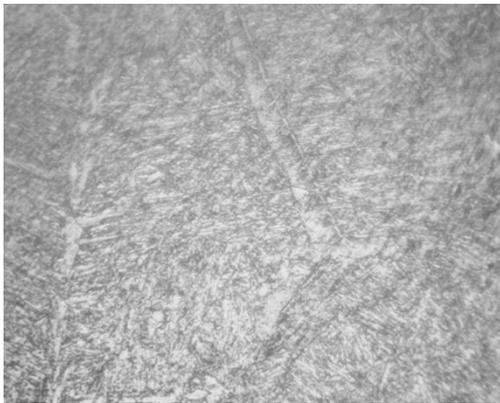
Fuente: elaboración propia.

4.5.6 Temple con enfriamiento en aceite y posterior revenido de dos horas a 400 °C de los aceros AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045

En la figura 37 se muestran los resultados de las micrografías de los aceros sometidos a un temple enfriado en aceite con un posterior revenido de dos horas a 400 °C. La apariencia acicular disminuye con el tratamiento térmico de revenido. Las partículas se asemejan a formas más redondeadas con tendencia a característica globular. En el acero AISI-SAE 1036, en el fondo puede apreciarse la matriz de austenita que no logro transformarse en su totalidad a la estructura de martensita.

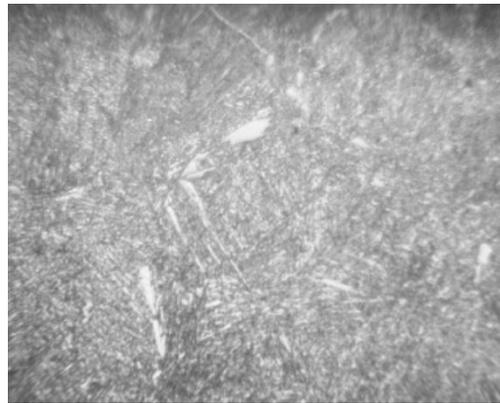
Figura 37. **Micrografías comparativas de temple enfriado en aceite con posterior revenido de dos horas a 400 °C**

AISI-SAE 1036
1000x



a)

AISI-SAE 1045
1000x



b)

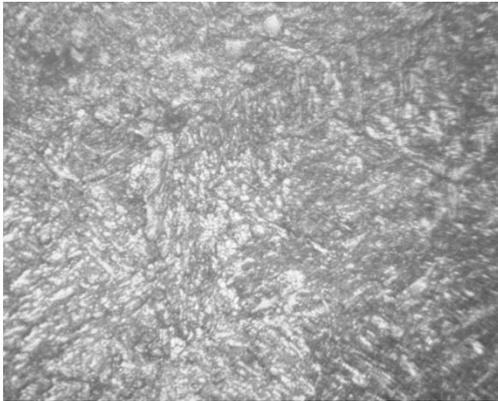
Fuente: elaboración propia.

4.5.7 Temple con enfriamiento en aceite y posterior revenido de dos horas a 600 °C de los aceros AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045

En la figura 38 se muestran los resultados de las micrografías de los aceros sometidos a un temple enfriado en aceite con un posterior revenido de dos horas a 600 °C. Se nota también que la estructura martensítica muestra el redondeo de los bordes igual que en los casos anteriores.

Figura 38. **Micrografías comparativas de temple enfriado en aceite con posterior revenido de dos horas a 600°C**

AISI-SAE 1036
1000x



a)

AISI-SAE 1045
1000x



b)

Fuente: elaboración propia.

4.5.8 Normalizado de los aceros AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045

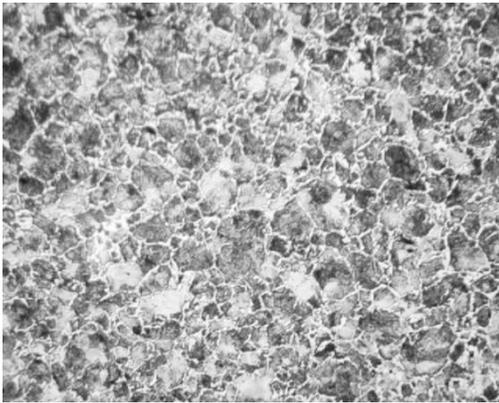
En las figuras 39, 40 y 41 se muestran las micrografías del tratamiento térmico normalizado aplicado a las probetas de acero AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045. La ferrita en ciertos puntos se muestra con tendencia acicular en los límites de la red conocida como estructura Widmanstätten que se muestra en la figura 40 a). La estructura perlítica, la cual está constituida de láminas de ferrita y cementita, se muestra más fina. Un normalizado de mayor tiempo eliminaría esta estructura. Se muestra la matriz de la red en las micrografías del acero AISI-SAE 1036.

