

TEORÍA Y CÁLCULOS EN LA INGENIERÍA DE LOS MATERIALES

*Carlos Oswaldo Serrano Aguiar
Carlos José Santillán Mariño
Marcelo Esteban Calispa Aguilar
Luis Santiago Choto Chariguamán*

TEORÍA Y CÁLCULOS EN LA INGENIERÍA DE LOS MATERIALES



TEORÍA Y CÁLCULOS EN LA INGENIERÍA DE LOS MATERIALES



AUTORES

Carlos Oswaldo Serrano Aguiar
Carlos José Santillán Mariño
Marcelo Esteban Calispa Aguilar
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Luis Santiago Choto Chariguamán
Autor Independiente

Teoría y cálculos en la ingeniería de los materiales

Reservados todos los derechos. Está prohibido, bajo las sanciones penales y el resarcimiento civil previstos en las leyes, reproducir, registrar o transmitir esta publicación, íntegra o parcialmente, por cualquier sistema de recuperación y por cualquier medio, sea mecánico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia o por cualquiera otro, sin la autorización previa por escrito al Centro de Investigación y Desarrollo Ecuador (CIDE).

DERECHOS RESERVADOS

Copyright © 2021

Centro de Investigación y Desarrollo Ecuador.

Cdla. Martina Mz. 1 V. 4

Guayaquil, Ecuador.

Tel.: 00593 4 2037524

<http://www.cidecuador.com>

ISBN: 978-9942-844-07-1

Impreso y hecho en Ecuador

Dirección Editorial: Lic. Pedro Naranjo Bajaña, Msc.

Coordinación Técnica: Lic. María J. Delgado

Diseño Gráfico: Lic. Danissa Colmenares

Diagramación: Lic. Alba Gil

Fecha de Publicación: julio, 2021



Guayaquil – Ecuador

La revisión de este libro fue realizada por pares ciegos

Catalogación en la fuente

Teoría y cálculos en la ingeniería de los materiales / Carlos Oswaldo Serrano Aguiar, Carlos José Santillán Mariño, Marcelo Esteban Calispa Aguilar, Luis Santiago Choto Chariguamán.-- Ecuador: Institución Editorial CIDE, 2021

261 p.: il.; 21 x 29, 7 cm.

ISBN 978-9942-844-07-1

1. Ingeniería de los materiales

SEMBLANZA DE LOS AUTORES

Carlos Oswaldo Serrano Aguiar

Docente de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, con formación académica de pregrado como Ingeniero Mecánico, en posgrado con una maestría en Ingeniería Mecánica con mención en Materiales y Procesos de manufactura, y un Máster en Ingeniería Matemática y Computación. Experiencia docente en el área de Ingeniería de Materiales, Soldadura y Matemáticas. Autor de varios artículos científicos así como del libro titulado *Introducción a los materiales utilizados en la ingeniería mecánica y eléctrica*.

Carlos José Santillán Mariño

Docente de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, con formación académica de pregrado como Ingeniero Mecánico, postgrado como Máster en Ciencias Mención Diseño Mecánico. Experiencia docente en el dictado de las asignaturas de Resistencia de Materiales, Elementos de Máquinas, Simulación de Procesos, Métodos Numéricos y Análisis Matemático. Director y miembro integrante de varios proyectos de investigación y vinculación con el reconocimiento de Investigador Senior de la ESPOCH. Autor, miembro y productor de varios artículos científicos. Obtuvo beca de formación de postgrado por parte del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y de la Fundación para la Ciencia y Tecnología. Le fue otorgada la Condecoración al Mérito Científico del año 2014 por parte del Diario La Prensa.

Marcelo Esteban Calispa Aguilar

Docente de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, título de pregrado en Ingeniería Mecánica, Máster of Philosophy Mechanical and Systems Engineering en la universidad de Newcastle en Inglaterra. Además, máster universitario en Ingeniería Matemática y Computación de la universidad Internacional de la Rioja en España. Experiencia docente en asignaturas de mecánica teórica, ecuaciones diferenciales, métodos numéricos, mecánica de fluidos e instalaciones industriales. Miembro del grupo de investigación AUTOPROMA de la Facultad de Mecánica. Autor de publicaciones de alto impacto y nivel regional. Becario Senescyt convocatoria abierta 2014.

Luis Santiago Choto Chariguamán

Ingeniero Automotriz, con un postgrado en Manufactura y Diseño Asistidos por Computador, profesional con experiencia en el Diseño y construcción de máquinas y estructuras metálicas, inmiscuido en la investigación en el proceso de la manufactura materiales.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecemos a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por permitirnos pertenecer a esta prestigiosa entidad educativa y tener la oportunidad de mejorar personal y profesionalmente, y así ofrecer un aporte positivo a la sociedad a través de la formación de profesionales responsables y comprometidos.

DEDICATORIA

A la comunidad académica, en especial a los estudiantes de Ingeniería de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, que encuentren útil este presente trabajo, cuyo objetivo principal es brindar un mejor acceso a la información necesaria en la formación básica de ingeniería en el campo de los materiales.

CONTENIDO

Semblanza de los Autores	vi
Agradecimiento	viii
Dedicatoria	ix
Prólogo	xxiii
CAPÍTULO I. SIDERURGIA	2
1.1. Introducción	2
1.2. Clasificación de los productos siderúrgicos	3
1.3. Materias primas para la obtención del acero	5
1.3.1. Minerales de hierro	5
1.3.2. Combustibles	6
1.3.3. Fundentes	7
1.3.4. El viento	7
1.4. Proceso de obtención del arrabio y del acero	8
1.4.1. Obtención del arrabio	8
1.5. El Alto horno	9
1.6. Reducción de los óxidos de hierro	10
1.6.1. Reacciones químicas en el Alto horno	10
1.6.2. Reducción del óxido férrico por el óxido de carbono	11
1.6.3. Reducción del óxido magnético por el óxido de carbono	12
1.6.4. Reducción del óxido ferroso por el carbono	14
1.7. Otras reacciones en el alto horno	14
1.7.1. Reducciones por el carbono	14
1.7.2. La corriente gaseosa en el Alto horno	15
1.7.3. Las escorias	16
1.7.4. Composición de las escorias	17
1.7.5. Propiedades de las escorias	17
1.7.6. Acción purificadora de las escorias (desulfuración)	18
1.7.7. Acción de la cal	18
1.7.8. Acción del manganeso	19
1.8. Cálculos concernientes al Alto horno	20
1.8.1. Cálculo del lecho de fusión. Elementos del problema	20

1.8.2.	Cálculo del lecho de fusión, ejemplo simplificado	20
1.9.	Compresión de viento	27
1.10.	Distribución de viento	28
1.10.1.	Tratamientos y utilización de los gases del tragante	29
1.10.2.	Desulfuración de la colada	32
1.10.3.	Obtención del acero	33
1.11.	Las fundiciones	36
1.11.1.	Fundiciones grises	37
1.11.2.	Fundiciones blancas	39
1.11.3.	Fundiciones aleadas	40
1.11.4.	Fundiciones mecánicas especiales	41
1.11.5.	Fundiciones refractarias	41
1.11.6.	Fundiciones resistentes a la corrosión	42
1.11.7.	Fundiciones de características físicas particulares	42
1.12.	Segunda fusión	42
1.13.	Fusión en el cubilote	43
1.14.	Resumen	44
CAPÍTULO II. DIAGRAMAS DE FASES		49
2.1.	Introducción	49
2.2.	Terminología	50
2.3.	Diagramas de fase (o de equilibrio)	56
2.3.1.	Constitución de las aleaciones	60
2.3.2.	Factores que controlan el intervalo de solubilidad	60
2.3.3.	Fases intermedias (compuestos intermedios)	64
2.3.4.	Clasificación diagramas de fase	67
2.4.	Diagramas de fase binarios	68
2.4.1.	Tipo I: Completamente solubles en estado líquido y sólido	68
2.4.2.	Tipo II: Insolubles en estado sólido	75
2.4.3.	Tipo III: Parcialmente solubles en estado sólido	80
2.4.4.	Tipo IV: Formación de una fase intermedia de fusión congruente ...	86
2.4.5.	Tipo V. La reacción peritectoide	91
2.4.6.	Tipo VI: Componentes insolubles en estado líquido e insoluble en estado sólido	95

2.5.	Diagrama hierro – carbono	95
2.5.1.	Fases sólidas en el diagrama de fases hierro – carbono	96
2.5.2.	Reacciones invariantes en el diagrama de fases Fe-C	100
2.6.	Problemas resueltos de diagramas de fase	106
2.7.	Aplicación del diagrama Fe-C en la caracterización metalográfica de un acero hipoeutectoide	126
2.7.1.	Tipos de metalografías	127
2.7.2.	Porcentaje de fases presentes	127
2.7.3.	Preparación de una muestra metalográfica	128
 CAPÍTULO III. TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE MATERIALES METÁLICOS		 139
3.1.	Introducción	139
3.2.	Constituyentes de los aceros tratados térmicamente	142
3.2.1.	Martensita	142
3.2.2.	Bainita	143
3.3.	Recocido	145
3.4.	Normalizado	146
3.5.	Temple	147
3.5.1.	Ensayo de Jominy	148
3.6.	Revenido	149
3.7.	Tratamientos isotérmicos	151
3.7.1.	El diagrama TTT para aceros hipoeutectoides e hipereutectoides ...	154
3.8.	Esfuerzos residuales y agrietamiento	156
3.9.	Rapidez de templado	157
3.10	Diagramas de transformación de enfriamiento continuo	158
3.11.	Problemas resueltos	163
 CAPÍTULO IV. ALEACIONES NO FERROSAS		 171
4.1.	Introducción	171
4.2.	Aleaciones de aluminio	172
4.2.1.	Extracción del aluminio	173
4.2.2.	Designación de aleaciones de aluminio	177

4.2.3.	Grupos de aleación	179
4.3.	Aleaciones de cobre	184
4.3.1.	Propiedades del cobre	185
4.3.2.	Extracción del cobre	186
4.3.3.	Designación de aleaciones de cobre	190
4.3.4.	Grupos de aleaciones.....	190
4.4.	Aleaciones de magnesio	199
4.4.1.	Obtención del magnesio	200
4.4.2.	Designación de las aleaciones de magnesio	204
4.4.3.	Grupo de aleaciones de magnesio	205
4.5.	Aleaciones del zinc	211
4.5.1.	Extracción del zinc	212
4.5.2.	Grupo de aleaciones del zinc	216
4.5.3.	Designación de aleaciones del zinc	221
4.6.	Aleaciones de níquel	222
4.6.1.	Propiedades del níquel	223
4.6.2.	Extracción del níquel	223
4.6.3.	Grupo de aleaciones del níquel	226
4.6.4.	Designación del níquel	228
	BIBLIOGRAFÍA	233

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1.	Alto horno	8
Figura 2.	Alto horno	9
Figura 3.	Reacciones químicas en el alto horno	11
Figura 4.	Esquema de un Cowper	28
Figura 5.	Parte superior de un alto horno	29
Figura 6.	Cámaras de polvos	31
Figura 7.	Depuración por vía seca	32
Figura 8.	Obtención del acero	33
Figura 9.	Obtención del acero por oxígeno	35
Figura 10.	Horno eléctrico	36
Figura 11.	Fundición gris sin tanque a 100x	37
Figura 12.	Esquema de un cubilote	44
Figura 13.	Tipos de soluciones	51
Figura 14.	Solución sólida intersticial de carbono en hierro	52
Figura 15.	Cu-Ni, solución sólida sustitucional	53
Figura 16.	Red espacial, celda unitaria	53
Figura 17.	Estructuras cristalinas bcc, fcc, hcp	54
Figura 18.	La solubilidad de azúcar en un jarabe de agua azucarada	57
Figura 19.	Diagrama de fases del agua	58
Figura 20.	Diagrama de fases binario	59
Figura 21.	Diagrama de fases binario, solubilidad completa en estado sólido	61
Figura 22.	Tabla periódica.....	63
Figura 23.	Curvas de enfriamiento para diferentes aleaciones en un sistema totalmente soluble. (Las líneas punteadas representan la forma del diagrama de fase)	69
Figura 24.	Diagrama de fase de dos metales completamente solubles en los estados líquido y sólido	69
Figura 25.	Diagrama de fases con solubilidad completa, regla 1	71
Figura 26.	Curvas de enfriamiento y diagrama de fases	74
Figura 27.	Diagrama de fases binario que muestra una insolubilidad total en estado sólido	75

Figura 28.	Curvas de enfriamiento y microestructuras a temperatura ambiente para una serie de aleaciones de dos metales insolubles en estado sólido	76
Figura 29.	Diagrama de fase eutéctico	77
Figura 30.	Diagrama de fase tipo eutéctico de aleación de oro y plata	78
Figura 31.	Etapas de enfriamiento lento de una aleación hipoeutéctica	80
Figura 32.	Diagramas de fase que muestra solubilidad parcial en estado sólido	81
Figura 33.	Diagrama de fase que muestra solubilidad parcial en el estado sólido	82
Figura 34.	Microestructura de la aleación 1	83
Figura 35.	Microestructura de la aleación 3	84
Figura 36.	Microestructura de la aleación 4	85
Figura 37.	Relación lineal entre las partes de la microestructura y la composición	86
Figura 38.	Relación lineal entre las partes de la microestructura y la composición	87
Figura 39.	Diagrama de equilibrio que muestra una aleación intermedia	87
Figura 40.	Diagrama de fase binario con un compuesto de fusión congruente intermedio	88
Figura 41.	Análisis de la microestructura de una composición total correspondiente al sistema AB-B (solo necesario considerar dicho diagrama eutéctico).....	89
Figura 42.	Diagrama de base de relativa complejidad	90
Figura 43.	Región para el análisis de una composición total situada	90
Figura 44.	Reacción peritectoide	91
Figura 45.	Diagrama de fase que muestra dos aleaciones atravesando la línea de reacción peritética	91
Figura 46.	Microestructura de la aleación 1	93
Figura 47.	Microestructura de la aleación 2	94
Figura 48.	Diagrama hipotético de equilibrio para dos metales	95
Figura 49.	Diagrama hierro – carbono	96

Figura 50.	Ferrita en un acero de bajo carbono	97
Figura 51.	Esquema de la perlita	99
Figura 52.	Perlita (blanco) en una matriz de ferrita, un acero de bajo carbono	100
Figura 53.	Representación esquemática de las microestructuras de un acero eutectoide de composición (0,8 %C)	102
Figura 54.	Microestructura perlítica de un acero eutectoide mostrando laminas alternas de ferrita (fase oscura) y Cementita (laminas más delgadas verdes). 400X. atacada químicamente con nital al 2%	102
Figura 55.	Representación esquemática de las microestructuras de un acero hipoeutectoide de composición Co (menor de 0,8%C) a medida que se enfría desde la fase austenítica hasta por debajo de la temperatura eutectoide	104
Figura 56.	Fotomicrografía de un acero 0,25%C con una microestructura constituida por perlita (oscuro) y ferrita proeutectoide (Blanco). 100X atacada químicamente con Nital al 2%	104
Figura 57.	Representación esquemática de las microestructuras de un acero hipereutectoide de composición Co (mayor de 0,8%C) a medida que se enfría desde la fase austenítica hasta por debajo de la temperatura eutectoide	105
Figura 58.	Microestructura de un acero con 1,4% C formado por cementita proeutectoide blanca reticulada alrededor de las colonias de perlita a 1000X	106
Figura 59.	Análisis de la aleación alfa en $T \pm \Delta T$	107
Figura 60.	Diagrama de fase Al-Si	109
Figura 61.	Representación del 1% Si en el diagrama Al-Si	109
Figura 62.	Representación del 5% Si en el diagrama Al-Si	111
Figura 63.	Representación de una aleación eutéctica en el diagrama Al-Si ..	114
Figura 64.	Diagrama de fase Cd-Zn	115
Figura 65.	Diagrama de fase Al-Ge	118
Figura 66.	Diagrama de Fe – C	121
Figura 67.	Esquema, extracción de probetas para metalografía	128
Figura 68.	Empastillado de probetas para metalografía	129
Figura 69.	Proceso de desbaste	130
Figura 70.	Pulido	131
Figura 71.	Probeta metalográfica pulida	131

Figura 72.	Microestructura del acero hipoeutectoide (sección transversal al laminado). El componente blanco es ferrita proeutectoide; el componente oscuro es perlita (Decapante: nital al 2%; amplificación 100×)	132
Figura 73.	Microestructura del acero hipoeutectoide (sección transversal al laminado). El componente blanco es ferrita proeutectoide; el componente oscuro es perlita (Decapante: nital al 2%; amplificación 200X)	133
Figura 74.	Microestructura del acero hipoeutectoide (sección longitudinal al laminado). El componente blanco es ferrita proeutectoide; el componente oscuro es perlita (Decapante: nital al 2%; amplificación 200×)	133
Figura 75.	Microestructura del acero hipoeutectoide (sección transversal al laminado). El componente blanco es ferrita proeutectoide; el componente oscuro es perlita (Decapante: nital al 2%; amplificación 500×)	134
Figura 76.	Escalamiento de fotomicrografías en imagen	135
Figura 77.	Transformación de la fotomicrografía a binaria	135
Figura 78.	Porcentaje de área (Perlita) en la fotomicrografía	136
Figura 79.	Diagrama hierro – carbono	141
Figura 80.	Microestructura de la martensita en un acero AISI 4340	143
Figura 81.	Esquema de crecimiento de la bainita	144
Figura 82.	Ciclo térmico utilizado en un T.T de Recocido	145
Figura 83.	Esquema de las transformaciones que se producen en un acero hipoeutectoide durante el Recocido	146
Figura 84.	Ciclo térmico utilizado en un T.T. de normalización	147
Figura 85.	Ciclo térmico utilizado en un T.T de temple	147
Figura 86.	Representación esquemática de la probeta del ensayo de Jominy (a) instalación y (b) después del esmerilado para medir la dureza	149
Figura 87.	Ciclo térmico utilizado en un T.T de temple y revenido	150
Figura 88.	Microestructura de un acero eutectoide sometido a distintas velocidades de enfriamiento	150
Figura 89.	Nariz perlítica	152

Figura 90.	Diagrama TTT de un acero eutectoide	153
Figura 91.	Diagrama TTT para un acero (a) 1050 y (b) 10110	155
Figura 92.	Formación de grietas de templado causadas por esfuerzos residuales producidas durante el templado. Ilustra el desarrollo de esfuerzos, al transformarse la austenita en martensita durante el enfriamiento	156
Figura 93.	Tratamiento térmico por templado arriba de M, diseñado para reducir esfuerzos residuales y grietas de templado	157
Figura 94.	Diagrama TEC (líneas solidas) para un acero 1080 en comparación con el diagrama TTT (líneas punteadas)	159
Figura 95.	Diagrama TEC para un acero 4130	161
Figura 96.	Tratamiento TEC para una baja aleación acero 0,2% C	162
Figura 97.	Diagrama de transformación isotérmica de un hacer hipoeutectoide	165
Figura 98.	Diagrama de transformación isotérmica para un acero al carbono simple	166
Figura 99.	Propiedades mecánicas del acero AISI 1050 comercial	167
Figura 100.	Efecto de la temperatura de revenido sobre las propiedades mecánicas de un acero 1050	168
Figura 101.	Roca de bauxita	174
Figura 102.	Roca de nefelina	175
Figura 103.	Roca de alunita	176
Figura 104.	Roca de cianita	177
Figura 105.	Roca de calcopirita	187
Figura 106.	Roca de cuprita	188
Figura 107.	Roca de bornita	189
Figura 108.	Roca de azurita	189
Figura 109.	Magnesio	201
Figura 110.	Dolomita	202
Figura 111.	Brucita	202

Figura 112. Magnesita	203
Figura 113. Adamita	214
Figura 114. Esfalerita	215
Figura 115. Calcofanita	216
Figura 116. Roca de pentlandita	224
Figura 117. Roca de niquelina	225
Figura 118. Roca de garnierita	226

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Cálculo del lecho de fusión	21
Tabla 2.	Compuestos de la materia prima	25
Tabla 3.	Valores de minerales que pasan a la escoria	26
Tabla 4.	Carga de Fe que contiene el arrabio	26
Tabla 5.	Carga de P que contiene el arrabio	26
Tabla 6.	Carga de S que contiene el arrabio	27
Tabla 7.	Composición del arrabio por cada 100kg de coque	28
Tabla 8.	Ejemplo de composición de fundición gris	39
Tabla 9.	Composición de fundiciones blancas ordinarias	40
Tabla 10.	Relaciones entre parámetros de red y las geometrías de las celdillas ...	54
Tabla 11.	Ejemplo entre el aluminio y el silicio	63
Tabla 12.	Fases electrónicas del sistema Cu-Zn en función del factor de concentración	66
Tabla 13.	Por encima de la reacción eutéctica	79
Tabla 14.	Por encima de la reacción peritética	92
Tabla 15.	Por debajo de la reacción peritética	92
Tabla 16.	Reacción a temperatura peritética	92
Tabla 17.	Reacción a temperatura peritética	93
Tabla 18.	Coefficiente H, es decir severidad del templado, para diversos medios de templado	158
Tabla 19.	Clasificación de aleaciones de aluminio	178
Tabla 20.	Clasificación de aleaciones de aluminio	190
Tabla 21.	Clasificación comercial de la plata níquel	199

Tabla 22.	Sistema ASTM estándar de cuatro partes de aleaciones y designaciones de temple para aleaciones de magnesio Ver texto para discusión	204
Tabla 23.	Características de las aleaciones fundidas a presión	205
Tabla 24.	Características de las aleaciones. Características de la arena y aleaciones fundidas permanentes	207
Tabla 25.	Designación de los aceros al níquel	228

The background features a network of glowing, semi-transparent spheres in shades of blue and purple, interconnected by thin, light-colored lines. The spheres vary in size and are scattered across the frame, creating a sense of depth and connectivity. The overall aesthetic is futuristic and digital.

