



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

**GUÍA DE PRÁCTICAS PARA OBSERVACIÓN EN EL
MICROSCOPIO ELECTRÓNICO, EN EL LABORATORIO DE
METALOGRAFÍA**

José Miguel Barrientos García

Asesorado por el Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz

Guatemala, marzo de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**GUÍA DE PRÁCTICAS PARA OBSERVACIÓN EN EL
MICROSCOPIO ELECTRÓNICO, EN EL LABORATORIO DE
METALOGRAFÍA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

JOSÉ MIGUEL BARRIENTOS GARCÍA

ASESORADO POR EL ING. HUGO LEONEL RAMÍREZ ORTÍZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, MARZO DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Roberto Guzmán Ortiz
EXAMINADOR	Ing. Luis Alfredo Asturias Zúñiga
EXAMINADOR	Ing. Elvis José Alvarez Valdez
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

GUÍA DE PRÁCTICAS PARA OBSERVACIÓN EN EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO, EN EL LABORATORIO DE METALOGRAFÍA,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha de 29 de julio de 2008.



José Miguel Barrientos García

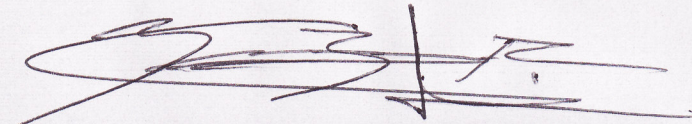
Guatemala, enero de 2009.

Ing. Julio César Campos Paiz
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Campos:

Por medio de la presente, informo a usted que he revisado el Trabajo de Graduación titulado: **“GUÍA DE PRÁCTICAS PARA OBSERVACIÓN EN EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO EN EL LABORATORIO DE METALOGRAFÍA”**, el cual fue realizado por el estudiante de ingeniería mecánica José Miguel Barrientos García, y el cual apruebo y me siento satisfecho con el contenido del mismo.

Agradeciéndole su atención a la presente, se despide de usted muy atentamente,



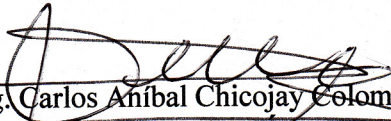
Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz
Asesor de Trabajo de Graduación
Colegiado No. 5545



FACULTAD DE INGENIERIA

El Coordinador del Área de Laboratorios de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado **GUÍA DE PRÁCTICAS PARA OBSERVACIÓN EN EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO EN EL LABORATORIO DE METALOGRAFÍA**, del estudiante **José Miguel Barrientos García**, recomienda su aprobación.

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Carlos Anibal Chicojay Coloma
Coordinador de Área

Guatemala, febrero de 2009.

/behdei



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación del Coordinador del Área de Laboratorios, al Trabajo de Graduación titulado GUÍA DE PRÁCTICAS PARA OBSERVACIÓN EN EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO EN EL LABORATORIO DE METALOGRAFÍA., del estudiante **José Miguel Barrientos García**, procede a la autorización del mismo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Julio César Campos Paiz
DIRECTOR



Guatemala, febrero de 2009

JCCP/behdei

Universidad de San Carlos
De Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG. 50.2009

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: **GUÍA DE PRÁCTICAS PARA OBSERVACIÓN EN EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO, EN EL LABORATORIO DE MATALOGRAFÍA**, presentado por el estudiante universitario **José Miguel Barrientos García**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
DECANO



Guatemala, marzo de 2009

/cc-

AGRADECIMIENTOS A:

JEHOVÁ	Por darme todas las cosas y también por tener un propósito en la vida.
MIS PADRES	Por educarme, enseñarme, quererme y darme siempre todo lo que necesito.
MIS HERMANOS Y SOBRINO	Por su compañía, cariño y ayuda.
MIS AMIGOS	Por su ayuda, compañía y apoyo en todos los momentos.
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS	Por darme los conocimientos que me servirán para mi desarrollo profesional.
INTECAP	Por brindarme la ayuda y conocimientos para la realización de este trabajo de graduación.
MI ASESOR	Por su tiempo y ayuda para la realización de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. MATERIALES	1
1.1. Estructura cristalina de los metales	1
1.1.1. Metales	1
1.1.2. Clasificación de los metales	2
1.1.3. Estructura cristalina de los metales	4
1.1.4. Redes cristalinas de los metales	5
1.2. Acero	9
1.2.1. Formas alotrópicas del hierro	9
1.2.2. Aleación hierro carbono	11
1.2.3. Diagrama hierro carbono	12
1.2.4. Microestructuras del acero	13
1.2.5. Clasificación de los aceros	19
1.2.5.1. Aceros al carbono	21
1.2.5.2. Aceros para herramienta	24
1.2.5.3. Aceros aleados	27
1.3. Hierro fundido	30
1.3.1. Definición de hierro fundido	30

1.3.2.	Tipos de hierro fundido	31
1.3.3.	Microestructuras del hierro fundido	40
1.3.4.	Propiedades mecánicas y aplicaciones de las fundiciones	42
2.	TRATAMIENTOS TÉRMICOS	45
2.1.	Conceptos generales	45
2.1.1.	Introducción	45
2.1.2.	Tipos fundamentales de tratamientos térmicos del acero	45
2.1.3.	Cuatro transformaciones principales del acero	47
2.1.4.	Etapas de un tratamiento térmico	49
2.2.	Tratamientos térmicos	52
2.2.1.	Recocido total	52
2.2.2.	Recocido en proceso	54
2.2.3.	Esferoidización	55
2.2.4.	Normalizado	57
2.2.5.	Revenido	58
2.2.6.	Ausrevenido	61
2.2.7.	Temple	62
2.2.8.	Templabilidad	65
2.3.	Tratamientos termoquímicos	65
2.3.1.	Cementación	65
2.3.2.	Nitruración	68
2.3.3.	Carbonitruración	69
2.4.	Diagrama TTT	70
3.	MICROSCOPIO ELECTRÓNICO	77
3.1.	Metalografía	77

3.2.	Microscopia electrónica	77
3.3.	Tipos de microscopio electrónico	79
3.4.	Microscopio electrónico de transmisión (MET)	82
3.4.1.	Introducción	82
3.4.2.	Cañón electrónico	84
3.4.3.	Lentes electromagnéticos	86
3.4.4.	Vacío	88
3.4.5.	La electrónica	89
3.4.6.	Preparación del espécimen	90
3.5.	Microscopio electrónico de barrido (MEB)	90
3.5.1.	Introducción	90
3.5.2.	Cañón electrónico	92
3.5.3.	Detección de electrones	93
3.5.4.	Aumento y resolución	94
3.5.5.	Procesamiento de la imagen	94
3.5.6.	Vacío	95
3.5.7.	Electrónica	95
3.5.8.	Componentes principales	96
3.5.9.	Preparación de muestras	98
4.	PRÁCTICAS DE METALOGRAFÍA	99
4.1.	Metalografía y microscopio electrónico	99
4.2.	Preparación de muestras para análisis metalográfico	101
4.3.	Observación de ferrita, ferrita + perlita y de perlita + cementita	106
4.4.	Temple y observación de martensita y bainita	109
4.5.	Revenido y observación de martensita revenida	112
4.6.	Normalizado y observación de afinamiento de grano	116
4.7.	Cementación y diferentes tipos de recocido y observación de estructura de aceros recocidos	119

4.8. Observación metalográfica de aceros aleados	123
4.9. Observación metalográfica de estructuras de hierro fundido	126
CONCLUSIONES	131
RECOMENDACIONES	133
BIBLIOGRAFÍA	135
ANEXOS	137

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Red cúbica centrada en el cuerpo	6
2	Red cúbica centrada en las caras	7
3	Red hexagonal compacta	8
4	Estructura de hierro alfa y beta	10
5	Estructura de hierro gamma	10
6	Diagrama hierro - carbono	13
7	Microestructura de la austenita (500x)	14
8	Estructura cristalina ortorrómbica	15
9	Cementita en acero SAE 52100 transformado a 810 ⁰ C (40,000x)	15
10	Microestructura de la ferrita (100x)	16
11	Microestructura de la perlita (2500x)	17
12	Microestructura de la martensita (400x)	18
13	Microestructura de bainita superior	19
14	Estructura de un acero según su porcentaje de carbono	24
15	Acero al 12% de cromo (500x) a) Recocido. b) Templado y revenido	29
16	Microestructura de un acero al 18% de cromo y 0.65% de carbono templado y revenido (500x)	29
17	Estructura de la fundición blanca (100x)	32
18	Estructura de la fundición blanca (400x)	33
19	Estructura de fundición maleable ferrítica (100x)	35
20	Estructura de fundición maleable ojo de buey (50x)	35
21	Estructura de fundición gris ferrítica (100x)	36

22	Estructura de fundición gris perlítica (100x)	37
23	Granos blancos de esteadita en fundición gris (400x)	38
24	Estructura de fundición nodular ferrítica (100x)	39
25	Matriz perlítica en fundición nodular (100x)	39
26	Microestructuras y fases del hierro fundido	41
27	Parte correspondiente al acero del diagrama Fe ₃ – Fe	46
28	Temperaturas de transformación de austenita (A ₃ y A _{cm})	50
29	Etapas de un tratamiento térmico	51
30	Etapas de tratamiento térmico de un acero bonificado	52
31	Cambios en microestructura durante el recocido	53
32	Estructura de un acero recocido con 1.3% de C (100x)	55
33	Acero de 0.8% de C con recocido de esferoidización (400x)	56
34	Intervalo de temperaturas de recocido, normalizado y temple	57
35	Estructura de un acero normalizado con 0.80% de C (400x)	58
36	Estructura de un acero revenido a 600°C con 0.35% de C (400x)	59
37	Productos de transformación de martensita en un acero eutectoide	60
38	Proceso de ausrevenido en el diagrama TTT	62
39	Intervalo de temple en el diagrama Fe-C	63
40	Estructura de un acero templado con 0.35% de C (400x)	64
41	Regímenes de tratamiento térmico de las piezas cementadas	67
42	Curvas TTT para un acero al carbono eutectoide	70
43	Representación diagramática del método usado para describir las curvas TTT	73
44	Representación de tratamientos térmicos en diagrama TTT	74
45	Microscopio de Van Leeuwenhoek	78
46	Microscopio electrónico de transmisión	80
47	Microscopio electrónico de barrido	81

48	Comparación de trayectoria de luz de un microscopio óptico con la de un microscopio electrónico de transmisión	83
49	Esquema del cañón de electrones de un MET	85
50	Sección transversal de una lente electromagnética	87
51	Diagrama esquemático de un MEB mostrando la columna y cómo se forma la imagen en el monitor	92
52	Diagrama de los componentes de un microscopio electrónico de barrido	96
53	Columna del microscopio electrónico de barrido	100
54	Realización del desbaste de una probeta	103
55	Estructuras del acero con diferentes contenidos de C	107
56	Estructuras de aceros con distintos porcentajes de C	108
57	Acero 1018 templado visto a 400x. Estructura bainítica	111
58	Acero 1095 templado visto a 1000x atacado con Picral. Estructura martensítica	111
59	Acero con alto carbono templado y revenido. a) 300°C b) 595°C	114
60	Estructuras de martensita revenida	115
61	Temperaturas de normalización	117
62	Acero con 0.35% de C normalizado a 870°C (100x)	118
63	Acero con 0.95% de C con recocido total a 970° C (400x)	122
64	Microestructura esferoidita en matriz de ferrita	122
65	Tipos de inclusiones de carbono y matrices en las fundiciones	128
66	Fundición dúctil con matriz perlítica vista en 400x	129
67	Fundición gris con matriz perlítica vista en 400x	129
68	Fundición gris importada. 500x	138
69	Fundición gris hecha en Guatemala. 200x	138
70	Acero 1045 templado y revenido a 250°C. 500x	139
71	Acero SAE O1 templado, revenido y recocido globular. 500x	139
72	Acero SAE D3 templado y revenido a 300°C. 500x	140

73	Estructuras de martensita revenida a diferentes temperaturas en acero con 0.75% de C. 15000x	140
74	Interfaces de cementita escalonada (20,000x)	141
75	Diagrama hierro – carbono completo	142

TABLAS

I	Clasificación de los metales	3
II	Características de los sistemas cristalinos	5
III	Estructuras cristalinas de los metales	8
IV	Clasificación de aceros según normas AISI y SAE	20
V	Clasificación de los aceros al carbono	22
VI	Especificaciones de aceros al carbono	23
VII	Clasificación de los aceros para herramienta (AISI)	26
VIII	Propiedades requeridas en los aceros para herramienta	27
IX	Propiedades de fundición gris Versa-Bar V2	42
X	Propiedades de fundición nodular Versa-bar V4	42
XI	Traducción de los términos mostrados en la Figura 44	75
XII	Estructuras del acero después del revenido	114
XIII	Probetas de acero aleado para práctica 4.8	124
XIV	Reactivo químico para fundiciones	137
XV	Reactivos químicos para aceros al carbono y aleados	137

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
%	Porcentaje
$^{\circ}\text{C}$	Temperatura en grados Celsius
α	Hierro alfa o ferrita
γ	Hierro gamma o austenita
β	Hierro beta
δ	Hierro delta
Fe	Hierro puro
C	Carbono
Fe_3C	Carburo de hierro o cementita
HRC	Dureza Rockwell C
Fe_3P	Fosfuro de hierro
m	Metros
mm	Milímetros
Å	Angstrom = $1 * 10^{-10}$ m
Psi	Libras sobre pulgada cuadrada
μ	Micrómetro = 0.001 milímetros

GLOSARIO

ALOTROPÍA:	Propiedad que tienen ciertos elementos químicos de presentarse bajo estructuras moleculares diferentes, como el carbono, que lo hace como grafito o diamante. Sus diferentes estructuras moleculares deben presentarse en el mismo estado físico.
AUSREVENIDO:	Tratamiento térmico isotérmico mediante el cual la austenita se transforma en bainita.
AUSTENITIZADO:	Calentamiento de un acero o hierro fundido a una temperatura donde puede transformarse en austenita homogénea.
AUSTENITA RETENIDA:	Austenita que no es posible transformar en martensita durante el templado debido a la expansión volumétrica asociada a la reacción.
CARBURIZADO:	Conjunto de técnicas de endurecimiento superficial, por las cuales el carbono se difunde en el acero.
CERIO:	Elemento químico que se encuentra dentro del grupo de los lantánidos.

ESFEROIDITA:	Microconstituyente que contiene cementita esferoidal gruesa en una matriz de ferrita, permitiendo excelentes características de maquinabilidad en los aceros de alto carbono.
EUTÉCTICO:	Reacción de tres fases en la cual una fase líquida se transforma en dos fases sólidas.
EUTECTOIDE:	Reacción de tres fases en la que una fase sólida se transforma en dos fases sólidas diferentes.
ESTEADITA:	Constituyente de naturaleza eutéctica; duro, frágil y de bajo punto de fusión (960°C), que aparece en las fundiciones de alto contenido de carbono en fósforo (más de 0.15% de fósforo).
PRUEBA JOMINY:	Prueba utilizada para evaluar la templabilidad. Una barra de acero austenitizada se templea en un extremo con un chorro de agua, produciendo un intervalo de velocidades de enfriamiento a lo largo de la barra.
TEMPLABILIDAD:	Facilidad con la que un acero puede ser templado para formar martensita. Los aceros con alta templabilidad forman martensita aún con enfriamientos lentos.

RESUMEN

Este trabajo de graduación consiste en elaborar una guía de prácticas para la observación en el microscopio electrónico, en el laboratorio de metalografía. Esta guía de prácticas se centrará en la observación de todas las estructuras de los aceros y hierro fundido.

Se describe como están compuestos cristalinamente los metales, en especial los aceros. Seguidamente se explicarán las microestructuras que se pueden encontrar en los aceros al carbono según el diagrama hierro – carbono; además de conocer la clasificación de los aceros. Es importante, también, conocer la clasificación de las fundiciones y las estructuras que podemos encontrar en cada una de ellas.

Se desarrollarán los tratamientos térmicos más importantes que existen, porque de esa manera comprenderemos mejor como la microestructura del acero cambia después de haber sufrido un tratamiento térmico, y que es lo que esperamos observar dentro de ese acero.

Finalmente, el capítulo tres se dedica a la microscopia electrónica y los dos tipos de microscopios electrónicos que existen. Todos estos conocimientos los aplicaremos en las prácticas de metalografía, las cuales se encuentran en el último capítulo, que tienen como objetivo principal ayudar al estudiante de ingeniería a comprender mejor la metalografía y entender la importancia que tiene esta última en el estudio de los aceros y fundiciones, principalmente.

OBJETIVOS

GENERAL

Elaborar una guía de prácticas para la observación en el microscopio electrónico, en el laboratorio de metalografía.

ESPECÍFICOS:

1. Conocer las microestructuras de los aceros y las microestructuras de las fundiciones mostradas en el diagrama hierro - carbono.
2. Conocer los principales tratamientos térmicos para el acero, y entender como estos afectan o cambian la estructura de los aceros.
3. Lograr observar, mediante el microscopio electrónico, todas las microestructuras que se pueden presentar en los aceros, tanto tratados térmicamente como sin tratar.
4. Observar en el microscopio electrónico las estructuras de las fundiciones que se pueden encontrar en el mercado de Guatemala.

INTRODUCCIÓN

La metalografía es la ciencia que se encarga del estudio microscópico de los metales y aleaciones. La metalografía ayuda, tanto al ingeniero como al estudiante de ingeniería a comprender mejor el comportamiento físico y mecánico de los metales, especialmente del acero.

La metalografía basa su estudio en la estructura microscópica de los metales. Esta nos ayuda a ver microscópicamente como está compuesto un acero o una fundición, además de ayudarnos a saber que le sucederá a este después de sufrir algún trabajo mecánico o tratamiento térmico.

Para observar todos estos cambios, la metalografía se apoya en una herramienta muy útil que nos ayuda a comprender estos cambios; esta herramienta es el microscopio. Hoy en día podemos encontrar en el mercado microscopios con gran resolución y aumento, estos son los microscopios electrónicos. Debido a la ayuda de electrones, y no de luz, estos pueden aumentar su resolución grandemente, y nos permiten ver de mejor forma el espécimen que estamos analizando, que para nuestro caso serían los aceros y fundiciones.

Debido a esto, se desarrollará un guía de prácticas que ayudará al estudiante de ingeniería a obtener el máximo beneficio de este instrumento o equipo, y a la vez, entender mejor la metalografía y comprender mejor el comportamiento de los aceros.

1. MATERIALES

1.1 Estructura cristalina de los metales

1.1.1 Metales

Metal se denomina a los elementos químicos caracterizados por ser buenos conductores de calor y electricidad, poseer alta densidad, y ser sólidos a temperaturas normales.

La ciencia de los materiales define un metal como un material en el que existe un solape entre la banda de valencia y la banda de conducción en su estructura electrónica (enlace metálico). Esto le da la capacidad de conducir fácilmente calor y electricidad, y generalmente la capacidad de reflejar la luz, lo que le da su peculiar brillo.

El concepto de metal refiere tanto a elementos puros, así como aleaciones con características metálicas, como el acero y el bronce. Los metales comprenden la mayor parte de la tabla periódica de los elementos y se separan de los no metales por una línea diagonal entre el boro y el polonio. En comparación con los no metales tienen baja electronegatividad y baja energía de ionización.

Son particularmente útiles en aplicaciones estructurales o de carga. Aunque en ocasiones se utilizan metales puros, las combinaciones de metales conocidas como aleaciones proporcionan mejoría en alguna propiedad particularmente deseable o permiten una mejor combinación de propiedades.

1.1.2 Clasificación de los metales

Los metales desde el punto de vista tecnológico y de sus aplicaciones en ingeniería, se pueden clasificar en:

- **Metales ferrosos:**
 - a. Aceros
 - b. Fundiciones
- **Metales no ferrosos:**
 - a. Aluminio y sus aleaciones
 - b. Cobre y sus aleaciones
 - c. Zinc
 - d. Estaño
 - e. Titanio

Los metales ferrosos se subdividen en:

- a. Metales del grupo del hierro: hierro, cobalto, níquel y manganeso. Aditivos en aleaciones del hierro. Propiedades parecidas a los aceros de alta aleación.
- b. Metales refractarios o de alto punto de fusión: metales ferrosos con punto de fusión más alto que el hierro.
- c. Metales del grupo del uranio: se emplean en aleaciones destinadas a la ingeniería nuclear.

Los metales no ferrosos se subdividen en:

1.1.3 Estructura cristalina de los metales

Como los átomos tienden a adoptar posiciones relativamente fijas, esto da lugar a la formación de cristales en estado sólido. Los átomos oscilan alrededor de puntos fijos y están en equilibrio dinámico, más que fijos estáticamente. La red tridimensional de líneas imaginarias que conecta los átomos se llama red espacial, en tanto que la unidad más pequeña que tiene la simetría total del cristal se llama celda unitaria.

Sólo hay catorce tipos posibles de redes espaciales, y pueden clasificarse en siete sistemas cristalinos; los cuales están enumerados en la Tabla II.

Afortunadamente, la mayoría de los metales importantes se cristalizan ya sea en los sistemas cúbicos o en los hexagonales, y sólo tres tipos de redes espaciales se encuentran comúnmente: la BCC (cúbica centrada en el cuerpo), la FCC (cúbica centrada en las caras) y la HC (hexagonal compacta).

Tabla II. Características de los sistemas cristalinos

Estructura	Ejes	Ángulos entre ejes
Cúbica	$a = b = c$	Todos los ángulos de 90°
Tetragonal	$a = b \neq c$	Todos los ángulos de 90°
Ortorrómbica	$a \neq b \neq c$	Todos los ángulos de 90°
Hexagonal	$a = b \neq c$	Dos ángulos de 90° , un ángulo de 120°
Romboédrica	$a = b = c$	Todos los ángulos son iguales y ninguno es de 90°
Monoclínica	$a \neq b \neq c$	Dos ángulos de 90° Un ángulo β distinto a 90°
Triclínica	$a \neq b \neq c$	Todos los ángulos son distintos y ninguno es de 90°

Fuente: Donald R. Askeland. **La ciencia e ingeniería de los materiales**. Pág. 36

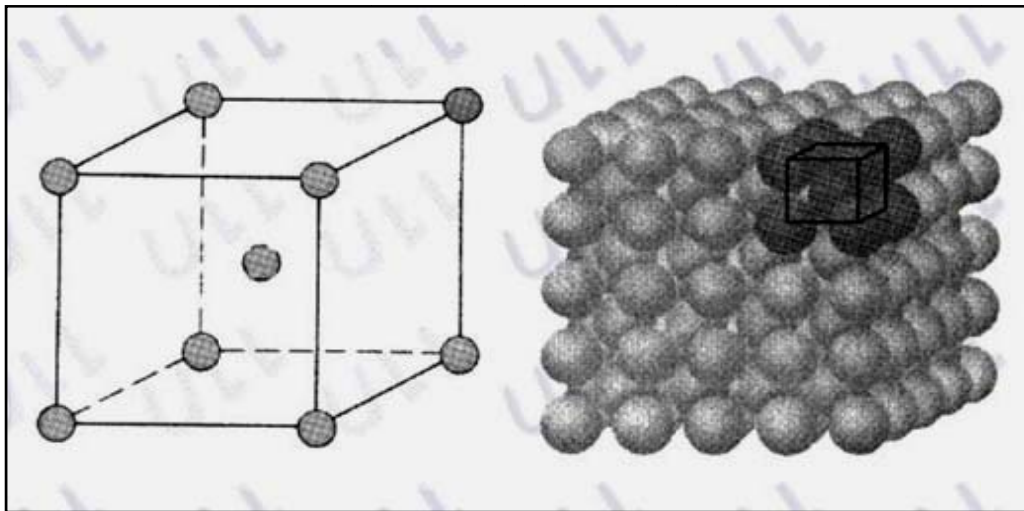
1.1.4 Redes cristalinas de los metales

Como se mencionó anteriormente, los metales se pueden agrupar en los sistemas cristalinos siguientes:

- a. **Cúbica centrada en el cuerpo BCC:** Si los átomos se representan como esferas, el átomo del centro toca a cada átomo de las esquinas, pero éstos no se tocan entre sí. Como cada átomo de las esquinas lo comparten ocho cubos adyacentes y el átomo del centro no puede compartirlo ningún otro cubo, la celda unitaria de la estructura BCC contiene:

$$\begin{aligned}
 &8 \text{ átomos en las esquinas} \times 1/8 = 1 \text{ átomo} \\
 &1 \text{ átomo central} = \underline{1 \text{ átomo}} \\
 &\text{Total} = 2 \text{ átomos}
 \end{aligned}$$

Figura 1. Red cúbica centrada en el cuerpo



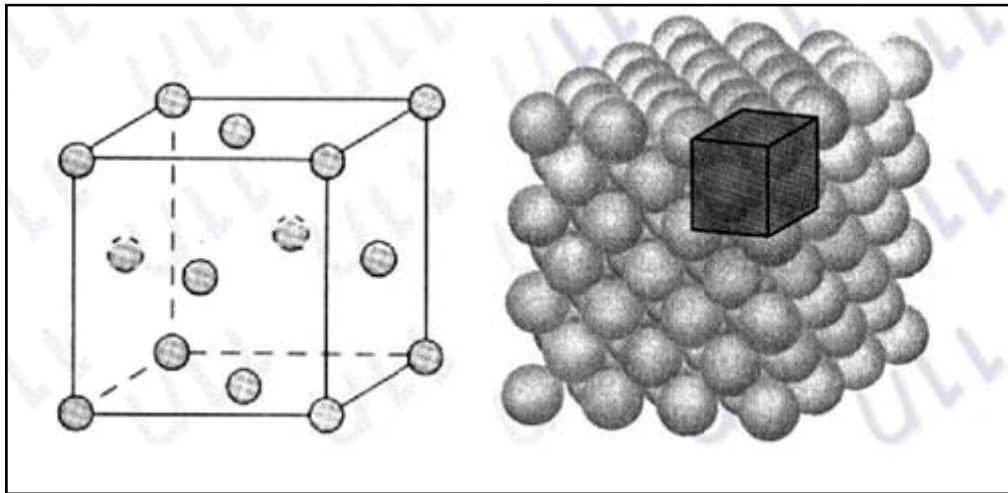
Fuente: <http://webpages.ull.es/users/mlaz/TEMARIO/T1METALES/Diapositiva18.JPG>

- b. **Cúbica centrada en las caras FCC:** Además de haber un átomo en cada esquina del cubo, hay uno en el centro de cada cara, pero ninguno en el centro del cubo. Cada átomo de las caras toca los átomos de las esquinas más próximas. Como cada átomo de las esquinas lo comparten ocho cubos adyacentes y cada átomo de las caras es compartido sólo por un cubo adyacente la celda unitaria contiene:

$$\begin{aligned}
 &8 \text{ átomos en las esquinas} \times 1/8 = 1 \text{ átomo} \\
 &6 \text{ átomos centrados en las caras} \times 1/2 = \underline{3 \text{ átomos}} \\
 &\text{Total} = 4 \text{ átomos}
 \end{aligned}$$

Esto indica que la estructura FCC está más densamente empaquetada que la BCC.

Figura 2. Red cúbica centrada en las caras



Fuente: webpages.ull.es/users/mlaz/TEMARIO/T1METALES/Diapositiva19.JPG

- c. **Hexagonal compacta:** La figura usual de la red hexagonal compacta muestra dos planos basales en forma de hexágonos regulares, con un átomo tanto en cada esquina del hexágono como en el centro. Además, hay tres átomos en forma de triángulo a la mitad de la distancia entre los dos planos basales. En total esta celda unitaria contiene:

$$\begin{aligned} 12 \text{ átomos en las esquinas} \times 1/6 &= 1 \text{ átomo} \\ 2 \text{ átomos centrados en las caras superior e inferior} \times 1/2 &= 1 \text{ átomo} \\ 3 \text{ átomos en el centro de la red} \times 1 &= \underline{3 \text{ átomos}} \\ \text{Total} &= 6 \text{ átomos} \end{aligned}$$

1.2 Acero

El acero es una aleación de hierro con una pequeña proporción de carbono, que comunica a aquel, propiedades especiales, tales como dureza y elasticidad. En general, también se pueden fabricar aceros con otros componentes como manganeso, níquel o cromo.

El hierro es un constituyente fundamental de algunas de las más importantes aleaciones de la ingeniería. El hierro es un metal alotrópico, por lo que puede existir en más de una estructura reticular dependiendo fundamentalmente de la temperatura. Es uno de los metales más útiles debido a su gran abundancia en la corteza terrestre y a que se obtiene con gran facilidad y con una gran pureza comercial

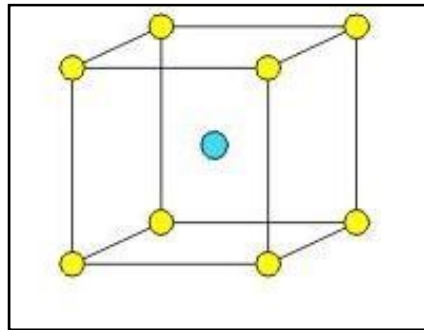
El hierro técnicamente puro, es decir, con menos de 0.008% de carbono, es un metal blanco azulado, dúctil y maleable, cuyo peso específico es de 7.87. Funde de 1536°C a 1539°C reblandeciéndose antes de llegar a esta temperatura, lo que permite forjarlo y moldearlo con facilidad.

1.2.1 Formas alotrópicas del hierro

El hierro cristaliza en la variedad **alfa (α)** hasta la temperatura de 768°C. La red espacial a la que pertenece es la red cúbica centrada en el cuerpo (**BCC**). La distancia entre átomos es de 2.86 Å (angstroms). El hierro alfa no disuelve prácticamente en carbono, llegando a un máximo de 0.008% de C a temperatura ambiente, teniendo como punto de máxima solubilidad a 723°C (0,025%). Este estado recibe el nombre de **ferrita**.

La variedad **beta** (β) existe de 768°C a 910°C. Cristalográficamente es igual a la alfa (**BCC**), y únicamente la distancia entre átomos es algo mayor.

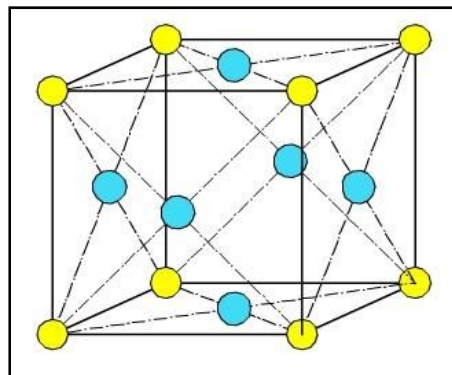
Figura 4. Estructura de hierro alfa y beta



Fuente: www.tecnologiaindustrial.info/images/Tratamientos%20termicos/fig2.jpg

La variedad **gamma** (γ) se presenta de 910°C a 1400°C. Cristaliza en la estructura **FCC**. El cubo de hierro gamma tiene más volúmenes que el del hierro alfa. El hierro gamma disuelve fácilmente en carbono, creciendo la solubilidad desde 0.85% a 723°C hasta 1.76% a 1130°C, para decrecer hasta el 0.12% a 1487°C. Este estado es conocido también como **austenita**.

Figura 5. Estructura de hierro gamma



Fuente: www.tecnologiaindustrial.info/images/Tratamientos%20termicos/fig3.jpg

La variedad **delta (δ)** se inicia a los 1400°C, observándose, entonces un retorno a la estructura **BCC**. Su máxima solubilidad de carbono es 0.007% a 1487°C. Esta variedad es poco interesante desde el punto de vista industrial. A partir de 1537°C se inicia la fusión del hierro (Fe) puro.

1.2.2 Aleación hierro carbono

El hierro puro apenas tiene aplicaciones industriales, pero formando aleaciones con el carbono (además de otros elementos), es el metal más utilizado en la industria moderna. A la temperatura ambiente, salvo una pequeña parte disuelta en la ferrita, todo el carbono que contienen las aleaciones Fe-C está en forma de carburo de hierro (CFe_3). Por eso, las aleaciones Fe-C se denominan también aleaciones hierro-carburo de hierro.

Las aleaciones con contenido de C comprendido entre 0.03% y 2.00% tienen características muy bien definidas y se denominan **aceros**. Los aceros de cualquier proporción de carbono dentro de los límites citados pueden alearse con otros elementos, formando los denominados aceros aleados o aceros especiales. Algunos aceros aleados pueden contener excepcionalmente hasta el 2.5% de C. Los aceros generalmente son forjables, y es ésta una cualidad muy importante que los distingue. Si la proporción de C es superior a 2.00% las aleaciones de Fe-C se denominan fundiciones, siendo la máxima proporción de C aleado del 6.67%, que corresponde a la cementita pura. Las fundiciones, en general, no son forjables.