La tendencia de la ferrita pura al acercarse a la composición eutéctica desaparece aumentando la cantidad de perlita hasta llegar a la composición

eutectoide la cual es totalmente perlítica por lo que las micrografías de AISI-SAE 1045 muestran una mayor densidad de perlita dado el mayor contenido de carbono. Por este mismo principio, las estructuras de contorno de ferrita desaparecen en las micrografías del acero AISI-SAE 1045.

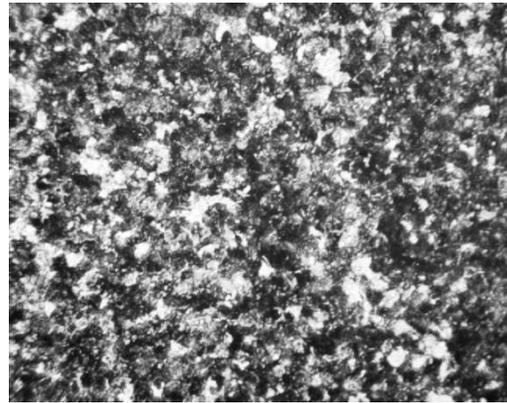
Figura 39. **Comparación de micrografías de normalizado 100x**

AISI-SAE 1036
100x



a)

AISI-SAE 1045
100x



b)

Fuente: elaboración propia.

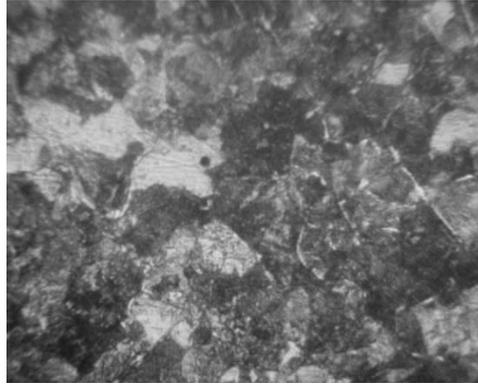
Figura 40. **Comparación de micrografías de normalizado 400x**

AISI-SAE 1036
400x



a)

AISI-SAE 1045
400x

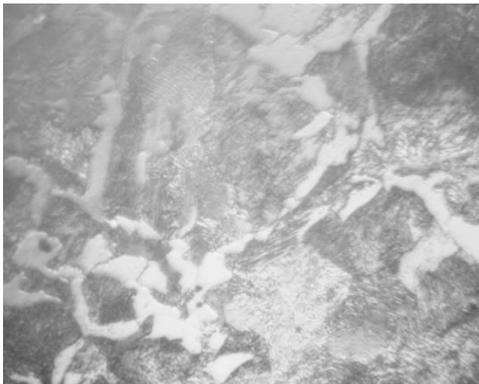


b)

Fuente: elaboración propia.

Figura 41. **Comparación de micrografías de normalizado 1000x**

AISI-SAE 1036
1000x



a)

AISI-SAE 1045
1000x



b)

Fuente: elaboración propia.

4.5.9 Recocido de los aceros AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045

En las figuras 42, 43 y 44 se muestran las micrografías del tratamiento térmico de recocido aplicado a las probetas de aceros AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045. Se muestra la ferrita en forma de granos blancos formando una red redondeando los granos de perlita que se muestran oscuros.

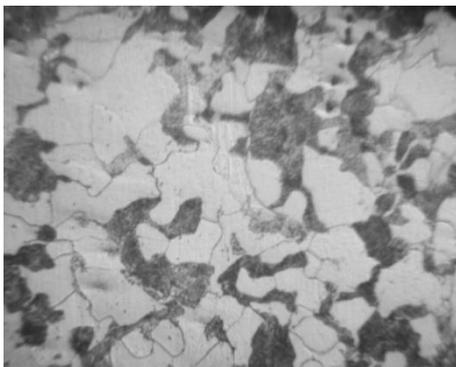
En la figura 43 b) se muestra claramente en aumento de 1000x la estructura perlítica laminar.