PRÓLOGO

PRÓLOGO

El conocimiento básico de la ingeniería de los materiales, es una consecución de la ciencia de los materiales mediante la relación de los principios fundamentales de temas como: estructura atómica, estructura física, solidificación e imperfecciones cristalinas, difusión y propiedades de los materiales con la obtención de materias primas que cumplan los requisitos para construcciones de ingeniería. Temas que los autores del actual texto lo han analizado, llevando a una publicación previa de un libro denominado “Introducción a los materiales utilizados en la ingeniería mecánica y eléctrica”. Con estos antecedentes, se han enfocado en aportar sustento para la adquisición de conocimientos generales sobre la temática de ingeniería de los materiales, dirigido a estudiantes de pregrado de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

El objetivo general de la publicación del actual texto es presentar de forma no tediosa ni extensa a fin de evitar un desfallecimiento en el continuo aprendizaje del alumnado, la fundamentación de temas relacionados a la obtención del acero principalmente, diagramas de fase binarios, principales tratamientos térmicos en el acero y conocimiento en aleaciones no ferrosas. Si bien es cierto, existe numerosa bibliografía para el autoconocimiento de los estudiantes, pero debido a la amplia información que se puede encontrar de los temas expuestos, optan por abandonar la lectura.

Iniciando con el capítulo I, se hace un breve ensayo en la extracción del mineral hierro, ya que en la naturaleza se le encuentra en forma combinada con elementos como oxígeno, carbonatos y sulfuros. Estudiando brevemente la materia prima, cómo se obtiene el arrabio (primera fusión del hierro con alto carbono), una revisión del equipo para la obtención del mismo, el alto horno, y principales reacciones que se dan en el mismo.

El capítulo II, promueve a los estudiantes a conocer los diagramas de fase binarios con las principales reacciones que se producen cuando solidifican aleaciones metálicas, desde la fase líquida hasta la temperatura ambiente. Se

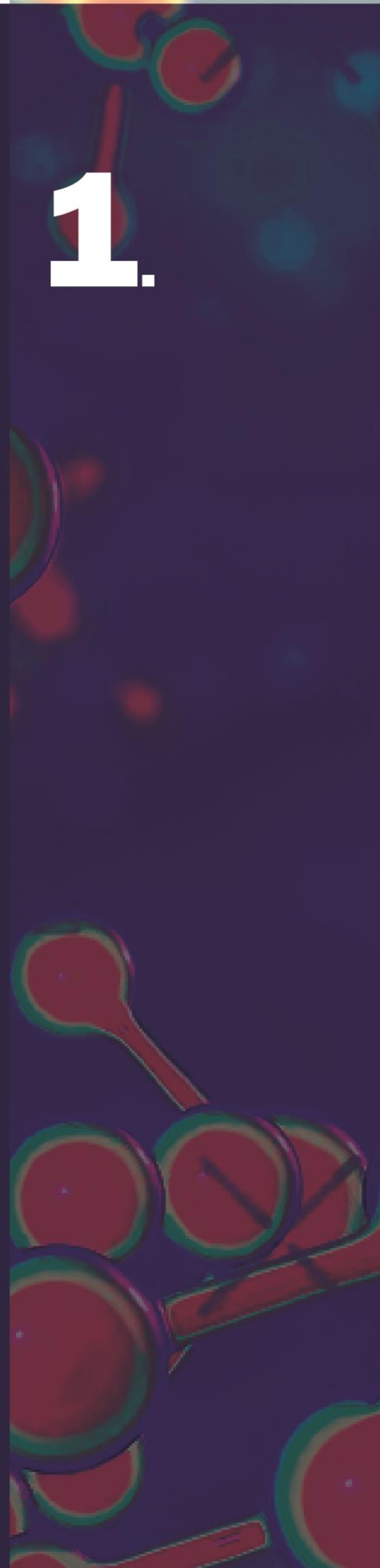
pretende partir desde la teoría indispensable y fundamentada, a fin de resolver cuestiones metalográficas con la identificación de fases en fotomicrografías, obtenidas a partir de microscopios ópticos o electrónicos de aleaciones metálicas. Es por ello que el final del capítulo, se presenta una serie de problemas resueltos respecto a diagramas de equilibrio. Uno de los diagramas más utilizados en la Ingeniería Mecánica es el Fe-C, ya que actualmente el acero es el material más utilizado en la industria de la construcción, presentando al lector una guía de las transformaciones que sufren los aceros cuando se enfría en condiciones de equilibrio en dependencia al porcentaje de carbono. Finalmente, se contribuye con una caracterización metalográfica de un acero estructural (de bajo carbono) y su cuantificación de carbono a partir de una fotomicrografía.

Posteriormente, en el capítulo III, se precisa en los fundamentos teóricos de los principales tratamientos térmicos del acero, iniciando con la conceptualización de los constituyentes que se obtienen luego de realizar enfriamientos fuera del equilibrio, tales como, martensita y bainita, constituyentes que brindan un mejor desenvolvimiento de los aceros frente a condiciones de carga externas en comparación con la ferrita y perlita, constituyentes comunes de los aceros enfriados lentamente. Para obtener constituyentes duros y de mayor resistencia mecánica que los últimos, es primordial la revisión de los tipos de curvas de enfriamiento para tratamientos isotérmicos (TTT) y tratamientos con enfriamiento continuo (TEC).

Finalmente, se describe las principales aleaciones no ferrosas, tales como: aleaciones de aluminio, cobre, magnesio, zinc y níquel, enfocando en temas de extracción, propiedades, designación de las aleaciones de cada grupo y aplicaciones industriales.

CAPÍTULO
SIDERURGIA

1.



CAPÍTULO I

SIDERURGIA

1.1. Introducción

Uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción es el acero, es por ello que en este breve capítulo se tratará sobre la obtención de esta aleación (Fe-C) que presenta una vasta relación de propiedades mecánicas y precio. Este metal se encuentra en la corteza terrestre principalmente como óxidos de hierro, sulfuros y carbonatos, y estos a su vez se encuentran mezclados en las rocas con gangas (elementos no deseados o impurezas) las mismas que pueden ser separadas mediante el proceso siderúrgico.

La siderurgia (viene del griego sideros “hierro”) se define generalmente como el proceso técnico para el tratamiento del mineral de hierro (Fe) y sus aleaciones como principal agente el Fe con porcentajes adecuados de carbono (C), fósforo (P), cobre (Cu), níquel (Ni), silicio (Si), cromo (Cr), entre otros.

La fabricación del hierro en la antigüedad se hacía directamente en una sola etapa por reducción del mineral. Se obtenían pequeñas partículas metálicas de aspecto esponjoso, en estado sólido o pastoso. Luego, las partículas o cristales de hierro obtenidos se reunían y se les daba la forma adecuada por martillado en caliente que producía su soldadura. Este método comenzó a emplearse unos 1400 años a.C.

Hasta el siglo XIV no se conocía otro hierro que el obtenido en una sola operación por reducción directa del mineral por medio de carbón. Desde el siglo XV se aumentó la altura de los hornos; primero hasta 3 o 4 m, luego hasta 7 m. Se llegó así, al perfeccionamiento de los medios de insuflación, a obtener diariamente 4 toneladas de un metal que cuela líquido del horno, lo que permite fundir en molde. Esto es el arrabio o también llamado fundición de primera fusión, este es un material que contiene muchas gangas y exceso de C, que debe ser tratado para convertirse en un acero específico.

A mediados del siglo XVIII, la sustitución del carbón de madera por el coque metalúrgico y el empleo de la máquina de vapor para impulsar los sopletes, permitieron aumentar las dimensiones del alto horno que llegó a producir en aquel

entonces, unas 25 toneladas diarias. En 1750 calentando el hierro y carbón de madera en un crisol, sometido a la acción del coque incandescente, se obtuvo por fusión, el primer acero homogéneo llamado acero al crisol.

Durante la segunda mitad del siglo XIX aparecieron diversos procedimientos que permitían el tratamiento de masas de metal importantes y obtener productos de calidad superior, partiendo de materiales menos ricos en el metal y con más impurezas que los tratados; ya en los siglos XX y XXI se han ido evolucionando las técnicas de la siderurgia, sin embargo en la actualidad, existen pueblos de origen africanos que utilizan técnicas del siglo XIV.

El arrabio (primera fusión del hierro en los altos hornos con contenido alto de carbono, ($3 < \%C < 4$) siendo el material base para la formación del acero, tiene un exceso de C e impurezas) tiene que pasar por un proceso llamado “afino” donde este elimina las gangas, azufre (S) y fósforo (P); esta técnica se realizaba en hornos convertidores, y estos equipos fueron creados por Bessemer (1855-1860), Martin ácido (1856-1864), Thomas (1879) y Martin básico (1890) lo que llevó a dar un gran salto productivo en dicha época. Finalmente, la aparición del horno LD (el proceso de oxígeno básico L-D (BOS, BOF, Linz-Donawitz-Verfahren, LD-convertidor) es un método de producir aceros en el cual el hierro fundido rico en carbono se transforma en acero y los eléctrico (1900) permite el control riguroso de las reacciones durante el afino y permite garantizar la composición exacta del acero.

1.2. Clasificación de los productos siderúrgicos

Los metales ferrosos pueden considerarse como aleaciones hierro-carbono (principal elemento aleante el hierro) ya que sus propiedades dependen esencialmente de su contenido en carbono (mayor carbono mayor dureza y resistencia mecánica). Se les clasifica en hierro, aceros y fundiciones.

- a) El Hierro ($C \% < 0,008$). Se conoce vulgarmente como «hierro» a la ferrita α , que es una solución sólida intersticial de carbono en hierro α . Es muy maleable y de baja resistencia mecánica sin utilidad industrial. Funde a los $1535\text{ }^{\circ}\text{C}$ y presenta cambios alotrópicos a diferentes temperaturas. Desde la temperatura ambiente hasta los $910\text{ }^{\circ}\text{C}$ tiene una estructura cristalina BCC (Body Center Cubic), sobre los $910\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta los $1395\text{ }^{\circ}\text{C}$ se presenta como FCC (Face Center Cubic) y sobre los $1395\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta el punto de fusión 1535

°C nuevamente se ordena de forma BCC pero con diferente parámetro de red (longitud de la celda unitaria).

- b) El Acero ($0,008 < C\% < 2$). El acero es menos dúctil que el hierro, pero tiene mayor dureza y mayor resistencia mecánica, puede admitir tratamientos térmicos como el temple si tiene suficiente carbono; es decir, una vez calentado a una temperatura suficientemente elevada (austenización) y enfriado rápidamente, adquiere un aumento notable de dureza pero reduce su ductilidad, esto porque se produce una solución sobresaturada de carbono en el hierro. El constituyente característico del acero es la perlita formada por un agregado muy fino de ferrita y de carburo de hierro (Fe_3C) o cementita. Teóricamente un acero está compuesto con una cantidad del 0.008 al 2% de carbono, pero comercialmente se encuentra como máximo aceros que contengan 1,4% de carbono, que son materiales muy duros, pero presentan mucha fragilidad. (De los aceros se hablan con mayor profundidad en el Capítulo II)

- c) La Fundición (3) ($2 < C\% < 6,67$). También son aleaciones de hierro con carbono, pero a diferencia del acero, el carbono se encuentra en forma libre como grafito (principal característica de las fundiciones). Teóricamente pueden tener una composición desde 2 hasta 6.67% de carbono, pero en la práctica se encuentra desde 2.5 hasta 4,5 como máximo de carbono. Los principales hierros fundidos que se encuentran en el mercado son: hierro fundido gris, hierro fundido blanco, hierro fundido nodular y el hierro fundido maleable.

Normalmente, todas las aleaciones hierro-carbono contienen pequeñas cantidades de otros metales como el Mn o de elementos no metálicos (Si, P, S, etc.), cuya presencia es debida a la composición de la primera materia empleada y a los procedimientos usados para su obtención. No obstante, se puede elevar o reducir considerablemente a voluntad, la proporción de estos elementos y obtener nuevos productos siderúrgicos: ferroaleaciones, fundiciones especiales, aceros aleados, etc. con mejores propiedades mecánicas.

1.3. Materias primas para la obtención del acero

Las materias primas para la obtención del acero son: minerales de hierro (óxidos, sulfuros y carbonatos principalmente), combustibles y fundente, actualmente como un elemento de reciclabilidad, la chatarra en reemplazo de los minerales (caso muy común en Ecuador).

1.3.1. Minerales de hierro

Los minerales más importantes son los óxidos; se emplean también los carbonatos y algunos sulfuros entre estos están los que a continuación se describen:

a) Óxidos de hierro

Óxido magnético (Fe_3O_4).- También denominado **magnetita** y de todos los minerales de hierro, este es el más rico en estado de pureza (72% de Fe). Su peso específico es de 5 Kg/dm^3 , se presenta en naturaleza en color negro gris y abunda en Argelia (Mokta-el-Hadid), en Rusia y en Suecia. La mina, generalmente siliciosa, está exenta de fósforo; esta es una de las causas de la excelente calidad del hierro sueco.

Óxidos férricos anhídridos (Fe_2O_3).- También denominada **hematita**, su estado de riqueza es del (72% de Fe), su peso específico es de 4.9 Kg/dm^3 , se presenta en naturaleza en color rojo. Los más importantes son el hierro oligisto (cristalizado) y la hematites roja (amorfa). Este último mineral se encuentra en Estados Unidos (cuatro quintos de la producción americana), también se halla en España, Argentina y Túnez; en Francia constituye una parte del yacimiento de Baja-Normandía.

Óxidos férricos hidratados. Estos minerales tienen una composición aproximadamente de $2(Fe_2O_3)$, $3(H_2O)$, también denominada **limonita**. Su estado de riqueza es del (60% de Fe), su peso específico es de 4.5 Kg/dm^3 , se presenta en naturaleza en color amarillo rojizo. Están muy repartidos y son fáciles de reducir, pero su ganga contiene frecuentemente combinaciones fosfatadas o sulfuradas. El origen común es la limonita o mineral de marisma (Pirineos, Suecia), y principalmente, la hematites oolítica, que se encuentra en Baja-Normandía y constituye el yacimiento de hierro más importante del mundo.

b) Carbonatos de hierro

Estos materiales están formados por carbonato ferroso CO_3Fe también denominada **siderita**. Su estado de riqueza es del (48.3% de Fe), su peso específico es de $3.7 \text{ Kg}/dm^3$, se presenta en naturaleza en color pardo, asociado una ganga compuesta de carbonatos isomorfos (CO_3Mg, CO_3Ca). Se distingue: el hierro litoide, o esfero siderita, abundante en Inglaterra (el tercio del mineral inglés) y en Baja-Normandía; este mineral está mezclado, a veces, con la hulla (carbonato hullero o black band).

Existen otros minerales secundarios como la pirita (S_2Fe), su estado de riqueza es del (47% de Fe), pirrotina y la calcopirita (S_2CuFe) que también se explotan pero por su gran porcentaje de azufre (S) que es un enemigo del acero y que conjunto con el fósforo (P) hacen que el acero se vuelva frágil y que, por esta razón se descalifican.

c) Chatarra

Desecho metálico u obsoleto que ha cumplido su funcionalidad, se puede encontrar en el medio, por partes, los cuales pueden provenir de máquinas, coches, estructuras metálicas, línea blanca, etc.

1.3.2. Combustibles

El combustible introducido en el alto horno debe presentar una resistencia al aplastamiento muy elevado (a fin de poder descender en la cuba sin desmoronarse ni amontonarse) y con gran porosidad, condición necesaria para la regularidad de su combustión. Además, a las temperaturas de 600 a 700°C no debe aglomerarse en masas pastosas que imposibilitarían el descenso del mineral. Entre estos están el coque y el carbón vegetal.

- a) **El coque.** Es un combustible sólido poroso, obtenido por pirogenación (destilación en vacío) de la hulla grasa de llama corta, conteniendo de 18% a 26% de materias volátiles; posee las cualidades requeridas por ejemplo su resistencia al aplastamiento del orden de $170 \text{ daN}/\text{cm}^2$, ha permitido elevar hasta 30 m la altura de los altos hornos. Su poder calorífico es alrededor de $7000 \text{ kcal}/\text{kg}$. Formado esencialmente por carbono, el coque puede contener

hasta el 15% de cenizas, generalmente siliciosas, y hasta 1% de azufre que proviene de las piritas de la hulla.

- b) **Carbón vegetal.** En ciertos países, Suecia en particular, se utiliza aun el carbón de madera. El empleo de este combustible exento de azufre, da con los minerales magnéticos muy puros, arrabios de alta calidad. No obstante, su friabilidad limita a unos 12 metros la altura de los altos hornos, restringiendo la capacidad de producción.

1.3.3. Fundentes

La principal función del fundente es crear la capa de escoria del material fundido, que en caso de no generarla las impurezas quedarían mezcladas en el metal, provocando una reducción de las propiedades mecánicas del mismo.