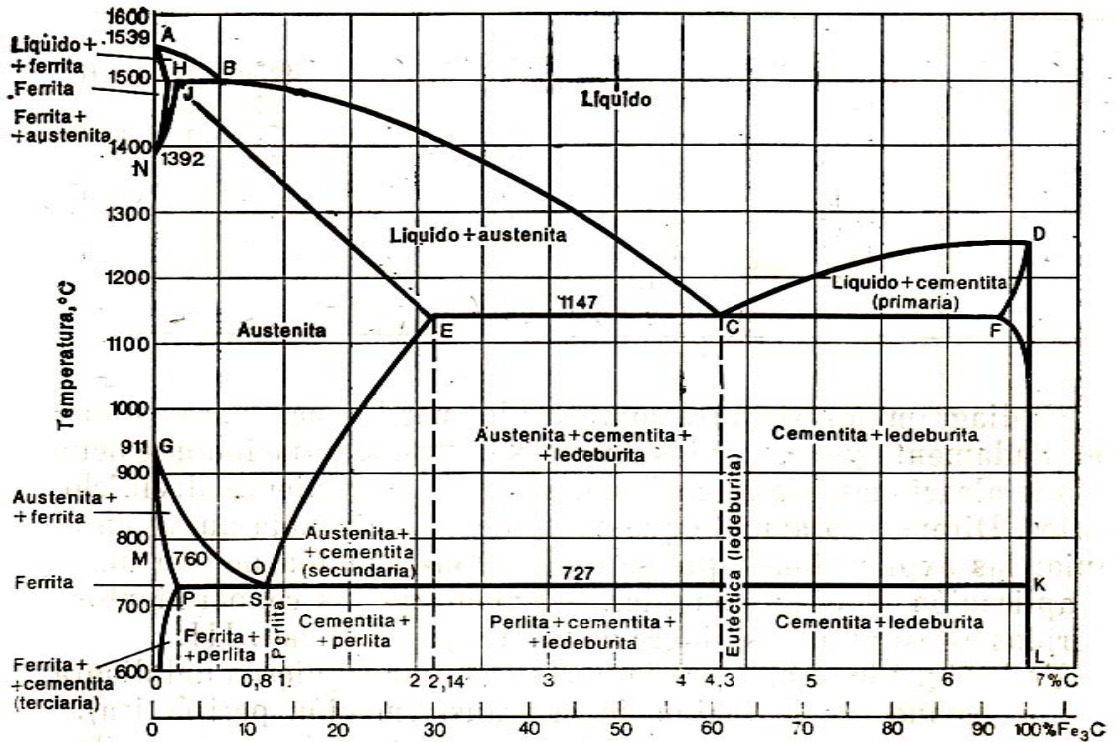
1.2.3 Diagrama hierro carbono

En la Figura 6 se muestra la parte útil del diagrama de equilibrio hierro – carbono. De acuerdo con su composición, las aleaciones hierro – carbono se dividen, usualmente, en tres categorías:

1. Hierros, en los que el contenido de carbono es muy bajo y su efecto sobre las propiedades ordinarias es despreciable.
2. Aceros, cuyo contenido de carbono es importante. Usualmente se encuentran en el intervalo de 0.010% a 1.5% con un valor máximo de 2.0%.
3. Fundiciones, en las que el contenido de carbono es tal que haga que se solidifique parte del líquido en la composición eutéctica. El contenido mínimo de carbono es, por lo tanto, de aproximadamente 2.0%, mientras que el máximo práctico es de, aproximadamente, 4.5%.

El intervalo de acero se subdivide aún más con base al contenido de carbono eutectoide (0.8% de C). Los aceros que contienen menos del 0.8% de C se llaman **aceros hipoeutectoides**, en tanto que los que contienen de 0.8 a 2.0% de C se llaman **aceros hipereutectoides**. El intervalo de hierro fundido también puede subdividirse por el contenido de carbono eutéctico (4.3% de C). Los hierros fundidos que contienen menos del 4.3% de C se conocen como **hierros fundidos hipoeutécticos**, en tanto que los que contienen más del 4.3% de C se llaman **hierros fundidos hipereutécticos**.

Figura 6. Diagrama hierro – carbono



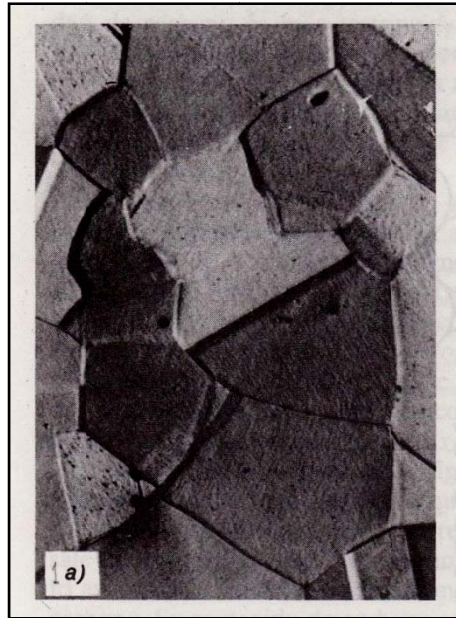
Fuente: A. P. Guliaev. **Metalografía**, tomo 1. Pág. 165.

1.2.4 Microestructuras del acero

Dependiendo del porcentaje de carbono o el tratamiento térmico que el acero haya sufrido, este presentará determinadas estructuras, las cuales se describen a continuación.

Austenita es el nombre dado a la solución sólida γ (gamma). Es una solución sólida intersticial de carbón disuelto en hierro γ (FCC). La máxima solubilidad es del 2% de C a 1130°C. Las propiedades promedio son: resistencia tensil, 150,000 psi; elongación, 10% en 2 pulgadas; dureza 40 Rockwell C, aproximadamente; y tenacidad, alta. Generalmente no es estable a la temperatura ambiente, y su microestructura se muestra en la figura 7.

Figura 7. Microestructura de la austenita (500x)



Fuente: Sydney Avner. **Introducción a la metalurgia física**. Pág. 239.

La **cementita** o carburo de hierro, fórmula química Fe_3C , contiene 6.67% de C y 93.33% de Fe por peso. Es un compuesto intersticial típicamente duro y frágil de baja resistencia tensil (aproximadamente 5000 psi), pero de alta resistencia compresiva. Es la estructura más dura que aparece en el diagrama hierro carbono. Su estructura cristalina es ortorrómbica.

Figura 8. Estructura cristalina ortorrómbica

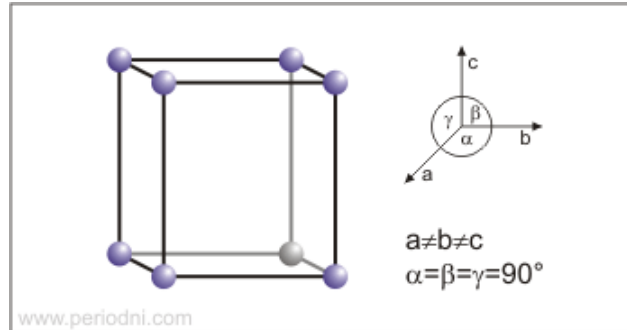


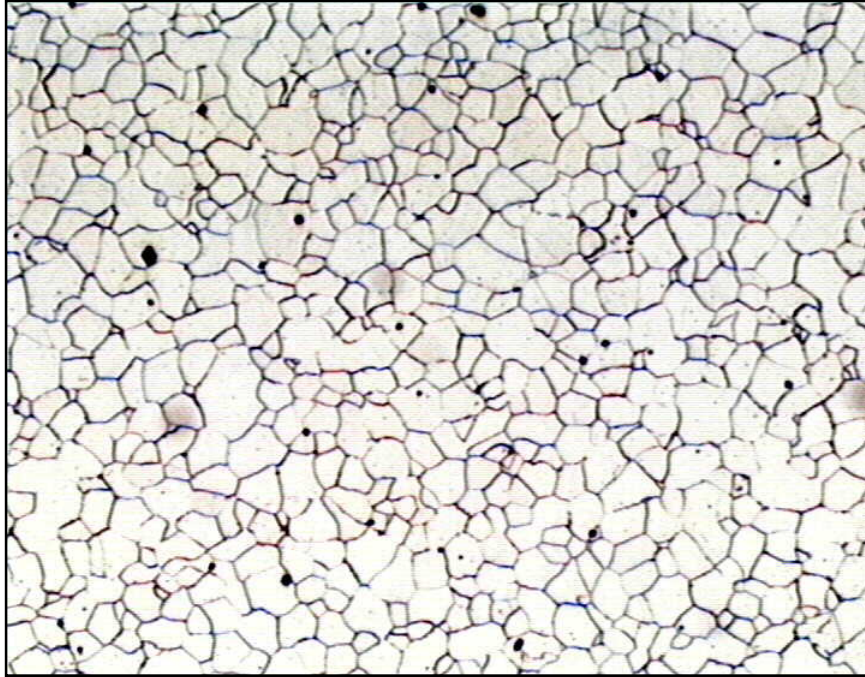
Figura 9. Cementita en acero SAE 52100 transformado a 810⁰C (40,000x)



Fuente: George Krauss. **Steels; processing, structure and performance**. Pág. 52.

Ferrita es el nombre dado a la solución sólida α (alfa). Es una solución intersticial de una pequeña cantidad de carbón disuelto en hierro alfa (BCC). La máxima solubilidad es de 0.025% de C a 723⁰C, y disuelve sólo 0.008% de C a temperatura ambiente. Es la estructura más suave que aparece en el diagrama.

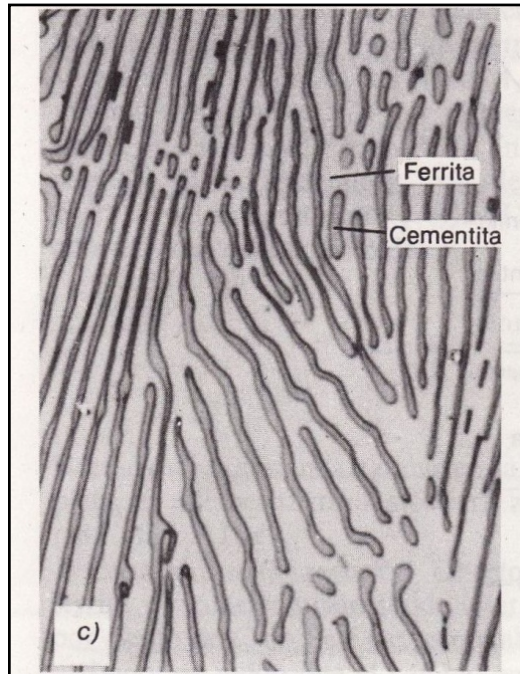
Figura 10. Microestructura de la ferrita (100x)



Fuente: www.esi2.us.es/IMM2/Pract-html/ferrita.html

Perlita es la mezcla eutectoide que contiene 0.80% de C y se forma a 723°C a un enfriamiento muy lento. Es una mezcla muy fina, tipo placa o laminar de ferrita y cementita. Es un constituyente compuesto por el 86.5% de ferrita y 13.5% de cementita. La figura 10 muestra la fina mezcla tipo huella dactilar, llamada perlita. La base o matriz ferrítica blanca que forma la mayoría de la mezcla eutectoide contiene delgadas placas de cementita. Las propiedades promedio son: resistencia tensil, 120,000 psi; elongación, 20% en 2 pulgadas; dureza, 20 Rockwell C.

Figura 11. Microestructura de perlita (2500x)



Fuente: Sydney Avner. **Introducción a la metalurgia física.** Pág. 239.

Martensita es la fase endurecida del acero, la cual es obtenida por el enfriamiento de la austenita lo suficientemente rápido para atrapar átomos de carbono dentro de la matriz cúbica de hierro, cambiándola a una estructura tetragonal centrada en el cuerpo. Al ser observada en el microscopio, en su sección transversal, tiene forma circular o de agujas. Debe añadirse que dichas agujas aparecen sólo claramente cuando el porcentaje de carbono es alto siendo en otro caso la apariencia más parecida a hebras de paja amontonada. Su dureza depende del porcentaje de carbono que tenga en solución, y está comprendida entre 40 y 67 HRC, aproximadamente.

Figura 12. Microestructura de la martensita (400x)

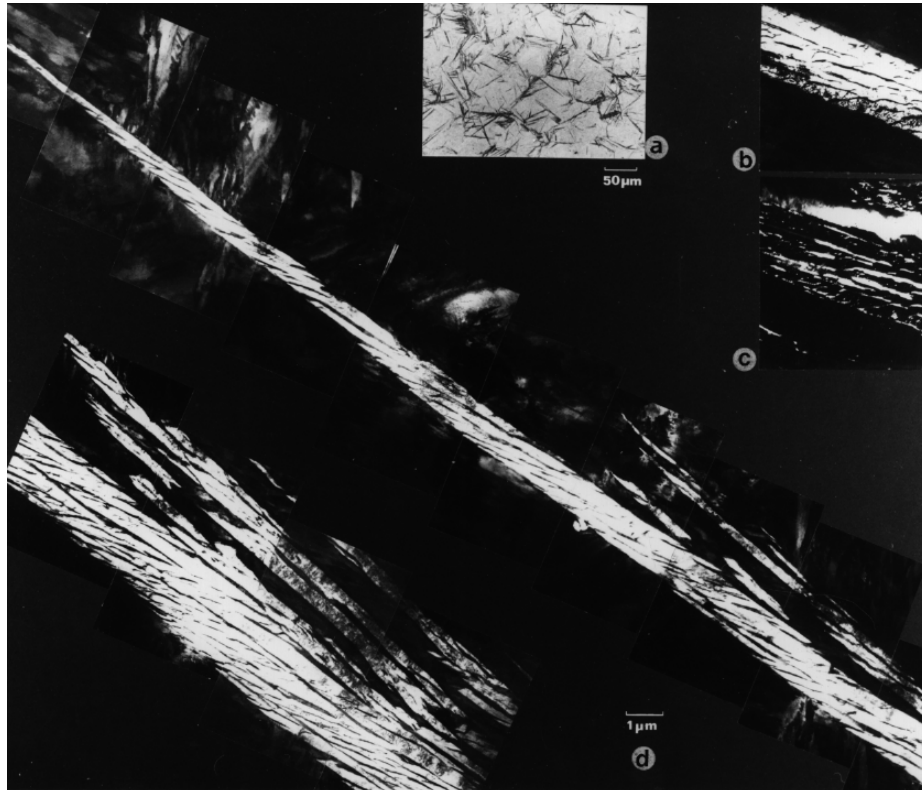


Fuente: www.esi2.us.es/IMM2/Pract-html/martensi.html

Ledeburita es la mezcla eutéctica de austenita y cementita; contiene 4.3% de C y se forma a 1130°C. Es el constituyente eutéctico que se forma al enfriar la fundición líquida de 4.3% C desde 1145°C. Está formada por 52% de cementita y 48% de austenita de 2% de C. La ledeburita no existe a temperatura ambiente en las fundiciones ordinarias debido a que en el enfriamiento se transforma en cementita y perlita; sin embargo en las fundiciones se pueden conocer la zona donde existió la ledeburita por el aspecto eutéctico con que quedan las agrupaciones de perlita y cementita.

La **bainita** es una microestructura que se forma cuando la austenita es enfriada lo suficientemente rápido para evitar la formación de perlita, pero el enfriamiento es retardado lo suficiente para evitar la formación de martensita. Los detalles microestructurales de la bainita son tan finos que su resolución sólo es posible mediante el microscopio electrónico. Está compuesta de una matriz ferrítica y de partículas alargadas de cementita. La fase que rodea las agujas es martensita. La bainita tiene algunas propiedades de dureza de la martensita y algunas propiedades de tenacidad de la perlita.

Figura 13. Microestructura de bainita superior



Fuente: www.msm.cam.ac.uk/phasetrans/images/sheaf.gif

1.2.5 Clasificación de los aceros

Para clasificar el acero se pueden utilizar varios métodos:

Método de manufactura. Este da lugar al acero Bessemer, de hogar abierto, de horno abierto, de horno eléctrico, de crisol, etc.

Composición química. Este método indica, por medio de un sistema numérico, el contenido aproximado de los elementos importantes en el acero. Es el método de clasificación más conocido.

Las especificaciones para los aceros representan los resultados del esfuerzo conjunto de la *American Iron and Steel Institute* (AISI) y de la *Society of Automotive Engineers* (SAE).

El primero de los cuatro o cinco dígitos de la designación numérica indica el tipo a que pertenece el acero. De este modo, uno indica un acero al carbono; dos un acero al níquel, tres un acero al níquel-cromo, etc. En el caso de acero de aleación simple, el segundo dígito indica el porcentaje aproximado del elemento predominante en la aleación. Los dos o tres últimos dígitos generalmente indican el contenido de carbono medio dividido entre 100.

Los números básicos para la serie de cuatro dígitos de los diversos grados de aceros al carbono y de aleación con porcentajes aproximados de elementos de identificación se muestran a continuación en la tabla IV.

Tabla IV. Clasificación de aceros según normas AISI y SAE

Dígitos	Significado
10xx	Aceros al carbono
11xx	Aceros al carbono, azufre alto, fósforo bajo
12xx	Aceros al carbono, azufre alto, fósforo alto
23xx	Aceros al níquel 3.5%
25xx	Aceros al níquel 5.0%
31xx	Aceros al níquel 1.25% y cromo 0.60%
41xx	Aceros al cromo 0.95% y molibdeno 0.20 o 0.30%
43xx	Aceros al níquel 1.83%, cromo 0.50% y molibdeno 0.25%
51xx	Aceros al cromo 0.95 o 1.0%
61xx	Aceros al cromo 0.60 o 0.95% y vanadio 0.15%
86xx	Aceros al níquel 0.55%, cromo 0.50% y molibdeno 0.20%
92xx	Aceros al silicio 2.0%

1.2.5.1 Aceros al carbono

La producción fundamental de la siderurgia es el acero, siendo aproximadamente el 90% del mismo acero al carbono y el 10%, acero aleado. Por lo tanto, el material metálico más importante para la industria es el acero al carbono.

El acero al carbono de producción industrial es una aleación de composición química compleja. Además de la base -el hierro, cuyo contenido puede oscilar entre los límites de 97 a 99.5%-, hay en el muchos elementos cuya presencia se debe a las peculiaridades tecnológicas de su producción (manganeso, silicio), a la imposibilidad de excluirlos totalmente del metal (azufre, fósforo, oxígeno, nitrógeno, hidrógeno) o a circunstancias casuales (cromo, níquel, cobre y otros).

El carbono influye mucho en las propiedades del acero, incluso cuando su contenido varía de un modo insignificante. Por esto, cuando el contenido de todas las demás posibles impurezas es pequeño, el elemento principal, por medio del cual pueden hacerse variar las propiedades de una aleación ferrosa, es el carbono. Como es natural, estas aleaciones (cuando $C < 2.0\%$) se llaman **aceros al carbono**.

Los aceros al carbono se clasifican según el porcentaje de carbono que contengan estos. La clasificación de los aceros al carbono se muestra a continuación en la tabla V.

Tabla V. Clasificación de los aceros al carbono

Tipo de acero	Porcentaje de carbono	Aplicaciones
Calmado dulce	0.05 a 0.15	Cadenas, estampados, remaches, alambre, tubos soldados, colchones.
Dulce	0.10 a 0.20	Aceros estructurales, tornillos, hojalata, forjados al martillo, troquelados.
	0.20 a 0.30	Trabajo de máquinas y estructural, engranes, flechas, palancas, forjados.
Medio carbono	0.30 a 0.40	Bielas, flechas, alambre, ejes, placas, tubos de alta tensión.
	0.40 a 0.50	Cigüeñales, ejes, engranes, moldes fijos, rotores, ruedas.
	0.50 a 0.60	Ruedas de locomotora, rieles, resortes laminados, cables.
Alto carbono	0.60 a 0.70	Troqueles de forja, tornillos de ajuste, sierras, mandriles, brocas huecas.
	0.70 a 0.80	Sierras, martillos, llaves, resortes laminados, cables, troqueles.
	0.80 a 0.90	Cinceles en frío, cuchillas, punzones, taladros de roca.
Aceros de herramienta	0.90 a 1.00	Resortes, alambre de alta resistencia a la tensión, ejes, cuchillos, clavos.
	1.00 a 1.20	Taladros, machuelos, fresas, baleros, troqueles, herramientas de torno.
	1.20 a 1.40	Escariadores, rebajadores, hojas de rasurar, herramientas para perforar.

Fuente: Raymond Higgins. **Ingeniería metalúrgica, tomo 1.** Pág. 136.

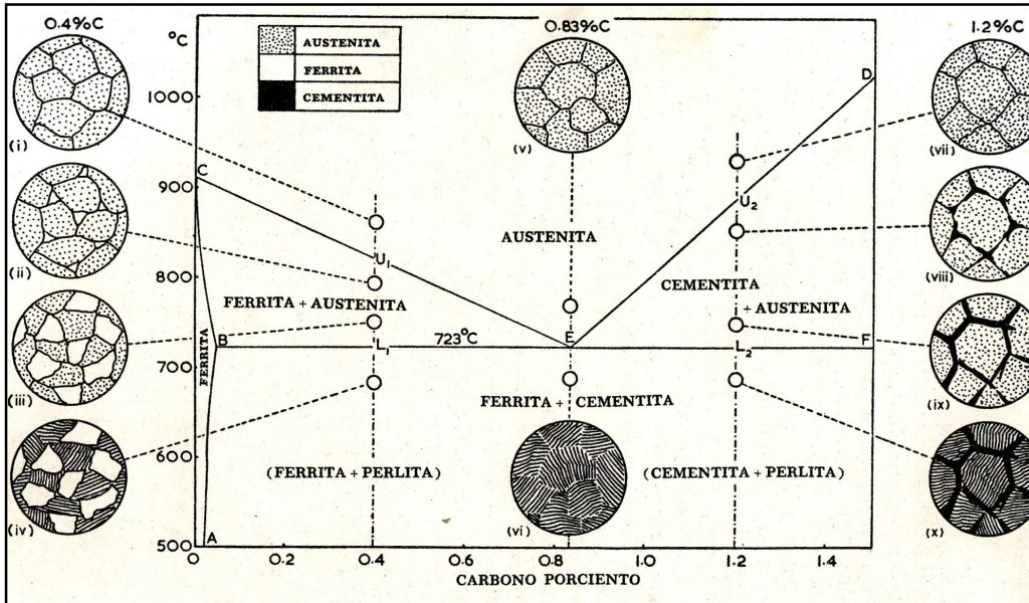
En la tabla VI se muestran algunas especificaciones de aceros al carbono según la clasificación SAE y AISI.

Tabla VI. Especificaciones de aceros al carbono

NÚM. AISI*	% C	% Mn	% P max	% S max	NÚM. SAE
ACEROS AL CARBONO					
C1010	0.08-0.13	0.30-0.60	0.04	0.05	1010
C1015	0.13-0.18	0.30-0.60	0.04	0.05	1015
C1020	0.18-0.23	0.30-0.60	0.04	0.05	1020
C1025	0.22-0.28	0.30-0.60	0.04	0.05	1025
C1030	0.28-0.34	0.60-0.90	0.04	0.05	1030
C1035	0.32-0.38	0.60-0.90	0.04	0.05	1035
C1040	0.37-0.44	0.60-0.90	0.04	0.05	1040
C1045	0.43-0.50	0.60-0.90	0.04	0.05	1045
C1050	0.48-0.55	0.60-0.90	0.04	0.05	1050
C1055	0.50-0.60	0.60-0.90	0.04	0.05	1055
C1060	0.55-0.65	0.60-0.90	0.04	0.05	1060
C1065	0.60-0.70	0.60-0.90	0.04	0.05	1065
C1070	0.65-0.75	0.60-0.90	0.04	0.05	1070
C1074	0.70-0.80	0.50-0.80	0.04	0.05	1074
C1080	0.75-0.88	0.60-0.90	0.04	0.05	1080
C1085	0.80-0.93	0.70-1.00	0.04	0.05	1085
C1090	0.85-0.98	0.60-0.90	0.04	0.05	1090
C1095	0.90-1.03	0.30-0.50	0.04	0.05	1095
ACEROS DE MAQUINADO LIBRE					
B1112	0.13 max	0.70-1.00	0.07-0.12	0.16-0.23	1 112
B1113	0.13 max	0.70-1.00	0.07-0.12	0.24-0.33	1 113
C1110	0.08-0.13	0.30-0.60	0.04	0.08-0.13	
C1113	0.10-0.16	1.00-1.30	0.04	0.24-0.33	
C1115	0.13-0.18	0.60-0.90	0.04	0.08-0.13	1 115
C1120	0.18-0.23	0.70-1.00	0.04	0.08-0.13	1 120
C1137	0.32-0.39	1.35-1.65	0.04	0.08-0.13	1 137
C1141	0.37-0.45	1.35-1.65	0.04	0.08-0.13	1 141
C1212	0.13 max	0.70-1.00	0.07-0.12	0.16-0.23	1 112
C1213	0.13 max	0.70-1.00	0.07-0.12	0.24-0.33	1 113
C12L14†	0.15 max	0.80-1.20	0.04-0.09	0.25-0.35	12L14

Fuente: Sydney Avner. **Introducción a la metalurgia física.** Pág. 249.

Figura 14. Estructura de un acero según su porcentaje de carbono



Fuente: Raymond Higgins. **Ingeniería metalúrgica, tomo 1.** Pág. 132.

1.2.5.2 Aceros para herramientas

Los aceros para herramientas son generalmente aceros de alta aleación utilizados para la fabricación de piezas que requieran alta resistencia al desgaste y/o al impacto. Generalmente usados en la fabricación de troqueles , cuchillas , dados sujetos a choques térmicos, moldes , herramientas para prensas de extrusión , dados de forja, insertos , camisas , rodos de laminación, etc.

Hay varios métodos para clasificar los aceros para herramientas. Uno es según los medios de templado que se usen, como aceros templados en agua, aceros templados en aceite y aceros templados en aire. El contenido de la aleación es otro medio de clasificación, como aceros al carbono para herramientas, aceros de baja aleación para herramientas y aceros de mediana aleación para herramientas. Un último método de agrupación es el basado en el empleo del acero para herramientas, como aceros para trabajo en caliente, aceros resistentes al impacto, aceros de alta velocidad y aceros para trabajo en frío.

El método de identificación y tipo de clasificación de los aceros para herramientas adoptado por la AISI tiene en cuenta el método de templado, aplicaciones, características particulares y aceros para industrias específicas. Los aceros para herramientas que más se utilizan se han agrupado en siete grupos y a cada grupo o subgrupo se le ha asignado una letra del alfabeto. La clasificación es como se muestra en la tabla VII.

Tabla VII. Clasificación de los aceros para herramientas (AISI)

GRUPO	SIMBOLO
Templados en agua	W
Resistentes al impacto	S
Trabajo en frío Templable en aceite Templable en aire Alto carbón, alto cromo	O A D
Trabajo en caliente	H H1-H19 base cromo H20-H39 base tungsteno H40-H59 base molibdeno
Alta velocidad	T base tungsteno M base molibdeno
Moldes	P Aceros para moldes
Propósitos específicos	L baja aleación F carbono-tungsteno

Fuente: Sydney Avner. **Introducción a la metalurgia física**. Pág. 384.

En la tabla VIII, se muestran las propiedades que se requieren en los aceros para herramientas que mas se producen, que son los de trabajo en frío y de trabajo en caliente.

Tabla VIII. Propiedades requeridas en los aceros para herramienta

Trabajo en frío	Trabajo en caliente
<ul style="list-style-type: none">• Resistencia al desgaste• Resistencia a la compresión• Tenacidad• Estabilidad dimensional• Maquinabilidad• Facilidad de afilar, rectificar, pulir	<ul style="list-style-type: none">• Dureza al rojo• Resistencia al revenido• Resistencia al impacto• Resistencia a la abrasión• Resistencia a choque térmicos• Maquinabilidad

Fuente: www.tecniaceros.com

1.2.5.3 Aceros aleados

Los aceros al carbono son muy satisfactorios donde la resistencia y otros requisitos no son muy severos. Estos aceros se utilizan también con todo éxito a las temperaturas comunes y en atmósferas que no son altamente corrosivas, pero su templabilidad relativamente baja limita la resistencia que puede obtenerse, excepto en secciones regularmente delgadas. Casi todos los aceros endurecidos se revienen para reducir las tensiones internas. Los aceros al carbono muestran una marcada suavidad con el incremento de la temperatura de revenido. Este comportamiento disminuirá su aplicabilidad para piezas que requieran dureza por arriba de la temperatura ambiente. La mayoría de las limitaciones de los aceros al carbono pueden vencerse mediante el uso de elementos de aleación.

Un acero aleado puede definirse como aquel cuyas propiedades características se deben a algún elemento diferente del carbono. Aunque todos los aceros al carbono contienen moderadas cantidades de manganeso y silicio no se consideran aleados, porque la función principal del manganeso y del silicio es actuar como desoxidadores. Ellos se combinan con el oxígeno y con el azufre, para reducir el efecto nocivo de dichos elementos.

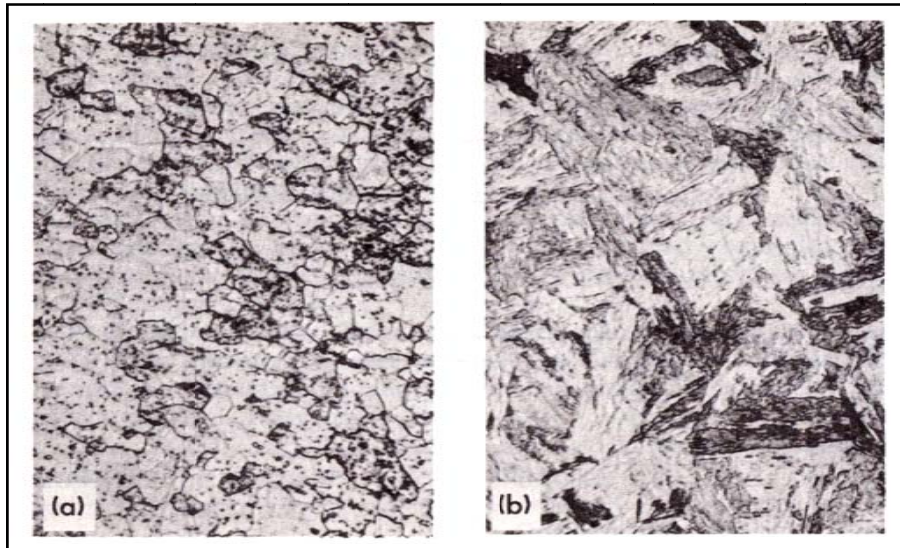
Los elementos de aleación se añaden a los aceros para muchos propósitos, entre los cuales los más importantes son:

- a) Aumentar la templabilidad
- b) Mejorar la resistencia a temperaturas comunes
- c) Mejorar las propiedades mecánicas tanto a altas como a bajas temperaturas
- d) Mejorar la tenacidad a cualquier dureza o resistencia mínima
- e) Aumentar la resistencia al desgaste
- f) Aumentar la resistencia a la corrosión
- g) Mejorar las propiedades magnéticas

Dentro de los aceros aleados, según clasificación AISI, tenemos los siguientes:

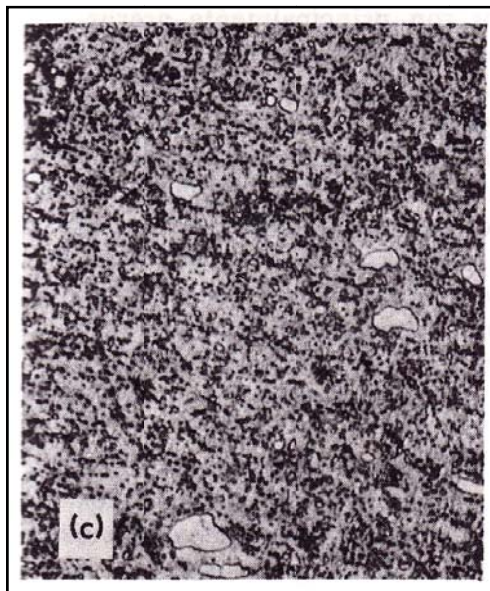
- Aceros al níquel (2xxx)
- Aceros al níquel cromo (3xxx)
- Aceros al molibdeno (4xxx)
- Aceros al cromo (5xxx)
- Aceros al cromo vanadio (6xxx)
- Aceros al níquel cromo molibdeno (8xxx)

Figura 15. Acero al 12% de cromo (500x). a) Recocido. b) Templado y revenido.



Fuente: Sydney Avner. **Introducción a la metalurgia física.** Pág. 362.

Figura 16. Microestructura de un acero al 18% de cromo y 0.65% de carbono, templado y revenido (500x).



Fuente: Sydney Avner. **Introducción a la metalurgia física.** Pág. 363.