El acero AISI-SAE 1045 se acerca más al punto eutectoide que corresponde a 0,80 % de carbono por lo cual muestra una mayor densidad de perlita en comparación al acero AISI-SAE 1036.

Figura 42. **Comparación de micrografías de recocido 400x**

AISI-SAE 1036

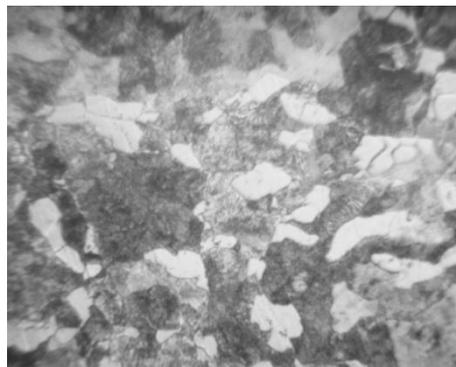
400x



a)

AISI-SAE 1045

400x



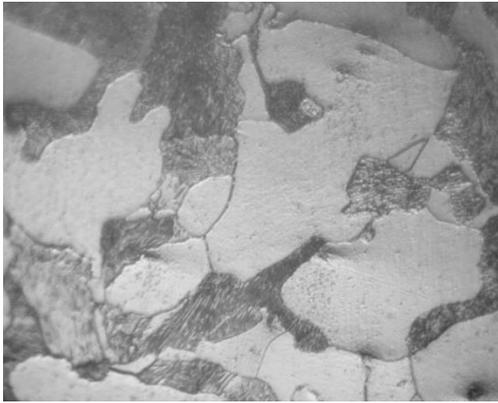
b)

Fuente: elaboración propia.

Figura 43. **Comparación de micrografías de recocido de probetas de acero AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045 a 1000x de aumento**

AISI-SAE 1036

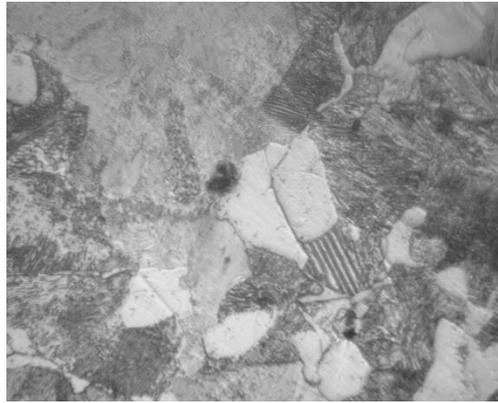
1000x



a)

AISI-SAE 1045

1000x



b)

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos por los diferentes tratamientos térmicos aplicados a las probetas de los aceros AISI-SAE 1036 y AISI-SAE 1045 se demuestra lo siguiente:

1. Que el contenido de carbono de los aceros ensayados, influye directamente en las características metalográficas y los resultados de dureza de los mismos.
2. Los resultados muestran, en estado de suministro, mayor dureza en el acero AISI-SAE 1036 y menor dureza en el acero AISI-SAE 1045. Esto quizá se deba en primer lugar a la mayor cantidad de Mn contenido en el acero AISI-SAE 1036.
3. Se observa una considerable disminución en dureza en ambos tipos de acero después de la aplicación de los procesos de recocido.
4. En el caso del normalizado, se observa claramente una total uniformidad de las estructuras cristalinas, después del tratamiento, mientras, que las propiedades dureza permanecen similares a las manifestadas por las probetas en estado de suministro.
5. Los resultados, en el caso del temple, muestran una diferencia entre el enfriado en agua y el enfriado en aceite. El enfriado en agua es un enfriamiento más brusco que el enfriado en aceite, mostrando; por

consiguiente, que en el primer caso, las durezas son más elevadas y la martensita se muestra con mayor densidad.