El mineral, al pasar por un proceso de purificación donde se trata de eliminar al mínimo el porcentaje de las impurezas, a pesar de este paso preliminar, todavía queda gangas en la capa de escoria que flota sobre el metal fundido. Para transformarla en una escoria fusible hacia 1300°C, es preciso combinar esta ganga con una sustancia de función química antagónica, de manera que pueda formarse un silicato de fácil fusión. Por ello, a los minerales silíceos se añade un fundente calcáreo (castina) y a los minerales calcáreos un fundente arcilloso (erbue). Así se pueden mezclar convenientemente dos minerales de hierro, el uno con ganga carbonatada y el otro con ganga rica en silicio.

1.3.4. El viento

Se designa así al aire insuflado a presión dentro del alto horno (60 cm de columna de mercurio de sobrepresión). Es llevado a una temperatura previa de 700 a 800°C y contiene siempre un poco de humedad (15g de agua por m^3). Se consume alrededor de 5t de viento para obtener una tonelada de arrabio.

Observación: En los últimos tiempos se va extendiendo el empleo de aire oxigenado (30% de oxígeno).

1.4. Proceso de obtención del arrabio y del acero

Los distintos tratamientos que llevan a la producción del acero ordinario se basan en dos fases esenciales como se muestran en la Figura 1.

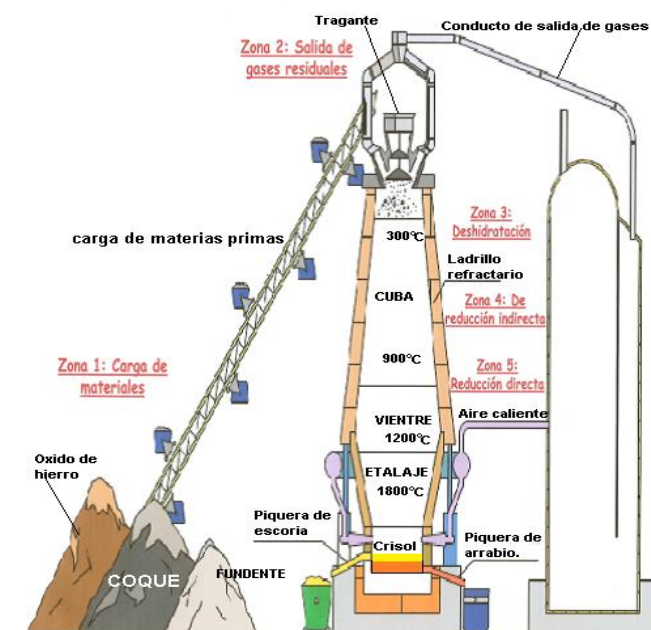
- Obtención del arrabio por reducción y fusión del mineral.
- Obtención del acero por afinado del arrabio.

1.4.1. Obtención del arrabio

Se introduce en el alto horno una mezcla (lecho de fusión) del mineral (óxidos de hierro), de combustible (coque, que actúa a la vez de reductor) y el fundente. Se insufla una corriente de aire caliente (viento) que origina con el coque óxido de carbono, que reduce al mineral. El hierro metal coexiste con la ganga sólida. Por combinación con el fundente, esta ganga pasa al estado de escoria, fusible hacia los 1300°C. Bajo el efecto de tal temperatura, el hierro se combina con el carbono (disolviéndose una pequeña cantidad): se forma arrabio, aleación compleja, con un contenido máximo de 94% de hierro. El arrabio y escorias en estado líquido se separan por orden de densidades como se muestra en la Figura 1.

Figura 1.

Alto horno



Fuente: http://www.Unisid.org/main.asp?id_pagina=31

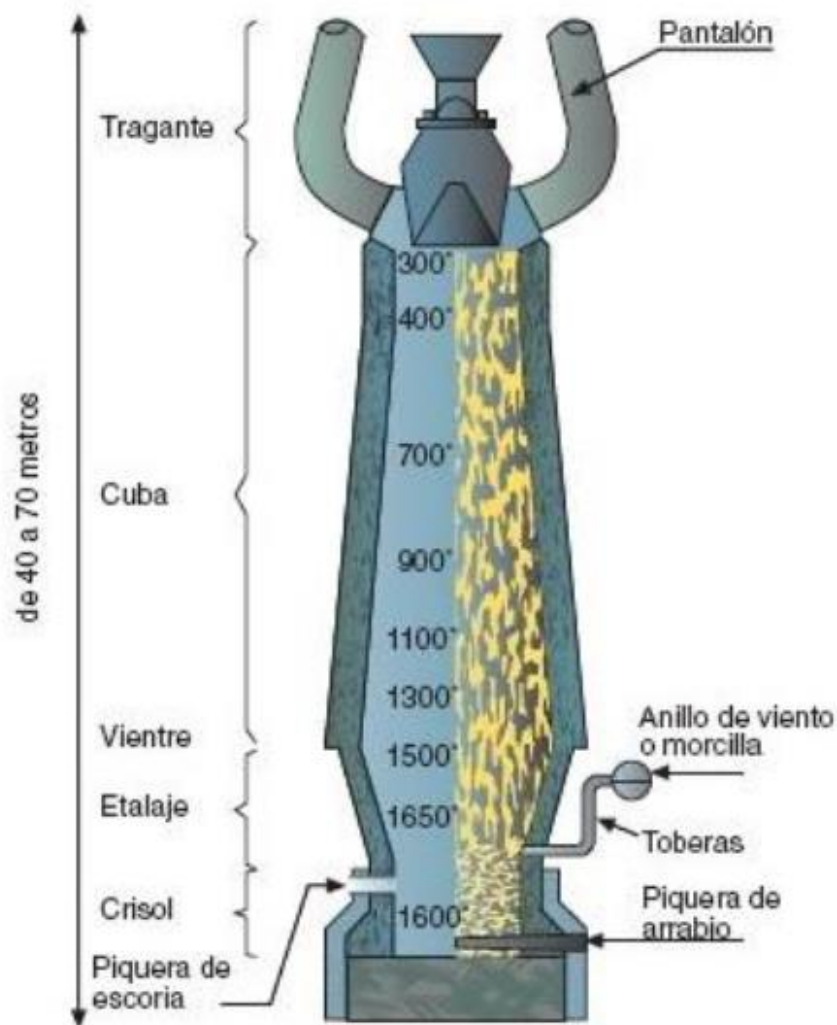
1.5. El Alto horno

El arrabio se obtiene en un gran horno con cuerpo de eje vertical tienen alturas entre 40 y 70 m, de secciones rectas circulares, llamado horno alto o alto horno indistintamente.

Consta, de arriba abajo, de las siguientes partes como se observa en Figura 2:

Figura 2.

Alto horno



Fuente: (García et al., n.d.)

- a) **El tragante:** abertura por la cual se introducen las cargas y donde a su salida, son recogidos los gases de las diferentes reacciones que han tenido lugar y que contienen esencialmente óxido de carbono, gas carbónico, nitrógeno con un poco de hidrogeno y vapor de agua.
- b) **La cuba:** troncocónica, que se ensancha ligeramente hacia la parte inferior.
- c) **El vientre:** parte cilíndrica, la más ancha del alto horno.
- d) **El etalaje:** tronco de cono que une el vientre con el crisol.
- e) **El crisol:** donde se mezclan el arrabio y las escorias líquidas y lleva un agujero superior para la colada de la escoria (piquera de la escoria), y a un nivel inferior otro agujero para la del arrabio (piquera del arrabio).

1.6. Reducción de los óxidos de hierro

El óxido de hierro de las cargas, es casi siempre óxido férrico Fe_2O_3 . Cuando se opera con óxido magnético (Fe_3O_4) generalmente por calcinación previa, se lleva al estado férrico.

El primer problema a aclarar es la reducción del óxido férrico. Aquí hay dos posibles reductores:

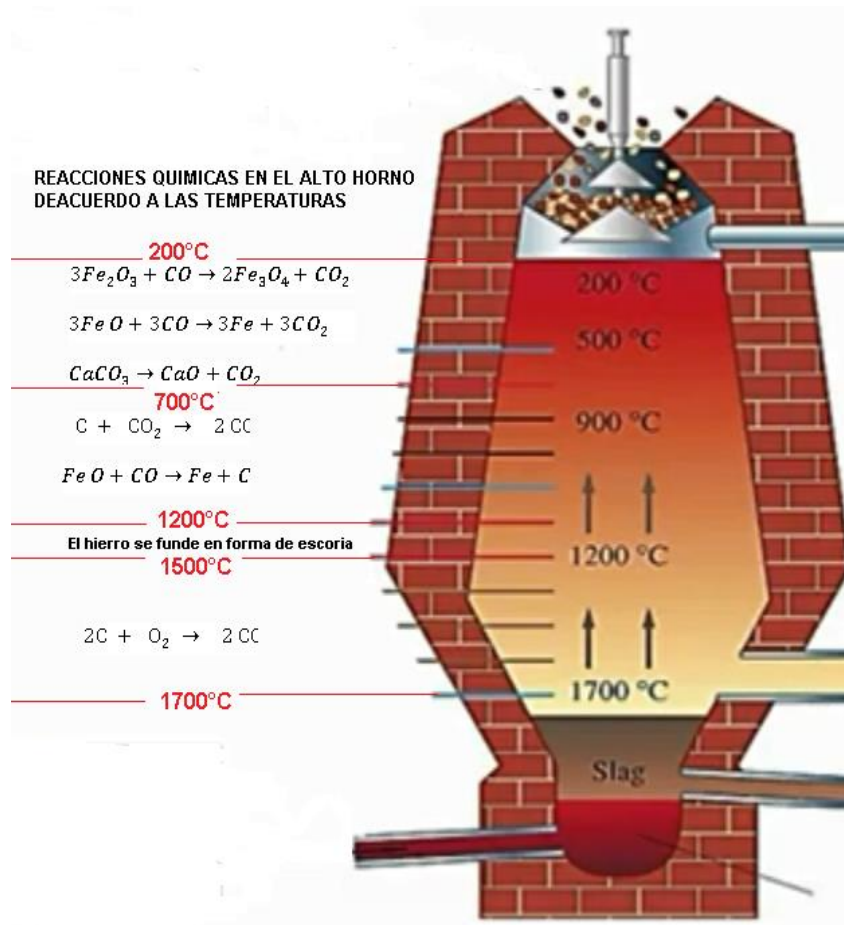
- a) **El óxido de carbono**, que actúa a partir de $400^{\circ}C$.
- b) **El carbono sólido**, cuya acción no tiene efecto hasta una temperatura mayor; no obstante, cuando las cargas alcanzan cierta temperatura en el horno, no contiene óxido férrico, sino óxido ferroso. Tenemos pues que considerar en primer lugar, la reducción del óxido férrico por el óxido de carbono.

1.6.1. Reacciones químicas en el alto horno

Los hornos altos trabajan bajo la reacción redox (reducción-oxidación) se puede apreciar en la Figura 3, las reacciones de acuerdo a la temperatura del área.

Figura 3.

Reacciones químicas en el alto horno



Fuente: García et al. (s.f.)

1.6.2. Reducción del óxido férrico por el óxido de carbono

La temperatura en el tragante oscila entre 700 y 200°C. Por lo tanto, se produce primeramente una desecación del mineral. La reducción del óxido férrico por el óxido de carbono empieza a 1,50 m del tragante, habiendo formación de óxido magnético. La reacción química es:

3(Óxido de hierro) ($3Fe_2O_3$) + Monóxido de carbono (CO) se reduce a \rightarrow 2(óxido ferroso férrico) ($2Fe_3O_4$) + Dióxido de carbono (CO_2) entonces la ecuación queda de la siguiente manera:

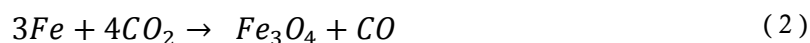


Esta reacción es prácticamente total. Es decir, desde el instante en que se encuentran el óxido férrico y el óxido de carbono, la reducción tiene efecto inmediatamente y prosigue hasta la transformación completa del óxido férrico, ya que la corriente gaseosa ascendente aporta sin cesar, óxido de carbono.

1.6.3. Reducción del óxido magnético por el óxido de carbono

Esta reducción se hace directamente o indirectamente (con formación intermedia de óxido ferroso) según, que la temperatura sea inferior o superior a 570°C.

a) A temperatura igual o inferior a 570°C, dos reacciones son posibles: Reducción del óxido magnético u oxidación del hierro:



Para que la reducción (reacción 2) tenga lugar, es necesario que a cada instante se cumpla la condición:

$$\frac{P_{CO}}{P_{CO} + P_{CO_2}} > 0,5 \quad (3)$$

Si este rendimiento es precisamente igual a 0,5, no hay ninguna modificación del sistema hierro, óxido magnético, óxido de carbono, gas carbónico se produce hasta que se alcance de nuevo este valor 0,5 de la relación $\frac{P_{CO}}{P_{CO} + P_{CO_2}}$. Esta temperatura de 570°C se obtiene aproximadamente a 4m del tragante, y la experiencia demuestra que en esta región del alto horno la relación $\frac{P_{CO}}{P_{CO} + P_{CO_2}}$ es siempre superior 0,5. Así, que en el tragante lo mismo, para los gases de composición:

$$CO: 28\%; \quad CO_2: 12\%; \quad N_2: 56\%; \quad H_2: 4\%$$

La relación:

$$\frac{P_{CO}}{P_{CO} + P_{CO_2}} = \frac{28}{28 + 12} = 0,7 \quad (4)$$

P_{CO} , P_{CO_2} = Presiones parciales del óxido de carbono y del gas carbónico en la atmosfera que está en contacto con la mezcla hierro- óxido de hierro.

Conclusión. - En la parte superior del alto horno, la reducción directa del óxido magnético a hierro es siempre posible. No obstante, es necesario observar que, a 4 metros del tragante, todo el óxido magnético no se ha transformado en hierro, puesto que el movimiento de descenso de las cargas es mucho más rápido que la velocidad de reducción y, a este nivel, el suministro de óxido de carbono no es suficiente para reducir la totalidad del mineral obtenido. Nos encontramos, pues, en presencia de una mezcla de hierro sólido y de óxido magnético.

b) Por encima de 570°C la reducción del óxido magnético a hierro se hace en dos tiempos, habiendo formación intermedia de óxido ferroso (**FeO**).



Pero las reacciones (2) y (3) son reversibles como la reacción (1) y para que se cumpla en el sentido que están escritas (reducciones), la relación $\frac{P_{CO}}{P_{CO} + P_{CO_2}}$ aún debe ser superior a ciertos valores, variables con la temperatura.

Ejemplo.- Cerca de 800°C, reacción (2) solamente se realiza para valores de $\frac{P_{CO}}{P_{CO} + P_{CO_2}}$ superiores a 0,33; para valores inferiores, y en presencia de óxido ferroso, es la reacción de oxidación:



La que se producirá.

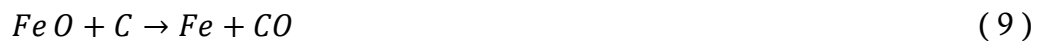
A 800°C la reacción (3) no es posible hasta que $\frac{P_{CO}}{P_{CO} + P_{CO_2}}$ sea superior a 0,75; si no, y en presencia de hierro, es reacción de oxidación:



La que se producirá.

1.6.4. Reducción del óxido ferroso por el carbono

A nivel del etalaje, el hierro y el óxido ferroso coexisten en una atmósfera formada de óxido de carbono y nitrógeno. Tiende a establecer un equilibrio:



La reducción (reacción (1)) no es posible para cada valor de la presión parcial del óxido de carbono $P_{CO} = 0,5$ atmósferas, la reducción empieza teóricamente por encima de 850°C. Prácticamente, todo el óxido ferroso residual se reduce por el carbono, ya que, en marcha normal, la proporción del hierro que se halla en las escorias es inferior al 1%.

En general se mira delimitar al máximo la *reducción directa* (por el carbono), por haber demostrado la experiencia que la *reducción indirecta* (por el óxido de carbono) es más económica. Según las instalaciones, la proporción de hierro debida a la reducción por el carbono varía de 35 a 25%.

1.7. Otras reacciones en el alto horno

1.7.1. Reducciones por el carbono

La ganga de los minerales y el fundente contienen óxidos: anhídrido fosfórico, que proviene del fosfato, sílice, óxidos de manganeso, alúmina, cal y magnesia.

Como el aluminio, el calcio y el magnesio son metales ávidos de oxígenos, la reducción de sus óxidos es imposible en el alto horno.

Solo los compuestos P_2O_5, MnO, SiO_2 son reducibles por el carbono según reacciones análogas a la de la reducción del óxido ferroso:



Pero los óxidos P_2O_5, MnO y SiO_2 son compuestos mucho más difíciles de reducir que el óxido ferroso y las temperaturas mediante las cuales sus reducciones son posibles, son más elevadas que la de reducción del FeO .

Para una región del alto horno en que la presión del óxido de carbono sea $P_{CO} = 0,5$ atmósferas, las temperaturas de reducción serán aproximadamente.

1050°C para el anhídrido fosfórico

1580°C para el óxido de manganes

1800°C para la sílice

Esto explica, porqué todo el fósforo se vuelve a hallar en la fundición, mientras que del manganeso pasa el 50% al arrabio y a la escoria; con esto solamente se disminuye la mitad de MnO , y que 5% de la sílice, reducida al estado de silicio, se incorpore al metal, y el resto forme la escoria.

Formación de la cementita.- El arrabio contiene carburo de hierro (Fe_3C) o cementita, la cual se forma en el cuerpo del horno debido a la acción del óxido de carbono sobre los óxidos de hierro o sobre el hierro.

1.7.2. La corriente gaseosa en el alto horno

A la salida de las toberas, todo el oxígeno del aire quema al coque:



Al estar expuesto a un exceso de carbono, el gas carbónico se transforma íntegramente en óxido de carbono:



Este óxido de carbono reduce los óxidos del hierro, dando gas carbónico naciente que, en contacto con los lechos superiores de coque, se reduce de nuevo a óxido de carbono.

Inferior a 700°C se producen las reacciones de cementación y de disociación del óxido de carbono:



La proporción de gas carbónico aumenta tanto más, cuando hacia la parte superior de la cuba, los carbonatos del fundente se disocian:



Finalmente, la mezcla gaseosa tiene en el tragante la composición siguiente:

CO_2 : 1

CO : 2

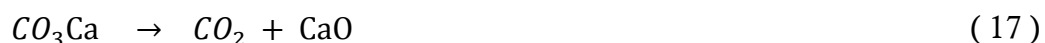
N_2 : 5

Agua, hidrógeno, carburos: 0,3

1.7.3. Las escorias

Las escorias son los productos de las reacciones de la cuba al etalaje, se producen en el alto horno entre el fundente y la ganga del mineral.

Desde 900°C, el carbonato de calcio se disocia y forma cal viva:



Asimismo, el carbonato de magnesio da óxido magnésico:



Las reacciones entre la cal y el óxido magnésico (elementos básicos) y la sílice (elemento ácido) empiezan hacia 1400°C, y la fusión total de los productos de la reacción solamente se realiza en las proximidades de las toberas.

1.7.4. Composición de las escorias

Las escorias se pueden considerar como silicatos complejos de aluminio y de calcio conteniendo además en pequeña proporción, óxido de magnesio y óxido de manganeso, además de óxidos de hierro y de sulfuros. Prácticamente se distinguen:

- a) Las escorias ácidas, con más del 35% de sílice. Son relativamente pobres en elementos básicos; su aspecto es vítreo.
- b) Las escorias básicas, con menos del 35% de sílice, espesas y viscosas, de aspecto pétreo después de su solidificación.
- c) Son relativamente ricas en elementos básicos (CaO, MgO, MnO).