1.3 Hierro fundido

1.3.1 Definición de hierro fundido

Los hierros fundidos, como los aceros, son básicamente aleaciones de hierro carbono. En relación con el diagrama hierro-carbono, los hierros fundidos contienen más cantidad de carbono que la necesaria para saturar austenita a la temperatura eutéctica; por tanto contienen entre 2.0 y 6.67% de carbono. Como el alto contenido de carbono tiende a hacer muy frágil al hierro fundido, la mayoría de los tipos manufacturados comercialmente están en el intervalo de 2.5 a 4.0% de carbono.

La mayoría de los hierros fundidos no son maleables a cualquier temperatura; sin embargo, a veces funden fácilmente o pueden fundirse en formas complicadas que generalmente se maquinan a dimensiones finales. Como la fundición de piezas es el único proceso aplicado a estas aleaciones, se conocen como **hierros fundidos**.

Aunque los hierros fundidos comunes son frágiles y tienen más bajas propiedades de resistencia que la mayoría de los aceros, son baratos, pueden fundirse más fácilmente que el acero y tienen otras propiedades útiles. Además, mediante una aleación apropiada, buen control de la fundición y un tratamiento térmico adecuado, las propiedades de cualquier tipo de hierro fundido pueden variar ampliamente.

1.3.2 Tipos de hierro fundido

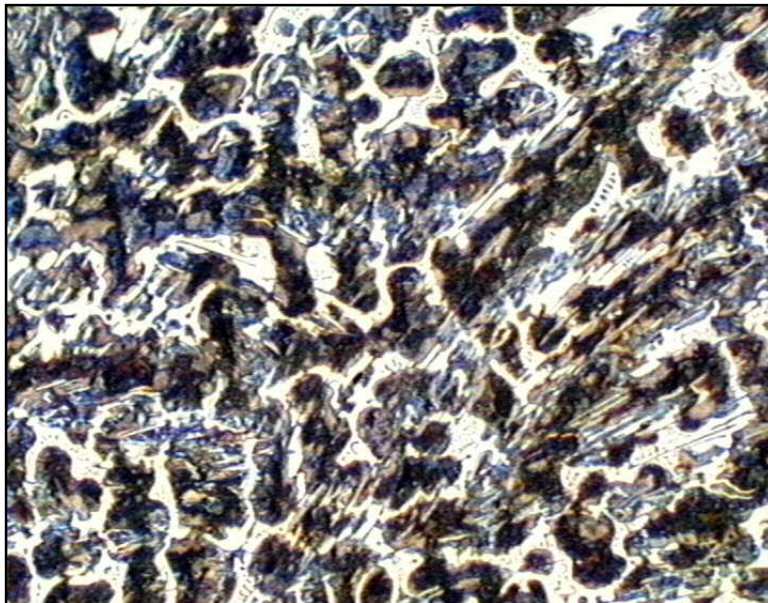
El mejor método para clasificar el hierro fundido es de acuerdo con su estructura metalográfica. Las variables a considerar que dan lugar a los diferentes tipos de hierro fundidos son: el contenido de carbono, el contenido de aleación y de impurezas, la rapidez de enfriamiento durante o después del congelamiento, y el tratamiento térmico después de fundirse. Estas variables controlan la condición del carbono y también su forma física. El carbono puede estar combinado en forma de carburo de hierro en la cementita, o existir como carbono sin combinar (o libre) en forma de grafito. La forma y distribución de las partículas de carbono sin combinar influirá grandemente en las propiedades físicas del hierro fundido. Los tipos de hierro fundido se pueden clasificar de la siguiente manera:

Fundición blanca. Son aquellas en la que todo el carbono se encuentra combinado bajo la forma de cementita. Todas ellas son aleaciones hipoeutécticas, y las transformaciones que tienen lugar durante su enfriamiento son análogas a los de la aleación de 2.5% de carbono.

La Figura 17 muestra la microestructura típica de las fundiciones blancas, la cual está formada por dendritas de austenita transformada (perlita), en una matriz blanca de cementita. En la Figura 18 se ve la Figura 17 con más aumentos para ver que las áreas oscuras son perlita.

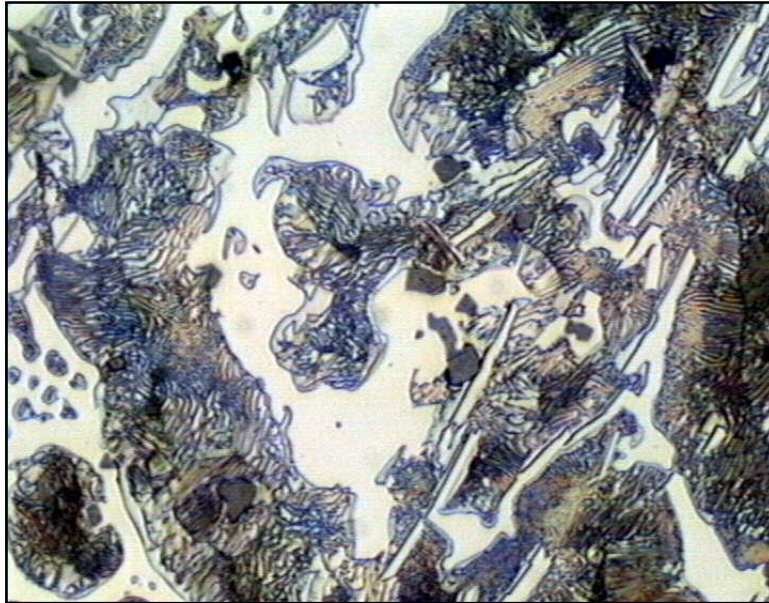
Estas fundiciones se caracterizan por su dureza y resistencia al desgaste, siendo sumamente quebradiza y difícil de mecanizar. Esta fragilidad y falta de maquinabilidad limita la utilización industrial de las fundiciones totalmente blancas, quedando reducido su empleo a aquellos casos en que no se requiera ductilidad, como en las camisas interiores de las hormigoneras, molinos de bolas y en las boquillas de extrusión. También se utiliza como material para la fabricación de la fundición maleable.

Figura 17. Estructura de la fundición blanca (100x)



Fuente: www.esi2.us.es/IMM2/Pract-html/y1.html

Figura 18. Estructura de la fundición blanca (400x)



Fuente: www.esi2.us.es/IMM2/Pract-html/y1.html

Fundición maleable. La tendencia que presenta la cementita a dejar en libertad carbono, constituye la base de la fabricación de la fundición maleable. La reacción de descomposición se ve favorecida por las altas temperaturas, por la presencia de impurezas sólidas no metálicas, por contenidos de carbono más elevados y por la existencia de elementos que ayudan a la descomposición del carburo de hierro.

La maleabilización tiene por objeto transformar todo el carbono que en forma combinada contiene la fundición blanca, en nódulos irregulares de carbono revenido (grafito) y en ferrita. Industrialmente, este proceso se realiza en dos etapas conocidas como primera y segunda fases de recocido.

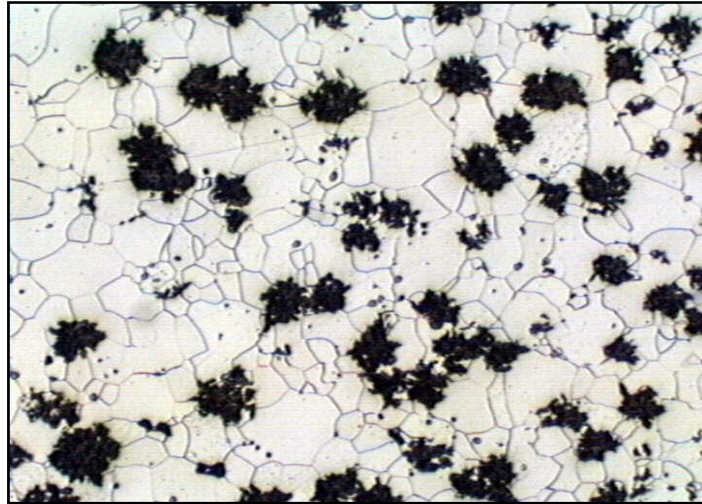
En la primera fase del recocido, la fundición blanca se calienta lentamente a una temperatura comprendida entre 840 y 980°C. Durante el calentamiento, la perlita se transforma en austenita al alcanzar la línea crítica inferior y, a medida que aumenta la temperatura, la austenita formada disuelve algo más de cementita.

La segunda fase del recocido consiste en un enfriamiento muy lento al atravesar la zona crítica en que tiene lugar la reacción eutectoide. Esto permite a la austenita descomponerse en las fases estables de ferrita y grafito. Una vez realizada la grafitización, la estructura no sufre ninguna nueva modificación durante el enfriamiento a temperatura ambiente, quedando constituida por nódulos de carbono de revenido (rosetas) en una matriz ferrítica. Este tipo de fundición se denomina normal o ferrítica.

Si durante el temple al aire se consigue que el enfriamiento a través de la región eutectoide se realice con la suficiente rapidez, la matriz presentará una estructura totalmente perlítica.

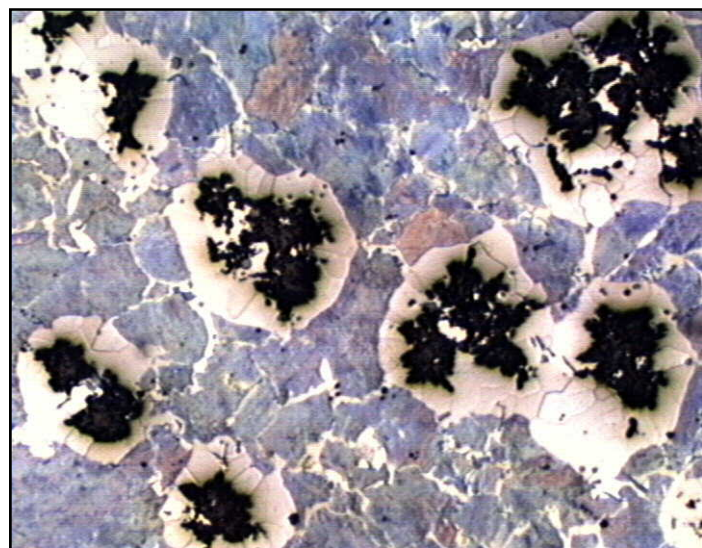
Si el enfriamiento en la región eutectoide no se realiza a la velocidad necesaria para que todo el carbono quede en forma combinada, las zonas que rodean los nódulos de carbono revenido estarán totalmente grafitizadas, mientras que las más distantes presentarán una estructura totalmente perlítica. Debido al aspecto que presenta esta estructura al microscopio, se conoce como estructura de **ojo de buey**.

Figura 19. Estructura de fundición maleable ferrítica (100x)



Fuente: www.esi2.us.es/IMM2/Pract-html/y5.html

Figura 20. Estructura de fundición maleable ojo de buey (50x)



Fuente: www.esi2.us.es/IMM2/Pract-html/y5.html

Fundición gris. La mayoría de las fundiciones grises son aleaciones hipoeutécticas que contienen entre 2.5 y 4.0% de carbono. El proceso de grafitización se realiza con mayor facilidad si el contenido de carbono es elevado, las temperaturas elevadas y si la cantidad de elementos grafitizantes presentes, especialmente el silicio, es la adecuada.

Para que grafiticen la cementita eutéctica y la proeutectoide, y así obtener una estructura final perlítica hay que controlar cuidadosamente el contenido de silicio y la velocidad de enfriamiento. El grafito adopta la forma de numerosas laminillas curvadas, que son las que proporcionan a la fundición gris su característica fractura grisácea o negruzca.

Si la composición y la velocidad de enfriamiento son tales que la cementita eutectoide se grafitiza, presentará entonces una estructura totalmente ferrítica (Figura 21). Por el contrario, si se impide la grafitización de la cementita eutectoide, la matriz será totalmente perlítica (Figura 22).

Figura 21. Estructura de fundición gris ferrítica (100x)



La mayoría de las fundiciones contienen fósforo procedente del mineral de hierro en cantidades variables entre 0.10 y 0.90%, el cual se combina en su mayor parte con el hierro, formando fosfuro de hierro (Fe_3P). Este fosfuro forma un eutéctico ternario con la cementita y la austenita conocida como esteadita, la cual es uno de los constituyentes normales de las fundiciones.

Figura 22. Estructura de fundición gris perlítica (100x)



Fuente: www.esi2.us.es/IMM2/Pract-html/y2.html

Figura 23. Granos blancos de esteadita en fundición gris (400x)

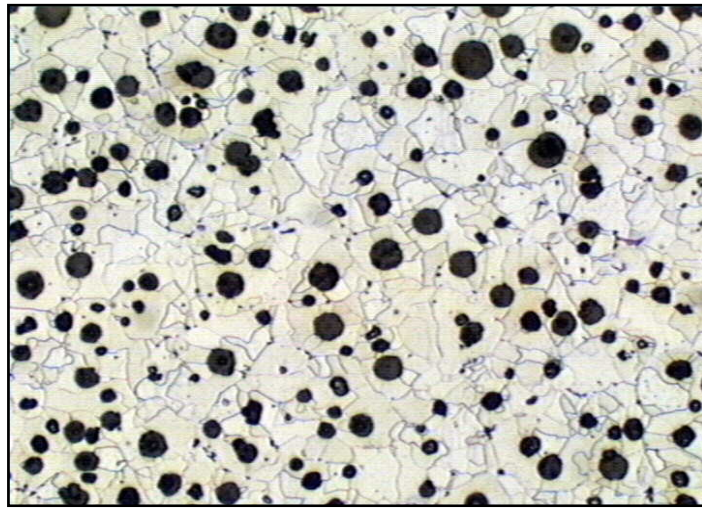


Fundición nodular. Al encontrarse el carbono en forma esferoidal, la continuidad de la matriz se interrumpe mucho menos que cuando se encuentra en forma laminar; esto da lugar a una resistencia a la tracción y tenacidad mayor que en la fundición gris ordinaria. La fundición nodular se diferencia de la fundición maleable en que normalmente se obtiene directamente en bruto, por fusión, sin necesidad de tratamiento térmico posterior. Además los nódulos presentan una forma más esférica que los aglomerados de grafito, más o menos irregulares, que aparecen en la fundición gris.

El contenido total de carbono en la fundición nodular es igual al de la fundición gris. Las partículas esferoidales de grafito se forman durante la solidificación, debido a la presencia de pequeñas cantidades de algunos elementos de aleación formadores de nódulos, normalmente magnesio y cerio, los cuales se adicionan al caldero inmediatamente antes de pasar el metal a los moldes.

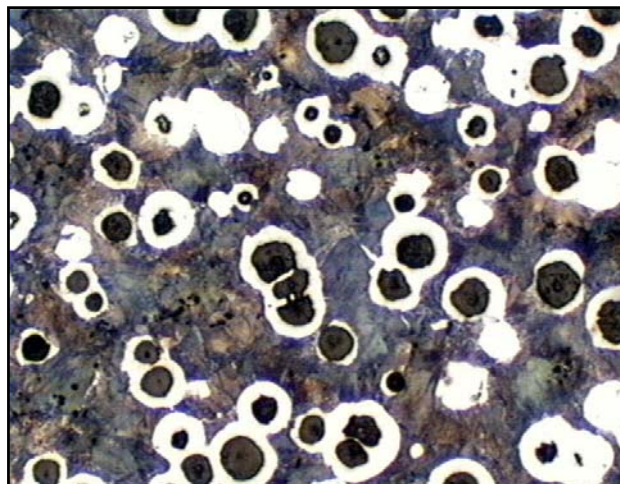
Las fundiciones ferríticas son las que proporcionan la máxima ductilidad, tenacidad y maquinabilidad.

Figura 24. Estructura de fundición nodular ferrítica (100x)



Estas fundiciones, bien en bruto de fundición o tras haber sufrido un normalizado, pueden presentar también una matriz constituida en gran parte por perlita, como se muestra en la Figura 25.

Figura 25. Matriz perlítica en fundición nodular (100x)

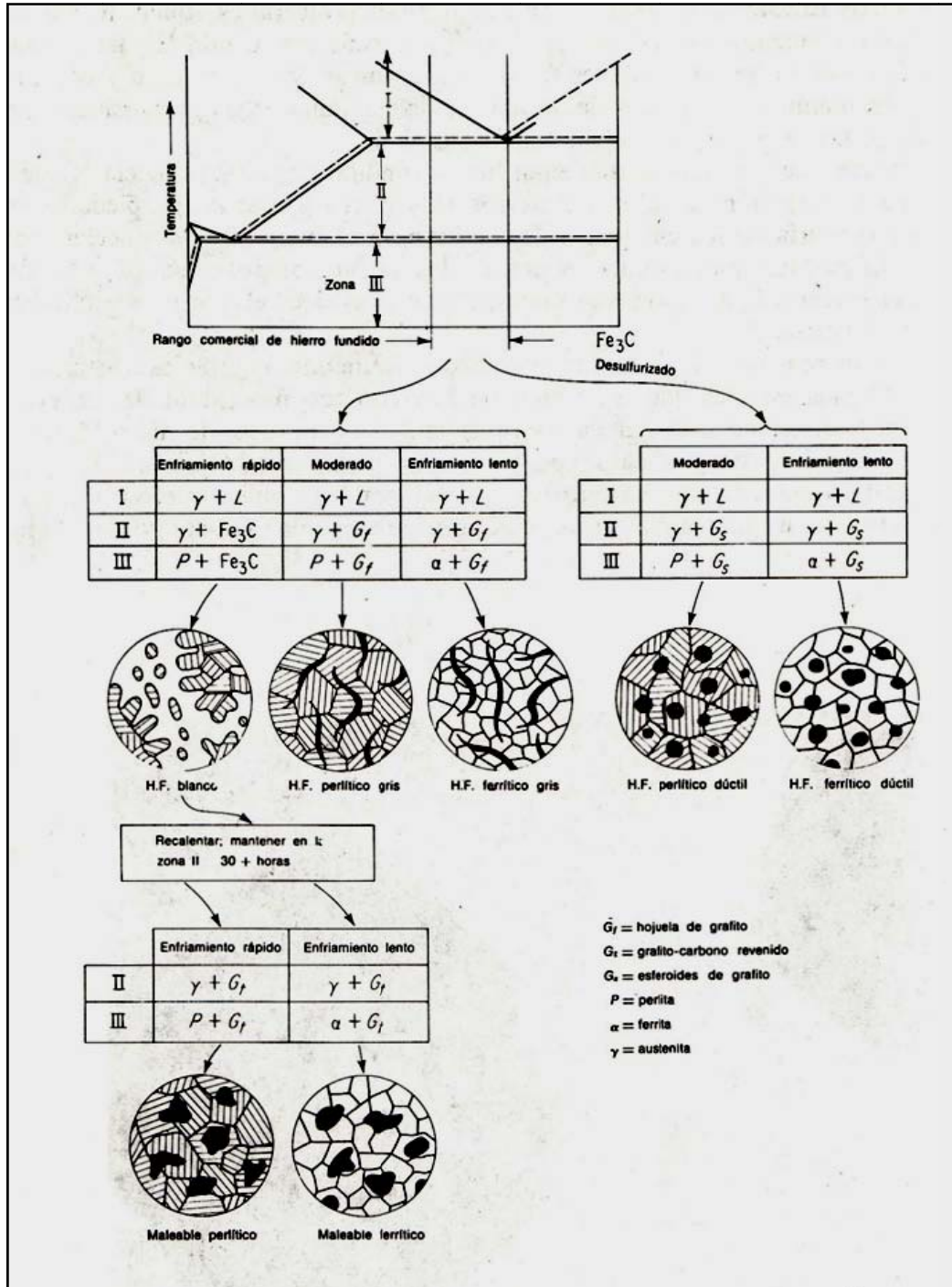


1.3.3 Microestructuras del hierro fundido

Los hierros fundidos pueden presentar las siguientes estructuras:

- a) Cementita primaria y perlita solamente. Este tipo de estructura es típica de los hierros duros, blancos, de bajo silicio y alto azufre, y se encuentra también en otros tipos de hierro que han sido enfriados.
- b) Cementita primaria, grafito y perlita. Los hierros nodulares, en los cuales parte de la cementita primaria se ha descompuesto, formando grafito, son de este tipo.
- c) Grafito y perlita. Esta estructura es típica de un hierro de servicio pesado, en el cual toda la cementita primaria se ha transformado en grafito.
- d) Grafito, perlita y ferrita. Hierro gris de estructura mayor, que será más débil y blanda.
- e) Grafito y ferrita. Aquí, toda la cementita ferrítica, así como la cementita primaria, se ha disociado en grafito. Esto se debe generalmente a un gran contenido de silicio. Este hierro vaciado será muy blando y fácil de maquinar. La ferrita presente contendrá silicio y manganeso disueltos.

Figura 26. Microestructuras y fases del hierro fundido



Fuente: Sydney Avner. Introducción a la metalurgia física. Pág. 450.

1.3.4 Propiedades mecánicas y aplicaciones de las fundiciones

En las siguientes tablas se muestran las propiedades de dos tipos de fundiciones de hierro que se pueden encontrar en el mercado de Guatemala.

Tabla IX. Propiedades de fundición gris Versa-Bar V2

HIERRO GRIS VERSA-BAR V-2	
Resistencia a la tensión	40,000 psi
Resistencia a la compresión	15,000 psi
Resistencia a la carga lateral:	40,000 psi
Deflexión	0.25" – 0.34"
Microestructura (en estado fundido)	Esencialmente Perlítica
Tratamiento térmico	En aceite desde 858 ° C para obtener HRC 50 mín. en la superficie
Maquinabilidad	Muy buena
Especificación ASTM	A 48 (Clase 40)

Fuente: www.tecniaceros.com

Tabla X. Propiedades de fundición nodular Versa-bar V4

HIERRO NODULAR VERSA-BAR V-4	
Resistencia a la tensión	80,000 psi
Límite de cedencia	55,000 psi
Elongación	6 %
Rango de dureza Brinell	187/269 BHN
Microestructura (en estado fundido)	Perlítica
Tratamiento térmico	Recocido ó Normalizado
Maquinabilidad	Buena
Especificación ASTM	A-536

Fuente: www.tecniaceros.com

Los hierros fundidos presentan además las siguientes ventajas:

- a) Resistencia física como el acero
- b) Superficie de deslizamiento con alto grafito
- c) Sin deformaciones por el calor
- d) Retención del aceite por su estructura de grafito en copo
- e) No contamina el aceite lubricante
- f) Facilidad de corte libre manteniendo tolerancias estrechas
- g) Alta resistencia a la compresión y carga lateral
- h) Se puede obtener superficies muy bien pulidas
- i) Suprime las vibraciones

Debido a las propiedades de los hierros fundidos estos tienen una gran aplicación industrial, tales como:

- a) Hidráulica y neumática: manifolds, émbolos, tapas de cilindros.
- b) En la industria del vidrio: moldes, formas, buzos.
- c) En máquinas y equipos: poleas, rodillos, ejes, grúas.
- d) Maquinaria agrícola: soportes, brazos, cojinetes.
- e) Herramientas: grúas, sufrideras, postes, matrices.

2. TRATAMIENTOS TÉRMICOS

2.1 Conceptos generales

2.1.1 Introducción

La definición de tratamiento térmico dada en el *Metals Handbook* es: “Una combinación de operaciones de calentamiento y enfriamiento, de tiempos determinados y aplicadas a un metal o aleación en el estado sólido en una forma tal que producirá propiedades deseadas”. Todos los procesos básicos de tratamientos térmicos para aceros incluyen la transformación o descomposición de la austenita.

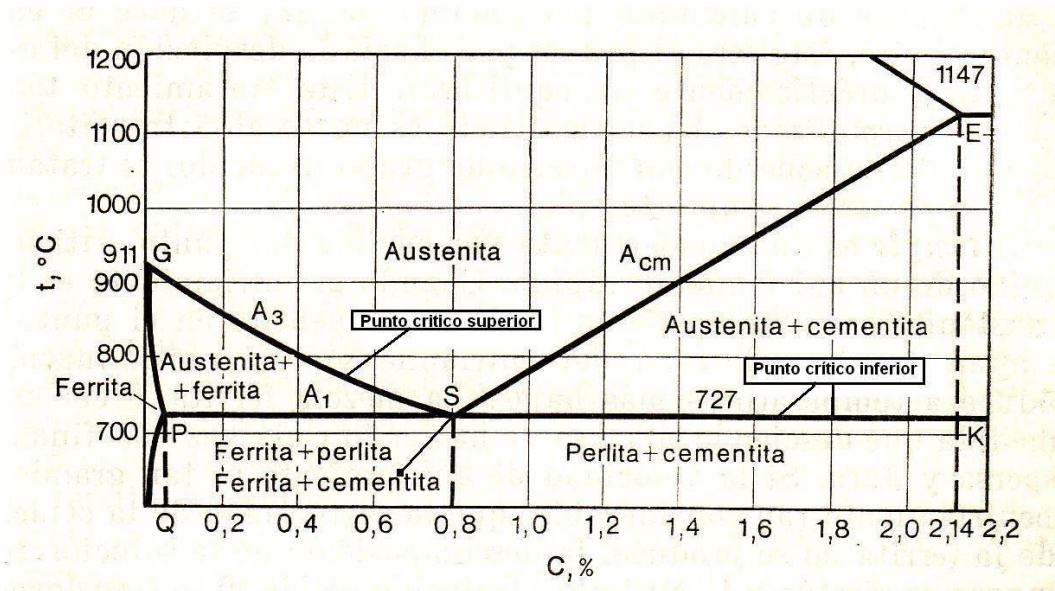
2.1.2 Tipos fundamentales de tratamientos térmicos del acero

Si la base para el estudio del tratamiento térmico de las aleaciones es el diagrama de estado correspondiente, es evidente que la base para el estudio del tratamiento térmico del acero será el diagrama hierro – carbono. Como se trata de estudiar el tratamiento térmico del acero, sólo nos interesarán las aleaciones cuya concentración sea de hasta 2% de C y, respectivamente, la región del diagrama hierro – carbono correspondiente a las concentraciones de hasta el 2%.

Como es natural, el límite superior de temperatura en el tratamiento térmico es la línea de sólido, por lo que los procesos de cristalización primaria y, por consiguiente, la parte superior del diagrama no tiene en este caso gran importancia para nosotros.

La parte del diagrama de hierro – carbono que vamos a considerar es la representada en la Figura 27.

Figura 27. Parte correspondiente al acero del diagrama Fe₃C – Fe



Fuente: A.P. Guliaev. **Metalografía, volumen 1.** Pág. 229.

Vamos a dar las denominaciones generalmente aceptadas de los puntos críticos. Los puntos críticos se designan con la letra A.

El punto crítico inferior, que se designa por A₁, se encuentra en la línea PSK y corresponde a la transformación austenita ↔ perlita. El punto crítico superior A₃ se halla en la línea GSE y corresponde al principio de la precipitación o al final de la disolución de la ferrita en los aceros hipoeutectoides o de la cementita (secundaria) en los aceros hipereutectoides.

Para poder diferenciar el punto crítico durante el calentamiento del punto crítico durante el enfriamiento, junto a la letra A se pone una *c* en el primer caso y una *r* en el segundo.

Por consiguiente, el punto crítico de la transformación de la austenita en perlita se designará por Ar_1 y el de la perlita en austenita, por Ac_1 ; el comienzo de la segregación de ferrita de la austenita se designará por Ar_3 , y al final de la disolución de la ferrita en la austenita, por Ac_3 . El principio de la segregación de cementita de la austenita también se denominará Ar_3 , y el fin de la disolución de la cementita secundaria en la austenita, Ac_3 (este punto se designa frecuentemente por A_{cm}).

En este capítulo se explicaran los principales tratamientos térmicos que se le pueden realizar al acero, los cuales son los siguientes:

- Temple
- Revenido
- Recocido
- Normalizado
- Ausrevenido o Austempering
- Cementado

2.1.3 Cuatro transformaciones principales del acero

Las transformaciones de fase que se cumplen en el acero también se deben a que, como consecuencia del cambio de las condiciones, por ejemplo, de la temperatura, un estado resulta ser menos estable que otro. Esto es lo que provoca las transformaciones que se desarrollan en el acero.

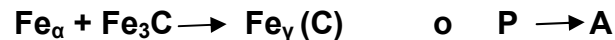
Examinando las transformaciones estructurales del acero debemos decir en primer lugar, que las estructuras fundamentales son tres y que las transiciones entre ellas caracterizan las transformaciones principales.

Estas estructuras son:

- La austenita (A), solución sólida de carbono en hierro γ , $Fe_\gamma(C)$.
- La martensita (M), solución sólida de carbono en hierro α , $Fe_\alpha(C)$.
- La perlita (P), mezcla eutectoide de ferrita y carburo, $Fe_\alpha + Fe_3C$.

En el tratamiento térmico del acero se observan cuatro transformaciones principales:

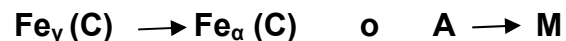
1. La transformación de la perlita en austenita, que transcurre por encima del punto A_1 , a una temperatura superior a la del equilibrio estable austenita – perlita; a estas temperaturas, de las tres estructuras fundamentales, la austenita es la que posee la energía libre mínima:



2. La transformación de la austenita en perlita, que se desarrolla por debajo de A_1 :



3. La transformación de la austenita en martensita:



4. La transformación de la martensita en perlita o, más exactamente, en mezcla de ferrita y carburo:



Esta transformación se efectúa a todas las temperaturas, ya que a todas las temperaturas es mayor la energía libre de la martensita que la de la perlita.

2.1.4 Etapas de un tratamiento térmico

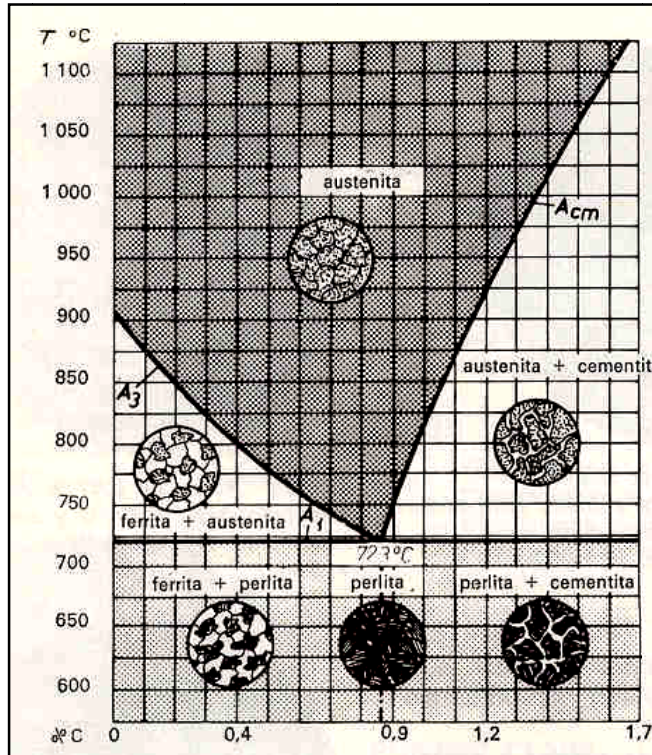
En todo tratamiento térmico se distinguen tres etapas:

1. Calentamiento hasta la temperatura adecuada.
2. Mantenimiento a esa temperatura hasta obtener uniformidad térmica.
3. Enfriamiento a la velocidad adecuada.

De acuerdo con las variantes de estas fases se obtienen los distintos tratamientos térmicos. Ahora, veamos la explicación de cada una de las tres fases:

Etapas 1. Si en esta fase se llega a la temperatura de transformación superior, toda la estructura se convierte en austenita. Si el calentamiento es suficientemente lento, la transformación se logra a las temperaturas que se muestran en la figura 28.