6. Las durezas obtenidas de las probetas después del temple, con posterior revenido muestran una disminución drástica de durezas obtenidas y se ve claramente la disminución entre un revenido de dos horas a 400 °C y dos horas a 600 °C lo cual indica que a mayor tiempo de revenido se obtendrá una menor dureza.
7. Dentro de los resultados del recocido, obtenidos de las micrografías de las probetas, se concluye que debido a que el acero AISI-SAE 1045 se acerca más al punto eutectoide, muestra una mayor densidad de perlita que la correspondiente al acero 1036.
8. Las micrografías del normalizado muestran en algunos puntos la estructura Widmanstätten, la cual consiste en una tendencia acicular de la ferrita en los límites de su red.
9. Así mismo, al acercarse a composición eutectoide la cual está compuesta en su totalidad de perlita, la ferrita pura tiende a desaparecer como se muestra en las micrografías del acero AISI-SAE 1045 donde desaparecen los contornos de ferrita.
10. Los revenidos de dos horas a 400 °C mostraron una tendencia similar para los aceros templados enfriados en aceite y enfriados en agua, consistentes en una disminución de la estructura acicular de la martensita; así mismo, las micrografías de los revenidos de dos horas a 600 °C mostraron unas estructuras con tendencia globular, que es lo esperado con revenidos más prolongados. Esto coincide con que por

medio de la aplicación del revenido, disminuye la dureza del temple, en función del alivio de las tensiones residuales producidas durante dichos tratamientos térmicos.

RECOMENDACIONES

1. Continuar con las investigaciones sobre procesos de tratamientos térmicos de diferentes tipos de acero existentes y/o utilizados en el mercado nacional y su relación con las estructuras metalográficas resultantes y las propiedades mecánicas de diferentes tipos.
2. Realizar los mismos tipos de ensayos, es decir, relaciones de macro y microestructuras, con sus propiedades mecánicas de diferentes tipos de fundiciones de hierro empleados en el país, principalmente, de las fundiciones grises fabricadas artesanalmente.
3. Enfocar las investigaciones que se realicen en aspectos y temas de beneficio nacional relacionando los conceptos científico-técnicos con resultados prácticos.

BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILAR RIVAS, Roberto. *Introducción a la metalurgia*. Guatemala: Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas, Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela de Ingeniería Mecánica, 2012. 192 p.
2. AGUILAR RIVAS, Roberto. *Tratamientos térmicos de los aceros*. Guatemala: Proyecto de Investigaciones, FIUSAC, 2012. 141 p.
3. APRAIZ BARRERIRO José. *Tratamientos térmicos de los aceros*. España: Dossat, 1984. 741 p.
4. American Society for Testing and Materials. *A615 standard specification for deformed and plain carbon-steel bars for concrete reinforcement*. Estados Unidos: ASTM International, 2005. 8 p.
5. AVNER, Sydney. *Introducción a la metalurgia física*. Estados Unidos: McGraw-Hill, 1988. 603 p.
6. BARRET, Charles S. *Estructura de los metales*. España: Aguilar, 1967. 838 p.
7. BERNARD, Michel P. *Metalurgia general*. España: Hispano Europea, 1982. 673 p.

8. CHALMERS, Bruce, *Physical metallurgy*. Estados Unidos: J. Wiley and Sons, 1959. 468 p.
9. GUY, Albert. *Metalurgia física para ingenieros*. Estados Unidos: Addison Wesley Publishing, 1965. 348 p.
10. HIGGINS, Raymond. *Ingeniería metalúrgica*. México: Continental, 1981. 469 p.
11. Metals Handbook. *Heat treating. Vol. 4*. Estados Unidos: ASM International, 2005. 857 p.
12. OBREG, Erick. *Machinery's handbook*. Estados Unidos: Industrial Press, 1968. 2896 p.
13. REED-HILL, Robert E. *Principios de metalurgia física*. México: CECSA, 1971. 813 p.
14. Association for Iron and Steel Engineers. *The making, shaping and treating of steel*. Estados Unidos: United States Steel Corporation, 1985. 1584 p.
15. VAN VLACK, Lawrence H. *Materiales para ingeniería*. México: Continental, 1985. 559 p.
16. ZACARÍAS GÓMEZ, Miguel Ángel. *Caracterización metalográfica y mecánica de las estructuras cristalinas obtenidas durante el proceso de cementación en aceros DIN 16CrNi4 y DIN 16MnCr5 y su relación con la dureza y tenacidad resultante en engranajes de*

dientes rectos. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica.
Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería,
2013. 191 p.