Para tener en cuenta la presencia de los óxidos de magnesio y de manganeso, es necesario recordar que en la formación de los silicatos (SiO_3Mn), desempeñan un papel análogo al de la cal. En particular, 40 gramos de óxido magnésico ó 71 gramos de óxido de manganeso pueden reemplazar 56 gramos de cal.

1.7.5. Propiedades de las escorias

- a) Para que la presencia de esta masa importante de materias no aumente más el precio de coste del arrabio y no complique el funcionamiento del alto horno, es necesario que las escorias sean relativamente fusibles (lo que limita el consumo coque).
- b) Suficientemente fluidez para que su evacuación sea fácil.

Fusibilidad. El punto de fusión inicial de un arrabio es 1150°C aproximadamente, y a 1300°C todos los arrabios corrientes son líquidos y pueden ser colados.

Los elementos constitutivos de las escorias son mucho menos fusibles: sílice, 1700°C; alúmina, 2000°C; cal, 2750°C. Es un caso excepcional el que la fusión completa de una escoria pueda ser alcanzada a cerca de 1400°C y, prácticamente,

es la fusibilidad de la escoria la que determina la temperatura de colada y, por consiguiente, el gasto de coque.

Si la obtención de una escoria fusible es una de las condiciones de la marcha económica del alto horno, también pueden intervenir otras consideraciones; por ejemplo, para obtener un arrabio rico en silicio, es necesario producir escorias más refractarias, lo que naturalmente obliga a un gasto suplementario de combustible.

Viscosidad. La velocidad de evacuación de una escoria depende de su viscosidad, que, a su vez, viene determinada por su composición química. En general, las escorias básicas son más viscosas que las escorias ácidas y se evacúan menos. Se puede aumentar la fluidez de una escoria básica reemplazando una parte de su cal por magnesia; esta operación disminuye así el punto de fusión inicial de la escoria.

1.7.6. Acción purificadora de las escorias (desulfuración)

La acción de la escoria es doble:

- a) Asegurar la separación por su pequeña densidad del arrabio líquido y de la mina escorificada.
- b) Permitir la eliminación de ciertas impurezas perjudiciales a la calidad del arrabio y en primer lugar del azufre que proviene del coque introducido en el alto horno.

1.7.7. Acción de la cal

El azufre se combina con el hierro para formar sulfuro ferroso en el arrabio:



Al contacto con la cal, el hierro se oxida:



El sulfuro de calcio pasa a la escoria, pero la reacción termina cuando el contenido en óxido de hierro alcanza un valor límite, lo que sucede con bastante rapidez. Pero, si una reacción de reducción como:



Disminuye el contenido en óxido ferroso, la reacción de oxidación se vuelve a producir y, en conjunto, la reacción



Puede ser considerada como total, a condición de que se opere presencia de un exceso de cal. Esta adición de cal tiene por objeto aumentar el peso de escoria y disminuir su fusibilidad; por estas dos razones la desulfuración en el alto horno provoca un aumento notable de consumo de coque.

1.7.8. Acción del manganeso

La presencia de manganeso en las cargas mejora la desulfuración. El manganeso sustituye al hierro.



El sulfuro de manganeso pasa en la proporción de $\frac{29}{30}$ a la escoria, pero la operación es onerosa por el elevado precio de los minerales de manganeso.

Observaciones

- a) El carbón de madera no contiene azufre, El problema de la desulfuración no se presenta en los altos hornos que utilizan este combustible.
- b) Algunas veces el precio de coste de la desulfuración en el alto horno puede resultar alto; entonces el azufre se elimina en el momento de la colada (desulfuración al carbonato de sodio).

1.8. Cálculos concernientes al alto horno

1.8.1. Cálculo del lecho de fusión. Elementos del problema

Hacer el cálculo de un lecho de fusión, es buscar las masas de los diferentes minerales (A, B, C, etc.), del fundente F y del coque K necesarios para obtener una tonelada de arrabio de composición dada.

El problema viene precisado por otras consideraciones; particularmente se tienen en cuenta las proporciones de sílice y de óxidos básicos que figuran en las escorias, así como la repartición de ciertos elementos (manganeso, etc.), entre el arrabio y la escoria. Y finalmente, la necesidad de reducir al mínimo el precio de venta del arrabio lleva a limitar el empleo de los minerales ricos y costosos.

El cálculo del lecho de fusión no es una operación frecuente. Si en el transcurso de la marcha del alto horno se debe introducir pequeñas modificaciones en la composición de las cargas, se hace generalmente de forma empírica; así, se aumenta un poco la proporción de mineral silíceo cuando la escoria resulta demasiado básica. Así mismo, al poner en funcionamiento un nuevo horno, el lecho de fusión se calcula con una composición análoga al de otro aparato funcionando en condiciones parecidas. No obstante, el cálculo es útil cuando se cambia de procedimiento y a la vez se utilizan nuevos minerales y fundentes, además, su interés instructivo es evidente, ya que permite conocer el conjunto de los fenómenos que concurren en la formación del arrabio y comprender sus relaciones.

1.8.2. Cálculo del lecho de fusión, ejemplo simplificado

Ejercicio 1. Se desea obtener un arrabio de composición de hierro Fe: 95%; de carbono C: 2,8%, silicio Si: 1,4% y de manganeso Mn: 0,6%, para lo cual se dispone de los materiales A, F y K sus composiciones químicas se describen en la tabla 1.

Tabla 1.*Cálculo del lecho de fusión*

Cargas	MINERAL A	MINERAL F	CALIZA K	COQUE
SiO ₂	30%	10,0%	1,5%	40,0 Kg por cada 1000 Kg de coque
Al ₂ O ₃	0,5%	11,02%	0,5%	49,0 Kg por cada 1000 Kg de coque
CaO	—	0,5%	60%	6,0 Kg por cada 1000 Kg de coque
MgO	—	0,1%	1,05%	2,0 Kg por cada 1000 Kg de coque
Fe	70,5%	38,8%	—	20,0 Kg por cada 1000 Kg de coque
P	0,08%	0,03%	—	0,20 Kg por cada 1000 Kg de coque
S	—	—	—	19,03 Kg por cada 1000 Kg de coque

Fuente: Chaussin (1967)

La producción de 1,5 toneladas de arrabio exige 1 tonelada de coque, se calcula por cada 1000 Kg de coque.

El consumo específico de coque de 1,5 t la cantidad de arrabio por 1000 Kg de coque es:

$$1000 \text{ Kg} \frac{1t}{1,5t} = 666,67 \text{ Kg de arrabio} \quad (24)$$

La cantidad de Fe en esta cantidad de arrabio dará igual a:

$$666,67 \text{ Kg} \times \frac{95\% \text{ Fe}}{100\%} = 633,33 \text{ Kg Fe} \quad (25)$$

De acuerdo a la tabla tenemos que 20,0 Kg de Fe por 1000 Kg de coque este valor debe ser restado al anterior:

$$633,33\text{Kg} - 20 \text{ Kg} = 613,33 \text{ Kg Fe} \quad (26)$$

Contenido del carbono en el arrabio debe ser 3%.

$$666,67 \text{ Kg} \times \frac{2,8\% \text{ C}}{100\%} = 18,67 \text{ Kg C} \quad (27)$$

Contenido de silicio en el arrabio debe ser el 1,4 %

$$666,67 \text{ Kg} \times \frac{1,4\% \text{ Si}}{100\%} = 9,33 \text{ Kg Si} \quad (28)$$

Contenido del Mn en el arrabio debe ser el 0,6 %

$$666,67 \text{ Kg} \times \frac{0,6\% \text{ Si}}{100\%} = 4,0 \text{ Kg Mn} \quad (29)$$

Lo siguiente será calcular la cantidad de **SiO₂** que debe ser reducido a:

Datos:

Peso atómico (**Patm**) del **Si** = 28

Peso atómico (**Patm**) del **O** = 16

Peso molecular (**Pmol**) de **SiO₂** = 60

$$9,33 \text{ Kg} \times \frac{60}{28} = 19,99 \text{ Kg SiO}_2 \quad (30)$$

Lo siguiente será calcular la cantidad de **MnO** que debe ser reducido a:

Datos:

Peso atómico (**Patm**) del **Mn** = 55

Peso molecular (**Pmol**) de **MnO** = 71

$$4,0 \text{ Kg} \times \frac{71}{55} = 5,16 \text{ Kg MnO} \quad (31)$$

Se dispone que para introducir el azufre S del coque a la escoria del 19,03 Kg pasan aproximadamente el 85%, ósea 16,18 Kg por cada 1000 Kg entonces se tiene:

Datos:

Peso atómico (**Patm**) del **S** = 32

Peso atómico (**Patm**) del **Ca** = 40

Peso molecular (**Pmol**) de **CaO** = 56

Peso molecular (**Pmol**) de **CaS** = 72

$$16,18 \text{ Kg} \times \frac{Pmol \text{ SiO}_2}{Patm \text{ S}} = 16,18 \times \frac{60}{32} = 30,34 \text{ Kg Ca} \quad (32)$$

Entonces:

$$30,34 \text{ Kg} \times \frac{Pmol \text{ CaO}}{Patm \text{ Ca}} = 30,34 \times \frac{56}{40} = 42,48 \text{ Kg} \quad (33)$$

CaO

Entonces se formaría en la escoria la cantidad de CaS:

$$30,34 \text{ Kg} \times \frac{Pmol \text{ CaS}}{Patm \text{ Ca}} = 30,34 \times \frac{72}{40} = 54,61 \text{ Kg CaS en la escoria} \quad (34)$$

Siguiendo con el análisis dado que se tiene los tres minerales A, F, K; el cálculo para 1 tonelada de coque (1000 Kg) en este caso relacionamos **SiO₂**: **Al₂O₃** según este análisis se tiene dos ecuaciones, y una tercera ecuación es para establecer el Fe que debe encontrarse para la carga de mineral, las ecuaciones tendrían las siguientes incógnitas.

x.....cantidad en % y Kg.
y.....cantidad en % y Kg.
z.....cantidad en % y Kg.

Solución primera ecuación en la carga se encuentra dos materias primas (A y F) y la caliza (K) y el cálculo de sus cantidades es para 1000 Kg de coque en carga, entonces aplicando la relación 1:2 se tiene:

Datos

n=2

SiO₂ (mineral) = n **Al₂O₃** (minerales)

$\text{SiO}_2 = 2 \text{ Al}_2\text{O}_3 = > \left(\frac{30\%x + 10\%y + 1,5\%z}{100\%} \right) + \text{Kg de coque del SiO}_2 - \text{SiO}_2$ silicio requerido para el arrabio = $2 \left(\frac{0,5\%x + 11,02\%y + 0,5\%z}{100\%} \right) + \text{Kg de coque del Al}_2\text{O}_3$. los valores se encuentran en la Tabla 1

$$0,3x + 0,1y + 0,015z + 40 \text{ Kg} - 19,99 \text{ Kg} = 0,01x + 0,22y + 0,01z + 49 \text{ Kg}$$

$$0,29x - 0,12y + 0,005z = 28,99 \text{ Kg} \quad (35)$$

Solución para segunda ecuación de acuerdo a la relación:

Datos:



$$0,3x + 0,1y + 0,015z + 0,005x + 0,1102y + 0,005z + 40 + 49 - 19,99 = 0,005y + 0,6z + 0,001y + 0,105z + 6 + 2 - 42,48$$

$$0.305x + 0,204y - 0,595z = -103,49\text{Kg} \quad (37)$$

Solución para la tercera ecuación la cantidad de Fe en una carga es la misma de la cantidad contenida de Fe en cada uno de los materiales:

De acuerdo a la ecuación (25) y los valores de la Tabla 1. para el Fe será:

$$613,33 = 0,705x + 0,388y \quad (38)$$

Se tendría un sistema de tres ecuaciones:

1. $0,2x - 0,12y + 0,005z = 29,99 \text{ Kg}$
2. $0.305x + 0,204y - 0,595z = -103,49\text{Kg}$
3. $0,705x + 0,388y = 613,33 \text{ Kg}.$

Resolviendo las ecuaciones se tendría:

$X = 517.33$cantidad de mineral A para 1000 Kg de coque.
 $Y = 640.747$cantidad de mineral F para 1000 Kg de coque.
 $Z = 658.525$cantidad de K Caliza para 1000 Kg de coque.

La carga está compuesta de la siguiente manera:

517,33 Kg del mineral A

640,747 Kg del mineral F

658,525 Kg de caliza

1000 Kg de coque.

En la Tabla 2 se muestra los valores y porcentajes de las materias primas, para lo cual se emplea una regla de tres simple.

Ejemplo:

Si en el material A se tiene 10,64% de **SiO₂** cuanto será en peso (Kg).

$$30,0\% \times \frac{517,33\text{kg}}{100\%} = 155,199 \text{ Kg} \quad (39)$$

Tabla 2.

Compuestos de la materia prima

Cargas	%	SiO ₂ kg	%	Al ₂ O ₃ kg	%	CaO kg	%	MgO kg
MINERAL A	30	155,199	0,5	2,59	0	0	0	0
MINERAL F	10	64,07	11,02	70,61	0,5	3,20	0,1	0,64
CALIZA K	1,5	9,88	0,5	3,29	60	395,115	1,05	6,91
COQUE	4	40	4,9	49	0,6	6	0,2	2
TOTAL	35,5	269,147	16,92	125,49	70,1	404,315	1,35	9,55

La cantidad total de **SiO₂** en la carga se consume en la reducción 9,33 kg de **Si** necesarios para el arrabio (19,99 kg **SiO₂**). Para eliminar 16,18 kg de **S** se consumieron 42,48 kg de **CaO** formándose durante la combinación 54,61 kg de **CaS** el cual pasa a la escoria los siguientes valores ver tabla 3.

Tabla 3.*Valores de minerales que pasan a la escoria*

Cargas	Valores calculados	Porcentaje %
SiO₂	269,147 – 19,99 = 249,157kg	35,22
Al₂O₃	125,49 kg – 92,6 = 32,89	3,83
CaO	404,315 - 42,48 = 361,835 kg	51,15
MgO	9,55kg	1,35
MnO	5,16 kg	0,73
FeO	0	0
CaS	54,61kg	7.72
TOTAL	718,352 kg	100

Las siguientes tablas indican la carga Kg que encuentran en el arrabio.

Tabla 4.*Carga de Fe que contiene el arrabio*

Cargas	Cantidad Kg
MINERAL A	517,33 x 0,705 = 364,72
MINERAL F	640.747 x 0,388 = 248,61
CALIZA K	0
COQUE	20
TOTAL Fe.	633,33

Tabla 5.*Carga de P que contiene el arrabio*

Cargas	Cantidad Kg
MINERAL A	517,33 x 0,0008 = 0,41
MINERAL F	640,747 x 0,0003 = 0,19
CALIZA K	0
COQUE	0,2
TOTALP	0,8

Tabla 6.
Carga de S que contiene el arrabio

Cargas	Cantidad Kg
COQUE	19,03
TOTAL S.	19,03

El silicio (Si) de arrabio fue de 9,33 Kg reducidos de 19,99 kg **SiO₂**.

También hay que tomar en cuenta que el azufre del coque, que es de 19,03 kg como ya se había ocupado 16.18 Kg (85) % en forma **CaS** su peso es 54,61kg, hay que tener en cuenta que parte de azufre, es capa aplomadamente una carga de 2,33 kg entonces:

$$19,03 - 2,33 - 16,18 = 0,52\text{kg} \quad (40)$$

Tabla 7.
Composición del arrabio por cada 100kg de coque

Cargas	Valores calculados Kg	Porcentaje %
Fe	633.33	95
Mn	Por reducción de 5,16 kg MnO = 4	0,6
P	0,8 kg	0,12
Si	Por reducción de 19,99 kg SiO₂ = 9,33	1,4
S	0,52	0,078
C	18,67	2,8
TOTAL	666,66	100

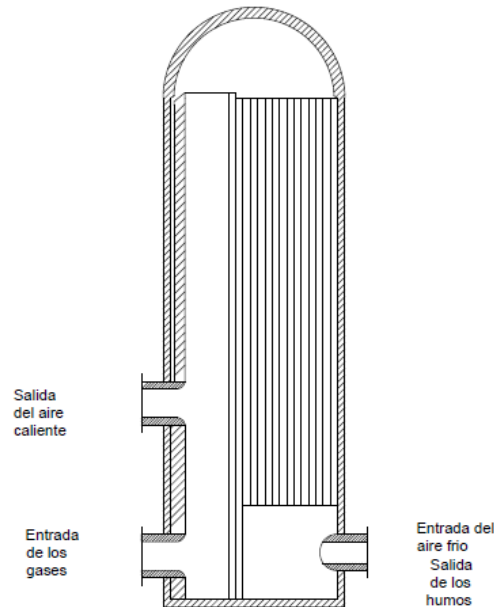
1.9. Compresión de viento

Mediante máquinas de pistón. El aire atmosférico se aspira por medio de las válvulas dentro de los cilindros de viento, desde donde se comprime bajo presión en un conducto de grueso diámetro en el trayecto del cual se halla un gran recipiente de aire. Este dispositivo permite asegurar un suministro regular a pesar del movimiento alternativo del pistón.

Algunas veces la fuerza motriz es suprimida por máquinas de vapor, pero lo más corriente es que la proporcionen motores alimentados por el gas del alto horno, los cuales mueven los pistones de los sopladores.

Figura 4.

Esquema de un Cowper



Fuente: Chaussin (1967)

Mediante Turbocompresores. - Son unos ventiladores centrífugos con muchas ruedas en serie con el fin de obtener las presiones necesarias sin sobrepasar la velocidad de 3000 rpm se impulsan por turbinas a baja presión alimentación por el vapor de escape de una máquina de pistón.

1.10. Distribución de viento

El viento se transporta al alto horno mediante un conducto aéreo de 110cm de diámetro, con una capa refractaria interior de 30cm de espesor, quedando para el viento un conducto de 50 cm de diámetro. Este conducto alimenta al “cinturón de viento”, canalización de sección decreciente situada en un plano horizontal a la altura del etalaje.

El dispositivo que conduce el viento al interior del alto horno, conocido con el nombre de tobera consta de tres partes:

- a. El conductor del viento, tubo oblicuo de 30 cm de diámetro, de fundición guarnecido de refractario.
- b. La tobera, tubo de palastro ligeramente cónico dispuesto horizontalmente. Una mirilla dispuesta en el eje de la tobera permite observar las operaciones dentro del horno.
- c. La tobera propiamente dicha, órgano protector que encierra el extremo del tubo que desemboca en el alto horno. Es un cono de cobre de doble pared por donde circula un corriente de agua. La tobera está rodeada de un cajón de bronce con circulación agua.

Las toberas cuyo número varia de seis en seis desemboca a nivel del suelo; algunas toberas de socorro más pequeñas están dispuestas hacia la mitad del etalaje.

Figura 5.

Parte superior de un alto horno



Fuente: Oviedo (2014).

1.10.1. Tratamientos y utilización de los gases del tragante

Poder calorífico. En la parte superior de la cuba, los gases contienen aproximadamente 25% de óxido de carbono, cuya combustión:



Da un poder calorífico de:

$$\frac{68 * 250}{22,4} = 760 kcal/m^3$$

Pero con la presencia de un poco de hidrógeno, este poder calorífico puede elevarse a $950kcal/m^3$.

Estos gases también contienen agua (5 % de humedad) y polvos (hasta) $60 g/m^3$) y su utilización no es posible sino después de una depuración muy cuidadosa.

Captación y depuración. Los gases salen del tragante por dos conductos muy inclinados que pronto se reúnen para formar el descenso de gas, canalización de 1,60 m de diámetros desembocando en la botella de polvo, cilindro de 15 m de altura donde, por efecto de la disminución de su velocidad, los gases abandonan una gran parte de los polvos, cuyo contenido desciende a $4 g/m^3$.