Figura 28. Temperaturas de transformación de austenita (A_3 y A_{cm})

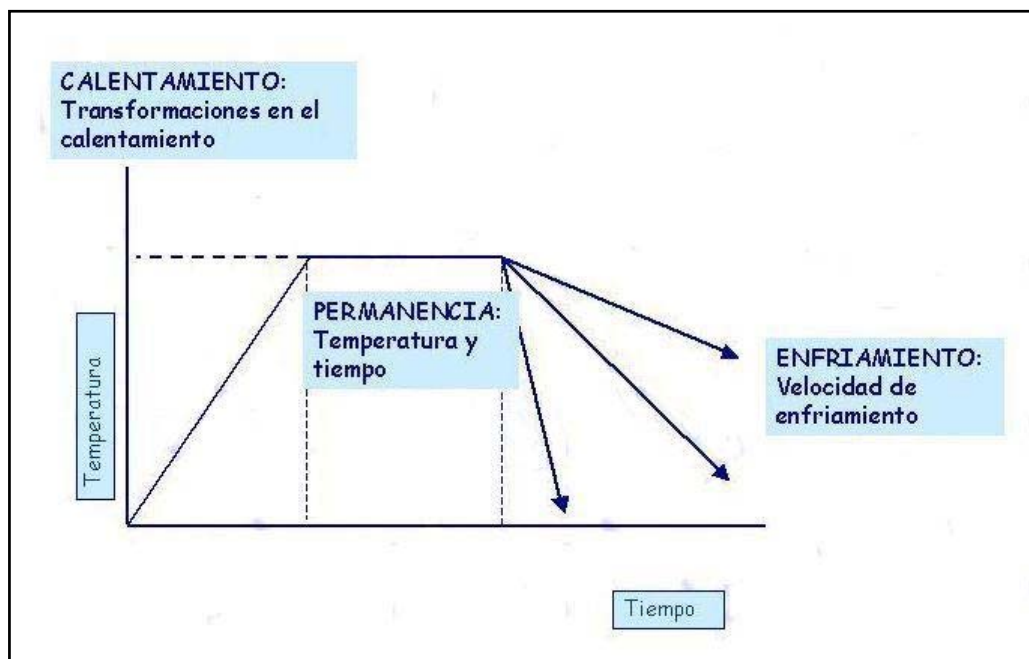


Etapas 2. Esta fase tiene por objeto lograr el equilibrio entre la temperatura del centro y la periferia, y con ello la homogeneización de la estructura. Deberá ser tanto más larga cuanto más rápido haya sido el calentamiento. La temperatura de tratamiento debe ser la mínima posible, para reducir los efectos adversos del crecimiento del grano y del sobrecalentamiento.

Etapas 3. Es la fase decisiva en la mayoría de los tratamientos térmicos. Para lograr el constituyente deseado hay que partir de la estructura austenítica, si queremos que haya transformación. Si el enfriamiento se hace a distintas velocidades, el comienzo y el final de transformación es distinto, y las estructuras resultantes serán distintas, aún para el mismo acero.

Si esta fase se hace escalonadamente, es decir, enfriando rápidamente hasta una cierta temperatura y luego se la mantiene a esa misma temperatura durante el tiempo suficiente, se comprueba que también se logra la transformación. Se dice de estas transformaciones que son a temperatura constante o isotérmica. Las transformaciones isotérmicas tienen la ventaja, sobre las logradas en el enfriamiento continuo, de que la estructura resulta muy homogénea, mientras que en el enfriamiento continuo pueden resultar varios tipos de cristales.

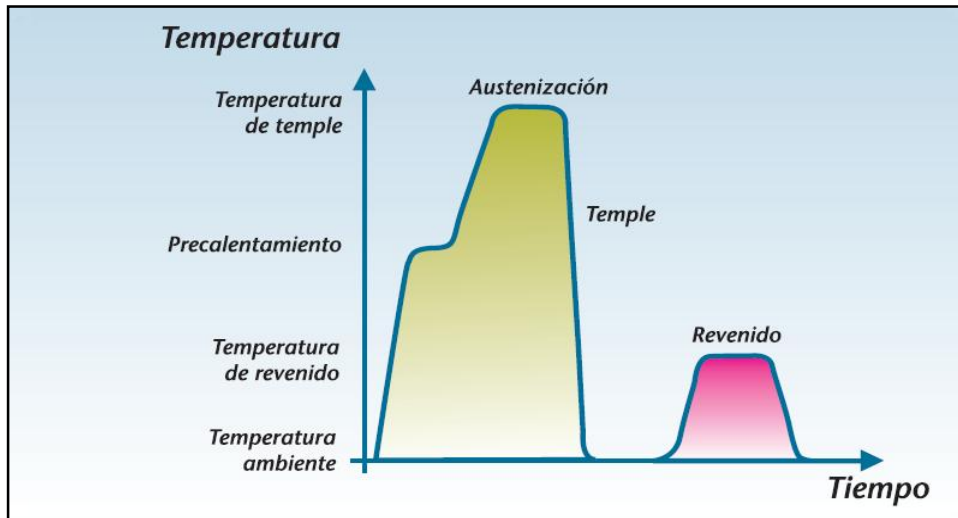
Figura 29. Etapas de un tratamiento térmico



Fuente: **Laboratorio de tratamientos térmicos. INTECAP.**

En la Figura 30 se muestran las tres etapas de un tratamiento térmico de un acero bonificado. En este caso, es un tratamiento de temple y posteriormente, de revenido.

Figura 30. Etapas de tratamiento térmico de un acero bonificado



Fuente: **Laboratorio de tratamientos térmicos.** INTECAP.

2.2 Tratamientos térmicos

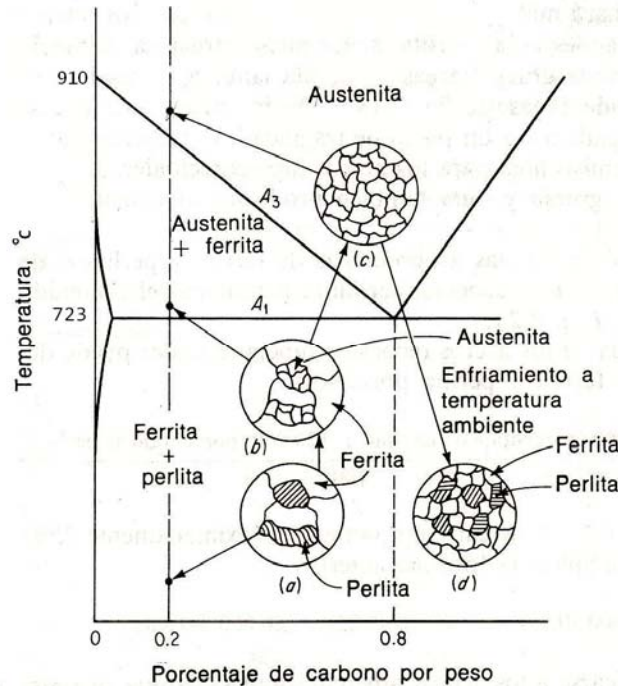
2.2.1 Recocido total

Este proceso consiste en calentar el acero a la temperatura adecuada y luego enfriar lentamente a lo largo del intervalo de transformación, preferentemente en el horno o en cualquier material que sea buen aislante al calor. Por lo general, el enfriamiento lento continúa a temperaturas más bajas.

El propósito del recocido puede ser refinar el grano, proporcionar suavidad, mejorar las propiedades eléctricas y magnéticas y, en algunos casos, mejorar el maquinado.

El recocido puede explicarse mediante el siguiente diagrama mostrado en la figura 31.

Figura 31. Cambios en microestructura durante el recocido



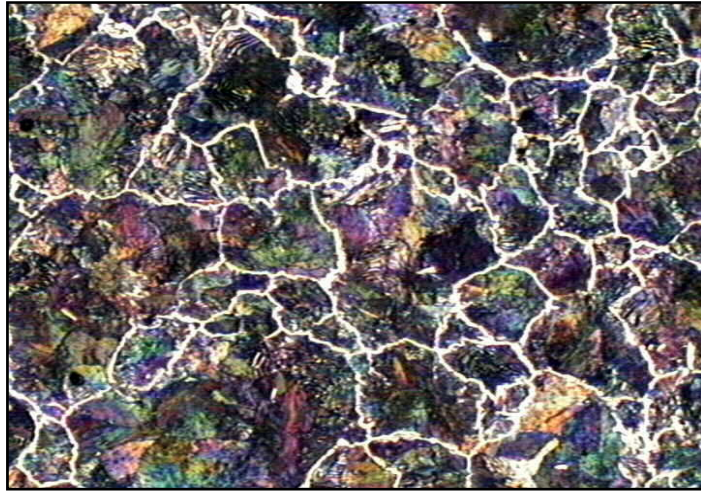
Supóngase que hay un acero al 0.20% de C y que se desea refinar el tamaño de grano por recocido. La Figura 31 muestra la microestructura. Cuando este acero se calienta, no ocurrirá cambio alguno hasta que la línea A₁ se cruza. A esa temperatura, las áreas de perlita se transformarán en pequeños granos de austenita, pero los grandes granos de ferrita permanecerán invariables (Figura 31 b). El enfriamiento desde esta temperatura no refinará el grano. Si se continúa el calentamiento entre las líneas A₁ y A₃ será posible que los grandes granos de ferrita se transformen en pequeños granos de austenita, de manera que por encima de la línea A₃ toda la microestructura mostrará sólo pequeños granos de austenita (Figura 31 c). El enfriamiento subsecuente del horno dará lugar a pequeños granos de ferrita proeutectoide y pequeñas áreas de gruesa perlita laminar (Figura 31 d); por tanto, la temperatura de recocido adecuada para aceros hipoeutectoides es de aproximadamente 10°C por encima de la línea A₃.

2.2.2 Recocido en proceso

Frecuentemente debemos aplicar una cantidad considerable de trabajo en frío a los aceros dulces como, por ejemplo, en el estirado de alambres. El recocido para aliviar esfuerzos se hace entonces necesario para ablandar el metal, de manera que puedan llevarse a cabo operaciones posteriores de estirado. Este recocido generalmente se lleva a cabo a 650°C. Puesto que esta temperatura se encuentra por encima de la temperatura de recristalización de 500°C, la recristalización se verá acelerada de manera que será completa en cuestión de minutos, al alcanzar la temperatura máxima.

Un recocido prolongado puede causar un deterioro en las propiedades, puesto que, aun cuando la ductilidad puede aumentar, habrá una pérdida de resistencia. Debe notarse que el recocido del proceso es una operación subcrítica; esto es, tiene lugar debajo de la temperatura crítica inferior. Por esta razón, aun cuando se estimula la recristalización, no hay cambio de fase y las constituyentes ferrita y cementita continúan presentes en la estructura durante el proceso.

Figura 32. Estructura de un acero recocido con 1.3% de C (100x)



Fuente: www.esi2.us.es/IMM2/Pract-html/x-20.html

2.2.3 Esferoidización

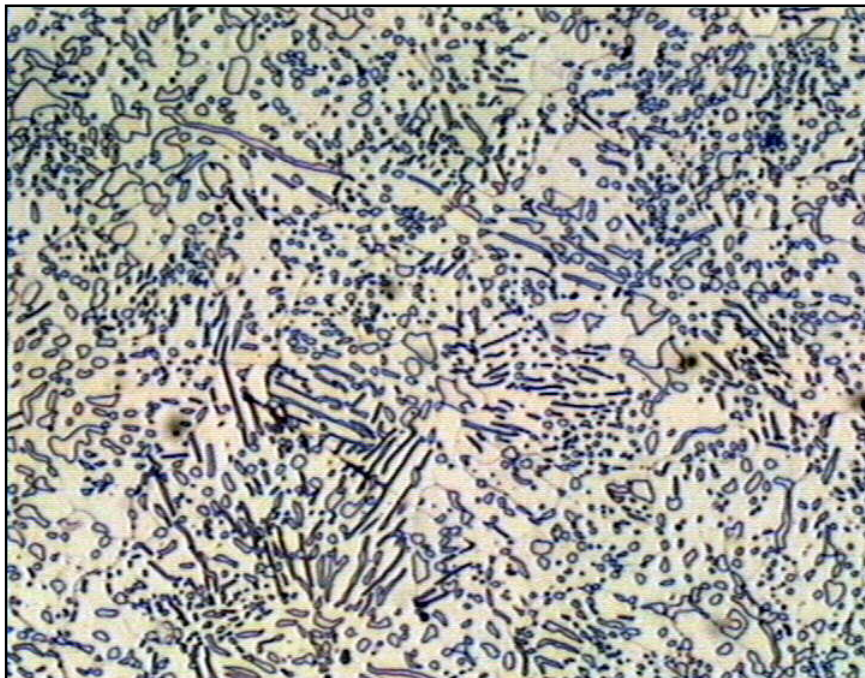
Un proceso de tratamiento térmico que mejorará la maquinabilidad se conoce como recocido de esferoidización. Este proceso producirá forma de carburo esferoidal o globular en una matriz ferrítica; puede emplearse uno de los métodos siguientes:

1. Mantener durante un tiempo prolongado a una temperatura justamente por debajo de la línea crítica inferior.
2. Calentar y enfriar alternadamente entre las temperaturas que están justamente por encima o por debajo de la línea crítica inferior.
3. Calentar a una temperatura por encima de la línea crítica inferior y luego enfriar muy lentamente en el horno, o mantener a una temperatura justo por debajo de la línea crítica inferior.

Mantener durante un tiempo prolongado a elevada temperatura despedazará completamente la estructura perlítica y la red de cementita. La cementita se convertirá en esferas, que es la forma geométrica de mayor equilibrio con sus alrededores.

La estructura esferoidizada es deseable cuando es importante una mínima dureza, una máxima ductilidad o una máxima maquinabilidad en acero al alto carbono. Los aceros al bajo carbono rara vez se esferoidizan por maquinado, porque en la condición esferoidizada son excesivamente suaves y gomosos. Algunas veces, los aceros al medio carbono se esferoidizan mediante recocido para obtener máxima ductilidad para ciertas operaciones de trabajo.

Figura 33. Acero de 0.8% de C con recocido de esferoidización (400x)

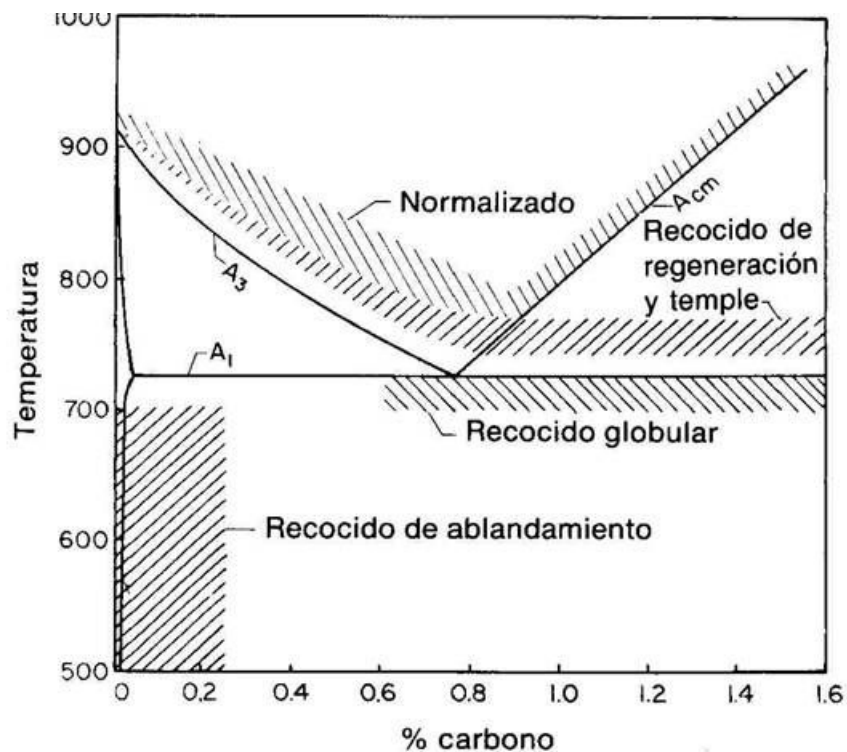


Fuente: www.esi2.us.es/IMM2/Pract-html/x-17.html

2.2.4 Normalizado

El normalizado se asemeja al recocido total en que la temperatura máxima alcanzada es similar. La diferencia se encuentra en el método de enfriamiento. Mientras que en el recocido se retarda el enfriamiento, en el normalizado el acero se retira del horno y se permite su enfriamiento en aire quieto. Este método de enfriamiento, relativamente rápido, limita el crecimiento del grano en el normalizado, de manera que las propiedades mecánicas son algo mejores que en la componente recocida. Además, el acabado de la superficie de una pieza normalizada es con frecuencia superior al de la misma recocida al maquinarse, ya que la falta de ductilidad de esta última, da con frecuencia, lugar a un desgarramiento local de la superficie.

Figura 34. Intervalo de temperaturas de normalizado, recocido y temple



Fuente: Raymond Higgins. **Ingeniería metalúrgica, tomo 1.** Pág. 210.

El tipo de estructura que se obtiene por el normalizado dependerá mucho del espesor de la sección transversal, ya que esto afecta la rapidez de enfriamiento. Las secciones delgadas darán un grano mucho más fino que las gruesas, y estas últimas difieren poco en su estructura, de una sección recocida.

Figura 35. Estructura de un acero normalizado con 0.80% de C (400x)



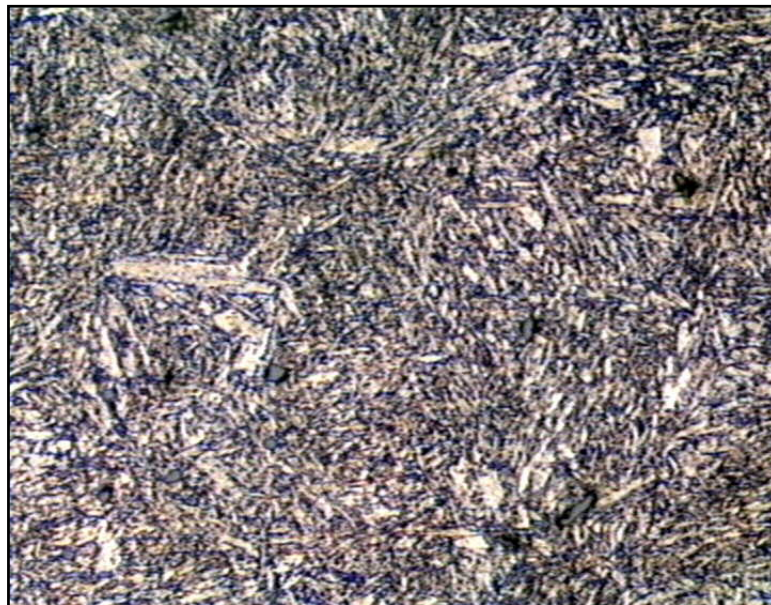
2.2.5 Revenido

En la condición martensítica sin tratamiento térmico posterior, el acero es demasiado frágil para la mayoría de las aplicaciones. La formación de martensita origina grandes tensiones residuales en el acero; por tanto, el endurecimiento casi siempre sigue de un tratamiento de revenido, el cual consiste en calentar el acero a alguna temperatura menor que la crítica inferior. El propósito del revenido es liberar los esfuerzos residuales y mejorar la ductilidad y tenacidad del acero. Este aumento en ductilidad generalmente se obtiene a costa de la disminución de dureza o de la resistencia.

El revenido causa una transformación de la martensita. Mientras más alta sea la temperatura del revenido, más tenderá la estructura a convertirse nuevamente a perlítica, estable a esta temperatura, puesto que el revenido siempre se lleva a cabo debajo de la temperatura crítica inferior.

El revenido a temperaturas de hasta 200° C, solamente alivia los esfuerzos hasta cierto punto; pero, entre 230° y 240°C, la martensita cambia en cierto grado, para formar un constituyente blanco de ataque rápido. Esta nueva estructura, llamada troostita secundaria, tiene forma granular y es, de hecho, una mezcla de ferrita extremadamente fina y cementita. La troostita es mucho más tenaz, pero algo más suave que la martensita, lo que la hace más útil en casos en que la resistencia y la uniformidad son más importantes que una dureza extrema.

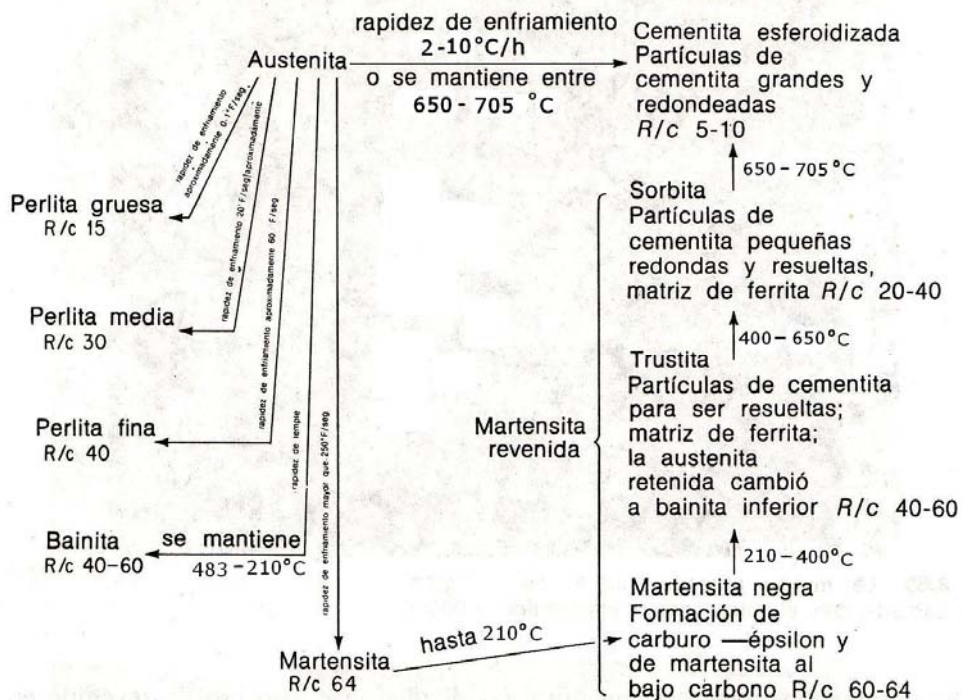
Figura 36. Estructura de un acero revenido a 600°C con 0.35% de C (400x)



Fuente: www.esi2.us.es/IMM2/Pract-html/x-26.html

El revenido a temperaturas superiores a 400°C, hace que se produzca la fusión de partículas de cementita, a tal grado que pueden ser vistas fácilmente con ampliaciones del orden de 500. Este tipo de estructura se conoce como “sorbita” y la diferencia entre la sorbita y la troostita se encuentra solamente en el tamaño de la partícula y no en su naturaleza fundamental. La sorbita es más débil y suave, pero más dúctil que la troostita; si bien, al aumentar la temperatura de revenido a más de 550°C, la resistencia desciende rápidamente, con poco o ningún aumento en la ductilidad.

Figura 37. Productos de transformación de martensita de un acero eutectoide



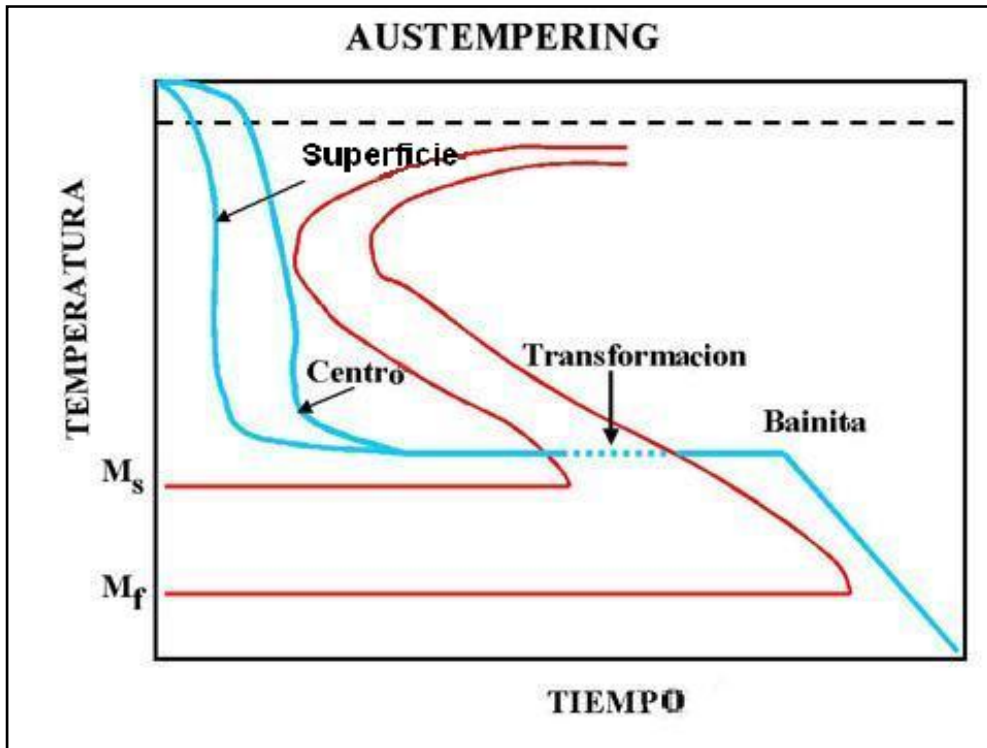
Fuente: Sydney Avner. **Introducción a la metalurgia física.** Pág. 312.

2.2.6 Ausrevenido (*Austempering*)

Éste es un proceso de tratamiento térmico desarrollado del diagrama TTT para obtener una estructura que es 100% bainita. Esto se logra calentando primero la pieza a la temperatura de austenización propia, seguida de un rápido enfriamiento en un baño de sal mantenido en el intervalo de bainita. La pieza se deja en el baño hasta que se completa la transformación a bainita. El acero se provoca a ir directamente de austenita a bainita, y en ningún momento se halla en el estado martensítico totalmente endurecido. De hecho, el ausrevenido es un tratamiento térmico completo y no se incluye ningún recalentamiento como el revenido.

Aparte de la ventaja de contar con mayor ductilidad y tenacidad junto con la alta dureza como resultado del ausrevenido, también hay menos distorsión y peligro de fisuras por templeado, porque el temple no es tan drástico como en el método convencional.

Figura 38. Proceso de ausrevenido en el diagrama TTT



Fuente: info.lu.farmingdale.edu/depts/met/met205/austempering.JPG

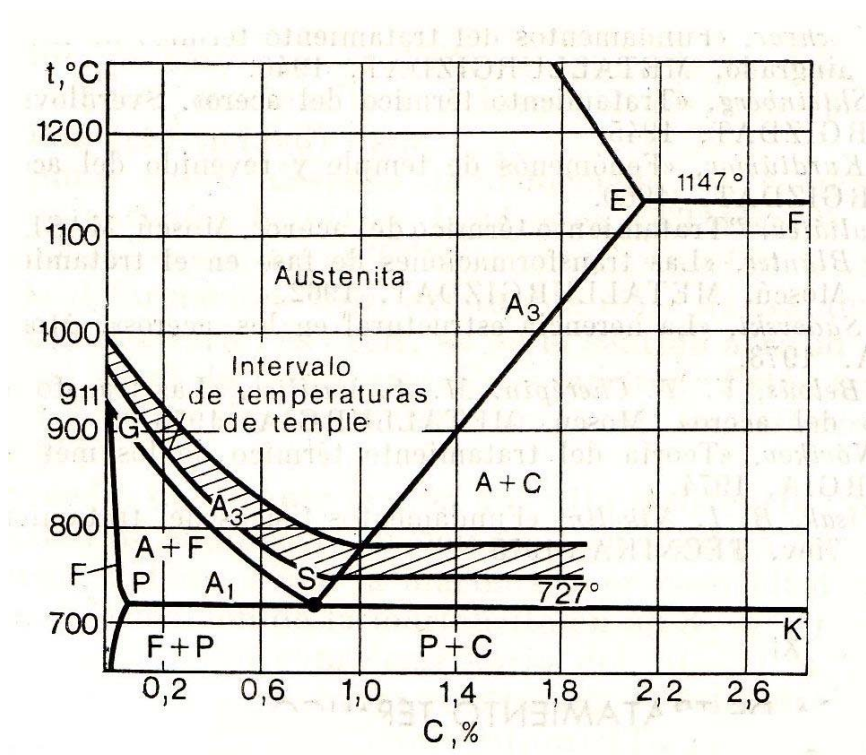
2.2.7 Temple

El temple es un tratamiento térmico que tiene por objeto aumentar la dureza, resistencia mecánica y tenacidad del acero. El proceso se lleva a cabo calentando el acero a una temperatura arriba de la temperatura crítica superior¹, para los aceros hipoeutectoides, y para los aceros hipereutectoides, se calienta el acero arriba de la temperatura crítica inferior, para luego enfriar el acero rápidamente.

1. Ir a las Figuras 27 y 39 de esta misma tesis para observar las temperaturas críticas inferior y superior e intervalos de temperaturas de temple en el diagrama hierro carbono.

El propósito básico del temple es producir una estructura totalmente martensítica, y la mínima rapidez de enfriamiento que evitará la formación de cualquiera de los productos más suaves de transformación se conoce como rapidez crítica de enfriamiento. La rapidez crítica de enfriamiento determinada por la composición química y el tamaño de grano austenítico, es una propiedad importante de un acero, ya que indica qué tan rápido debe enfriarse un acero para formar sólo martensita.

Figura 39. Intervalo de temperatura de temple en diagrama Fe-C



Fuente: A.P. Guliaev. **Metalografía, Tomo 1.** Pág. 284.

La estructura martensítica se logra obtener únicamente con enfriamientos extremadamente rápidos. La martensita es la más dura de las fases que se encuentran en el acero y puede considerarse más convenientemente como una solución sólida sobresaturada de carbono en hierro cúbico centrado. Mientras que la solución sólida de carbono en el hierro cúbico de caras centradas (austenita) es suave y maleable, esta solución supersaturada, martensita, es muy dura y frágil. Un enfriamiento menos severo, da lugar a una estructura conocida como bainita.

En la figura 40 se muestra la estructura martensítica que se logra en el acero con el temple.

Figura 40. Estructura de un acero templado con 0.35% de C (400x)



Fuente: www.esi2.us.es/IMM2/pag-web-metalografia.html

2.2.8 Templabilidad

La templabilidad de un acero es la propiedad que determina la profundidad y distribución producida por el temple; o también podría definirse como la facilidad que tiene el acero para formar martensita dificultando la aparición de productos de transformación.

La templabilidad depende de:

- La composición química del acero
- Tamaño de grano austenítico
- La estructura del acero antes del temple

La templabilidad se determina usualmente por dos métodos:

- Método Grossmann o del diámetro crítico ideal
- Método Jominy

2.3 Tratamientos termoquímicos

2.3.1 Cementación

En la cementación se lleva a cabo una saturación superficial del acero con carbono, a consecuencia de la cual se obtiene una capa superficial de alto contenido de carbono. Como para cementar se utiliza un acero pobre en carbono, el núcleo permanece blando y tenaz, aunque después de cementado se temple el acero.

Hay dos tipos de cementación: sólida y gaseosa.

En nuestro caso solamente explicaremos la cementación sólida, ya que este tipo de cementación es la más utilizada y sencilla de realizar.

En la cementación sólida las piezas se entierran en una caja llena de carburante o cementante. Este es carbón vegetal con algunos aditivos. En la caja, en los intervalos entre los trozos de carbón, hay aire, cuyo oxígeno a la temperatura del proceso (900 – 950°C) se combina con el carbono formando monóxido de carbono (CO).

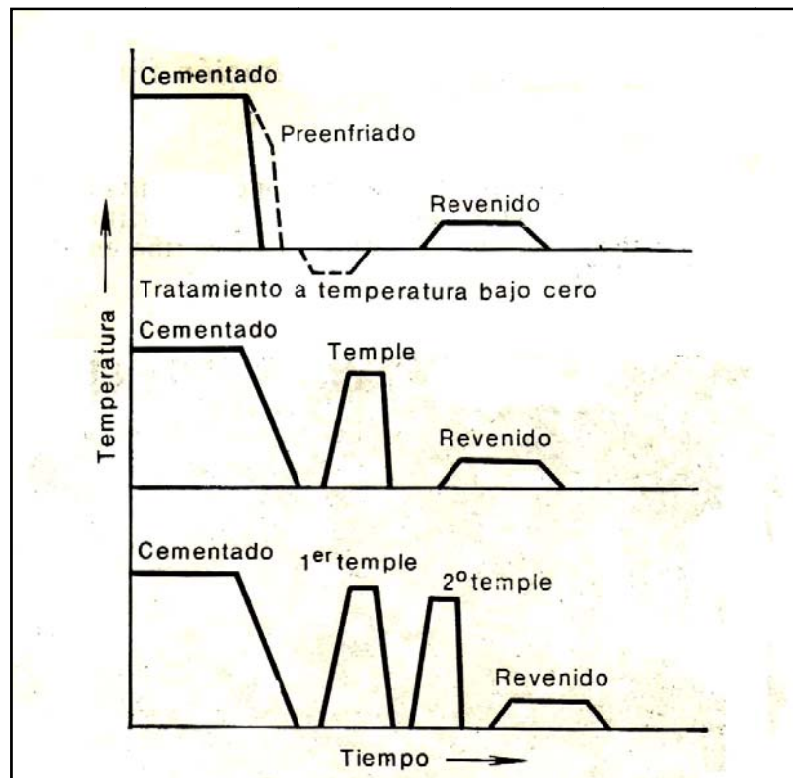
El proceso de cementación sólida es una operación larga y que, según sea la profundidad de cementación que sea necesaria, suele requerir muchas horas. Incluso para que se forme una capa de poca profundidad, por ejemplo, de 1 mm, la cementación debe durar varias horas. Esta duración tan larga del proceso se debe principalmente a la pequeña velocidad con que se calienta la caja, por estar llena de cementante mal conductor de calor.

Se recomienda cementar de tal modo, que el contenido de carbono en la capa exterior no excede del 1.1 – 1.2%. Si el contenido de carbono es mayor se forman cantidades considerables de cementita secundaria que da a la capa una fragilidad elevada.

Para resolver el problema de la cementación, es decir, para obtener una dureza superficial elevada y gran resistencia al desgaste, siendo tenaz el núcleo de la pieza, no basta dicho tratamiento. Las propiedades de la pieza cementada se ponen de manifiesto definitivamente después del temple, con el cual se obtiene en la superficie martensita rica en carbono, y en el núcleo se conserva la baja dureza y la alta tenacidad.

En todos los casos las piezas cementadas, después del temple, se someten a revenidos a bajas temperaturas (150 – 200°C) para eliminar las tensiones internas. Como resultado de este tratamiento (temple + revenido a baja temperatura) la superficie deberá tener la dureza HRC 58 – 62, y el núcleo una mucho menor, del orden de HRC 25 – 35 en los aceros aleados y aún más baja en los aceros al carbono.

Figura 41. Regímenes de tratamiento térmico de las piezas cementadas



Fuente: A.P. Guliaev. **Metalografía, volumen 1.** Pág. 325.

2.3.2 Nitruración

Se llama nitruración al proceso de saturación del acero con nitrógeno. Este proceso, comparado con la cementación, se utiliza desde hace relativamente poco.

La nitruración se asemeja a la cementación en que el acero se calienta durante un tiempo considerable en el medio endurecedor, mientras que en la cementación usan carbono como medio, en la nitruración se emplea nitrógeno gaseoso.

Puesto que se lleva a cabo a una temperatura relativamente baja, la nitruración constituye la operación final en la manufactura de la componente, habiendo sido llevados a cabo previamente todo el maquinado y procesos de tratamiento del centro. Las partes se mantienen a 500°C por lapsos de 40 a 100 horas, según la profundidad requerida, en la cubierta en una cámara estanca a través de la cual puede circular el amoniaco.

Antes de ser nitrurado, las componentes se tratan térmicamente para producir las propiedades requeridas en el centro. La frecuencia normal de operación será:

- a) Templados en aceite entre 850 y 900°C, seguido de revenido a entre 600 y 700°C;
- b) Maquinado de desbaste, seguido de un recocido estabilizador a 50°C por cinco horas para eliminar esfuerzos internos;
- c) Maquinado y acabado, seguido de nitruración.

Las ventajas de la nitruración son las siguientes:

- a) Puesto que no se requiere el templado después de la nitruración, son poco probables el agrietamiento o la distorsión.
- b) Se puede obtener una dureza superficial muy alta, del orden de HRC 70 con los aceros de nitruración (*Nitralloy*).
- c) La resistencia a la corrosión es buena si la superficie nitrurada se deja sin pulir.
- d) La resistencia a la fatiga es buena.

2.3.3 Carbonitruración

La carbonitruración es un proceso de endurecimiento superficial en el cual un acero se calienta en una atmósfera gaseosa de tal composición que el carbono y el nitrógeno se absorben simultáneamente. El proceso también se conoce como cianuración seca y cianuración por gas.

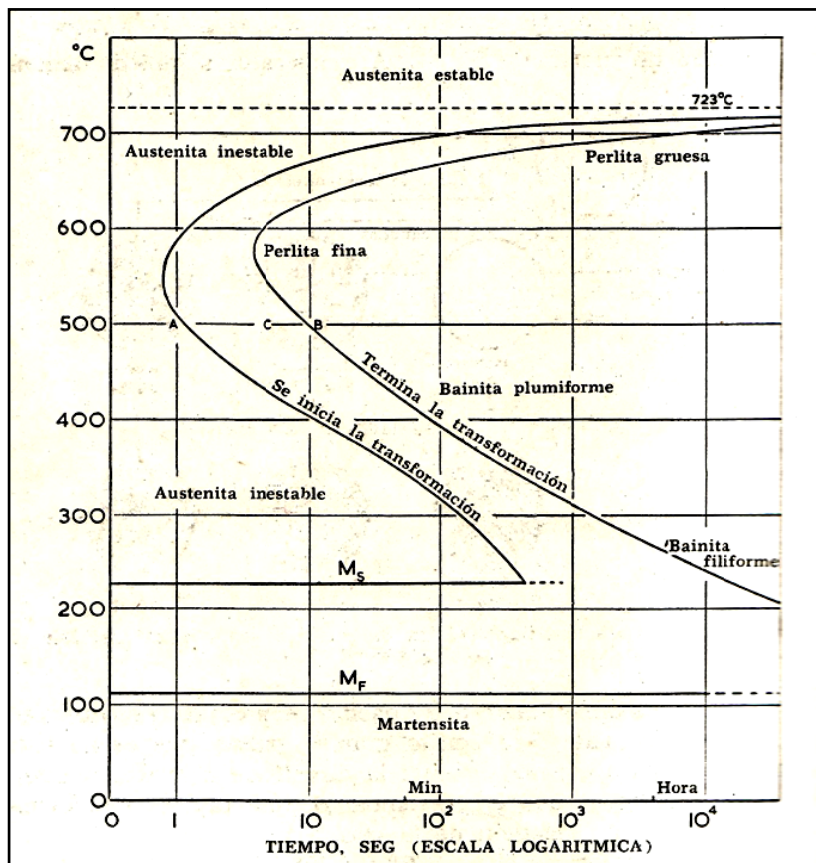
Las atmósferas utilizadas en carbonitruración generalmente incluyen una mezcla de gas portador, gas enriquecedor y amoníaco. El gas portador suele ser una mezcla de nitrógeno, hidrógeno y monóxido de carbono producido en un generador endotérmico. El gas portador se proporciona al horno bajo presión positiva a fin de prevenir infiltración por aire y actúa como una sustancia inerte para los gases activos, haciendo de este modo que el proceso sea más fácil de controlar. El gas enriquecedor es generalmente propano o gas natural y constituye la principal fuente para el carbono añadido a la superficie.

Debido al tratamiento a menor temperatura y al templado en aceite en vez de templado en agua, se reduce la distorsión y hay menos peligro de que haya fisuras.

2.4 Diagrama TTT

La microestructura y las propiedades de un acero enfriado, dependen de la rapidez de enfriamiento que prevalece durante la operación. Esta relación entre estructura y rapidez de enfriamiento, pueden ser estudiadas para un acero dado con la ayuda de un juego de curvas de transformación isotérmica que se conocen como curvas TTT (Transformación – Tiempo – Temperatura). Las curvas TTT para un acero de composición eutectoide se muestran en la Figura 42.

Figura 42. Curvas TTT para un acero al carbono eutectoide



Fuente: Raymond Higgins. *Ingeniería metalúrgica, tomo 1*. Pág. 222.

Estas curvas se construyen tomando varias probetas del acero en cuestión, calentándolas en la zona austenítica y luego enfriándolas en baños a temperaturas diferentes. A intervalos de tiempo predeterminados, se retiran probetas individuales de esos baños y se enfrían en agua. Luego se examina la microestructura para ver la extensión porque ha tenido lugar la transformación a la temperatura de mantenimiento.

Supóngase, por ejemplo, que hemos calentado un número de probetas de acero eutectoide a una temperatura un tanto arriba de 723°C y luego las hemos enfriado en plomo fundido a 500°C . Hasta después de un segundo, no se ha iniciado transformación y, si retiramos una probeta del baño en menos de un segundo y luego la enfriamos en agua, obtendremos una estructura completamente martensítica (Punto A en la Figura 42). La producción de martensita en la estructura observada se debe totalmente al enfriamiento final en agua.

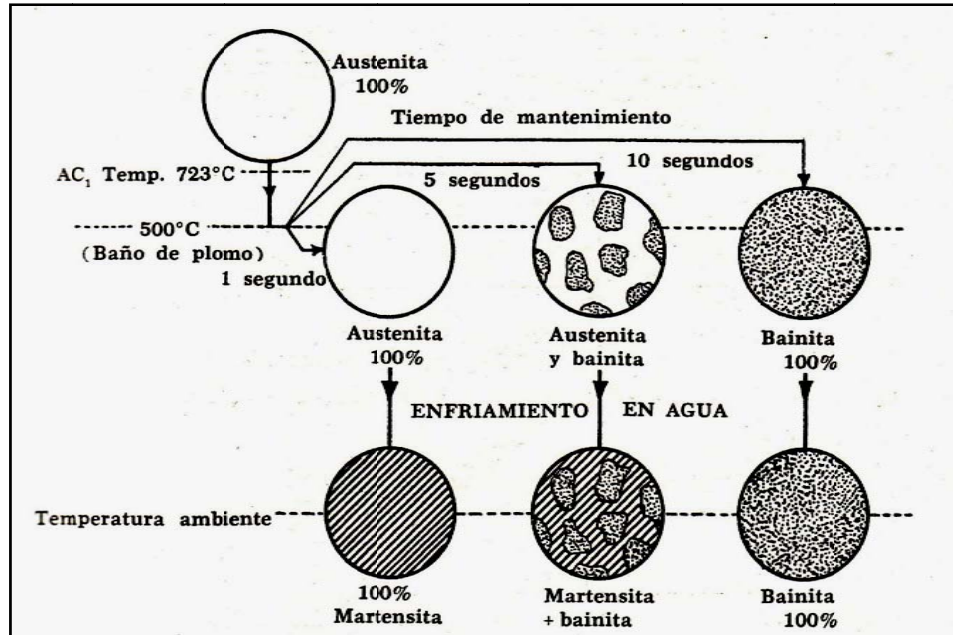
Si permitimos que la probeta permanezca a 500°C por 10 segundos (Punto B en la Figura 42) y luego la enfriamos en agua, encontraremos que la estructura está compuesta totalmente de bainita en parches con forma de pluma, lo que muestra que, después de 10 segundos a 500°C , la transformación a bainita ha sido completa.

Si enfriásemos una probeta después que se ha mantenido a 500°C por cinco segundos (Punto C, en la Figura 42), obtendríamos una mezcla de bainita y martensita, lo que indica que, a la temperatura de mantenimiento, la estructura ha contenido bainita y austenita, debido a la transformación incompleta de esta última. Repitiendo estos tratamientos a temperaturas de permanencia diferentes podemos, interpretando las microestructuras resultantes, construir las curvas TTT del tipo ilustrado en la Figura 42.

La línea horizontal que representa la temperatura de 723°C es la temperatura crítica inferior arriba de la cual la estructura del acero eutectoide en cuestión consiste enteramente de austenita estable. Abajo de esta línea la austenita es inestable y las dos curvas (con forma aproximada de C) indican el tiempo necesario para que se inicie la transformación austenita en ferrita + cementita y se complete después de un enfriamiento rápido a cualquier temperatura predeterminada.

La transformación es lenta a temperaturas inmediatamente debajo de la crítica inferior; pero la aleación en la iniciación y el tiempo requerido para su terminación, disminuye al descender la temperatura hacia 550°C . En esta zona, mientras mayor sea el grado de subenfriamiento, mayor es la tendencia de la austenita a transformarse y la rapidez de transformación alcanza un máximo de 550°C . A temperaturas inmediatamente debajo de 723°C , donde la transformación se produce directamente, la estructura formada será perlita grande, puesto que existe suficiente tiempo para que tenga lugar la difusión. En la región inmediatamente arriba de 500°C , sin embargo, una rápida transformación resulta en la formación de la perlita fina. A temperaturas entre 550 y 220°C , la transformación se hace más lenta al descender la temperatura; en esta zona de temperatura, el producto de transformación es bainita.

Figura 43. Representación diagramática del método usado para describir las curvas TTT



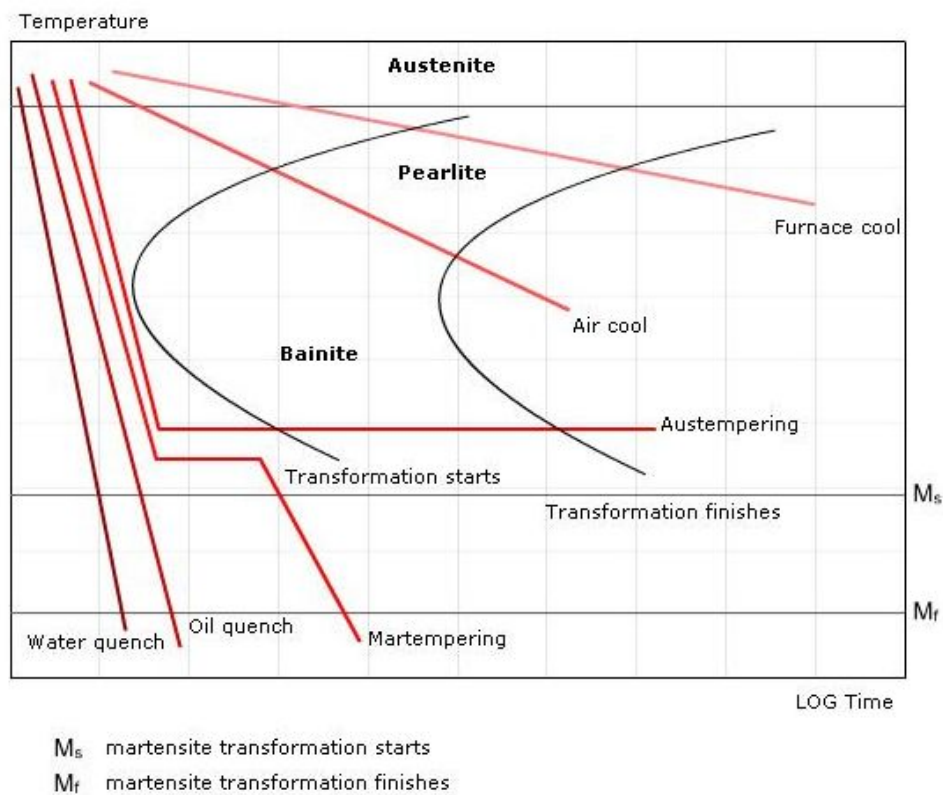
Fuente: Raymond Higgins. **Ingeniería metalúrgica, tomo 1.** Pág. 223.

Las líneas horizontales al pie del diagrama no son, hablando estrictamente, parte de las curvas TTT, sino que representan las temperaturas a las cuales se inicia (M_s) y acaba (M_f) la formación de martensita durante el enfriamiento de la austenita en esta zona.

Las curvas TTT ilustradas en la Figura 42 corresponden a un acero de composición eutectoide (0.83% C). Si el contenido de carbono es superior o inferior a éste, las curvas se desplazarán a la izquierda, de manera que el ritmo de enfriamiento crítico necesario para producir una estructura que sea enteramente martensítica, será mayor.

Afortunadamente, la adición de elementos de aleación tiene el efecto de mover las curvas TTT hacia la derecha del diagrama. Esto indica que pueden usarse ritmos de enfriamiento más lentos, en forma de enfriamiento en aceite y aún en aire, y todavía se podrá retener una estructura martensítica. En este sentido, son efectivas pequeñas cantidades de elementos tales como níquel, cromo y manganeso.

Figura 44. Representación de tratamientos térmicos en diagrama TTT



Fuente: www.steeluniversity.org

Tabla XI. Traducción de los términos mostrados en la Figura 44

Término en inglés	Significado en español
Furnace cool	Enfriado dentro del horno (recocido)
Air cool	Enfriado al aire (normalizado)
Oil quench	Temple en aceite
Water quench	Temple en agua
Transformation starts	Empieza transformación
Transformation finishes	Termina transformación
Martensite transformation starts	Empieza transformación martensítica
Martensite transformation finishes	Termina transformación martensítica
Austenite	Austenita
Pearlite	Perlita
Bainite	Bainita
Austempering	Ausrevenido
Martempering	Martemplado

3. MICROSCOPIO ELECTRÓNICO

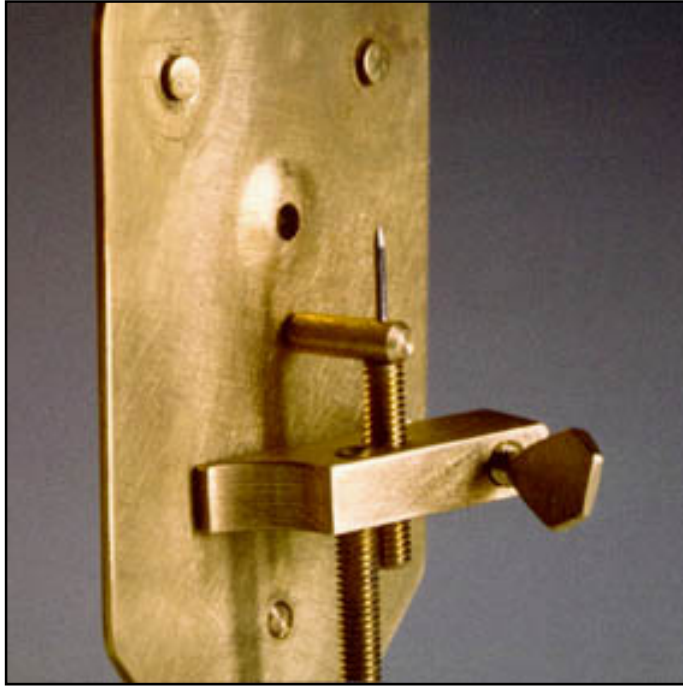
3.1 Metalografía

La metalografía es la disciplina que estudia microscópicamente las características estructurales de un metal o de una aleación. Sin duda, el microscopio es la herramienta más importante del metalurgista, tanto desde el punto de vista científico como del técnico. Es posible determinar el tamaño de grano, forma y distribución de varias fases e inclusiones que tienen gran efecto sobre las propiedades mecánicas del metal. La microestructura revelará el tratamiento mecánico y térmico del metal y, bajo un conjunto de condiciones dadas, podrá predecirse su comportamiento esperado.

3.2 Microscopía electrónica

Nadie sabe con seguridad quien inventó el microscopio. El microscopio óptico se desarrolló probablemente, a partir del telescopio de Galileo, durante el siglo XVII. Uno de los instrumentos más antiguos para ver objetos muy pequeños fue construido por el holandés Antony Van Leeuwenhoek (1632 – 1723), y estaba formado por una potente lente convexa y un soporte ajustable para el objeto a estudiar. Con este microscopio sumamente sencillo, Van Leeuwenhoek bien pudo haber conseguido ampliar objetos hasta 400x y, con él, descubrió protozoos y bacterias.

Figura 45. Microscopio de Van Leeuwenhoek



El factor limitante en el microscopio de Van Leeuwenhoek era la calidad de la lente convexa. El problema se pudo resolver con la adición de otra lente, para ampliar la imagen producida por la primera lente. Este microscopio compuesto – formado por una lente objetiva y un ocular, junto con medio para el enfoque, un espejo o una fuente de luz y un soporte para sujetar y colocar el espécimen – es la base de los microscopios ópticos actuales.

Un microscopio óptico moderno ofrece una ampliación máxima de 1000x, y permite al ojo resolver objetos separados 0.0002 mm. En un esfuerzo continuo para obtener una mejor resolución, se encontró que el poder de resolución del microscopio estaba limitado no sólo por el número y la calidad de las lentes sino, también, por la longitud de onda de la luz utilizada para la iluminación. Era imposible resolver puntos del objeto que estuviesen más próximos que unos cientos de nanómetros. El uso de luz de longitud de onda corta (azul o ultravioleta), proporcionó una ligera mejora.

En los años 1920, se descubrió que los electrones acelerados se comportan en el vacío como la luz. Viajan en línea recta y tienen una longitud de onda que es unas 100,000 veces más pequeñas que la de la luz. Además, se encontró que los campos eléctricos y magnéticos tienen el mismo efecto sobre los electrones que el que tienen las lentes y los espejos de vidrio sobre la luz visible.

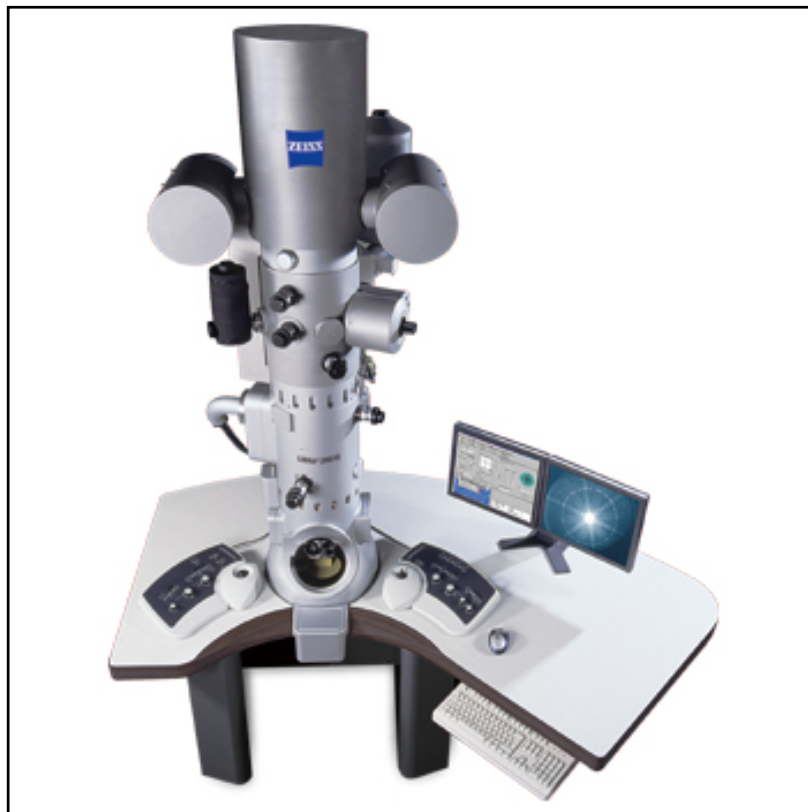
El Dr. Ernst Ruska, en la Universidad de Berlín, combinó estas características y construyó en 1931 el primer microscopio electrónico de transmisión (MET). El primer microscopio electrónico usaba dos lentes magnéticas, y tres años más tarde, se añadió una tercera y se logró una resolución de 100 nanómetros, doblemente mejor que la del microscopio óptico en esa época. Actualmente, usando cinco lentes magnéticas en el sistema de visualización, se puede conseguir un poder de resolución de 0.1 nanómetros con aumentos con más de un millón de veces.

3.3 Tipos de microscopio electrónico

Existen dos tipos principales de microscopios electrónicos:

Microscopio electrónico de transmisión: El microscopio electrónico de transmisión emite un haz de electrones dirigido hacia el objeto que se desea aumentar. Una parte de los electrones rebotan o son absorbidos por el objeto y otros lo atraviesan formando una imagen aumentada de la muestra. Para utilizar un microscopio electrónico de transmisión debe cortarse la muestra en capas finas, no mayores de un par de miles de angstroms. Los microscopios electrónicos de transmisión pueden aumentar un objeto hasta un millón de veces.

Figura 46. Microscopio electrónico de transmisión



Fuente: www.zeiss.com

Microscopio electrónico de barrido: En este microscopio la muestra es recubierta con una capa de metal delgada, y es barrida con electrones enviados desde un cañón. Un detector mide la cantidad de electrones enviados que arroja la intensidad de la zona de muestra, siendo capaz de mostrar figuras en tres dimensiones, proyectadas en una imagen de TV. Su resolución esta entre 3 y 20 nanómetros, dependiendo del microscopio. Permite obtener imágenes de gran resolución en materiales pétreos, metálicos y orgánicos. La luz se sustituye por un haz de electrones, las lentes por electroimanes y las muestras se hacen conductoras metalizando su superficie.

Figura 47. Microscopio electrónico de barrido



Fuente: www.fei.com

En los próximos dos subtítulos, dentro de este mismo capítulo, veremos con más detalle cada uno de estos dos microscopios.

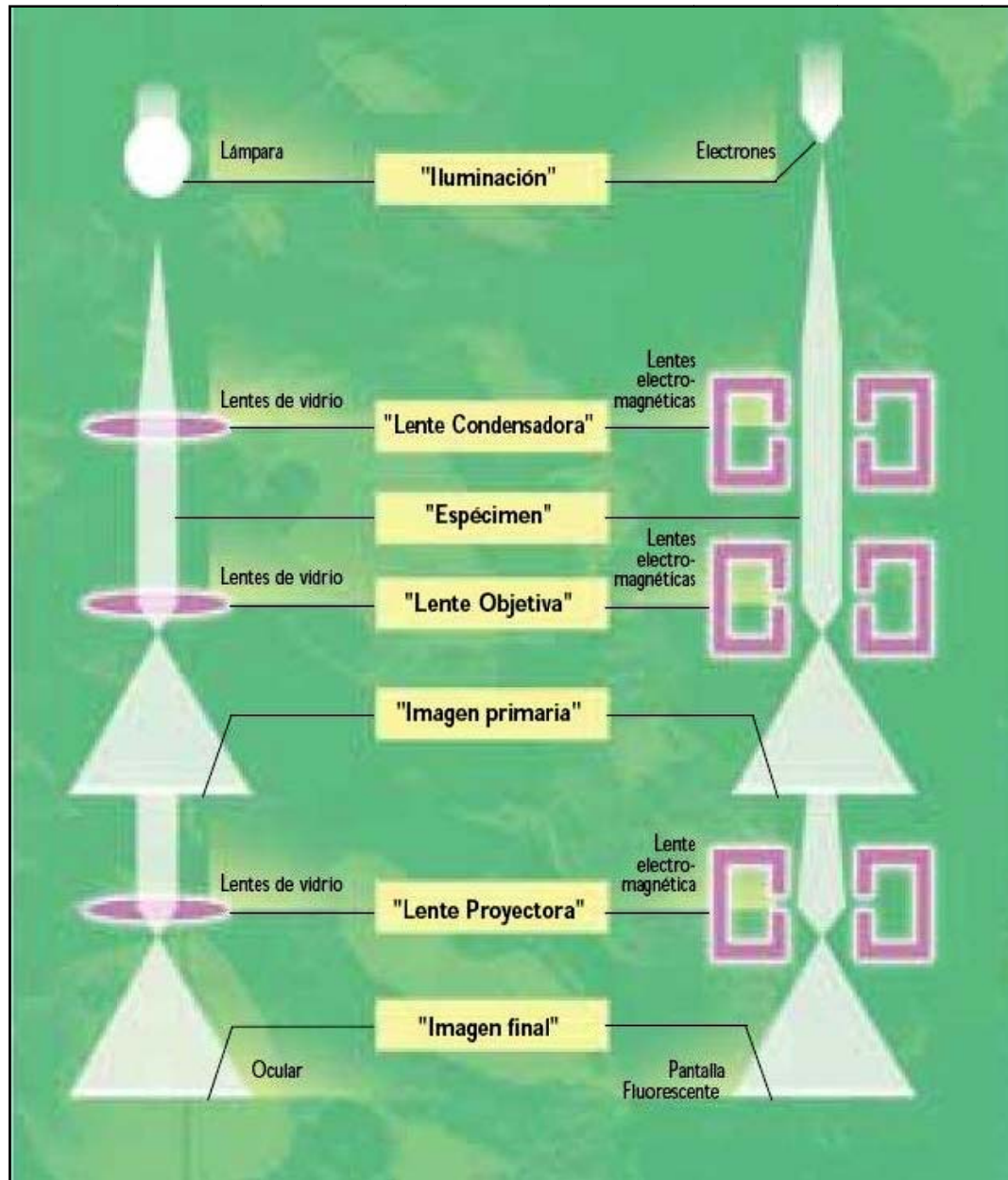
3.4 Microscopio electrónico de transmisión (MET)

3.4.1 Introducción

Un microscopio electrónico de transmisión esta formado por cuatro componentes principales: una columna de óptica electrónica, un sistema de vacío, la electrónica necesaria y el software de control.

La columna es el elemento principal. Consta de los mismos elementos que el microscopio óptico, como su puede ver en las trayectorias de los rayos de luz y de los electrones (Figura 48).

Figura 48. Comparación de trayectoria de luz de un microscopio óptico con la de un microscopio electrónico de transmisión



Fuente: **Manual microscopía electrónica.** FEI Company.

La fuente de luz del microscopio óptico es sustituida por un cañón de electrones incorporado en la columna. Las lentes de vidrio son sustituidas por lentes electromagnéticas y el ocular es sustituido por una pantalla fluorescente. Toda la trayectoria de los electrones, desde el cañón hasta la pantalla, ha de estar en vacío (en otro caso, los electrones colisionarían con las moléculas de aire y serían absorbidos), de modo que la imagen final ha de ser vista a través de una ventana en la cámara de proyección. A diferencia de las lentes de vidrio, las lentes electromagnéticas son variables: modificando la corriente que pasa por la bobina de la lente, se puede variar la distancia focal (la que determina el aumento).

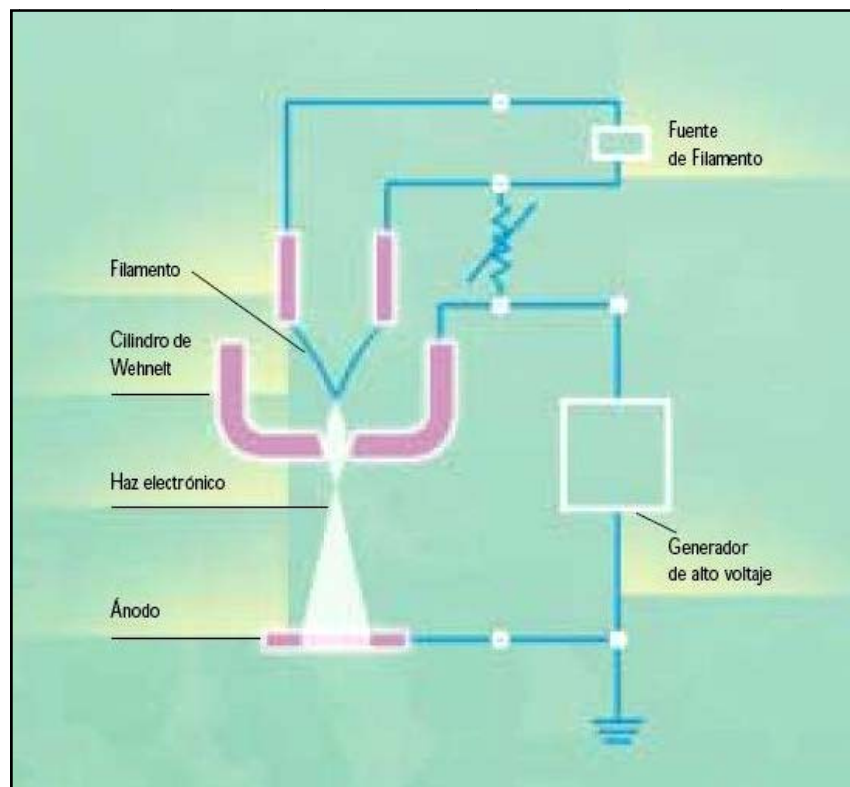
3.4.2 Cañón electrónico

El cañón electrónico está formado por un filamento, el llamado cilindro de Wehnelt y un ánodo. Estos tres elementos juntos forman un cañón tipo tríodo que es una fuente de electrones muy estable. El filamento de tungsteno tiene forma de horquilla y se calienta a unos 2700°C. Aplicando una diferencia de potencial positiva muy alta entre el filamento y el ánodo, los electrones son extraídos de la nube electrónica que rodea al filamento y se aceleran hacia el ánodo.

El ánodo tiene un orificio para que el haz electrónico, en el que los electrones viajan a varios cientos de miles de kilómetros por segundo, salga por el otro lado. El cilindro de Wehnelt, que está a un potencial diferente, agrupa los electrones en un punto enfocado con precisión.

El haz de electrones que sale del cañón se concentra en un haz casi paralelo al espécimen, mediante las lentes condensadoras y, después de pasar a través de éste, se proyecta como imagen ampliada del espécimen sobre la pantalla fluorescente en la base de la columna.

Figura 49. Esquema del cañón de electrones de un MET



Fuente: **Manual microscopía electrónica.** FEI Company.