Los gases destinados a la alimentación de los motores no deben contener más de 0,02 g de polvos por metro cúbico; estos se pueden eliminar casi por completo mediante los procedimientos siguientes:

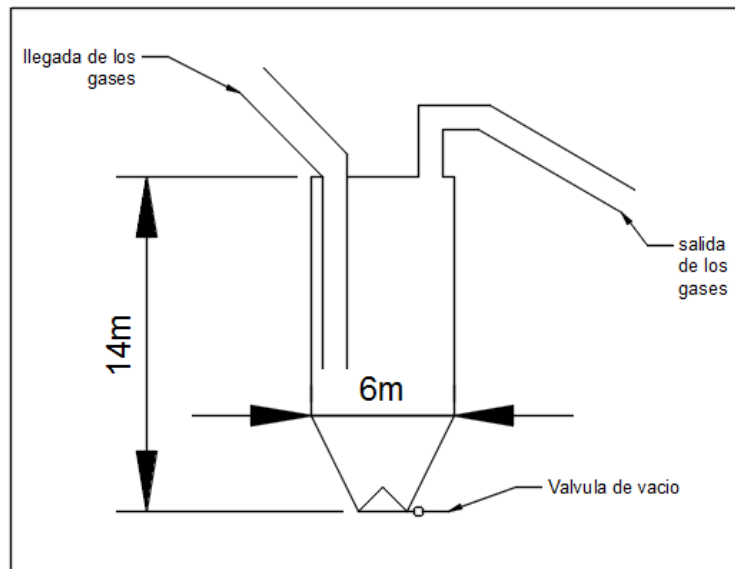
Depuración por vía húmeda. - los gases atraviesan, de arriba abajo, una columna del extremo superior de la cual cae agua en forma de fina lluvia. El contenido en polvo se reduce así a $1 g / m^3$. La depuración se acaba en un desintegrador, donde el agua y los gases se mezclan en un cilindro que gira a 500 r. p. m.

Las partículas sólidas son capturadas por las gotas finísimas de agua y proyectadas por la fuerza centrífuga contra las paredes exteriores del aparato, donde son detenidas, el gas con solo 0,02 g de polvo por metro cúbico se deseca por enfriamiento.

Depuración por vía seca. - los gases mantenidos a la temperatura de 70° C, atraviesan una serie de filtros constituidos por sacos de tejido de algodón muy apretado en los cuales son retenidos los polvos.

Figura 6.

Cámaras de polvos

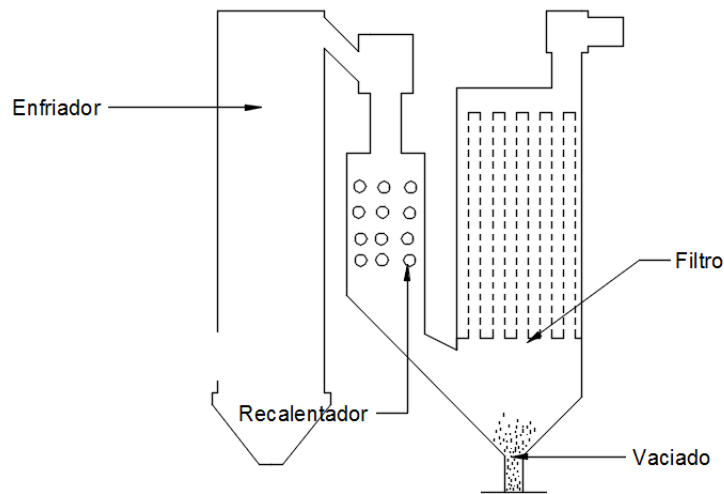


Fuente: Chaussin (1967)

Depuración electrónica (procedimiento Cottrell). Los gases se envían a grandes cajas que contienen placas dispuestas paralelamente. Las placas impares se elevan al potencial de 100.000 V y las placas pares (aisladas) comunican con el suelo (potencial cero) los polvos se fijan sobre las placas cargadas de electricidad. A intervalos regulares, se para la corriente gaseosa y se sacude el sistema de placas vos.

Figura 7.

Depuración por vía seca



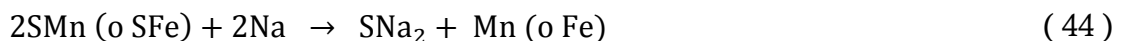
Fuente: Chaussin (1967)

1.10.2. Desulfuración de la colada

La desulfuración de la colada en el alto horno no puede efectuarse si no es en presencia de escorias muy básicas. Puede resultar imposible si las circunstancias obligan al empleo de minerales muy silíceos:

Entonces se realiza la desulfuración por el carbonato de calcio, en el momento de colar,

Reacciones químicas. A 1400⁰C, el carbonato de sodio se descompone en gas carbónico y óxido de sodio. El hierro reduce este óxido liberando el sodio, que sustituye al hierro y al manganeso en los sulfuros existentes. Estas reacciones se representan por las ecuaciones:



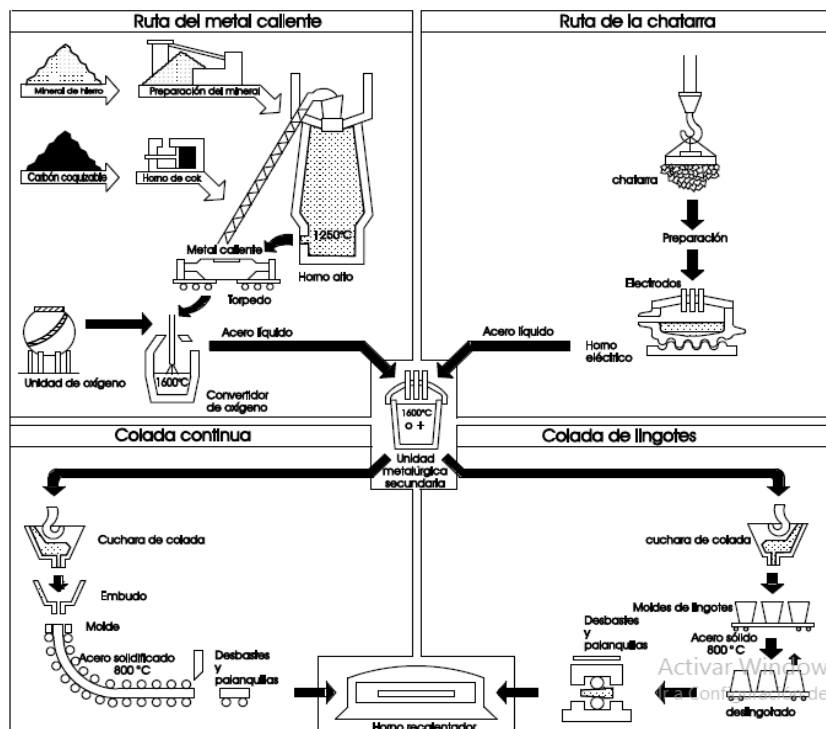
1.10.3. Obtención del acero

El acero ha evolucionado aplicando tecnologías (para menos consumo de material, electricidad y cuidado del medio ambiente) cada vez más avanzadas, ya que su demanda a nivel mundial va creciendo.

Una vez obtenido el arrabio se realiza el proceso de convertir el arrabio o también llamado proceso de afino; en cuya operación se rebaja la proporción de carbono de 3,5% a menos de 1%. Esta concentración consiste esencialmente en un conjunto de oxidaciones parciales producidas por:

- Acción de una corriente de aire que atraviesa la masa de arrabio líquido (afino por oxígeno). Véase la figura 6 por ruta de metal caliente.
- Acción de un óxido de hierro (mineral o chatarra) en un horno de solera (afino por solera), o en el horno eléctrico (afino eléctrico). Véase la figura 6 por ruta de chatarra.

Figura 8.
Obtención del acero



Fuente: Chaussin (1967)

- **Afino del arrabio por oxígeno**

Para el afinado del arrabio el método más utilizado es el LD el cual se realiza mediante un convertidor de oxígeno básico de alto horno BOF (basic oxygen converter).

Este método LD utiliza un chorro de oxígeno puro el cual es proporcionado por inyección a una velocidad máxima utilizando una herramienta tipo lanza vertical que se ubica en el centro del convertidor para oxigenar el arrabio, la construcción de este recipiente (convertidor) es recubierto con una capa refractaria de dolomita o magnesita que ayuda contra la erosión y el calor causado por los minerales y el oxígeno.

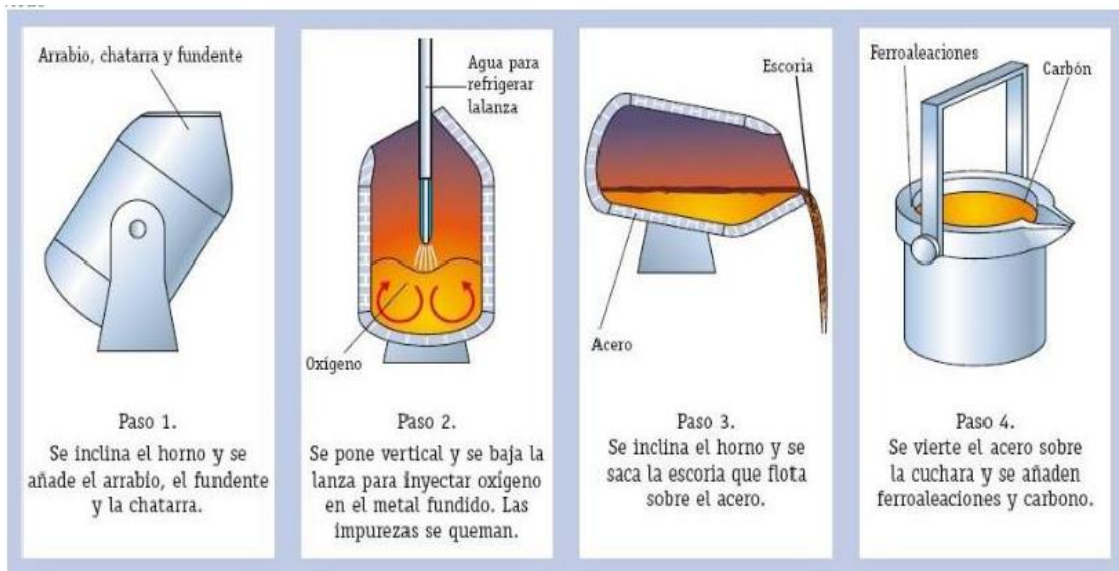
Entonces, al introducir el oxígeno en arrabio crea la reacción química:

Oxígeno + carbono del arrabio = monóxido de carbono CO + dióxido de carbono CO₂ los cuales se evaporan por los gases creados, los elementos Mn, Si, P se oxidan se mezclan con la cal (CaO) y el FeO formado por la oxidación del Fe, estos se unen a la escoria, y de esta manera permiten la obtención del acero deseado.

Este proceso tiene una duración de 15 a 20 minutos, se aumenta el tiempo de 45 a 60 minutos dependiendo el proceso como carga y descarga del acero y escoria, toma de muestras. Ver Figura 9.

Figura 9.

Obtención del acero por oxígeno



Fuente: (Pablo García)

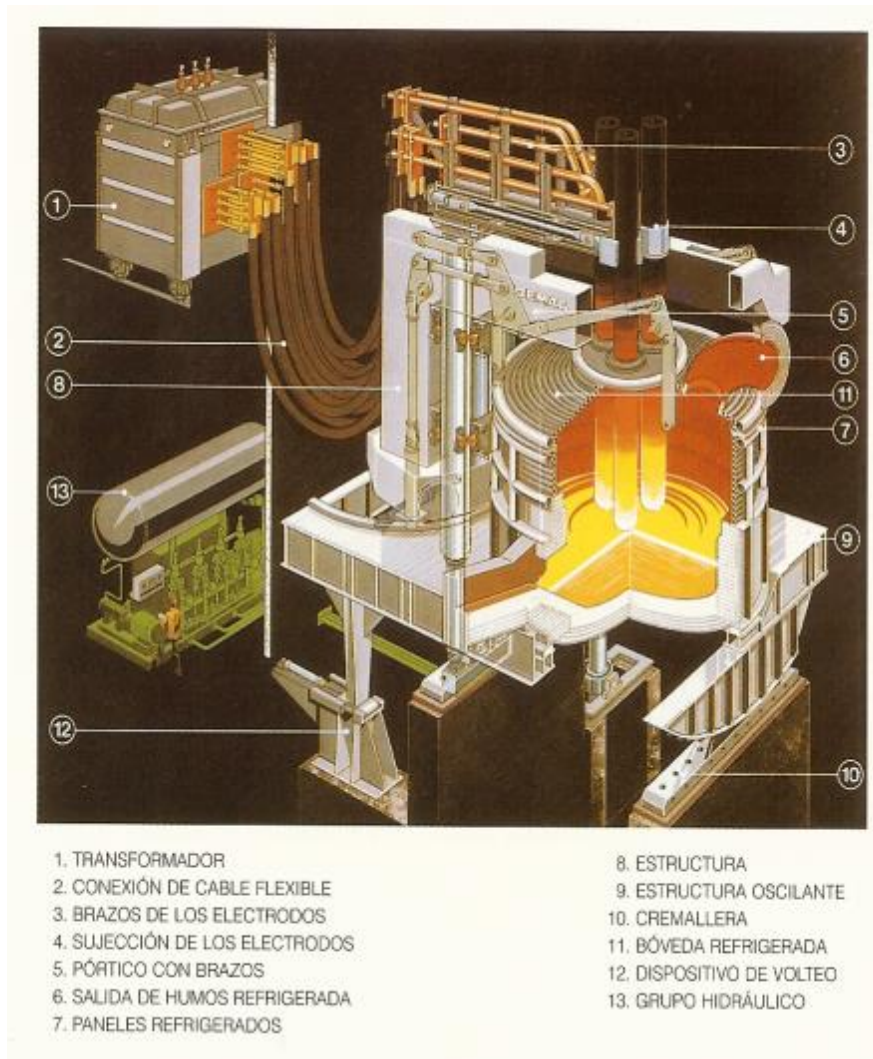
- **Obtención del acero por método del horno eléctrico**

En este proceso se utiliza como materia prima chatarra o pellets se consigue la fundición del acero por la energía de arcos eléctricos, donde actúa los electrodos y fosa del horno, este arco eléctrico se produce de acuerdo al voltaje seleccionados para producir la energía deseada, el horno trabaja con corriente alterna trifásica (300 – 700 Voltios), cuando trabaja el horno eléctrico produce un ruido de 120dBA, el horno viene con un recubrimiento especial para contrarrestar estos ruidos.

Estos hornos están diseñados con un diámetro de 6 a 9 metros de interior, para una capacidad de carga 100 a 200 toneladas de acero, el tiempo de proceso es 100 minutos.

El horno eléctrico produce aceros al carbono y acero para herramientas, su producción es aproximadamente un 30%, depende de la chatarra como materia prima barata, que al contrario de otros minerales como pellets y hierro de esponja que son más costosos

Figura 10.
Horno eléctrico



Fuente: *La fabricación del acero*. Unesid. Recuperada desde
(www.unesid.org/main.asp?id_pagina=31)

1.11. Las fundiciones

Las fundiciones son aleaciones hierro-carbono en las cuales la riqueza en el segundo, teóricamente comprendida entre 1,76 y 6,7 % para la mayoría de las fundiciones industriales. Sus constituyentes y sus propiedades dependen evidentemente de esta riqueza en carbono, pero la forma en la cual se hallan este elemento tiene un papel preponderante.

Dos fundiciones con la misma cantidad de carbono total (3%, por ejemplo), poseen propiedades muy diferentes según que tenga grafito (carbono libre) o cementita (carburo de hierro, $[\text{Fe}]_3\text{C}$)

Prácticamente, por el calor que presentan a la fractura, se distinguen:

- Las fundiciones grises.
- Las fundiciones blancas (de cementita).

Para una misma composición, un enfriamiento lento produce una fundición gris, mientras que un enfriamiento rápido produce una fundición blanca: así, pues, un cubilote produce normalmente fundición gris, mientras que las gotas que se proyectan en el transcurso de la colada y que se solidifican instantáneamente son de fundición blanca.

Figura 11.

Fundición gris sin tanque a 100x



1.11.1 Fundiciones grises

Composición. Estas fundiciones se caracterizan por la pequeña proporción de carbono combinado respecto al carbono libre (de 1/10 a 1/8). Esto se debe de 2 a 5% de silicio, que impide la combinación del carbono y del hierro. Por encima del 5% de silicio, se pasa de las fundiciones grises a los ferrosilícios.

El fósforo disminuye la temperatura inicial de fusión, da al metal fluidez en caliente y fragilidad en frío. Las fundiciones pobres en fósforo (0,04%) se llaman hematites; las fundiciones semifosforosas o Cleveland son las que contienen el 0.8%; y por encima del 1%, la fundición se llama fosforosa.

El manganeso favorece la combinación del hierro y del carbono; parece, pues, indeseable en las fundiciones grises: no obstante, como que se opone a los efectos nefastos de la presencia del azufre, se mantiene casi siempre su contenido entre el 0,5 y el 1,5%. El azufre disminuye la fluidez y provoca sopladuras; es necesario eliminarlo al máximo (0,01 a 0,02%).

Propiedades. Las fundiciones grises tienen una densidad del orden de 7,1 g/cm³. Empiezan a fundir hacia los 1150°C. Se puede trabajar con lima y con máquinas-herramientas (torno, taladrado, limadora, etc.).

Sus características mecánicas medias son:

A % < 0,7; resiliencia: $K = 30 \text{ da J/cm}^2$; carga de rotura por tracción, 12 daN/mm²; por flexión, 30 daN/mm²; por compresión, 70 daN/mm².

Estos números pueden variar dentro de unos límites bastante grandes; en particular, las propiedades mecánicas son máximas cuando la riqueza en silicio es aproximadamente del 2%.

Además, la ductilidad de las fundiciones grises es tanto más grande cuantas más pequeñas son las dimensiones de las partículas.

Aplicaciones. Las fundiciones grises son esencialmente fundiciones de moldeo. Las fundiciones grises ricas en silicio se utilizan para desoxidar los baños de acero o para mantener a un nivel conveniente el contenido en silicio de las fundiciones que sufren la segunda fusión en el cubilote.

En el siguiente cuadro indica algunos ejemplos de composición de fundición grises:

Tabla 8.*Ejemplo de composición de fundición gris*

Fundiciones	Carbono %	Grafito %	Carbono combinado %	Silicio %	Manganeso %	Fosforo %	Azufre %
Hematita	3,48	3,40	0,08	4,20	1,20	0,044	0,021
Cleveland	3,70	3,30	0,40	1,90	0,40	0,71	0,02
Fosforosa	3,20	3,20	0,00	3,50	0,60	1,07	0,05

Fuente: Chaussin (1967)

1.11.2. Fundiciones blancas

Composición. Las fundiciones blancas se caracterizan por la ausencia de grafito, debido a la presencia de manganeso (2 a 5%). Todo el carbono está o combinado (Fe_3C , cementita) o disuelto (ferrita).

El contenido en silicio varía del 0,5 al 1,5%.

Las fundiciones destinadas al afino por el procedimiento Thomas contiene 2,5% de fósforo; azufre, siempre perjudicial, casi no contiene.