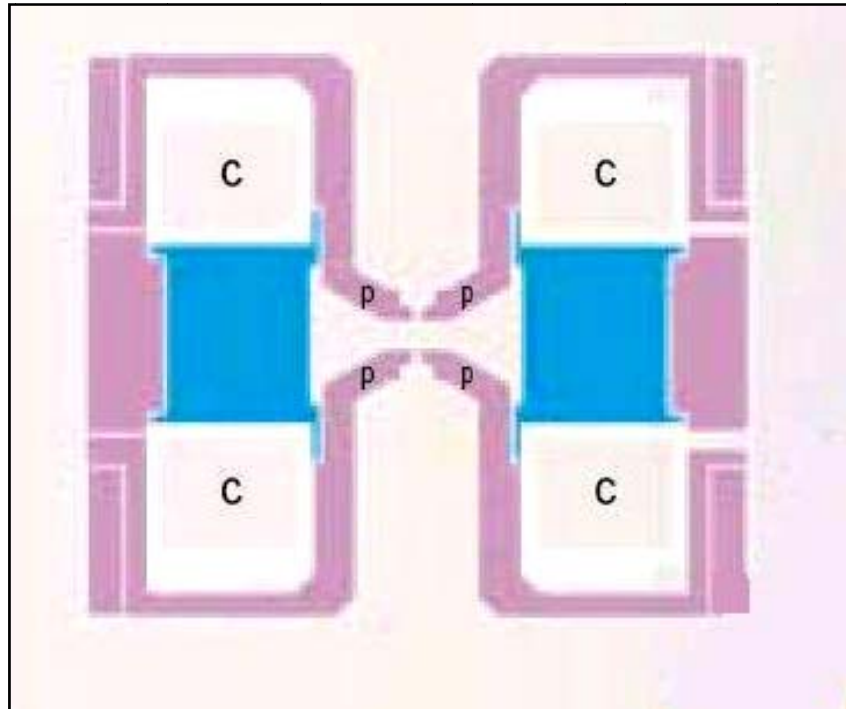
Si el espécimen no fuese delgado, los electrones, simplemente, serían detenidos y no se formaría ninguna imagen. Los especímenes para el microscopio electrónico de transmisión tienen, un espesor de 0.5 micras o inferior. Cuanto mayor es la velocidad de los electrones, más grueso puede ser el espécimen a estudiar.

3.4.3 Lentes electromagnéticas

La figura 50 muestra una sección transversal de una lente electromagnética. Cuando pasa una corriente eléctrica por las bobinas (C), se crea un campo electromagnético entre las piezas polares (P), que forman un entrehierro en el circuito magnético. Variando la corriente que pasa por la bobinas, se puede modificar el aumento de las lentes. Esta es la diferencia esencial entre las lentes magnéticas y las lentes de vidrio. Por lo demás, se comportan de la misma forma y tienen los mismos tipos de aberraciones.

Dentro de los tipos de aberraciones que existen, están: la aberración esférica, que consiste en que el aumento en el centro de la lente es diferente del aumento de los bordes; la aberración cromática, sucede cuando el aumento de la lente varía con la longitud de onda de los electrones del haz; y por último, el estigmatismo, que es, cuando un círculo en el espécimen se convierte en una elipse en la imagen.

Figura 50. Sección transversal de una lente electromagnética



Fuente: **Manual microscopía electrónica.** FEI Company.

El sistema de lentes condensadoras enfoca el haz electrónico sobre el espécimen a investigar todo lo que sea necesario para lograr la iluminación adecuada. La lente objetiva produce una imagen del espécimen que es posteriormente ampliada por el resto de las lentes de formación de la imagen y proyectada en la pantalla fluorescente. Para garantizar una gran estabilidad y conseguir el mayor aumento posible, las lentes de un MET moderno son refrigeradas con agua.

En su trayectoria desde el filamento hasta la pantalla fluorescente, el haz electrónico pasa a través de una serie de diafragmas de diferentes diámetros. Estos diafragmas detienen los electrones que no son necesarios para la formación de la imagen. Usando un sistema mecánico especial con cuatro diafragmas diferentes se pueden seleccionar desde el exterior de la columna los diámetros del diafragma de la lente condensadora, de la lente objetiva y de la lente de difracción, según sean requeridos por las circunstancias.

3.4.4 Vacío

Los electrones se comportan como la luz solamente cuando se manipulan en el vacío. Como se ha mencionado anteriormente, toda la columna, desde el cañón electrónico hasta la pantalla fluorescente, e incluyendo la cámara, se encuentran al vacío. Diversos niveles de vacío son requeridos. El vacío más elevado es alrededor del espécimen y en el cañón; en la cámara de proyección y en el recinto de la cámara fotográfica se encuentra un vacío menor. Para mantener estos niveles se usan diferentes bombas de vacío. El vacío más alto producido es del orden de una diezmillonésima de milímetro de mercurio.

Para evitar tener que evacuar toda la columna cada vez que se cambia de espécimen o de material fotográfico, o el filamento, se incorporan varias esclusas y válvulas de separación. En los microscopios electrónicos de transmisión modernos, el sistema de vacío esta totalmente automatizado, se vigila continuamente el grado de vacío y está totalmente protegido contra los problemas de funcionamiento.

3.4.5 La electrónica

Para obtener la resolución tan elevada que permiten los modernos microscopios electrónicos de transmisión, el voltaje de aceleración y la corriente de las lentes debe ser extremadamente estable. La unidad de la fuente de alimentación contiene varias fuentes de suministro cuya tensión o corriente de salida no se desvía más de una millonésima del valor seleccionado para una finalidad determinada. Dichas estabilidades requieren circuitos electrónicos muy sofisticados.

El diseño mejorado de la óptica electrónica ha hecho posible un mayor número de técnicas electrón-ópticas cada vez más complicadas. Ello, a su vez, ha creado la necesidad de una operación más sencilla. Las técnicas electrónicas digitales, en general, y las técnicas basadas en microprocesadores en particular juegan un papel muy importante en este aspecto.

Los modernos microscopios electrónicos emplean una PC potente y rápida para controlar, vigilar y registrar las condiciones de operación del microscopio. Esto da lugar a una drástica reducción en el número de botones de mando en comparación con los modelos antiguos, y a un microscopio que es muy sencillo de usar. La PC se puede conectar a una red para poder hacer copias de seguridad automáticas y para descargar los resultados a otras estaciones de trabajo. El microscopio siempre se podrá actualizar instalando un nuevo software o sustituyendo la computadora por un modelo de tecnología más reciente.

3.4.6 Preparación del espécimen

El microscopio electrónico de transmisión se puede usar en cualquier rama de la ciencia y de la tecnología en la que se desee estudiar la estructura interna de especímenes hasta el nivel atómico. El espécimen se debe poder estabilizar y hacer lo suficientemente pequeño (unos 3 milímetros de diámetro) para poder permitir su introducción en la columna del microscopio al vacío, y lo suficientemente delgado (menos de 0.5 micrones) para permitir el paso de los electrones.

En metalurgia se aplica, a veces, el siguiente método de preparación: un disco del material, de 3 milímetros de diámetro (de un espesor, digamos 0.3 milímetros), se trata químicamente de tal forma que en el centro del disco se ataque totalmente el material. Alrededor de este orificio, habrá, usualmente, zonas que sean lo suficientemente delgadas (aproximadamente 0.1 micrómetros) que permitan el paso de los electrones. En un semiconductor se desea, a veces, cortar una sección de material perpendicularmente a la superficie para investigar un defecto. Esto se hace mediante un ataque con haz de iones.

3.5 Microscopio electrónico de barrido (MEB)

3.5.1 Introducción

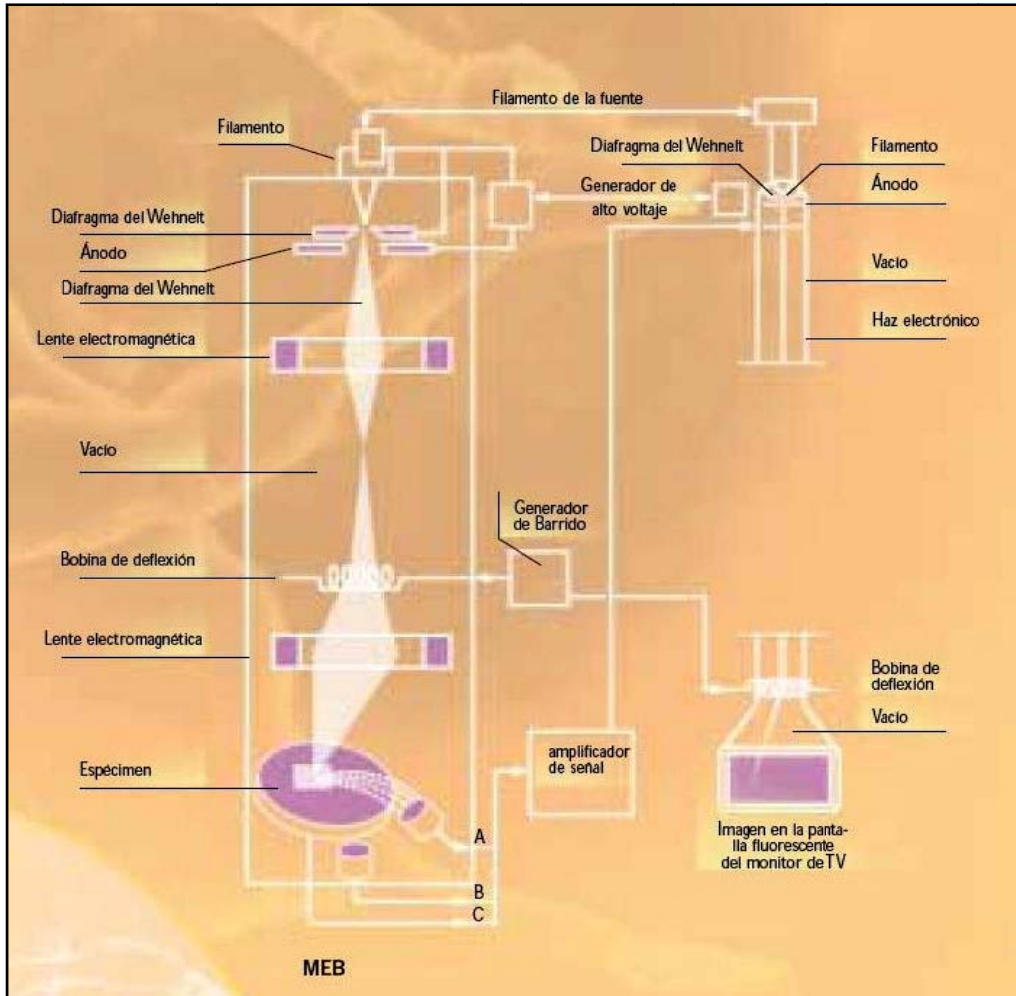
Un microscopio electrónico de barrido, al igual que un MET, esta compuesto por una columna de óptica electrónica, un sistema de vacío y la electrónica. La columna es notablemente más corta porque sólo hay tres lentes para enfocar los electrones en un haz fino sobre el espécimen; además no hay lentes bajo el espécimen.

La cámara del espécimen, por otra parte, es mayor debido a que la técnica MEB no impone otras restricciones sobre el tamaño del espécimen que las impuestas por el tamaño de su cámara de espécimen. La unidad electrónica es más pequeña: aunque contiene electrónica de barrido y visualización, que el MET básico no tiene, las alimentaciones de las lentes y el voltaje de aceleración son considerablemente más compactas.

Todos los componentes de un MEB se alojan, por lo general, en una unidad. El cañón electrónico en la parte superior de la columna produce un haz de electrones que se enfoca en un fino punto menor de 4 nanómetros de diámetro sobre el espécimen. Este haz es barrido en un arreglo rectangular sobre el espécimen. Además de otras interacciones con el espécimen, se producen electrones secundarios y estos son detectados por un detector adecuado. La amplitud de la señal de los electrones secundarios varía con el tiempo de acuerdo con la topografía de la superficie del espécimen. La señal se amplifica y se usa para hacer que varíe en concordancia con la brillantez del haz electrónico de un tubo de rayos catódicos (CRT).

Tanto el haz del microscopio como el del CRT, son explorados a la misma frecuencia y hay una relación unívoca entre cada punto en la pantalla del CRT y el punto correspondiente del espécimen. Así se construye la imagen (Figura 51). La relación entre el tamaño de la panta del monitor de visualización (CRT) y el tamaño de la superficie explorada sobre el espécimen es la amplificación. Se consigue aumentar la amplificación reduciendo el tamaño de la superficie barrida sobre el espécimen. El registro se realiza fotografiando la pantalla del monitor (o, más usualmente, una pantalla separada de alta resolución), haciendo impresiones de video o guardando la imagen digitalmente.

Figura 51. Diagrama esquemático de un MEB mostrando la columna y cómo se forma la imagen en el monitor



3.5.2 Cañón electrónico

El cañón electrónico está compuesto por un filamento y el cilindro Wehlnet, y es igual que el de un MET. Tampoco es muy diferente el sistema de iluminación, compuesto por el cañón electrónico, ánodos y lentes condensadoras. La lente final enfoca el haz sobre la superficie del espécimen a estudiar.

Las diferencias más importantes entre el microscopio electrónico de barrido y el de transmisión son:

- a. El haz no es estático como en el MET: con la ayuda de un campo electromagnético, producido por las bobinas de barrido, el haz explora línea por línea sobre un área extremadamente pequeña de la superficie del espécimen.
- b. El voltaje de aceleración es considerablemente menor que en el MET, porque ya no es necesario penetrar el espécimen; en un MEB varía entre 200 y 30,000 voltios.
- c. Los especímenes no necesitan preparaciones complicadas.

3.5.3 Detección de los electrones

Los detectores para los electrones retrodispersados y electrones secundarios son, usualmente, detectores de centello o detectores de estado sólido. En el primer caso, los electrones chocan contra una pantalla fluorescente que, inmediatamente después, emite luz que es amplificada y convertida en una señal eléctrica mediante un tubo fotomultiplicador. El último detector funciona amplificando la diminuta señal producida por los electrones que llegan a un dispositivo semiconductor.

Cuando el espécimen no está conectado directamente a tierra, sino a través de una resistencia, los electrones que no han sido reflejados generan una diferencia de potencial a través de la resistencia. Esta diferencia de potencial cambiante, puede ser amplificada y la señal resultante puede ser usada para producir una tercera clase de imagen en el monitor. Esta función también permite el estudio de fenómenos eléctricos (dinámicos) en dispositivos electrónicos, tales como los circuitos integrados.

3.5.4 Aumento y resolución

En el microscopio electrónico de barrido el aumento está totalmente determinado por el tipo de circuitos electrónicos que barren el haz sobre el espécimen (y simultáneamente sobre la pantalla fluorescente del monitor en el que se despliega la imagen).

El aumento puede ser tan grande como 300,000x, lo cual es, normalmente más que suficiente. En principio, la resolución de un MEB esta determinada por el diámetro de haz sobre la superficie del espécimen. La resolución práctica, sin embargo, depende de las propiedades del espécimen y de la técnica de preparación del mismo, y de muchos parámetros del instrumento, como la intensidad del haz, el voltaje de aceleración, la velocidad de barrido, la distancia desde la última lente al espécimen (denominada usualmente distancia de trabajo), y el ángulo de la superficie del espécimen con relación al detector. Bajo condiciones óptimas, se puede obtener una resolución de 1 nanómetro.

La resolución (determinada por el tamaño del haz incidente) significa que se pueden conseguir aumentos del orden de 300,000 veces. Si la pantalla de visualización es, pongamos por caso, de 300 milímetros de anchura, la anchura total de la zona barrida será de sólo 1 micrómetro.

3.5.5 Procesamiento de la imagen

Como en un microscopio electrónico de barrido la imagen es producida de forma totalmente electrónica, ésta puede someterse a toda clase de tratamientos utilizando la electrónica moderna.

Dentro de las mejoras que se puede hacer a la imagen están, mejora del contraste, inversión (el blanco es convertido en negro, etc.), mezcla de imágenes procedentes de varios detectores, sustracción de imágenes producidas por diferentes detectores, codificación de colores y análisis de imagen. Todas estas técnicas pueden ser aplicadas si se adecuan a la finalidad primaria de extraer la mejor información posible del espécimen.

3.5.6 Vacío

En general se produce un vacío lo suficientemente bajo para el microscopio electrónico de barrido, mediante una bomba de difusión de aceite, o una bomba turbomolecular, asistida en cada caso por una bomba rotativa para hacer el vacío previsto. Estas combinaciones también proporcionan tiempos de cambio razonables del espécimen, filamento y diafragma (menos de 2 minutos) sin necesidad de usar exclusas de vacío. El sistema de vacío del microscopio electrónico de barrido es controlado de forma totalmente automática y protegido contra fallas de operación.

3.5.7 Electrónica

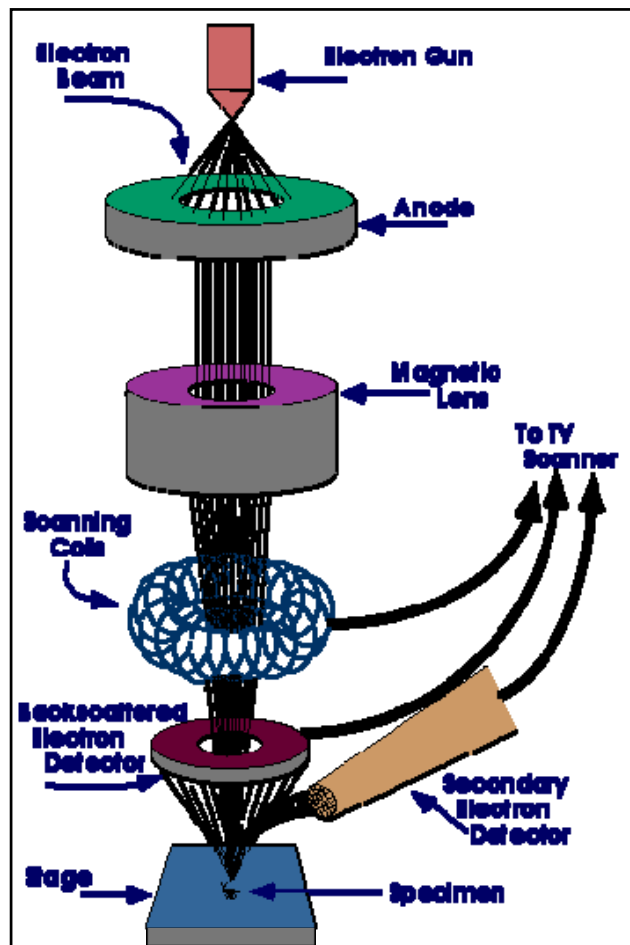
En el microscopio electrónico de barrido, el voltaje de aceleración y las corrientes necesarias para el funcionamiento del cañón electrónico y las lentes condensadoras deben ser lo suficientemente estables para alcanzar la máxima resolución. De forma análoga, la estabilidad de los circuitos electrónicos asociada con los detectores debe estar extremadamente bien controlada. Es común encontrar rangos de estabilidad de 1 parte por millón.

Todas las unidades electrónicas van alojadas en la consola del microscopio y son controladas por una computadora personal (PC), usando un teclado y un ratón.

3.5.8 Componentes principales

En la Figura 52 se muestran las partes más importantes de un microscopio electrónico de barrido, y cómo es que estas pueden producir la imagen del espécimen.

Figura 52. Diagrama de los componentes de un microscopio electrónico de barrido



A continuación se muestra la traducción de los términos de la figura 52:

- Electron gun = Pistola de electrones
- Electron beam = Haz de electrones
- Anode = Ánodo
- Magnetic lens = Lentes magnéticas
- Scanning coils = Detector del haz de electrones
- Backscattered electron detector = Detector de electrones retrodispersados
- Secondary electron detector = Detector de electrones secundarios
- Stage = Plataforma
- Specimen = Espécimen
- To TV scanner = Hacia pantalla de TV

El microscopio electrónico de barrido es un instrumento que produce imágenes con gran aumento, usando electrones en vez de luz para producir la imagen. Un haz de electrones es producido por medio de una pistola de electrones en la parte superior de la columna del microscopio. El haz de electrones viaja por toda la columna del microscopio, la cual está bajo vacío. El haz pasa por campos y lentes electromagnéticas, los cuales enfocan el haz hacia el espécimen. Una vez que el haz choca contra el espécimen, electrones y rayos X son disparados de este.

Diferentes detectores colectan los rayos X, los electrones retrodispersados y los electrones secundarios, y convierten a todos estos en una señal que es enviada a una pantalla similar a una pantalla de TV. Esto produce la imagen final.

3.5.9 Preparación de muestras

Se puede usar un microscopio electrónico de barrido siempre que se requiera información sobre la superficie de un espécimen. Esto se aplica a muchas ramas de la ciencia y de la tecnología, así como a las ciencias de la vida. El único requisito es que el espécimen pueda soportar el vacío de la cámara y el bombardeo electrónico.

Muchos especímenes se pueden introducir en la cámara sin preparación de ninguna clase. Si el espécimen contiene componentes volátiles, como agua, será necesario eliminarla mediante un proceso de secado (o, en algunas circunstancias, puede ser un sólido congelado). Los especímenes no conductores se cargarán por el bombardeo electrónico y necesitan ser recubiertos de una capa conductora. Debido a que un elemento pesado, como el oro, también proporciona una buena producción de electrones secundarios y, por lo tanto, una buena calidad de imagen, este es el elemento favorito para el recubrimiento. Además produce un recubrimiento de grano fino y se aplica fácilmente en un metalizador por bombardeo iónico. La capa necesaria para garantizar la conductibilidad es bastante delgada (unos 10 nanómetros). Considerándolo todo, la preparación de los especímenes a ser investigados mediante MEB no es tan complicada como la preparación de los especímenes para el MET.

En el caso de los metales, debido a que son buenos conductores, no requieren de ninguna preparación para ser analizados en el microscopio electrónico de barrido.

4. PRÁCTICAS DE METALOGRAFÍA

4.1 Metalografía y microscopio electrónico

a) Objetivos

- Conocer la importancia de la metalografía dentro de la ingeniería.
- Conocer el funcionamiento del microscopio electrónico de barrido.
- Aprender a utilizar el microscopio electrónico de barrido.

b) Materiales y equipo a utilizar

- Probeta de acero al carbono 1040 de 25.4 mm de diámetro por 15mm de altura.
- Microscopio electrónico de barrido.

c) Marco teórico

Metalografía: Consiste en el estudio de la constitución y estructura de los metales y aleaciones. Los estudios ópticos microscópicos producen resultados que no solo son útiles a los investigadores, sino también a los ingenieros. El examen de la microestructura es muy útil para determinar si un metal o aleación satisface las especificaciones en relación a trabajos mecánicos anteriores, tratamientos térmicos y composición general. La microestructura es un instrumento para analizar las fallas mecánicas y controlar procesos industriales.

Microscopio electrónico de barrido (MEB): El microscopio electrónico de barrido produce la imagen como se explica a continuación.

Figura 53. Columna del microscopio electrónico de barrido



1. Un cátodo emite un fuerte rayo de electrones.
2. Al final, un grupo de bobinas de barrido mueve el haz enfocado hacia delante y hacia atrás; y hacia la izquierda y derecha de la muestra.
3. Cuando los electrones chocan con la muestra, se emiten electrones secundarios de su superficie.
4. Un detector cuenta estos electrones y envía la señal a un amplificador.
5. La imagen final se construye con los electrones emitidos por cada punto de la muestra.

Este microscopio crea una imagen magnificada usando electrones que fluyen de un cátodo. La muestra se introduce en la columna de vacío del microscopio por una puerta hermética.

d) Realización de la práctica

1. Aprender de que partes esta compuesto el microscopio electrónico de barrido.
2. Aprender a colocar la muestra o probeta dentro de la cámara de vacío.
3. Aprender a enfocar la imagen de la probeta con el microscopio electrónico.
4. Familiarizarse con el uso del software del microscopio electrónico de barrido.
5. Aprender a obtener fotomicrografías con el microscopio electrónico de barrido.

4.2 Preparación de muestras para análisis metalográfico

a) Objetivos

- Aprender a preparar una probeta para su examen metalográfico.
- Saber la importancia de una buena preparación de la muestra metalográfica.
- Conocer los reactivos de ataque para examen microscópico que se utilizan para los aceros al carbono, aceros aleados y hierro fundido.

b) Materiales y equipo a utilizar

- Probeta de acero SAE 1018 de 25.4 mm de diámetro por 20 mm de altura.
- Lijas No. 100, No. 220, No. 320, No. 400, No. 600, No. 800 y No. 1200.
- Máquina para micropulido.
- Alúmina o pasta de pulir.

- 2 a 5 ml de ácido nítrico.
- 95 a 98 ml de alcohol industrial.
- Probeta con graduación de 100 ml.
- 1 jeringa de 10 ml.
- 1 par de guantes quirúrgicos.
- Mascarilla y algodón.
- Secador de aire caliente.
- Microscopio electrónico de barrido.

c) Marco teórico

La clave para obtener una interpretación acertada de una microestructura, es una adecuada preparación del espécimen o probeta del acero, o cualquier otro metal, que va a ser examinado.

Una superficie de una probeta debidamente preparada debe cumplir con los siguientes requisitos:

- La superficie debe de ser totalmente plana, libre de rayones, manchas u otras imperfecciones que puedan arruinar la superficie.
- Tener las inclusiones no metálicas intactas.

Para asegurarse de lograr una buena superficie, la preparación no solamente debe ser realizada correctamente, sino también con una clara comprensión de lo que debe lograrse durante cada etapa del proceso.

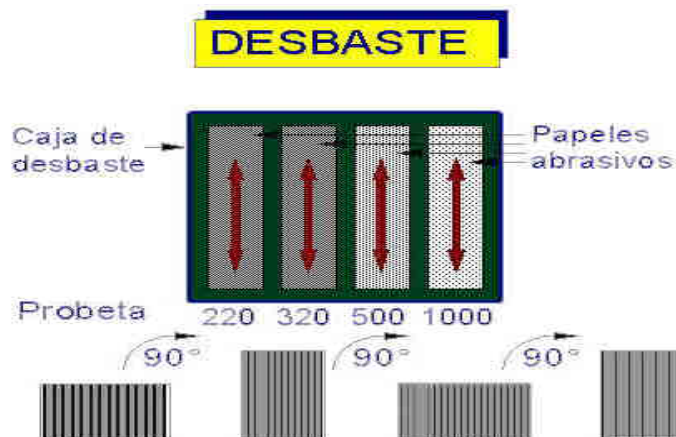
Los pasos a seguir para la preparación de una superficie de una probeta para ser examinada microscópicamente, son los siguientes:

Extracción: La muestra debe de extraerse de forma que sea representativa e identificar de alguna forma la orientación de la fabricación del material, tratando en todo momento de evitar calentamientos fuertes de la probeta.

Desbaste: Mediante el desbaste se consigue poner al descubierto la superficie del material, eliminando todo lo que pudiera obstaculizar su examen, a la vez que se obtiene una superficie plana con pequeña rugosidad.

El desbaste consiste en frotar la superficie de la probeta, que se desea preparar, sobre una serie de papeles abrasivos, cada vez más finos. Una vez obtenido un rayado uniforme sobre un determinado papel, se debe girar la probeta 90° para facilitar el control visual del nuevo desbaste. Cada fase será completada cuando desaparezcan todas las rayas producidas por el paso del papel abrasivo anterior. El desbaste puede hacerse manualmente, o mediante aparatos que se denominan desbastadoras o lijadoras. Debe realizarse en húmedo, para evitar que aparezcan grandes ralladuras que después sean difíciles de eliminar, y para evitar los calentamientos que puedan modificar la estructura de la probeta.

Figura 54. Realización del desbaste de una probeta



Pulido: El pulido de una probeta metalográfica tiene por objeto eliminar las rayas producidas en la fase de desbaste y obtener una superficie especular (como un espejo). Se pueden utilizar diversos tipos de abrasivos: polvo de diamante (10, 1, 0.5 y 0.25 micras), alúmina (5, 1, 0.5, 0.1 y 0.01 micras), óxido de magnesio, etc. En cuanto a los paños de pulido, los hay de tela de billar, nylon, seda, algodón, pana, etc.

Limpieza: Las probetas deben ser limpiadas después de cada paso. El método más empleado es mantener la probeta bajo un chorro de agua y frotarla con un algodón. Después de la limpieza se enjuagan con un chorro de alcohol y se secan rápidamente bajo un chorro de aire caliente.

Ataque: Una superficie pulida revela ya una serie de hechos interesantes, como pueden ser grietas, inclusiones, fases, poros, etc. Pero, normalmente, la probeta hay que atacarla para revelar la microestructura.

El ataque más empleado es el ataque químico. Este puede realizarse por frotamiento (empleando un algodón impregnado en el reactivo que se pasa sucesivamente por la superficie pulida) y por inmersión de la muestra en el reactivo. Inmediatamente después del ataque la probeta debe ser lavada con agua y secada con alcohol y aire caliente.

d) Realización de la práctica

- 1.0. Extracción de la probeta de acuerdo a las medidas, que son 25.4 mm de diámetro por 15 mm de alto.
- 2.0. Desbaste con lijas abrasivas.
 - 2.1. Desbastar probeta con lija núm. 100 o núm. 150 usando bastante agua.

- 2.2. Lavar con abundante agua.
- 2.3. Girar probeta 90° para desbastar con la siguiente lija.
- 2.4. Desbastar probeta con lija núm. 220 utilizando bastante agua.
- 2.5. Lavar con abundante agua.
- 2.6. Girar probeta 90° para desbastar con la siguiente lija.
- 2.7. Desbastar probeta con lija núm. 320 utilizando bastante agua.
- 2.8. Lavar con abundante agua.
- 2.9. Girar probeta 90° para desbastar con la siguiente lija.
- 2.10. Desbastar probeta con lija núm. 400 utilizando bastante agua.
- 2.11. Lavar con abundante agua.
- 2.12. Girar probeta 90° para desbastar con la siguiente lija.
- 2.13. Desbastar probeta con lija núm. 600 utilizando bastante agua.
- 2.14. Lavar con abundante agua.
- 2.15. Girar probeta 90° para desbastar con la siguiente lija.
- 2.16. Desbastar probeta con lija núm. 800 utilizando bastante agua.
- 2.17. Lavar con abundante agua.
- 2.18. Girar probeta 90° para desbastar con la siguiente lija.
- 2.19. Desbastar probeta con lija núm. 1200 utilizando bastante agua.
- 2.20. Lavar con abundante agua.
- 3.0. Pulido con alúmina o pasta de pulir.
 - 3.1. Pulir con alúmina abrasiva de 5 micrones.
 - 3.2. Lavar con abundante agua.
- 4.0. Ataque químico.
 - 4.1. Colocar sobre la probeta graduada la cantidad correspondiente de los siguientes componentes:
 - 4.1.1. 95 ml de alcohol industrial.
 - 4.1.2. Con la jeringa agregar 5 ml de ácido nítrico.
 - 4.2. Sumergir dentro de nital durante 5 segundos la cara pulida de la probeta.

- 4.3. Lavar con abundante agua.
 - 4.4. Colocar sobre la probeta alcohol.
 - 4.5. Secar rápidamente la probeta con un chorro de aire caliente.
 - 4.6. En caso de quedar manchas, repetir la operación desde el paso número 3.0.
- 5.0. Observación microscópica de la probeta.
 - 5.1. Colocar la probeta recién preparada dentro del microscopio electrónico de barrido.
 - 5.2. Observar la probeta con diferentes aumentos.
 - 5.3. Describir la microestructura observada en el microscopio.

4.3 Observación de ferrita, perlita + ferrita y de perlita + cementita

a) Objetivos

- Observar las principales microestructuras de los aceros al carbono.
- Conocer la división de los aceros al carbono según diagrama $\text{Fe}_3\text{C-Fe}$.
- Poder diferenciar las diferentes microestructuras de los aceros al carbono.

b) Materiales y equipo a utilizar

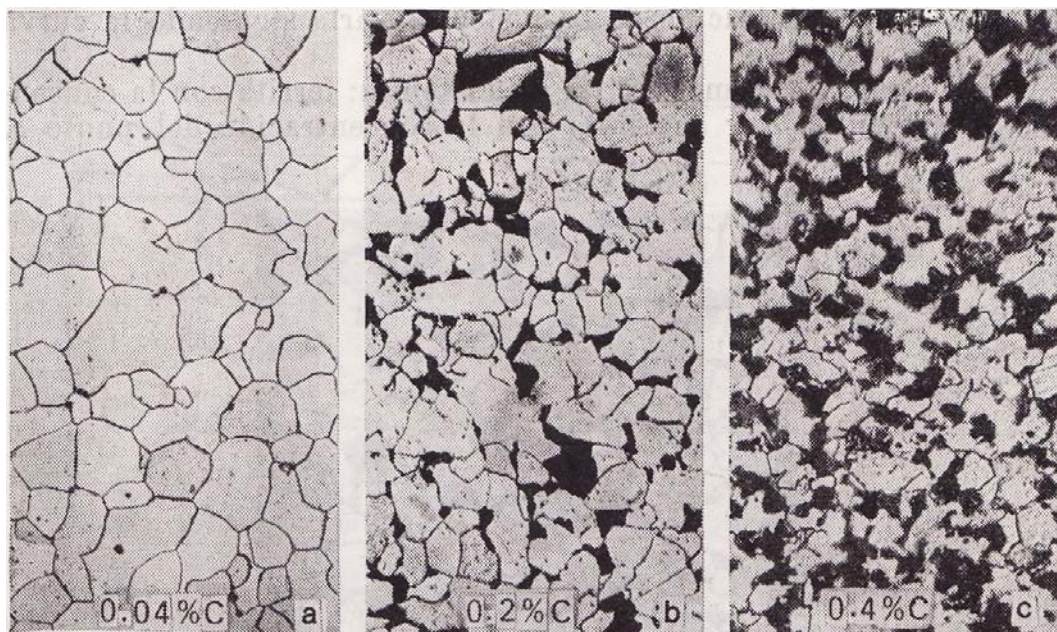
- Probeta de acero SAE 1018 de 25.4 mm de diámetro por 15 mm de altura.
- Probeta de acero SAE 1045 de 25.4 mm de diámetro por 15 mm de altura.
- Probeta de acero SAE 1095 o de mayor contenido de carbono, de 25.4 mm de diámetro por 15 mm de altura.