Propiedades. Las fundiciones blancas empiezan a fundir hacia 1050°C. Son muy duras (HB = 400), muy frágiles y no se dejan trabajar ni con la lima ni con las maquinas-herramientas. Su densidad media es 7,6 g/cm³: su alargamiento A% es de orden de 0,5 y su carga de rotura es de 16 daN/mm² por tracción y 90 daN/mm² por compresión.

Aplicaciones. La imposibilidad de trabajar las fundiciones blancas limita su empleo en fundición a la obtención de piezas que no necesiten un mecanizado complicado después de salir del molde (cilindros de laminadores, pieza de molinos, etc.).

Las fundiciones blancas son, pues, esencialmente fundiciones de afino, destinadas a ser transformadas en acero. Desde este punto de vista las fundiciones blancas fosforosas afinadas por los procedimientos básicos (convertidor Thomas, horno Martin básico) son las más importantes.

Las fundiciones blancas ricas en manganeso, y particularmente los Spiegel (5 a 20 % de Mn) se utilizan frecuentemente como compuestos desoxidantes, al final de las operaciones del afino, para eliminar el óxido de hierro que aún podría hallarse en el baño.

El siguiente cuadro da la composición de algunas fundiciones blancas ordinarias.

Tabla 9.

Composición de fundiciones blancas ordinarias

Fundiciones	Carbono	Silicio	Manganeso	Fosforo	Azufre
Moldeo	3,54	1,35	1,30	0,30	0,08
Cleveland	3	0,70	1,40	1,40	0,12
Thomas	3,50	0,45	1,45	2,05	0,08

Fuente: Chaussin (1967)

1.11.3. Fundiciones aleadas

Son fundiciones en las cuales hay elementos que habitualmente no entran en la composición de las fundiciones de moldeo y que se adicionan voluntariamente con el fin de obtener propiedades especiales tales como:

- Resistencia mecánica elevada (en frío y en caliente).
- Resistencia a la acción corrosiva de los líquidos y gases.
- Resistencia a la oxidación, especialmente a temperaturas elevadas.
- Propiedades físicas determinadas (dilatabilidad, resistividad, etc.).

Composición. Estas fundiciones contienen aproximadamente 3 % de carbono. Los valores límites por encima de los cuales los elementos aleados se consideran como añadidos voluntariamente son:

- % para el aluminio, el molibdeno, el titanio y el vanadio.
- % para el cromo.
- % para el cobre y el níquel.
- 1.5 % para el manganeso.
- 5 % para el silicio.

El cromo, el manganeso y el vanadio son los estabilizadores del cementita, por lo que tienden a <<blanquear>> las fundiciones.

El aluminio, el molibdeno, el níquel, el titanio y el silicio son gratificantes; tienden a dar fundiciones grises.

Atendiendo a su utilización, las fundiciones se clasifican en cuatro categorías:

1.11.4. Fundiciones mecánicas especiales

Las fundiciones grises de gran dureza que se pueden trabajar (H= 250 A 270 Brinell). Éstas son las fundiciones al níquel y al molibdeno utilizadas para la fabricación de carcasas de trituradoras y molinos, de volantes, de engranajes que trabajan al choque, etc.

Sus propiedades de frotamiento se mejoran por la adición de cromo, y se utilizan las fundiciones Ni-Mo-Cr para hacer los cilindros de los compresores y los tambores de freno. Su dureza Brinell puede alcanzar el valor 400 por la acción de un temple seguido de un revenido a 500 °C y se emplea para punzones y matrices, camisas de cilindros, etc.

Las fundiciones blancas de gran dureza que no pueden ser trabajadas. - Contienen de 2 a 6 % de níquel y 0,5 a 2% de cromo; colada en arena, su dureza Brinell se de 800. Se emplean para piezas de molinos o de aparatos que transportan abrasivos (bomba de arena).

Las fundiciones templadas en coquilla. - Éstas son fundiciones grises con 4 % de níquel y 1,2 % de cromo. Que se endurecen en la superficie, al contacto de las coquillas, por transformación en fundición blanca (cilindros de laminadores, ruedas de llantas, templada, etc.).

1.11.5. Fundiciones refractarias

Se las utiliza para obtener piezas que puedan ser mantenidas en caliente sin experimentar ninguna alteración.

Hasta 500 °C se emplean buenas fundiciones perlíticas de 3-3,5 % de carbono; se aumenta aún su estabilidad en caliente por la adición de 0,6 % de cromo.

Para los órganos de motores de combustión que trabajan aproximadamente a 600 °C, se emplean fundiciones de 2% de manganeso y 2 % de silicio, o bien de 1.6% de níquel y 0,6 de cromo.

Finalmente, el Ni -Resiste fundición austenítica (14 % Ni, 6 % Cu, 2% Cr), soportan fácilmente temperaturas de 800 °C, resistiendo al mismo tiempo la acción corrosiva de los vapores.

1.11.6. Fundiciones resistentes a la corrosión

La buena resistencia natural de las fundiciones a los agentes corrosivos usuales puede mejorarse con ligeras adiciones de cromo (0,5 %) o de manganeso (1%).

La resistencia a los productos alcalinos se aumenta por la adición de níquel (1,5%) y un bajo contenido de silicio (1,2 %).

La gran industria química emplea fundiciones de 13 a 18 % de silicio para las cubas de ácidos (exceptuando el ácido clorhídrico), al igual que fundiciones ricas en cromo, e incluso la fundición Ni-Resist, ya citada.

1.11.7. Fundiciones de características físicas particulares

Las más empleadas son las fundiciones de alta resistividad (190 $\mu\Omega$ / cm en vez de 100), de 10% de níquel y 5 % de manganeso. Se emplean también fundiciones amagnéticas Ni-Cr y Ni-Mn.

1.12. Segunda fusión

La utilización inmediata del arrabio líquido a la salida del alto horno para la obtención de piezas moldeadas, presentan algunas dificultades, debidas, entre otras causas, a la importancia misma del peso del metal disponible a cada colada.

Este sistema es limitado, empleándose en algunas fabricaciones particulares (tubos, por ejemplo) trabajando en gran serie.

Generalmente, las piezas de fundición se obtienen después de una segunda fusión, lo que permite preparar, para cada fabricación, la composición más conveniente mezclando varios tipos de arrabio.

La segunda fusión se efectúa:

- a) En crisoles, para pequeñas cantidades de fundición.
- b) En el horno de reverbero, pudiéndose obtener entonces más de 10 toneladas de fundición en una sola operación; pero, durante la fusión, hay una gran oxidación de silicio, y el metal se blanquea notablemente.
- c) En el cubilote, en los restantes casos.

1.13. Fusión en el cubilote

Los cubilotes son unos hornos pequeños de cuba cilíndrica donde el metal está en contacto directo con el combustible. Se distinguen, de abajo arriba, el crisol, la obra, la cuba (cilíndrica) y el tragante, generalmente con una gran chimenea (Figura 12.) Son aparatos de marcha discontinua.

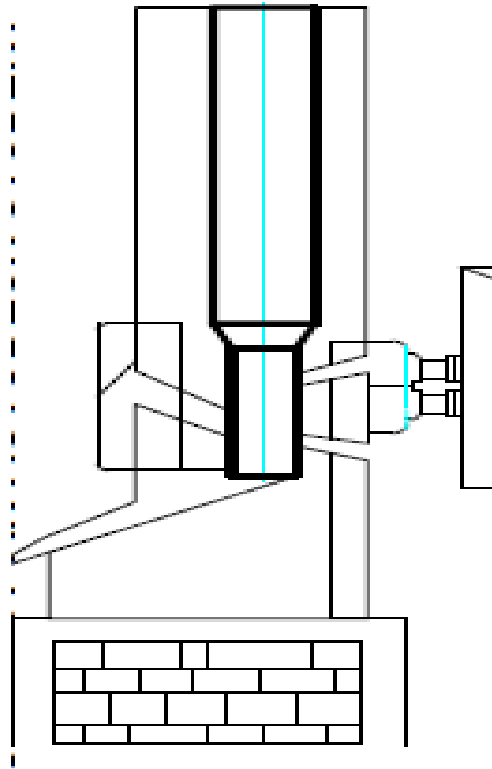
La carga (arrabio, coque, fundente para escorificar las cenizas del coque) se introduce por una abertura de la pared cerca de la cúspide y a una distancia de 2,50 a 4,50 metros de las toberas más bajas.

La sección de la zona de fusión se calcula para $0.70 \text{ m}^2/\text{t}$ de fundición por hora.

El aire se insufla mediante ventiladores bajo una sobrepresión de 50 centímetros de agua. El crisol está situado inmediatamente debajo de las toberas; corrientemente, tiene el fondo móvil, lo que facilita la limpieza al final de cada jornada. El agujero de colada de la fundición está situado en el punto más bajo del cristal, o sea aproximadamente a un metro por encima del suelo un canal de fundición revestido de arena conduce el metal líquido al recipiente de colada. Algunos cubilotes tienen un crisol previo.

Figura 12.

Esquema de un cubilote



Fuente: (CHAUSSIN, 1967)

1.14. Resumen

En el trabajo presentado demuestra que la evolución de la siderurgia ayuda al desarrollo de la humanidad.

La siderurgia (viene del griego sideros “hierro”) se define generalmente como el proceso técnico para el tratamiento del mineral de hierro (Fe) y sus aleaciones.

Clasificación de los productos siderúrgicos

Se clasifican por el contenido de carbono.

El hierro ($\%C < 0,05$).

El arrabio ($3 < \%C < 4$).

El acero ($0,05 < \%C < 1,7$).

La fundición ($1,7 < C\% < 6,7$)

Materias Primas

Minerales de Hierro

- **Óxidos de hierro**

Óxido Magnético (Fe_3O_4).- también denominado Magnetita

Óxidos Férricos Anhídridos (Fe_2O_3).- también denominada Hematita

Óxidos Férricos Hidratados.- Estos minerales tienen una composición aproximadamente de $2(Fe_2O_3), 3(H_2O)$, también denominada Limonita

- **Carbonatos de hierro**

Estos materiales están formados por carbonato ferroso CO_3Fe también denominada Siderita.

Existen otros minerales secundarios como la Pirita (S_2Fe), también se explota pero por su gran porcentaje de azufre (S) que es un enemigo del acero.

Chatarra. Desecho metálico u obsoleto que ha cumplido su funcionalidad.

- **Combustibles**

Son procesados para su mejor efectividad entre los cuales están:

- El Coque. - es un combustible sólido poroso, obtenido por pirogenación (destilación en vacío) de la hulla grasa de llama corta
- Carbón vegetal. - carbón de madera. El empleo de este combustible exento de azufre, da con los minerales magnéticos muy puros.

Fundentes

La caliza actúa como el principal fundente al descomponerse se reduce a óxido de calcio y dióxido de carbono.

El viento.

Se designa así al aire insuflado a presión dentro del alto horno (60 cm de columna de mercurio de sobrepresión). Observación: En los últimos tiempos se va extendiendo el empleo de aire oxigenado (30% de oxígeno).

Proceso de obtención del arrabio y del acero

- Obtención del arrabio por reducción y fusión del mineral;
- Obtención del acero por afino del arrabio.

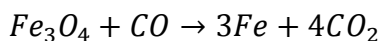
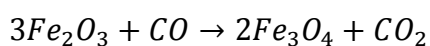
Altos hornos

Tienen alturas entre 40 y 70 m, donde se realiza el proceso de obtención del arrabio está conformado de las siguientes partes:

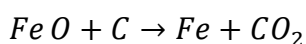
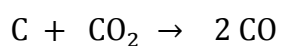
- El tragante
- La cuba
- El vientre
- El atalaje
- El crisol

Reacciones químicas en el alto horno

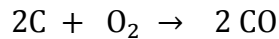
De 700° a 200°C



De 1200° a 700°C



De 1700° a 1200°C



Afino del arrabio por oxígeno

Para el afinado del arrabio el método más utilizado es el LD el cual se realiza mediante un convertidor de oxígeno básico de alto horno BOF (basic oxygen converter). Este proceso tiene una duración de 15 a 20 minutos.

Obtención del acero por método del horno eléctrico

Se utiliza como materia prima chatarra o pellets se consigue la fundición del acero por la energía de arcos eléctricos, donde actúan los electrodos y fosa del horno, Estos hornos están diseñados con un diámetro de 6 – 9 metros.

Las fundiciones

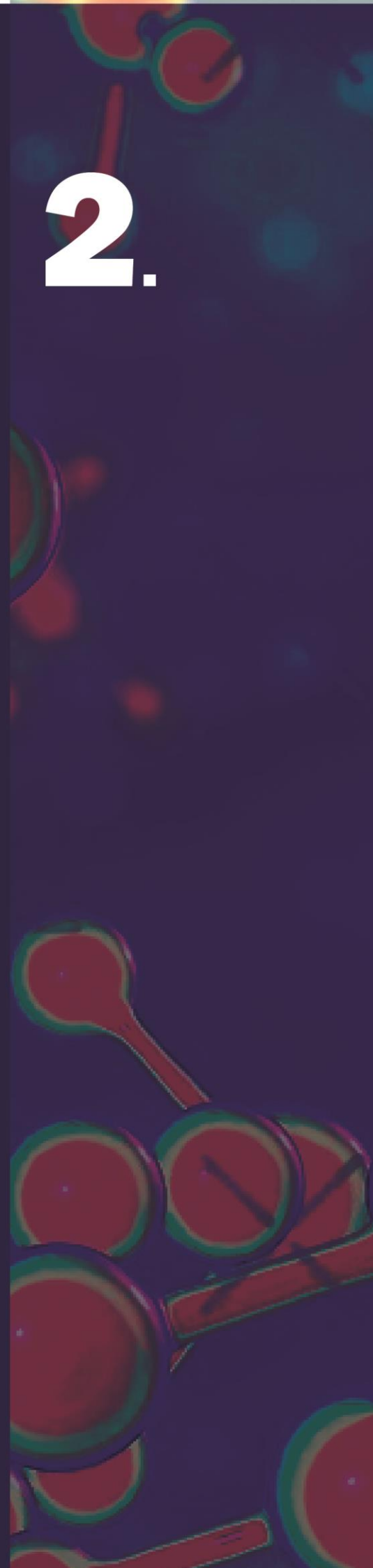
Las fundiciones son aleaciones hierro-carbono en las cuales la riqueza en el carbono, teóricamente comprendida entre 1,76 y 6,7 % para la mayoría de las fundiciones industriales.

Prácticamente, por el color que presentan a la fractura, se distinguen:

- Las fundiciones grises.
- Las fundiciones blancas (de cementita).

CAPÍTULO
DIAGRAMAS
DE FASES

2.



CAPÍTULO II

DIAGRAMAS DE FASES

2.1. Introducción

El campo de la Ingeniería de los Materiales, es la aplicación a los conocimientos adquiridos en la Ciencia de los Materiales para desarrollar nuevos materiales y utilizarlos en el campo industrial, esto no es posible si no se conoce a profundidad la relación que tienen las fases presentes en un metal con las propiedades mecánicas. En este capítulo se desarrolla la teoría y ejercicios de los diagramas de fase (Temperatura vs Composición) metálicos con las diferentes reacciones de solidificación que ocurre cuando una aleación es enfriada desde el estado líquido hasta llegar a la temperatura ambiente, y cómo se podría modificar sus propiedades mecánicas con ligeros cambios de composición en una aleación, distribución de fases en la matriz, la influencia de la velocidad de enfriamiento, predicción de fractura frágil con la visualización de una microestructura, etc.

Así, por ejemplo, en el diagrama de fase más utilizado en la Ingeniería Mecánica, en el diagrama Fe-C se ha podido identificar fases muy dúctiles como la ferrita (α) y fases muy frágiles como el carburo de hierro (cementita), con un estudio minucioso del enfriamiento de un acero en condiciones de equilibrio desde la fase líquida se puede predecir las propiedades mecánicas importantes como la resistencia a la tracción, ductilidad y dureza. Aceros con bajo porcentaje de carbono (<0.3) son muy dúctiles y de moderada resistencia mecánica debido a la presencia muy alta de ferrita (proeutectoide y eutectoide) y bajas cantidades de cementita, mientras que los aceros que tengan medio y alto porcentaje de carbono poseen mayor dureza y mayor resistencia tensil pero baja ductilidad, éstos porque las altas cantidades del elemento no metálico (C) se combina con el hierro y forman porcentajes elevados de carburo de hierro (compuesto duro y frágil) en una matriz de ferrita cada vez más pobre en cantidad.

2.2. Terminología

Metalurgia

La metalurgia es la técnica de la obtención y transformación de los metales desde minerales metálicos con la reducción de materiales no metálicos. También estudia la elaboración de aleaciones, el control de calidad de los procesos vinculados, así como su control contra la corrosión a fin de proyectar una vida útil de un metal.

Fase

Una fase es una fracción uniforme de un sistema con propiedades físicas y químicas homogéneas, que, aunque está en contacto con otras partes del sistema, está separado por un límite bien definido, se distinguen tres tipos básicamente:

- a) Continua: es una aleación o porción que contiene más de una fase, es la fase que forma la base o matriz en que la(s) otra(s) fase(s) están presentes como unidades aisladas.
- b) Intermedia: es una aleación o un sistema químico, la fase distinguible homogénea cuyo rango de composición no se extiende a ninguno de los componentes puros del sistema.
- c) Terminal: es una solución sólida, representada por un área en cualquiera de los lados extremos de un diagrama de fase binario.

Componentes

Los componentes son los elementos químicos, puede ser un metal y/o compuesto que forma parte de una aleación. (Al, Fe, C, Cu, Fe_3C , etc.)

Soluto

El soluto **es la sustancia que se disuelve en una solución**, por lo general, el soluto puede ser una sustancia sólida, gaseosa u otro líquido, lo que origina una solución líquida a altas temperaturas o una solución sólida a bajas temperaturas (se halla en menor cantidad en la solución) (Gordo, Piris, 1995).

Solvente

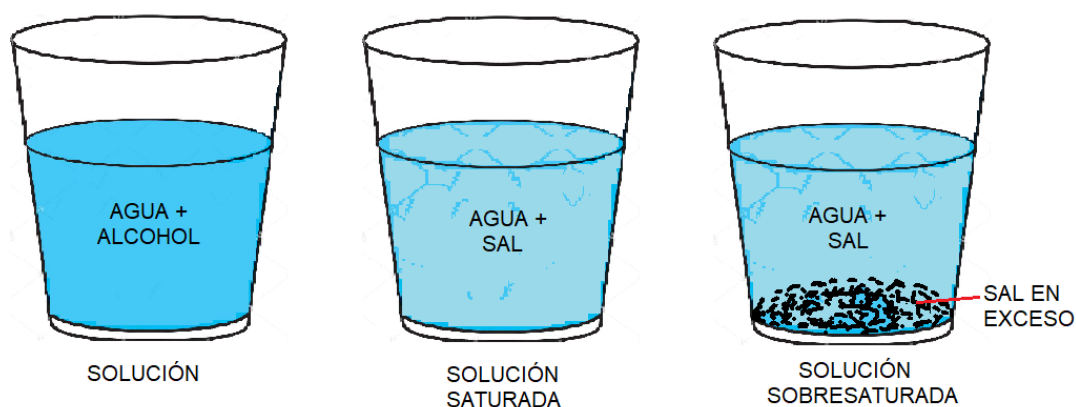
También conocido como disolvente, **es una sustancia que disuelve al soluto**, generando como resultado una solución química. Generalmente, el solvente es el componente que se encuentra en mayor proporción en la solución.

Solución o disolución

Es una mezcla homogénea de dos o más sustancias. La sustancia disuelta se denomina soluto y la sustancia donde se disuelve se denomina disolvente.

Figura 13.