- Probeta de hierro de construcción de 25.4 mm de diámetro por 15 mm de altura.
- Microscopio electrónico de barrido.
- Nital al 5% (95 ml de alcohol industrial y 5 ml de ácido nítrico).

c) Marco teórico

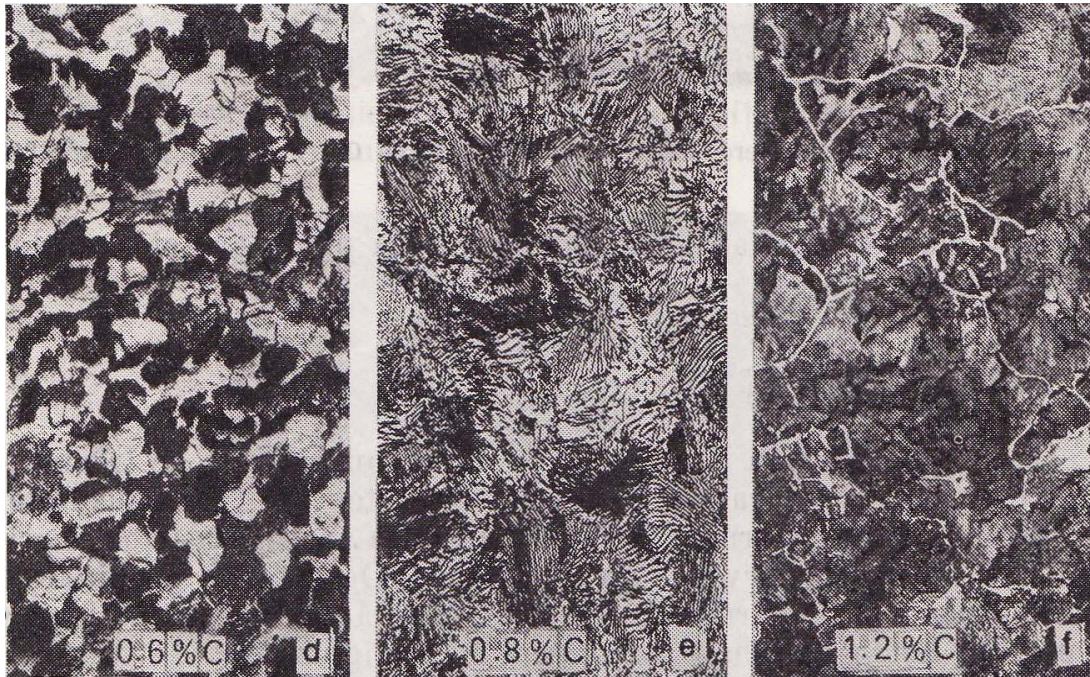
De acuerdo al diagrama hierro – carbono, dentro de los aceros al carbono podemos encontrar tres microestructuras a temperatura ambiente, que son las siguientes: ferrita, perlita y cementita. Estas pueden presentarse solas o en conjunto dentro de los aceros.

Figura 55. Estructuras del acero con diferentes contenidos de C



Fuente: A. P. Guliaev. **Metalografía, tomo 1.** Pág. 174.

Figura 56. Estructuras de aceros con distintos porcentajes de C



Fuente: A. P. Guliaev. **Metalografía, tomo 1.** Pág. 174.

De acuerdo a las figuras 55 y 56, en los aceros hipoeutectoides ($< 0.83\%$ de C) podemos encontrar una combinación de 2 estructuras: **ferrita + perlita**. En un acero eutectoide (0.83% de C) encontraremos una estructura **100% perlítica**, la cual es una combinación de **ferrita + cementita**; y en un acero hipereutectoide ($> 0.83\%$ de C) encontraremos una combinación de estructuras: **cementita + perlita**.

En aceros con muy bajos contenidos de carbono, como el hierro de construcción, encontraremos una estructura casi **100% ferrítica**.

d) Realización de la práctica

1. Realizar todo el procedimiento de la práctica 4.2 con cada una de las probetas (desbastar, pulir, limpiar y atacar químicamente).
2. Observar en el microscopio electrónico con diferentes aumentos la probeta de hierro de construcción; describir y mencionar la estructura observada.
3. Observar en el microscopio electrónico con diferentes aumentos la probeta de acero SAE 1018; describir y mencionar la estructura observada.
4. Observar en el microscopio electrónico con diferentes aumentos la probeta de acero SAE 1045; describir y mencionar la estructura observada.
5. Observar en el microscopio electrónico con diferentes aumentos la probeta de acero SAE 1095; describir y mencionar la estructura observada.
6. Describir las diferencias dentro de las estructuras observadas en el microscopio electrónico.

4.4 Temple y observación de martensita y bainita

a) Objetivos

- Entender qué es el temple y la finalidad con la que este se realiza.
- Observar las estructuras que se logran en el acero debido al temple.
- Conocer como se forman las estructuras del acero debido al temple.

b) Materiales y equipo a utilizar

- Probeta de acero SAE 1045 templada a 830° C y enfriada en agua.
- Probeta de acero SAE 1018 templada a 845° C y enfriada en agua.
- Probeta de acero SAE D2 (K-110 Böhler) templada a 960°C y enfriada en aceite.
- Reactivo químico Nital al 5%.
- Microscopio electrónico de barrido.

c) Marco teórico

El temple es un tratamiento térmico al que se somete el acero para aumentar su dureza, resistencia a esfuerzos y tenacidad. Es uno de los principales tratamientos térmicos, y lo que hace es afinar el tamaño del grano de la alineación de acero correspondiente. Se pretende la obtención de una estructura totalmente martensítica.

El proceso de temple se lleva a cabo primeramente calentando la pieza de acero a una temperatura mayor de la crítica superior, sostener esa temperatura durante un periodo de tiempo determinado, y finalmente enfriar la pieza rápidamente en su medio enfriante recomendado, ya sea agua o aceite.

Dependiendo de la velocidad a la que se realice el enfriamiento, de esa forma también se podrán obtener diferentes estructuras. Si el enfriamiento es lo suficientemente rápido, se formará una estructura completamente martensítica; si la velocidad es menor a la anterior, podría formarse una estructura bainítica. Durante su observación microscópica se podrán observar las estructuras tal y como se muestran en las figuras 57 y 58.

Figura 57. Acero 1018 templado visto a 400x. Estructura bainítica

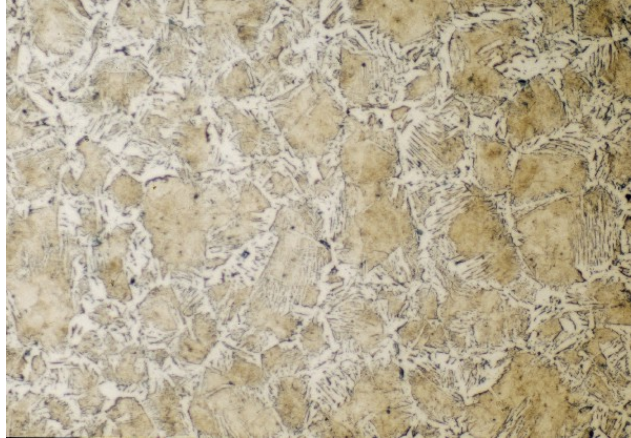
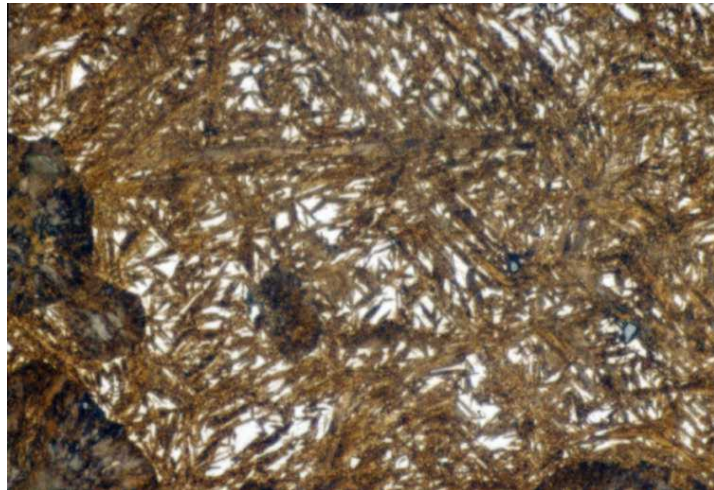


Figura 58. Acero 1095 templado visto a 1000x atacado con Picral. Estructura martensítica



d) Realización de la práctica

1. Realizar todo el procedimiento de la práctica 4.2 con cada una de las probetas (desbastar, pulir, limpiar y atacar químicamente).

2. Observar en el microscopio electrónico con diferentes aumentos la probeta de acero SAE 1018 templada; describir y mencionar la estructura observada.
3. Observar en el microscopio electrónico con diferentes aumentos la probeta de acero SAE 1045 templada; describir y mencionar la estructura observada.
4. Observar en el microscopio electrónico con diferentes aumentos la probeta de acero SAE D2 templada; describir y mencionar la estructura observada.
5. Comparar las estructuras vistas de las probetas en el microscopio electrónico con las figuras 57 y 58, y ver si hay similitud con las estructuras vistas.

4.5 Revenido y observación de martensita revenida

a) Objetivos

- Entender qué es el revenido y como se realiza el proceso de revenido.
- Comprender por qué se realiza el revenido en los aceros.
- Observar con el microscopio las estructuras que se forman en los aceros después del revenido.

b) Materiales y equipo a utilizar

- Probeta de acero SAE 1045 templada a 830° C, enfriada en agua y revenida a 200° C, de 25.4 mm de diámetro por 15 mm de altura.
- Probeta de acero SAE 1045 templada a 830° C, enfriada en agua y revenida a 350° C, de 25.4 mm de diámetro por 15 mm de altura.

- Probeta de acero SAE 1045 templada a 830⁰ C, enfriada en agua y revenida a 550⁰ C, de 25.4 mm de diámetro por 15 mm de altura.
- Probeta de acero SAE 1045 templada a 830⁰ C y enfriada en agua, de 25.4 mm de diámetro por 15 mm de altura.
- Reactivo químico Nital al 5%.
- Microscopio electrónico de barrido.

c) Marco teórico

El revenido es un tratamiento térmico que consiste en el calentamiento de un acero recién templado a una temperatura más baja que su temperatura crítica inferior, para luego enfriarlo al aire. El objetivo del revenido es disminuir la fragilidad del acero provocada por el temple, ya que después de este los aceros quedan duros y frágiles.

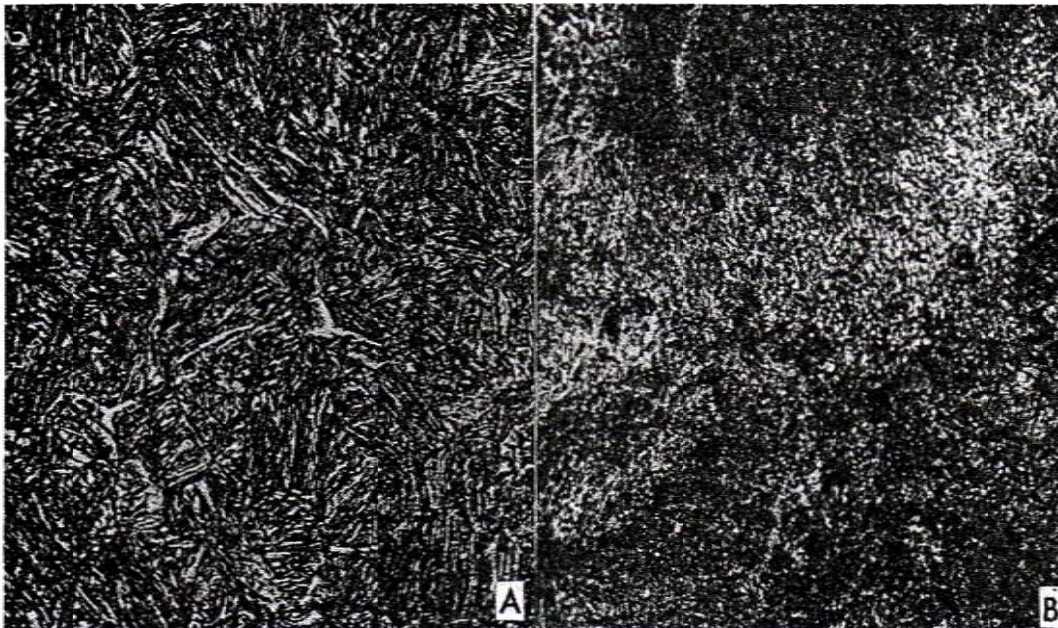
El revenido disminuye la dureza y la resistencia mecánica, pero aumenta la tenacidad y se eliminan las tensiones internas que se generan en los aceros al ser templados. Cuanto mas aumente la temperatura de revenido, menos dureza tendrá la pieza.

Dependiendo de la temperatura a la cual se lleve a cabo el revenido, el acero presentara diferentes estructuras y durezas. Las estructuras que se logran obtener después del revenido se muestran a continuación en la tabla XII.

Tabla XII. Estructuras del acero después del revenido

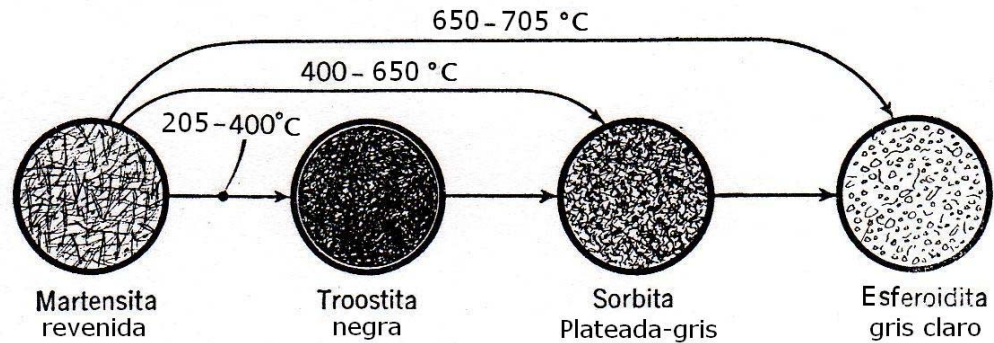
Estructura	Temperatura de revenido	Características
Martensita negra o revenida	0° a 200° C	Martensita negra Formación de carburo y de martensita al bajo carbono. Dureza HRC 60 – 64.
Troostita	220° a 400° C	Partículas de cementita para ser resuelta; matriz de ferrita; austenita retenida cambio a bainita inferior. Dureza HRC 40 – 60.
Sorbita	400° a 650° C	Partículas de cementita pequeñas, redondas y resueltas en matriz de ferrita. Dureza HRC 20 – 40.

Figura 59. Acero con alto carbono templado y revenido. a) 300°C b) 595°C.



Fuente: Frank T. Sisco. *Engineering metallurgy*. Pág. 275.

Figura 60. Estructuras de martensita revenida



Fuente: John Wulff, Howard F. Taylor. *Metallurgy for engineers*. Pág. 155.

d) Realización de la práctica

1. Realizar todo el procedimiento de la práctica 4.2 con cada una de las probetas (desbastar, pulir, limpiar y atacar químicamente).
2. Observar en el microscopio electrónico con diferentes aumentos la probeta de acero SAE 1045 templada; describir y mencionar la estructura observada.
3. Observar en el microscopio electrónico con diferentes aumentos la probeta de acero SAE 1045 templada y revenida a 200° C; describir y mencionar la estructura observada.
4. Observar en el microscopio electrónico con diferentes aumentos la probeta de acero SAE 1045 templada y revenida a 350° C; describir y mencionar la estructura observada.
5. Observar en el microscopio electrónico con diferentes aumentos la probeta de acero SAE 1045 templada y revenida a 550° C; describir y mencionar la estructura observada.

6. Obtener imágenes con el microscopio electrónico de barrido y observar como las estructuras van cambiando en las probetas dependiendo de la temperatura de revenido al cual fueron sometidas.
7. Comparar lo observado en el microscopio electrónico con las figuras 59 y 60; mencionar si hay similitud con lo observado.

4.6 Normalizado y observación de afinamiento de grano

a) Objetivos

- Conocer qué es el normalizado y entender el propósito con el que se realiza.
- Observar la estructura que se logra en el acero con el normalizado.
- Observar la diferencia de la estructura del acero antes y después del normalizado.

b) Materiales y equipo a utilizar

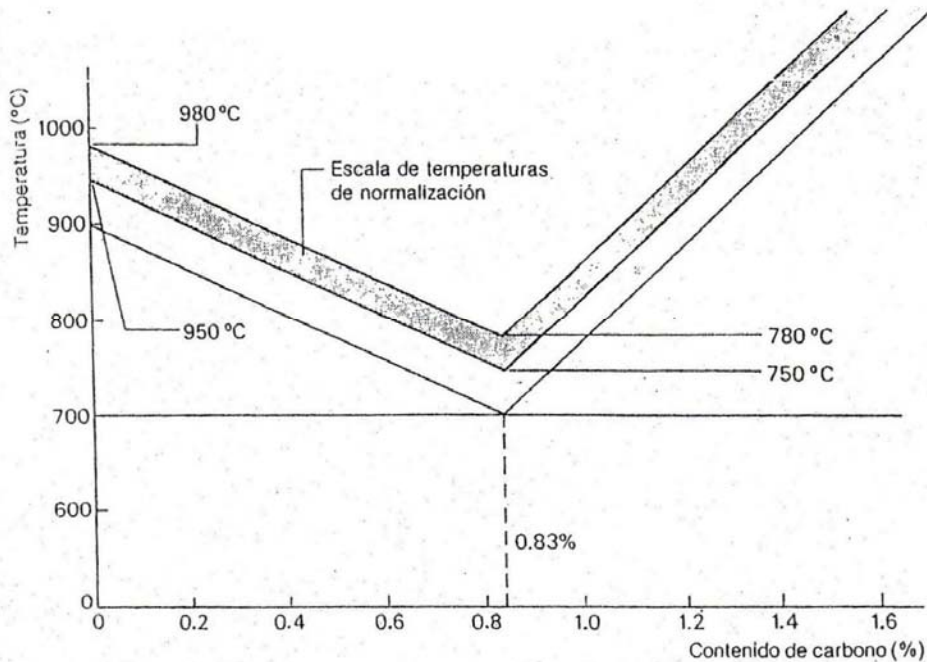
- Probeta de acero SAE 1018 de 25.4 mm de diámetro por 15 mm de altura.
- Probeta de acero SAE 1045 de 25.4 mm de diámetro por 15 mm de altura.
- Probeta de acero SAE 1018 normalizada a 870° C, enfriada al aire, de 25.4 mm de diámetro por 15 mm de altura.
- Probeta de acero SAE 1045 normalizada a 835° C, enfriada al aire, de 25.4 mm de diámetro por 15 mm de altura.
- Reactivo químico Nital al 5%.
- Microscopio electrónico de barrido.

c) Marco teórico

El tratamiento térmico de **normalizado** consiste en calentar el acero alrededor de 50 - 60° C por encima de la temperatura crítica superior, manteniéndose a dicha temperatura por un periodo corto de tiempo y enfriándolo al aire. El normalizado produce recristalización del acero, eliminando la estructura de grano grueso obtenido por laminación, forjado, fundición, etc.

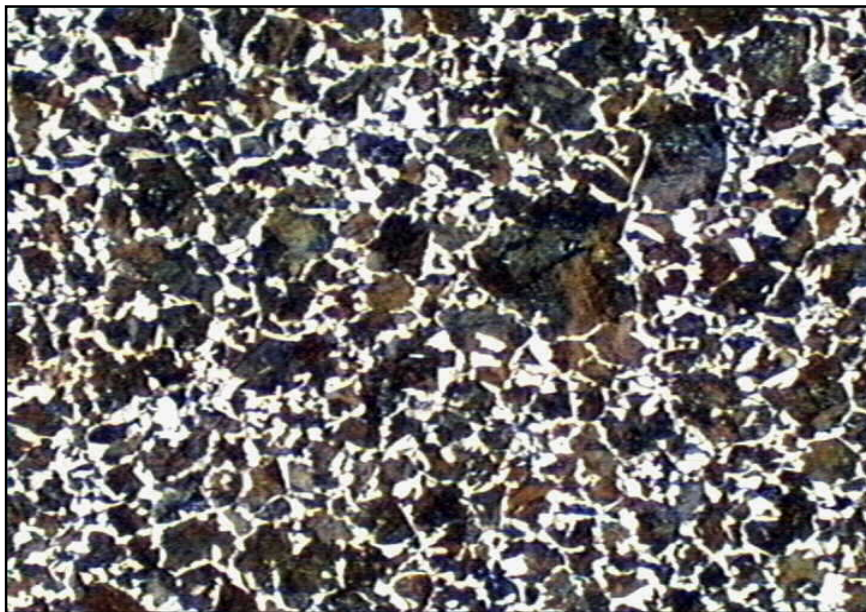
La rapidez de enfriamiento del normalizado es mayor, en comparación con el recocido. Este enfriamiento más rápido da por resultado una estructura granular más fina, lo que a su vez lleva a conseguir propiedades físicas mejoradas y mejores acabados al maquinarse.

Figura 61. Temperaturas de normalización



Con el normalizado se consigue obtener una estructura perlítica con el grano mas fino y mas uniforme que la estructura previa al tratamiento, consiguiendo un acero mas tenaz. Es lo que llamamos perlita fina (observar un diagrama TTT).

Figura 62. Acero con 0.35% de C normalizado a 870°C (100x)



d) Realización de la práctica

1. Realizar todo el procedimiento de la práctica 4.2 con cada una de las probetas (desbastar, pulir, limpiar y atacar químicamente).
2. Observación de la probeta de acero SAE 1018; describir la estructura observada.
3. Observación de la probeta de acero SAE 1018 normalizada; describir la estructura observada.
4. Obtener imágenes de ambas probetas observadas; comparar las dos estructuras y mencionar las diferencias entre las dos estructuras.

5. Observación de la probeta de acero SAE 1045; describir la estructura observada.
6. Observación de la probeta de acero SAE 1045 normalizada; describir la estructura observada.
7. Obtener fotomicrografías de ambas probetas observadas; comparar las dos estructuras y mencionar las diferencias entre las dos estructuras.

4.7 Cementación y diferentes tipos de recocido; observación de estructura de aceros recocidos

a) Objetivos

- Comprender el proceso de cementación.
- Conocer qué es el recocido y los diferentes tipos de recocido que existen.
- Observar la estructura de un acero cementado.
- Observar las estructuras que se logran con los diferentes tipos de recocido.

b) Materiales y equipo a utilizar

- Probeta de acero SAE 1018 de 25.4 mm de diámetro por 15 mm de altura.
- Probeta de acero SAE 1018 cementada de 25.4 mm de diámetro por 15 mm de altura.
- Probeta de acero SAE 1040 de 25.4 mm de diámetro por 15 mm de diámetro.
- Probeta de acero SAE 1040 con recocido total a 810° C de 25.4 mm de diámetro por 15 mm de altura.

- Probeta de acero SAE 1045 con recocido de esferoidización a 710°C, de 25.4 mm de diámetro por 15 mm de altura.
- Probeta de acero SAE D3 (Böhler K100) con recocido globular a 720° C de 25.4 mm de diámetro por 15 mm de altura.
- Reactivo químico Nital al 5%.
- Microscopio electrónico de barrido.

c) Marco teórico

Cementación: Consiste en el endurecimiento de la superficie externa del acero al bajo carbono, quedando el núcleo blando y dúctil. Como el carbono es el que genera la dureza en los aceros, en el método de cementado se tiene la posibilidad de aumentar la cantidad de carbono en los aceros de bajo contenido de carbono antes de ser endurecido. El carbono se agrega al calentar el acero a su temperatura crítica mientras se encuentra en contacto con un material carbonoso.

La cementación tiene por objetivo endurecer la superficie de una pieza sin modificación del núcleo, dando lugar así a una pieza formada por dos materiales, la del núcleo de acero con bajo índice de carbono, tenaz y resistente a la fatiga, y la parte de la superficie, de acero con mayor concentración de carbono, más dura, resistente al desgaste y a las deformaciones.

El proceso de cementación consiste en 3 fases que son:

- Carburación
- Temple
- Revenido

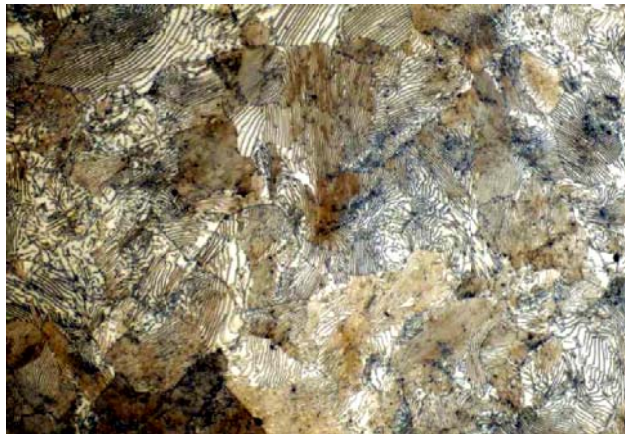
La cementación consiste en recubrir las partes a cementar de una materia rica en carbono, llamada cementante, y someterla durante varias horas a altas temperaturas (1000° C). En estas condiciones, el carbono irá penetrando en la superficie que recubre a razón de 0.1 a 0.2 mm por hora de tratamiento.

Recocido: Este tratamiento térmico tiene como finalidad principal ablandar el acero, produciendo al mismo tiempo una estructura lo mas homogénea posible. Implica un calentamiento hasta una temperatura que permita obtener plenamente la fase estable a altas temperaturas, seguido de un enfriamiento lo suficientemente lento como para que se desarrollen todas las reacciones completas. Existen tres tipos principales de recocido: recocido total, recocido de homogeneización o sub-crítico y recocido de esferoidización o globular.

- **Recocido total:** Se realiza cuando se quiere ablandar el acero y regenerar su estructura. Consiste en calentar el acero a una temperatura de 30 a 50° C por encima de la temperatura crítica superior, mantener la temperatura durante un tiempo y dejarlo enfriar lentamente con el objeto de conseguir un grano que facilite su mecanizado. El acero se deja enfriar en el horno y se consigue una estructura con grandes masas de perlita rodeada de ferrita o cementita.
- **Recocido de esferoidización:** Los aceros de alto carbono tienen características de maquinabilidad deficientes. Durante el tratamiento de esferoidización, lo que requiere tiempos prolongados a unos 30° C por debajo de temperatura crítica inferior, el carburo de hierro se aglomera en partículas esféricas para reducir el área de frontera. La microestructura, conocida ahora como esferoidita, tiene ahora una matriz continua de ferrita blanda y maquinable.

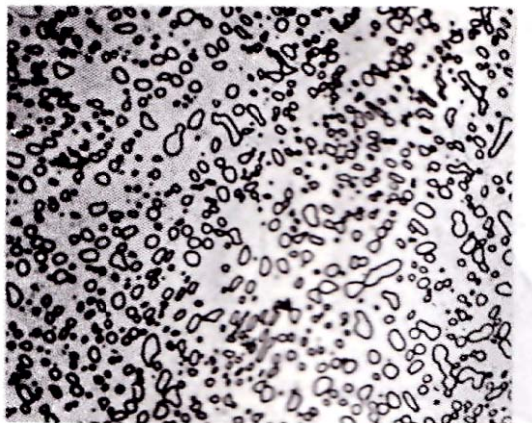
- **Recocido sub-crítico:** El objetivo fundamental de este tratamiento térmico es el mismo que el del recocido total, o sea ablandar el acero. Debido a la menor temperatura de tratamiento, no existe gran descarburización y la velocidad de enfriamiento, una vez terminado el tratamiento, no tiene gran influencia en la dureza o sub estructura, lo cual simplifica grandemente el tratamiento.

Figura 63. Acero con 0.95% de C con recocido total a 970° C (400x)



Fuente: www.metallographic.com/Procedures/1095%20quenched%20steel.htm

Figura 64. Microestructura esferoidita en matriz de ferrita



d) Realización de la práctica

1. Realizar todo el procedimiento de la práctica 4.2 con cada una de las probetas (desbastar, pulir, limpiar y atacar químicamente).
2. Observar con diferentes aumentos el acero SAE 1018.
3. Observar con diferentes aumentos la probeta de acero SAE 1018 cementada, y describir la estructura observada en el microscopio.
4. Comparar las dos estructuras observadas de acero SAE 1018, la cementada y la que no lo esta.
5. Observar la probeta de acero SAE 1040.
6. Observar la probeta de acero SAE 1040 con recocido total y describir la estructura observada.
7. Comparar las dos estructuras observadas, antes y después del recocido, y comentar las diferencias encontradas.
8. Observar la probeta de acero SAE D3 (Böhler K100) y describir la estructura observada. Comprobar si la estructura del grano se transformo en forma de esferoiditas.

4.8 Observación metalográfica de aceros aleados

a) Objetivos

- Conocer la clasificación de los aceros aleados, y los principales elementos aleantes de los aceros.
- Observar microscópicamente la estructura de los aceros aleados más conocidos comercialmente en Guatemala.
- Observar con el microscopio electrónico la estructura de aceros aleados tratados térmicamente.

b) Materiales y equipo a utilizar

- Reactivo químico Nital de 3 al 5%.
- Microscopio electrónico de barrido.
- Probetas mostradas en la tabla XIII.

Tabla XIII. Probetas de acero aleado para práctica 4.8

Acero Clasificación AISI/SAE	Composición química (valores aproximados en %)							
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W
D3	2.00	0.25	0.35	11.50				
D2	1.55	0.30	0.30	11.00	0.75		0.75	
O1	0.95		1.10	0.60			0.10	0.60
S1	0.63	0.60	0.30	1.10			0.18	2.00
H13	0.39	1.10	0.40	5.20	1.40		0.95	

- Probeta de acero SAE O1 templada a 825° C enfriada en aceite, de 25.4 mm de diámetro por 15 mm de altura.
- Probeta de acero SAE D3 templada a 950° C enfriada en aceite y revenida a 200° C, de 25.4 mm de diámetro por 15 mm de altura.

c) Marco teórico

En los subtítulos 1.2.5.2 y 1.2.5.3 de esta misma tesis se encuentran las principales clasificaciones de los aceros aleados y aceros aleados para herramienta.

Es importante conocer los elementos aleantes más importantes de los aceros, y además saber qué propiedades proporcionan estos al acero. Dentro de los elementos aleantes más importantes tenemos el manganeso, silicio, cromo, molibdeno, níquel, tungsteno y vanadio.

- **Cromo:** Imparte dureza y resistencia al desgaste, mayor resistencia a la penetración que otros metales de aleación y aumenta la elasticidad y resistencia a la temperatura. Baja la dilatación y contracción, formación de carburos y forjabilidad.
- **Molibdeno:** Permite que las herramientas de corte mantengan su dureza cuando están calientes. Aumenta la dureza, resistencia al corte y a la temperatura. Aumenta la formación de carburos y resistencia al desgaste.
- **Níquel:** Aumenta la tenacidad, resistencia a fallas por fatiga, resistencia a los impactos y resistencia a la corrosión.
- **Tungsteno:** Aumenta la resistencia y la tenacidad del acero, como la facilidad para endurecerlo. Hace que las herramientas de corte mantengan su filo aunque estén al rojo.
- **Vanadio:** En cantidades hasta 0.20% aumenta la resistencia a la tracción del acero y produce una estructura granular más fina.
- **Manganeso:** A los aceros de bajo contenido de carbono los hace dúctiles y fáciles de doblar. A los aceros de alta velocidad o rápidos les da mayor tenacidad.

d) Realización de la práctica

1. Realizar todo el procedimiento de la práctica 4.2 con cada una de las probetas (desbastar, pulir, limpiar y atacar químicamente).