Tipos de soluciones



- Solución no saturada.** Es aquella solución a la cual es posible agregar más soluto y que éste se disuelva.
- Solución saturada.** Es aquella solución a la cual, aunque se agregue más soluto, éste no se disuelve.
- Solución sobresaturada.** Se denomina así a la solución que posee mayor cantidad de soluto disuelto que el que admite a una cierta temperatura.

Para lograr este tipo de soluciones sobresaturadas, normalmente se eleva la temperatura del sistema, para así aumentar la solubilidad, una vez disuelto todo el soluto se enfría rápidamente. Estas soluciones son muy inestables; al incorporar más cantidad de soluto que se puede disolver, precipita el exceso de soluto disuelto, convirtiéndose en una solución saturada.

Aleación

Es una combinación de dos o más elementos (por lo menos uno es metal), en la que también participan cantidades de algunos elementos no metálicos. Se elaboran para mejorar las propiedades de los componentes originales (ejemplo: Acero, Fe-C).

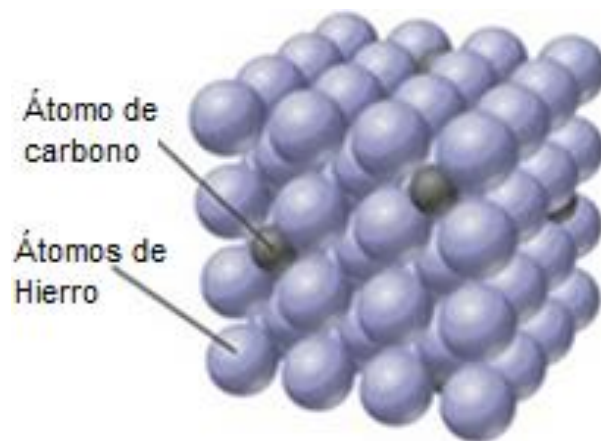
Solución sólida

Una solución sólida es una combinación atómica homogénea en estado sólido entre dos o más elementos en un tipo de red espacial (BCC, FCC, HCP), contienen dos o más especies químicas, se suelen representar con letras griegas minúsculas (α , β , γ , etc.) se dividen en dos tipos:

a) Intersticial. Es aquella en la que los átomos del soluto (componente de la solución en menor presencia) ocupan posiciones dentro de la red del solvente (componente de la solución en mayor presencia y que disuelve al soluto). Este tipo de solución se da cuando el diámetro de los átomos del soluto es muy pequeño en comparación con el diámetro de los átomos del solvente.

Figura 14.

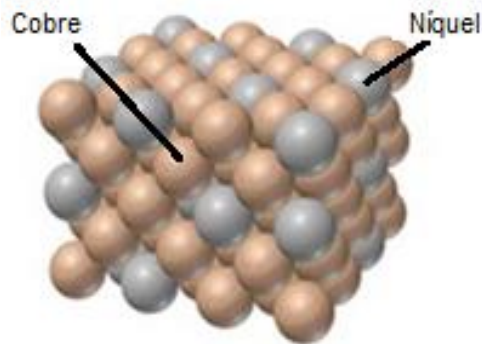
Solución sólida intersticial de carbono en hierro



b) Sustitucional. Es una solución sólida en la que los átomos del soluto reemplazan a los átomos del solvente en la estructura cristalina. Este caso es muy común cuando el diámetro de los átomos del soluto es semejante al diámetro de los átomos del solvente. Ejemplo: Aleación Au-Ag

Figura 15.

Cu-Ni, solución sólida sustitucional



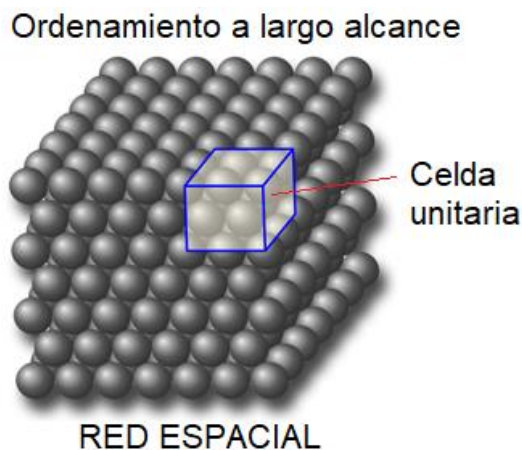
c) Soluciones sólidas ordenadas: Son las que se obtienen cuando los átomos de soluto ocupan posiciones definidas en la red cristalina del solvente.

Estructura cristalina

Los materiales tienen dos posibilidades de unir sus átomos, moléculas o iones, esto es, de forma ordenada o desordenada. Los materiales con un ordenamiento atómico de largo alcance forman una red espacial (un ordenamiento tridimensional), a este ordenamiento se lo conoce como estructura cristalina.

Figura 16.

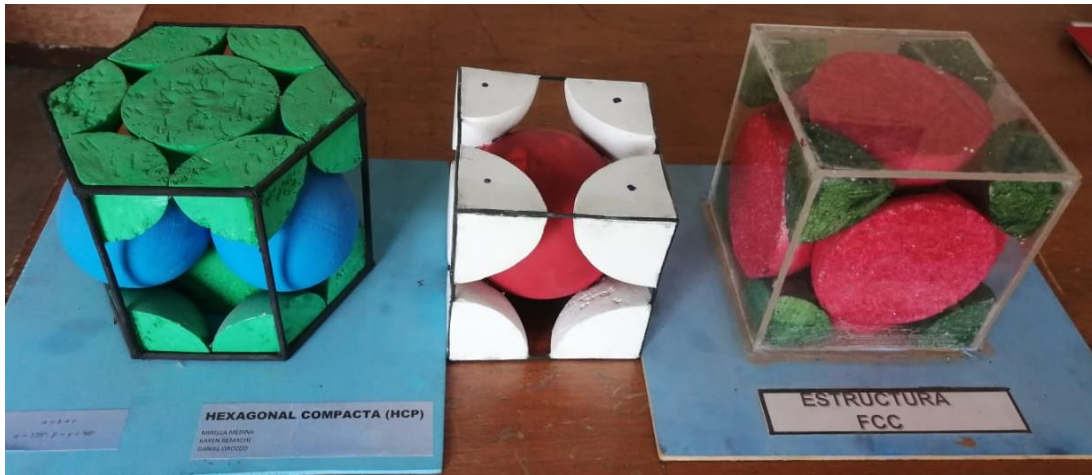
Red espacial, celda unitaria



Se puede citar varios ejemplos de estructuras cristalinas típicas en los metales, como la BCC (Body Center Cubic) común en metales como el hierro, cromo, molibdeno, wolframio. La FCC (Face Center Cubic) típico de ordenamiento en metales como el aluminio, cobre, oro, níquel, plata, plomo. HCP (Hexagonal Compact) en metales como el titanio, zinc, magnesio, cobalto.

Figura 17.

Estructuras cristalinas bcc, fcc, hcp

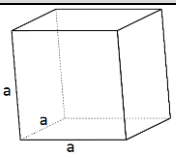
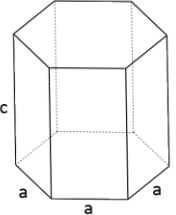


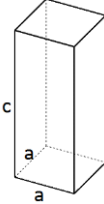
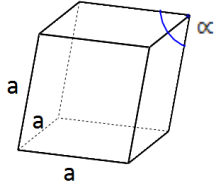
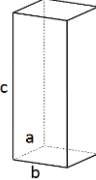
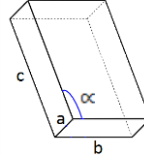
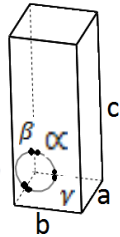
Se ha identificado 7 sistemas cristalinos con una subclasificación de cada uno de ellos, formando 14 redes Bravais en total.

Los materiales que no tienen un ordenamiento atómico a largo alcance se consideran como amorfos, típico de materiales poliméricos. Aunque la mayoría de ellos tienen regiones de cristalinidad, se consideran como materiales con un ordenamiento de corto alcance, a estos polímeros se los conoce como parcialmente cristalinos.

Tabla 10.

Relaciones entre parámetros de red y las geometrías de las celdillas

Sistema cristalino	Relación axial	Ángulos interaxiales	Geometría de la celdilla unidad
Cúbico	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Hexagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	

Sistema cristalino	Relación axial	Ángulos interaxiales	Geometría de la celdilla unidad
Tetragonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Romboédrico	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
Ortorrómbico	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Monoclínico	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
Triclínico	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

Alotropía

Es la capacidad que tienen algunos materiales para existir en más de una estructura cristalina a diferentes temperaturas, suele reservarse de este comportamiento en elementos puros, mientras que el término polimorfismo se usa para elementos compuestos.

La transformación alotrópica a menudo repercute en la densidad y en las propiedades físicas del material de ahí el interés de su estudio en áreas como la ingeniería. El hierro puede presentar tres estructuras cristalinas a diferentes temperaturas (formas alotrópicas), Ferrita α (<910 °C), Austenita γ (910-1395 °C), Ferrita δ (1395-13535 °C).

2.3. Diagramas de fase (o de equilibrio)

Los diagramas de fase son representaciones gráficas de las fases que existen en un sistema de materiales a varias temperaturas, presiones y composiciones. Idealmente, el diagrama de fase deberá mostrar las relaciones entre las fases, bajo condiciones de equilibrio, o sea bajo condiciones en las cuales no habrá cambio con el tiempo. Las condiciones de equilibrio pueden ser aproximadas por calentamiento y enfriamiento extremadamente lentos, de modo que se deje suficiente tiempo si un cambio de fase está por ocurrir. La rápida variación de temperatura, puede impedir cambios de fase que normalmente ocurrirían bajo condiciones de equilibrio. Estos diagramas son utilizados por ingenieros y científicos para entender y predecir muchos aspectos del comportamiento de los materiales (Shackelford, 2005).

A partir de los diagramas de fase se puede obtener información:

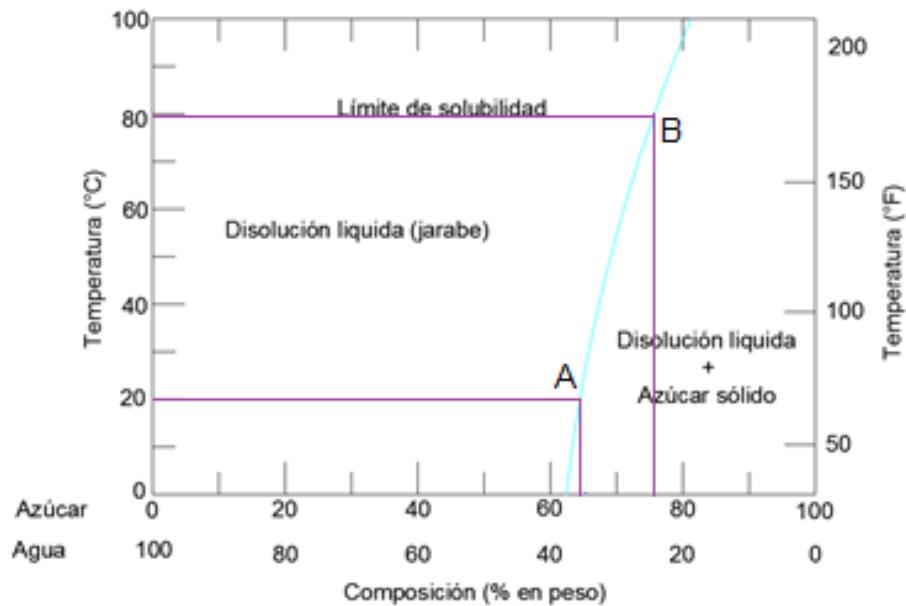
1.- Conocer que fases están presentes a diferentes composiciones y temperaturas bajo condiciones de equilibrio.

Cuando en un sistema hay dos fases, no necesariamente implica que haya diferencias en las propiedades físicas y químicas; es suficiente que la disparidad esté en un solo tipo de estas propiedades. Cuando el agua y el hielo están juntos en un recipiente, existen dos fases separadas; son físicamente distintas (el hielo es sólido y el agua es líquido).

Los sistemas monofásicos reciben el nombre de “sistema homogéneo” y los sistemas de dos o más fases se denominan “mezclas” o “sistemas heterogéneos”. La mayoría de las aleaciones metálicas, los cerámicos, los polímeros y los materiales compuestos son sistemas heterogéneos (Newell, 2016).

Figura 18.

La solubilidad de azúcar en un jarabe de agua azucarada



2.-Averiguar la solubilidad, en el estado sólido y en el equilibrio, de un elemento (o compuesto) en otro.

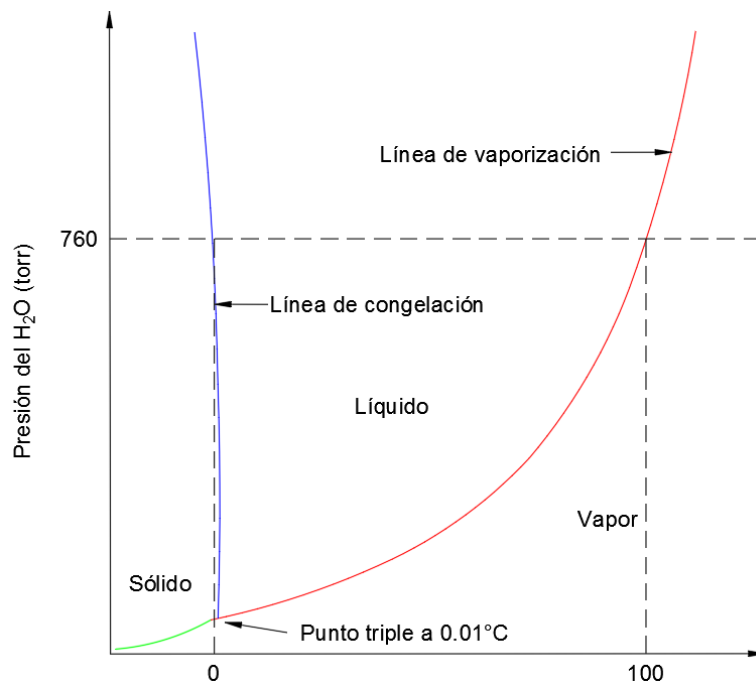
El límite de solubilidad se conoce como la concentración máxima de átomos de soluto que se disuelven en el disolvente para formar una disolución sólida. La adición de un exceso de soluto a este límite de solubilidad forma otra disolución sólida o compuesto con una composición completamente diferente (Shackerlford, James, 2005). Cuando se mezcla agua con azúcar, al principio se forma un jarabe, al añadir azúcar la disolución se concentra hasta alcanzar el límite de solubilidad, o sea, la disolución se satura de azúcar, al propio tiempo, la disolución es incapaz de disolver más azúcar y las posteriores adiciones originan simples segregados en el fondo del recipiente. En ese momento el sistema contiene dos fases: el jarabe y el sólido cristalino de azúcar sin disolver. Cabe destacar que la solubilidad es directamente proporcional a la temperatura, a mayor temperatura mayor solubilidad. En la Figura 18 se muestra que a 20 °C lo máximo que puede solubilizar el agua es de un 63% en peso de azúcar (Punto A), mientras que a 80 °C se puede mezclar un 75% de azúcar sin llegar a la sobresaturación.

3.- Determinar la temperatura en la cual una aleación enfriada bajo condiciones de equilibrio comienza a solidificar y la temperatura a la cual ocurre la solidificación.

Como ejemplo se puede representar el diagrama de fases presión-temperatura (PT) del agua (Figura 19), existe un punto triple a baja presión (4,579 torr) y baja temperatura (0,0098 °C) donde coexisten la fase sólida, líquida y vapor. A la izquierda de la línea azul se representa la fase sólida, entre la línea azul y rojo la fase líquida, y a la derecha de la línea roja la fase vapor de agua. Indica que se puede tener fases como vapor incluso a bajas temperaturas a consecuencia de una disminución de la presión. De igual manera se puede obtener una fase líquida a 100 °C, pero deberá tener una presión mayor a la atmosférica.

Figura 19.

Diagrama de fases del agua

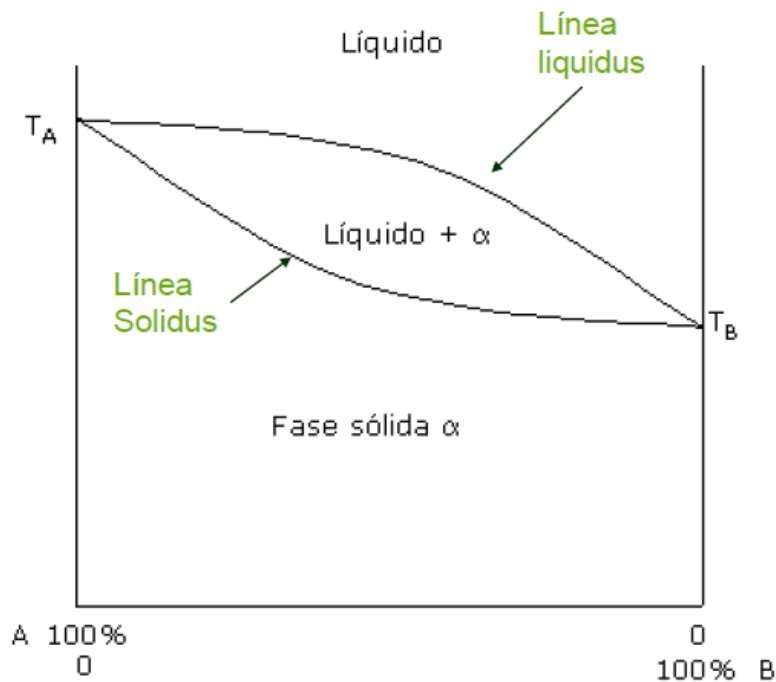


4.-Conocer la temperatura a la cual comienzan a fundirse diferentes fases.

Como se sabe, las aleaciones solidifican en un intervalo de temperaturas. La Figura 20 representa un diagrama de fases binarias (temperatura vs composición, a presión atmosférica) sobre la línea liquidus todas las aleaciones del sistema muestra una solubilidad completa y una sola fase líquida. En el intervalo entre las líneas liquidus y solidus se muestra una zona bifásica (coexistencia, de líquido + sólido), una aleación que se ha fundido y al enfriarse inicia la solidificación en la línea liquidus y termina la solidificación al rebasar la línea solidus. Ya debajo de la línea solidus todas las aleaciones del sistema forman una solución sólida completa. Los elementos A y B en los extremos del diagrama, representan a elementos puros, los cuales tienen definido su punto de solidificación (metales puros solidifican a temperatura constante).

Figura 20.

Diagrama de fases binario



2.3.1. Constitución de las aleaciones

Actualmente, en la industria es muy usual utilizar aleaciones debido a sus diferentes características y propiedades que presentan frente a condiciones de carga y condiciones ambientales hostiles. El hierro puro, como elemento no presenta resistencia tensil ni dureza, para lo cual se combina con pequeñas cantidades de carbono (elemento no metálico) a fin de mejorar la resistencia mecánica y dureza, apto para cualquier uso industrial. El mismo hierro se puede combinar con otro elemento metálico como el Cr, mejorando significativamente la resistencia a la corrosión (aceros inoxidables %Cr>10.5%).

Las aleaciones tienen por objeto modificar en un sentido determinado las condiciones de los metales, tratando de mejorar bajo el punto de vista práctico, ya sea su aspecto o su resistencia mecánica. Pero el número de aleaciones empleadas en construcción es inmenso, y algunas de ellas, como el bronce, el latón y el hierro fundido, datan de muy antiguo.