2. Observar en el microscopio electrónico con diferentes aumentos la probeta de acero SAE D3 y comentar sobre la estructura observada.
3. Observar en el microscopio electrónico con diferentes aumentos la probeta de acero SAE D2 y comentar sobre la estructura observada.
4. Observar en el microscopio electrónico con diferentes aumentos la probeta de acero SAE O1 y comentar sobre la estructura observada.
5. Observar en el microscopio electrónico con diferentes aumentos la probeta de acero SAE S1 y comentar sobre la estructura observada.
6. Observar en el microscopio electrónico con diferentes aumentos la probeta de acero SAE H13 y comentar sobre la estructura observada.
7. Observar en el microscopio electrónico la probeta de acero SAE O1 templada, y ver si la estructura presenta una forma martensítica.
8. Observar en el microscopio electrónico la probeta de acero SAE D3 templada y revenida, y ver si la estructura es de martensita revenida.
9. Comparar la estructura de probeta de acero SAE O1 templada con una de acero al carbono templada; ver si hay similitud entre las estructuras.

4.9 Observación metalográfica de estructuras de hierro fundido

a) Objetivos

- Conocer los diferentes tipos de hierro fundido que existen.
- Observar con el microscopio la estructura de la fundición gris.
- Observar microscópicamente la estructura de la fundición dúctil o nodular.

b) Materiales y equipo a utilizar

- Probeta de fundición gris.
- Probeta de fundición dúctil o nodular.
- Reactivo químico Nital al 5%.
- Microscopio electrónico de barrido.

c) Marco teórico

La fundición o hierro fundido es una aleación hierro-carbono-silicio que por lo general contienen entre 2 y 4% de C, y 0.5 y 3.0% de Si. Esta difiere del acero por su composición química y por sus propiedades tecnológicas. En las condiciones ordinarias no pueden forjarse. La fundición es más barata que el acero.

Las fundiciones pueden clasificarse de la siguiente manera:

Fundición blanca. Tiene este nombre por el aspecto de su fractura, que tiene un color blanco o mate. La estructura de la fundición blanca consta de cementita y perlita (a temperatura normal). Por lo tanto, en la fundición blanca todo el carbono se halla en forma de cementita y el grado de grafitización es nulo. Esta fundición es dura y frágil.

Fundición gris. Se llama así por el aspecto de su fractura, que es de color gris. En la estructura de la fundición gris hay grafito, cuya cantidad, forma y tamaño varían dentro de unos límites muy amplios. Así, pues, en la fundición gris hay grafito, en la blanca, no. Por la estructura de la base metálica, las fundiciones grises se dividen en: fundición gris perlítica, fundición gris ferrito-perlítica y fundición gris ferrítica.

Fundición dúctil. Este tipo de fundición se caracteriza porque en ella el grafito aparece en forma de esferas minúsculas, y así la continuidad de la matriz se interrumpe mucho menos que cuando se encuentra en forma laminar, esto da lugar a una resistencia a la tracción y tenacidad mayores que en la fundición gris ordinaria. El contenido total de carbono es igual al de la fundición gris. Las partículas esferoidales de grafito se forman durante la solidificación debido a la presencia de pequeñas cantidades de magnesio.

Fundición maleable. Los hierros maleables son tipos especiales de hierros producidos por el tratamiento térmico de la fundición blanca. Estas fundiciones se someten a rígidos controles y dan por resultado una microestructura en la cual la mayoría del carbono está en la forma combinada de cementita.

Figura 65. Tipos de inclusiones de carbono y matrices en las fundiciones

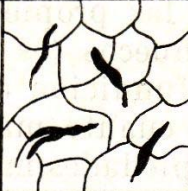
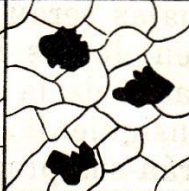
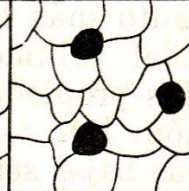


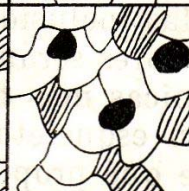


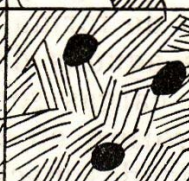
Matriz metálica	Forma de las inclusiones de carbono		
	Laminar	Nodular	Esferoidal
Ferrita			
Ferrita + perlita			
Perlita			

Figura 66. Fundición dúctil con matriz perlítica vista en 400x

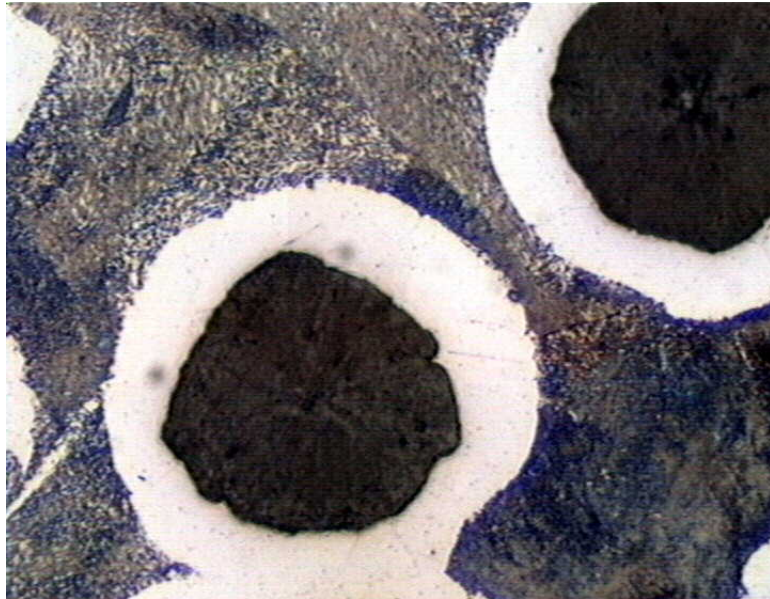
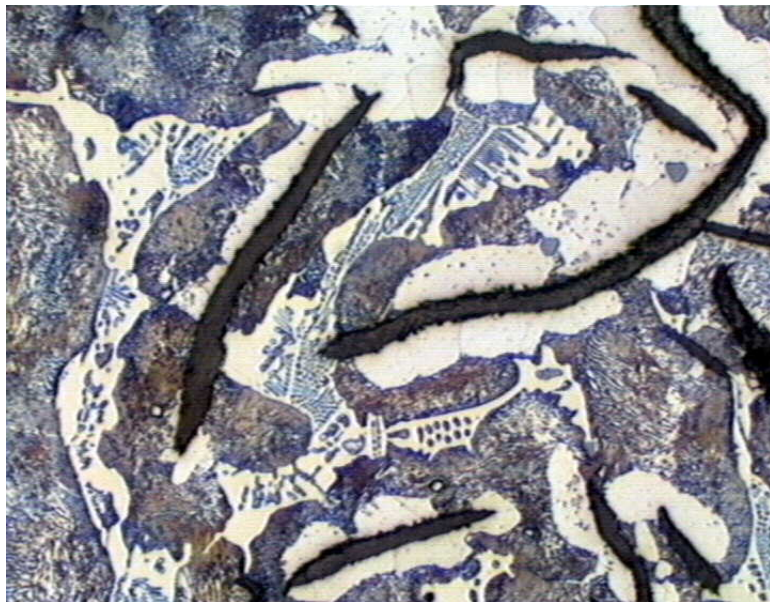


Figura 67. Fundición gris con matriz perlítica vista en 400x



d) Realización de la práctica

1. Realizar todo el procedimiento de la práctica 4.2 con cada una de las probetas (desbastar, pulir, limpiar y atacar químicamente).
2. Observar en el microscopio electrónico la probeta de fundición gris y describir la estructura observada.
3. Observar en el microscopio electrónico la probeta de fundición dúctil y describir la estructura observada.
4. Comparar las estructuras vistas con las figuras 66 y 67 y comentar si las estructuras observadas tienen similitud con las figuras.

CONCLUSIONES

1. La metalografía es de mucha importancia para el estudio de los metales, principalmente del acero y fundición, ya que esta ayuda a comprender de una mejor forma el comportamiento mecánico de estos.
2. La presente guía de prácticas ayudará al estudiante de ingeniería a comprender mejor la metalografía, además que el estudiante entenderá en qué consisten los tratamientos térmicos y cómo transforman estos la estructura del acero.
3. Con la ayuda del microscopio electrónico de barrido, el estudiante podrá observar de una mejor forma todas las estructuras que se presentan en los aceros; tanto las estructuras de los aceros en su estado natural, como también de las estructuras que se forman debido a un tratamiento térmico.
4. Con la ayuda de esta guía de prácticas de laboratorio, el estudiante observará las estructuras de las fundiciones gris y dúctil, las cuales son las de más uso comercial dentro de nuestro país.

RECOMENDACIONES

1. Para realizar una buena observación microscópica de la probeta es muy importante la correcta preparación de esta, ya que de no hacerse correctamente, no se podrá observar bien la estructura de la probeta a ensayar.
2. Cuando se realice el ataque químico de la probeta, es muy importante no exponerla demasiado tiempo al reactivo, ya que este puede provocar que la cara pulida se quemé u opaque demasiado, y de esta forma no se observe la estructura.
3. Es importante que el estudiante comprenda bien el diagrama hierro – carbono y el diagrama TTT para comprender mejor la estructura que se está observando en el microscopio electrónico.
4. Conocer como se llevan a cabo los procesos de los tratamientos térmicos y los objetivos con que estos se realizan, para comprender los cambios de estructura que sufren los aceros después de haber sufrido un tratamiento térmico, y de esta manera, al observar en el microscopio electrónico, comprender lo que el estudiante está observando.

BIBLIOGRAFÍA

1. Guliaev, A. P. **Metalografía**. 2ª. Edición. (Tomo 1). Rusia: Editorial Mir, 1983. 385 Pp.
2. Avner, Sydney. **Introducción a la metalurgia física**. 2ª. Edición. México: McGraw-Hill, 1988. 695 Pp.
3. Higgins, Raymond A. **Ingeniería metalúrgica**. (Volumen 1). México: Editorial Continental, 1963. 523 Pp.
4. Askeland, Donald R. **La ciencia e ingeniería de los materiales**. México: Editorial Iberoamérica, 1987. 556 Pp.
5. Reed-Hill, Robert E. **Physical metallurgy principles**. USA: Editorial Princeton, 1964. 630 Pp.
6. Wulff, John. **Metallurgy for engineers: casting, welding and working**. USA: Editorial John Wiley, 1952. 483 Pp.
7. Sisco, Frank T. **Engineering metallurgy**. USA: Editorial Pitman, 1957. 516 Pp.
8. FEI Company. **Todo lo que quiso saber sobre la microscopia electrónica**. (Hillsboro, Oregon), 2002. 22 Pp.

9. www.metallographic.com/Procedures/Applications.htm, septiembre 2007.
10. www.esi2.us.es/IMM2/Pract-html/estructurasdeaceros.html, agosto 2007.
11. www.steeluniversity.org, agosto 2007.

ANEXOS

Tabla XIV. Reactivo químico para fundiciones.

Hierro Fundido		
Reactivo de Ataque	Composición	Comentarios
Nital	Alcohol metílico o etílico 95 a 98 ml Acido nítrico 2 a 5 ml	El tiempo de ataque es de unos cuantos segundos a un minuto. No exceder más de 10 ml de acido nítrico, ya que es explosivo.

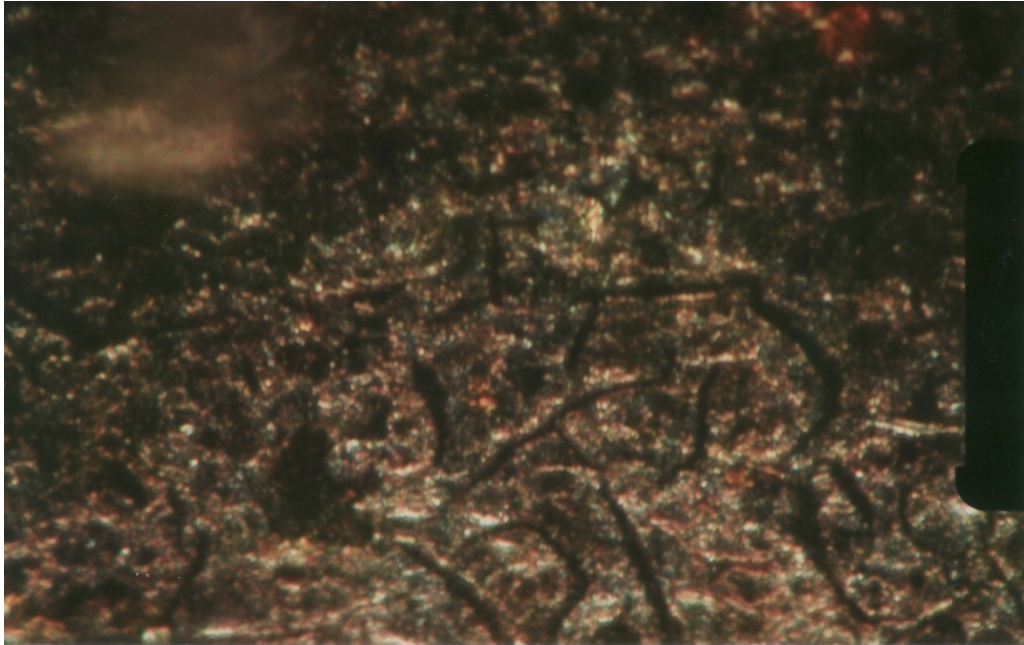
Fuente: www.metallographic.com/Etchants/Cast%20Iron%20etchants.htm

Tabla XV. Reactivos químico para aceros al carbono y aleados.

Aceros al carbono y aleados		
Reactivo de Ataque	Composición	Comentarios
Nital	Alcohol metílico o etílico 95 a 98 ml Acido nítrico 2 a 5 ml	El tiempo de ataque es de unos cuantos segundos a un minuto. No exceder más de 10 ml de acido nítrico, ya que es explosivo.
Picral	Alcohol metílico o etílico 95 a 98 ml Acido pícrico 2 a 4 gramos	No dejar que el reactivo seque, ya que es explosivo. El tiempo de ataque es de unos segundos a 1 minuto.

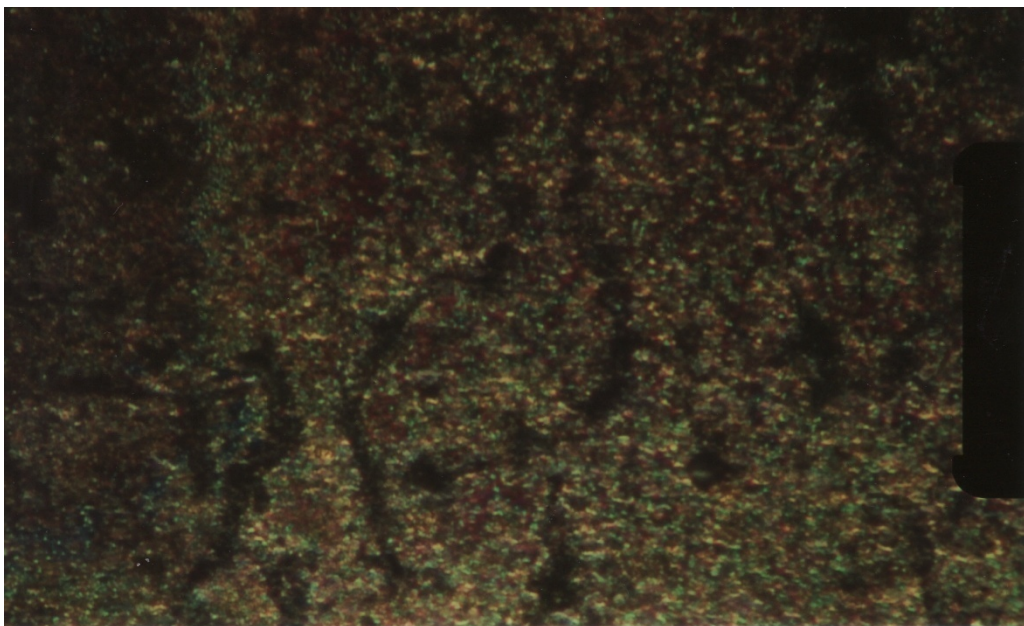
Fuente: www.metallographic.com/Etchants/High%20carbon%20steel%20etchants.htm

Figura 68. Fundición gris importada. 500x



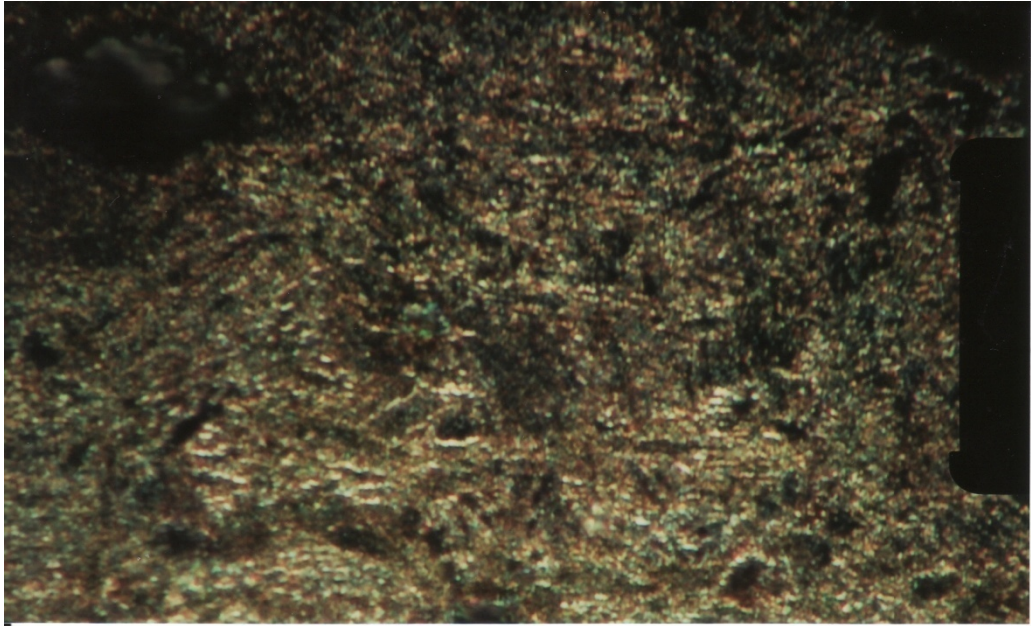
Fuente: Laboratorio de metalografía. INTECAP.

Figura 69. Fundición gris hecha en Guatemala. 200x



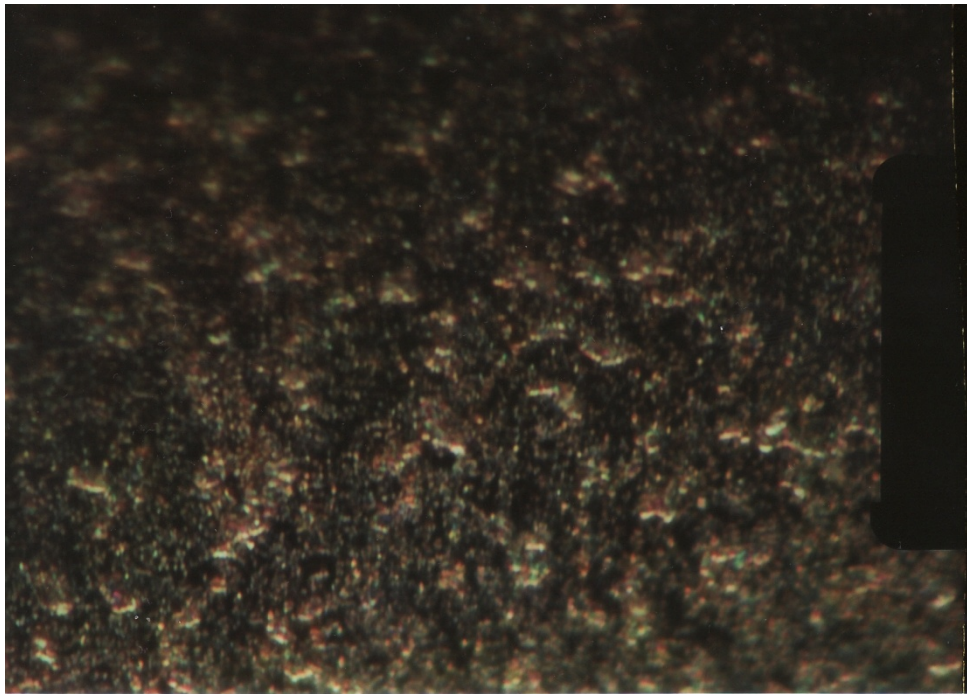
Fuente: Laboratorio de metalografía. INTECAP.

Figura 70. Acero 1045 templado y revenido a 250°C. 500x



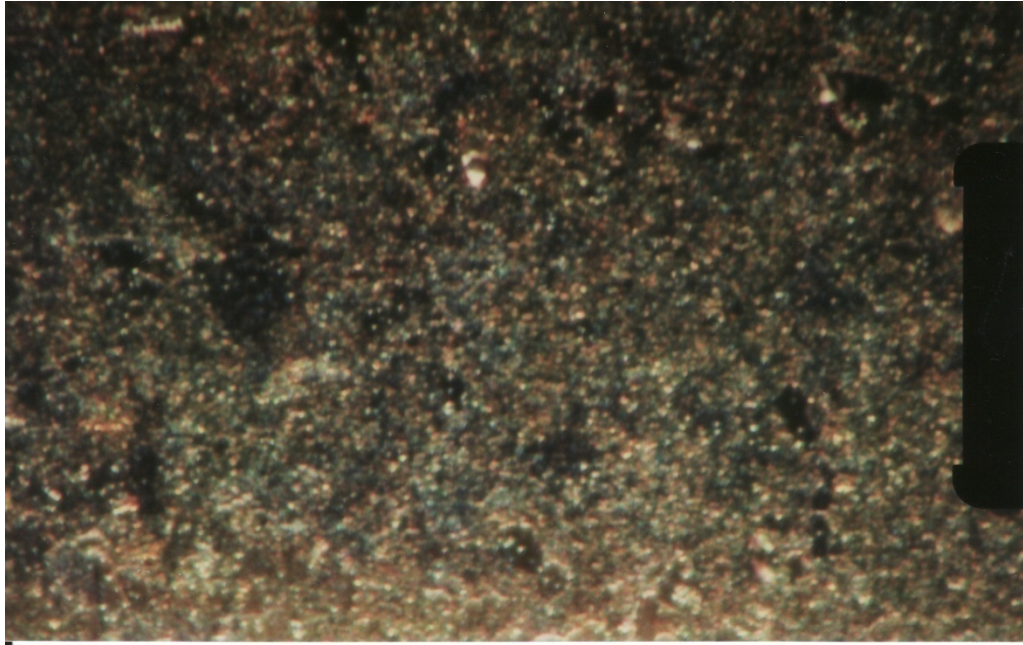
Fuente: Laboratorio de metalografía. INTECAP.

Figura 71. Acero SAE O1 templado, revenido y recocido globular. 500x



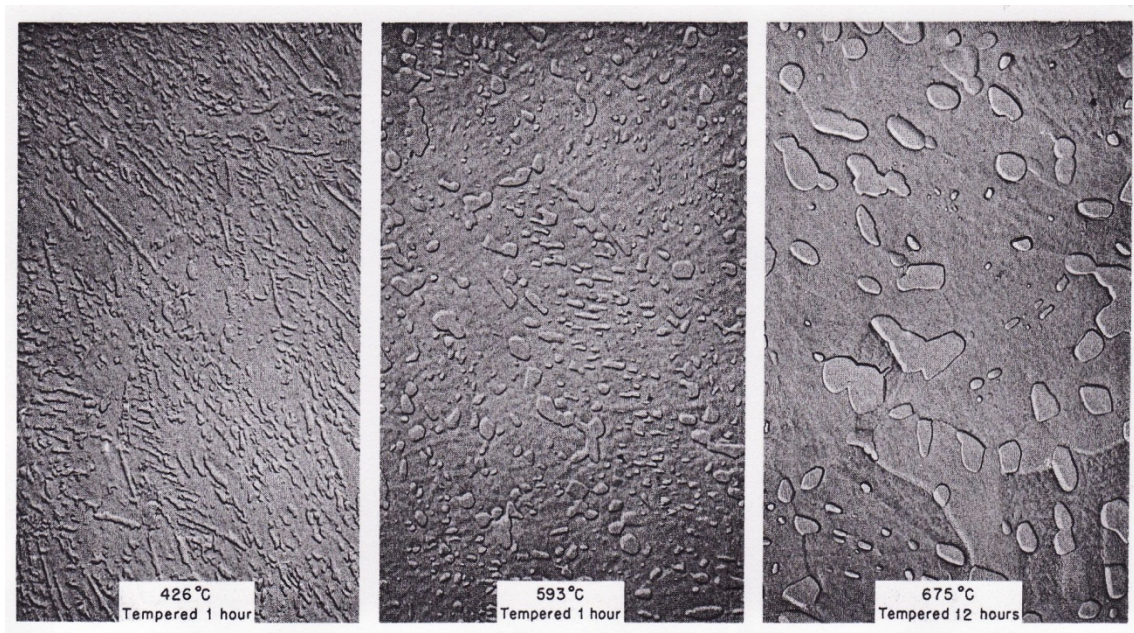
Fuente: Laboratorio de metalografía. INTECAP.

Figura 72. Acero SAE D3 templado y revenido a 300°C. 500x



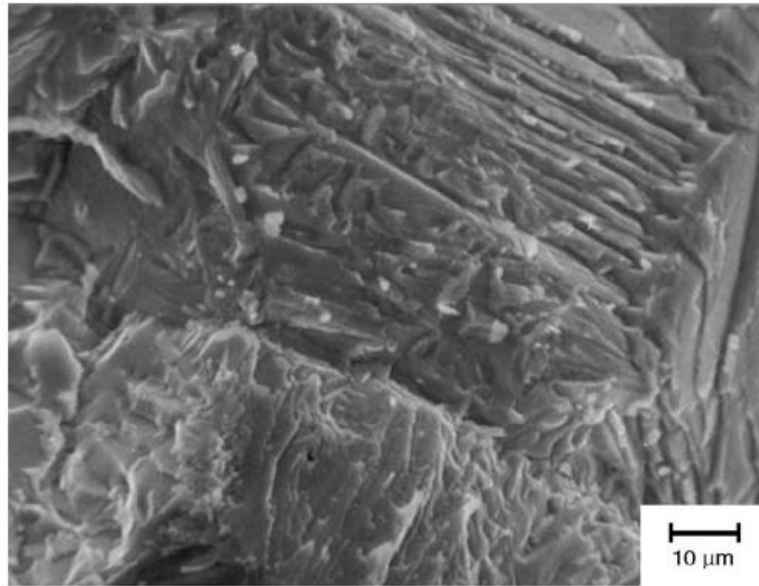
Fuente: Laboratorio de metalografía. INTECAP.

Figura 73. Estructuras de martensita revenida a diferentes temperatura en acero con 0.75% de C. 15000x

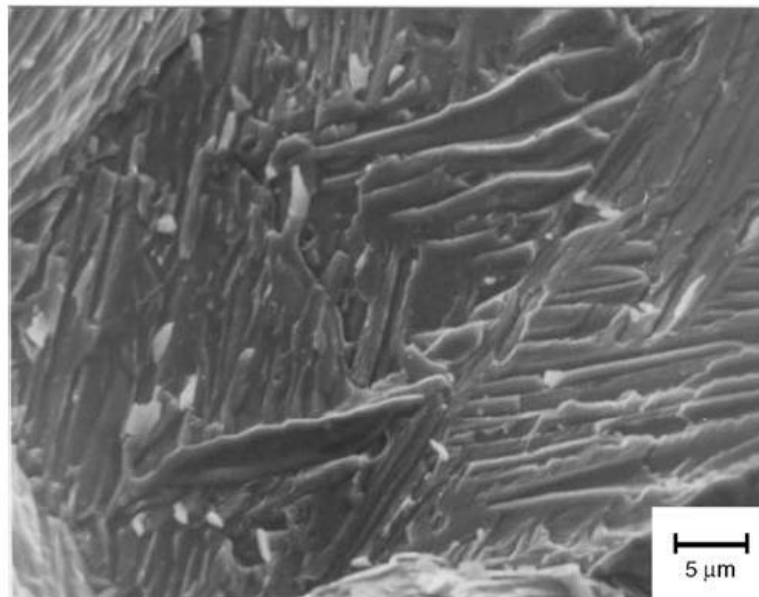


Fuente: Robert Reed-Hill. *Physical metallurgy principles*. Pág. 512.

Figura 74. Interfaces de cementita escalonada (20,000x)



(a)

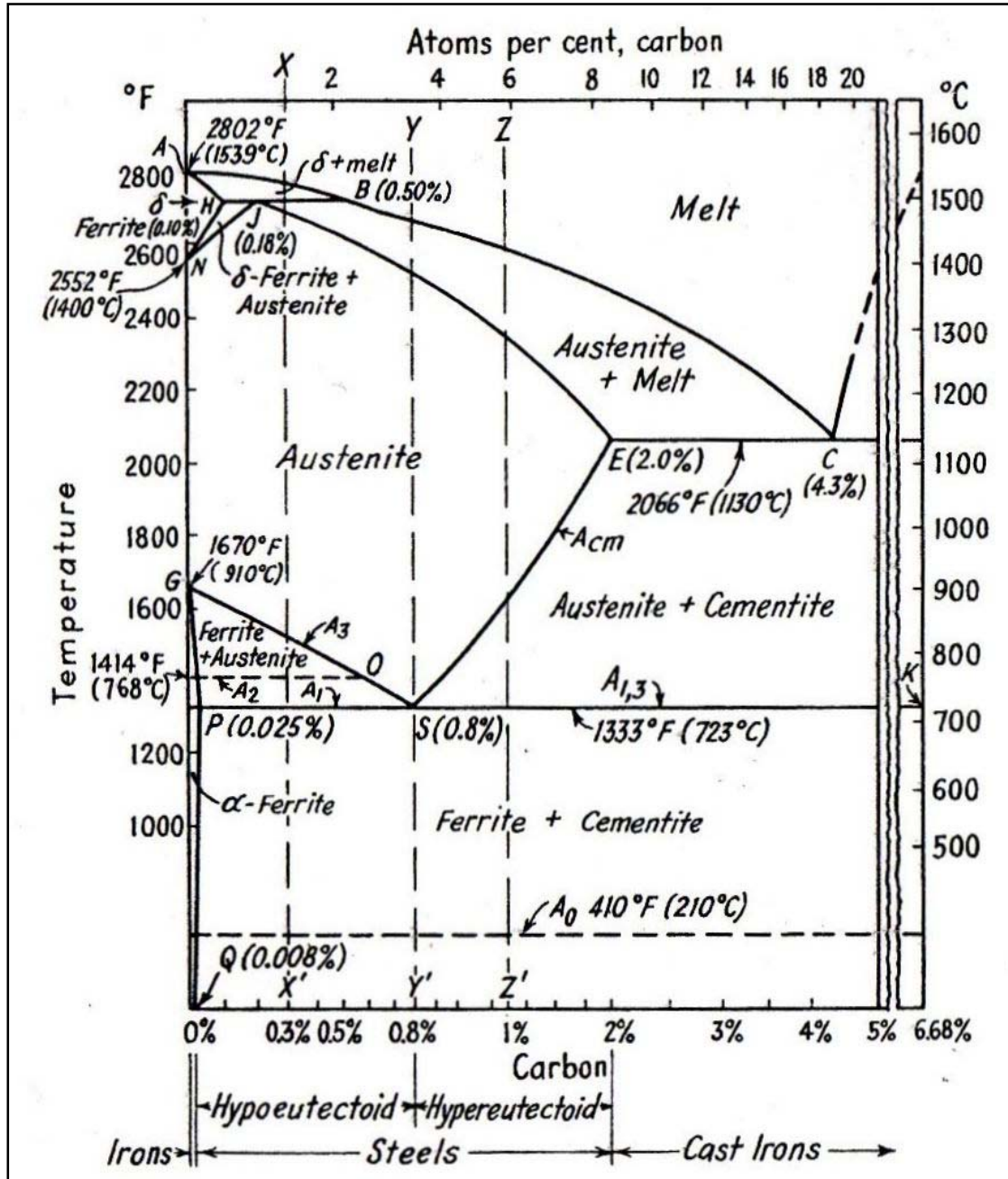


(b)

a) Acero 52100 transformado a 785⁰C por 30 minutos y **b)** Acero 52100 transformado a 785⁰C por 2 horas. Fotomicrografías de un microscopio electrónico de barrido (MEB).

Fuente: George Krauss. *Steels; processing, structure and performance*. Pág. 51.

Figura 75. Diagrama hierro – carbono completo



Fuente: Frank T. Sisco. *Engineering Metallurgy*. Pág. 246.