Las aleaciones resultan a veces verdaderas combinaciones químicas, pero en la mayoría de los casos son simplemente mezclas bastante homogéneas, como puede comprobarse con el examen microscópico.

Las aleaciones se clasifican en: soluciones sólidas, fases intermedias y compuestos químicos.

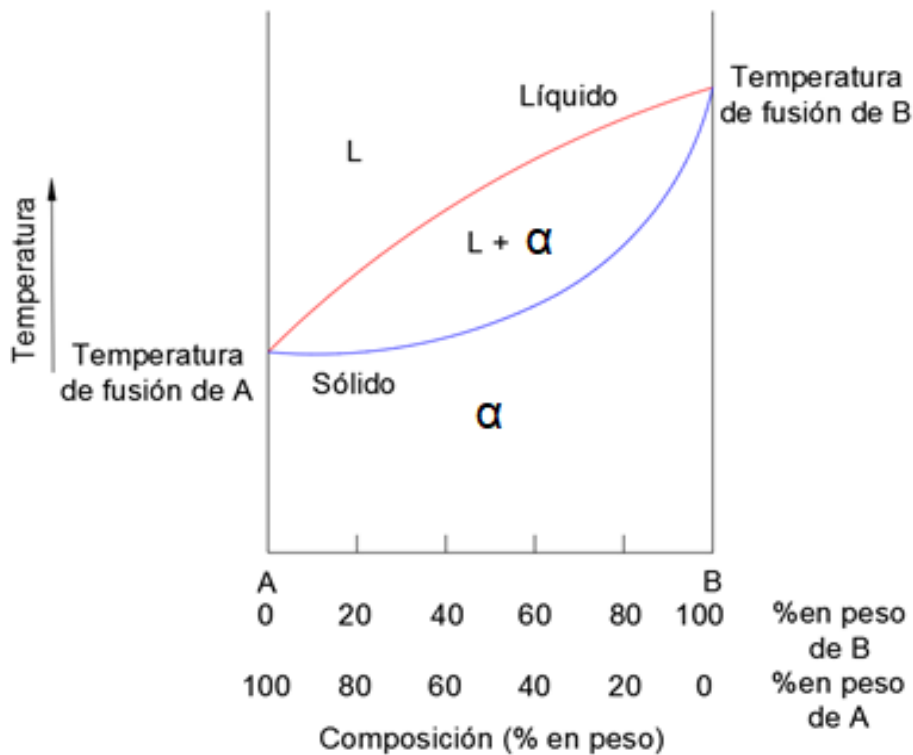
2.3.2. Factores que controlan el intervalo de solubilidad

- **Factor de estructura**

La solubilidad completa se puede lograr cuando los elementos tienen el mismo tipo de estructura reticular cristalina. Probablemente el tipo de diagramas de fases más sencillo es el correspondiente a aquellos diagramas binarios en los que los dos componentes son completamente solubles entre sí (solubilidad total), tanto en estado sólido como en estado líquido, tales como las del Cu y el Ni (Shackerlford, James, 2005).

Figura 21.

Diagrama de fases binario, solubilidad completa en estado sólido



El campo de fase líquida se identifica mediante una L y la solución sólida se designa mediante α . Nótese que la región de coexistencia de dos fases está referenciada por L + α , para las soluciones sólidas es habitual utilizar letras griegas minúsculas $\alpha, \beta, \gamma, \epsilon, \delta, \epsilon, \theta, etc.$

- **Factor de tamaño relativo**

La solubilidad es mayor cuando la diferencia en radios atómicos es menor que el 15 %, diferencia entre los radios iónicos de A y B supone una limitación en la solubilidad, es decir, el porcentaje de la diferencia relativa de radios iónicos debe ser pequeño:

$$Dr = \frac{r_A - r_B}{r_A} * 100 < 15\% \quad (45)$$

Donde:

$D_r = \text{diferencia de radios atómicos}$

$r_A = \text{radio atómico del elemento A, elemento de mayor diámetro}$

$r_B = \text{radio atómico del elemento B}$

- **Factor de afinidad química**

Cuanto mayor sea la afinidad química que tengan dos metales más restringidos será su solubilidad y mayor será la tendencia a formar compuestos (mayor distancia en la tabla periódica).

Ejemplo:

Cr y 0 tendencia a formar compuestos (mayor distancia).

Cu y Zn tendencia a formar soluciones sólidas (menor distancia).

- **Factor de valencia relativa**

Un metal de menor valencia tiende a disolver más que un metal de mayor valencia.

Ejemplo:

Sistema Al-Ni

- Al Valencia 3. Disuelve el 0,04 % de Ni
- Ni Valencia 2. Disuelve 5 % de Al

Figura 22.

Tabla periódica

TABLA PERIODICA DE ELEMENTOS

The image shows a standard periodic table with the following data highlighted for Hydrogen (H) and Silicon (Si):

Elemento	Número Atómico	Peso Atómico	Electronegatividad	Número de Oxidación	Punto de Fusión	Punto de Ebullición
H	1	1.00797	2.1	1,-1	-259.2	0.0709
Si	14	28.0855	1.9	4	1414	2966

Below the main table, the Lanthanides and Actinides series are listed:

LANTANIDOS

ACTINIDOS

Fuente: Serguéi Brin (1998)

Si por ejemplo se considera una solución de Si en Al se puede averiguar a priori el grado aproximado de solubilidad que presentará dicha solución. Sabiendo que:

Tabla 11.

Ejemplo entre el aluminio y el silicio

Al	Si
Radio atómico = 0,143 nm	Radio atómico = 0,117 nm.
Estructura cristalina = FCC	Estructura cristalina = estructura del diamante (FCC con base)
Valencia = +3	Valencia = -4

Conclusión: Como se observa, la solución de Si en Al viola las reglas 1, 2, 3 y 4, es por esto que no nos sorprenderá saber que el Si sólo es soluble en Al en una proporción inferior al 2% (porcentaje atómico).

2.3.3. Fases intermedias (compuestos intermedios)

En algunos casos la mezcla de dos componentes da lugar a la aparición de fases intermedias con una composición (fija o no), estructura cristalina y propiedades propias. Las fases formadas pueden poseer enlaces metálicos, iónicos o covalentes, o una mezcla de ellos.

Cuando uno de los componentes que interviene es un metal (con baja electronegatividad), las fases cristalinas más comunes, son (de mayor a menor carácter metálico) las soluciones sólidas, los compuestos intersticiales, los compuestos intermetálicos de valencia anormal (o fases electrónicas), las fases de Laves, los compuestos intermetálicos de valencia normal (o compuestos electroquímicos), y los compuestos químicos. Estos últimos también pueden formarse entre elementos no metálicos.

Son aquellas que tienen composiciones químicas intermedias entre los dos metales puros y generalmente tienen estructuras cristalinas diferentes a la de estos.

La mayoría de los compuestos químicos son combinación de elementos con valencia positiva y negativa en una proporción definida, expresada mediante una fórmula química A_mB_n .

Cuando se forma un compuesto, los elementos pierden en gran medida su identidad individual y sus propiedades características. La mayoría de los compuestos, al igual que los metales puros, tienen un punto de fusión definido.

Fases intermedias intermetálicos o de valencia

Estos compuestos se originan cuando la diferencia de electronegatividad entre los elementos es grande, pero no lo suficiente para que se forme un compuesto químico. Suelen formarse entre elementos de las columnas I o II de la Tabla periódica, con los de las columnas IV, V o VI.

En general, presentan características de los compuestos químicos: posee enlace iónico o covalente (solo débilmente metálico), se forman en la solidificación con gran desprendimiento de calor (por lo que tienen gran estabilidad), y solidifican a temperatura más elevada que la de sus componentes (alto punto de fusión) y a

temperatura constante. En ellos, existen unas proporciones definidas de sus componentes, regidas por leyes de valencia, y el margen de existencia en composición es muy estrecho (en los diagramas de fases, se representan muchas veces mediante una línea vertical, como los compuestos químicos o las fases de Laves). Los compuestos electroquímicos tienen una red cristalina propia. Son fases frágiles y poseen cierto carácter metálico (por ejemplo, el Mg_2Pb es conductor, lo que es una característica típica del enlace metálico).

Fases intermedias intersticiales

Se forman usualmente entre metales de transición (M) y no metales de pequeño diámetro (H, B, C, N, O, Si). Es necesario que exista entre ellos un acusado contraste de tamaño. El factor tamaño influye en su formación y el tipo de red. Si la diferencia de tamaño es menor de 0,59, suelen formarse redes simples, y si es mayor de ese valor, se originan redes complejas.

Los compuestos intersticiales son compuestos con red propia, diferente a la de los elementos (por eso no se pueden considerar soluciones sólidas). Los átomos del metal (M) ocupan las posiciones de la red, mientras que los no metales ocupan (total o parcialmente) los huecos octaédricos o tetraédricos. Se les da una fórmula (M_mX_n) que no se rige por una regla de valencia, sino que obedece a una ley de proporción (está asociada al número de huecos). Estos compuestos poseen enlaces covalentes, con electrones des localizados, y tienen características de los compuestos químicos y de las soluciones sólidas: alta temperatura de fusión (se comportan como refractarios), alta dureza y fragilidad, y son conductores. A este tipo de fase pertenecen casi todos los hidruros, nitruros, boruros y carburos metálicos.

Se forman por la unión entre los elementos de transición como el Sc, Ti, Ta, W y Fe con el H, O, C, B y N. Sus propiedades son metálicas y tienen un reducido intervalo de composición, altos puntos de fusión y son extremadamente duros.

Ejemplos: TiC , Fe_3C , W_2C , CrN y TiH .

Compuestos intermedios electrónicos

Se forman entre elementos metálicos (metales del grupo IB, IIB, IIIB, IVB, y metales de transición). Con solubilidad sólida parcial, y de distinta valencia. Las fases electrónicas poseen enlace metálico, pero tienen red cristalina propia, a diferencia de las soluciones sólidas. Como estas, existen dentro de un intervalo de composiciones. Se les puede asignar una fórmula representativa de una composición media, pero dicha fórmula no sigue las leyes de valencia. No rigen las leyes de formación de los compuestos químicos. Tienen un acusado carácter metálico (aunque menor que las soluciones sólidas).

Según dedujo (Hume-Rothery, 1947) la formación de las fases electrónicas viene determinada por la concentración electrónica e^-/at , esto es, por la estabilidad de la nube electrónica, que también explicaba los límites de solubilidad. El número de electrones presentes por cada 100 átomos totales de los elementos que constituyen el compuesto intermetálicos (que se obtienen a partir de la valencia de cada metal y la proporción en la que se encuentra presente), determina la red cristalina y las características finales del compuesto. En la Tabla 12 se muestran las diferentes fases electrónicas que pueden aparecer en un sistema como el Cu-Zn (con un metal monovalente y otro divalente). La solubilidad máxima es igual al 40 % (ese sería el máximo porcentaje atómico de Zn que puede disolverse por sustitución en el cobre). Cantidades mayores de Zn ya no originan una solución sólida, sino que dan lugar a la aparición de compuestos intermetálicos de valencia anormal

Tabla 12.

Fases electrónicas del sistema Cu-Zn en función del factor de concentración

Intervalo de concentración electrolítica e^-/at	Fase	Fórmula	e^-/at nominal (factor electrónico)	Tipo de red
(1,0 a 1,4)	Solución sólida α	-	$(1,6+2,40)/100=1,4=21/15$	FCC
(1,4 a 1,56)	Fase electrónica β	CuZn	$(1,1+2,1)/2=1,5=21/14$	BCC
(1,56 a 1,71)	Fase electrónica γ	Cu ₅ Zn ₈	$(1,5+2,8)/13=1,62=21/13$	Cúbica centrada compleja de 52 átomos/celdilla
(1,71 a 1,87)	Fase electrónica ϵ	CuZn ₃	$(1,1+2,3)/4=1,72=21/12$	HCO

Fuente: (Serope, 2002)

Fases de Laves

Su formación está definida por el factor tamaño: se forman si las diferencias de diámetro atómico están entre el 20 y el 30 %. La relación nominal de diámetros para que se formen fases de Laves es de 1,225. Uno de los elementos suele ser un metal de transición.

Las fases de Laves responden a una fórmula del tipo AB_2 (donde A es el elemento de mayor tamaño). No se rigen por ninguna regla de valencia. Suelen cristalizar en redes complejas con alto número de coordinación (16 para el elemento A y 12 para B). Tienen un margen de existencia en composición pequeño. Hay tres tipos diferentes: C15 o tipo $MgCu_2$ (cubica compleja), C14 o tipo $MgZn_3$ (hexagonal) y C36 o tipo $MgNi_2$ (hexagonal). Ejemplos típicos son el $MgZn_2$ y el $SiMg_2$ importantes en algunas aleaciones de aluminio. (Gordo, A.; Piris, 1995)

2.3.4. Clasificación diagramas de fase

También conocidos como diagramas de equilibrio o constitucionales, es la representación gráfica de las variables de estado, asociadas con las microestructuras a través de la regla de las fases de Gibbs. A partir de las transformaciones de fases, de los cambios que ocurren entre fases, al modificar la temperatura (generalmente en el subenfriamiento), se originan la mayoría de las microestructuras, lo que implica la transformación de una fase a la otra o la aparición o la desaparición de una fase.

La utilidad de los diagramas de equilibrio radica en la posibilidad de la predicción de la transformación y de la microestructura resultante, que pueden estar o no en equilibrio. Idealmente se obtienen las fases del diagrama bajo condiciones de equilibrio.

En la práctica, los diagramas de fase de uso común para los ingenieros son los diagramas binarios, que representan sistemas de dos componentes ($C = 2$ en la regla de las fases de Gibbs), y los diagramas ternarios, que representan sistemas de tres componentes ($C = 3$). (Shackerlford, James, 2005)

2.4. Diagramas de fase binarios

Los diagramas de fase representan 3 variables intensivas e independientes, presión, composición y temperatura. Para facilitar el estudio de los diagramas de fase binarios, se toma en cuenta la solubilidad de las fases presentes tanto en estado líquido como en estado sólido.

Solubilidad de fases	Tipos
1. Componentes completamente solubles en estado líquido:	a) Completamente solubles en estado sólido (Tipo I). b) Insolubles en estado sólido (Tipo II). c) Parcialmente soluble en estado sólido (Tipo III). d) Formación de una fase intermedia de fusión congruente (Tipo IV). e) La reacción peritética (Tipo V).
2. Componentes parcialmente solubles en estado líquido (Tipo VI).	
3. Componentes insolubles en estados líquidos e insolubles en estado sólido (Tipo VII).	
4. Transformaciones en estado sólido:	a) Cambio alotrópico b) Orden-desorden c) La reacción Eutectoide d) La reacción Peritectoide

2.4.1. Tipo I: Completamente solubles en estado líquido y sólido

Es el diagrama de fases más sencillo, se representa dos variables, composición (eje horizontal) y temperatura (eje vertical). (Presión constante de 1 atmósfera)

Es posible determinar el diagrama de fases con una gráfica de las curvas de enfriamiento (Temperatura vs Tiempo) para varias combinaciones o aleaciones entre los metales A y B, variando en composición del 100% de A y 0% de B hasta 0% de A y 100% de B. Se elimina la variable tiempo y se unen los puntos para formar la línea sólidas y líquidas que forman el diagrama de fases (Temperatura vs composición). Anteriormente se ha recordado la solidificación a temperatura constante de elementos puros y solidificación en un intervalo de temperaturas de aleaciones.

Figura 23.

Curvas de enfriamiento para diferentes aleaciones en un sistema totalmente soluble. (Las líneas punteadas representan la forma del diagrama de fase)

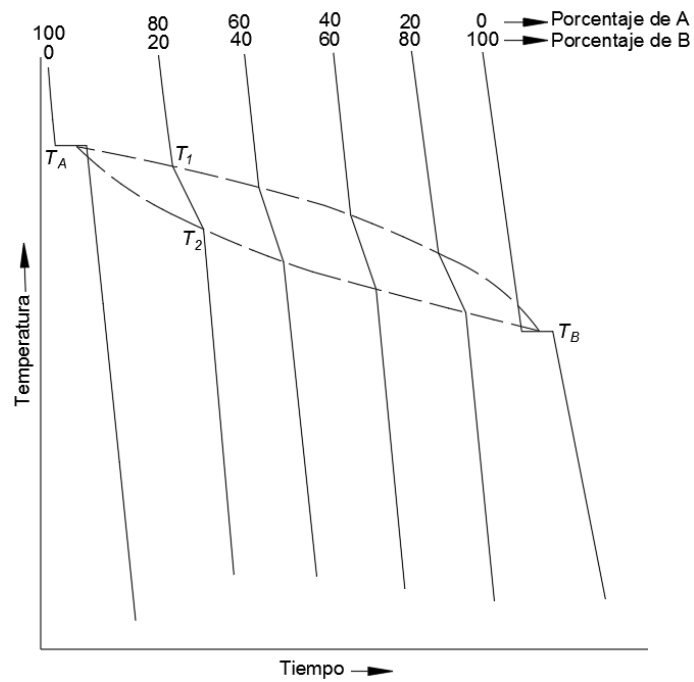
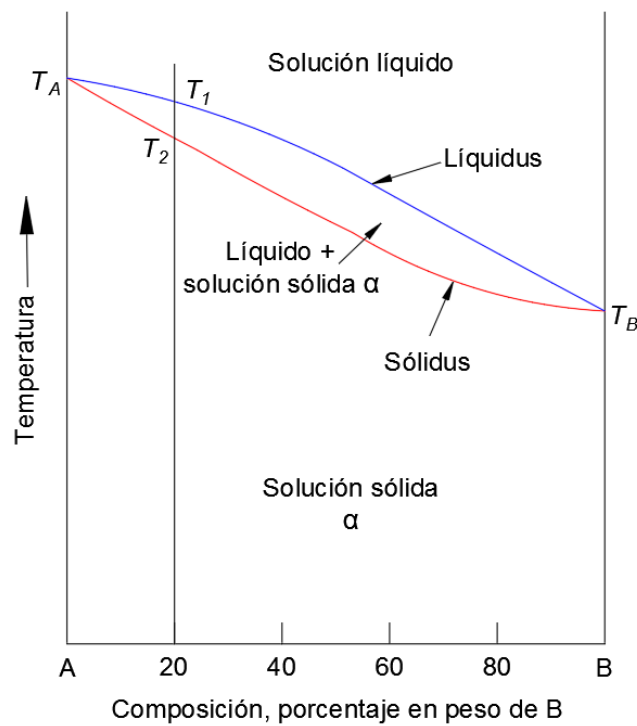


Figura 24.

Diagrama de fase de dos metales completamente solubles en los estados líquido y sólido



El diagrama de fases consta de dos puntos (T_A , T_B), dos líneas (líquidas y sólidas) y tres áreas (L, L+ α , α) (Figura 24). Los puntos T_A y T_B , representan los puntos de solidificación de los dos metales puros. Al unir los puntos de inicio solidificación entre los metales puros y diversas aleaciones del sistema, se forma la línea líquida, mientras que la línea inferior que se forma al unir los puntos de finalización de la solidificación se llama línea sólida.

En el diagrama de fase se observa que cualquier aleación de este sistema sobre la línea líquida es completamente soluble, al igual que cualquier aleación bajo la línea sólida (Forman una sola fase).

A temperaturas bajas, existe una única fase de solución sólida (α). Entre las líneas líquidas y sólidas se encuentra una región bifásica (de dos fases), correspondiente al tramo de solidificación de cualquier aleación del sistema.

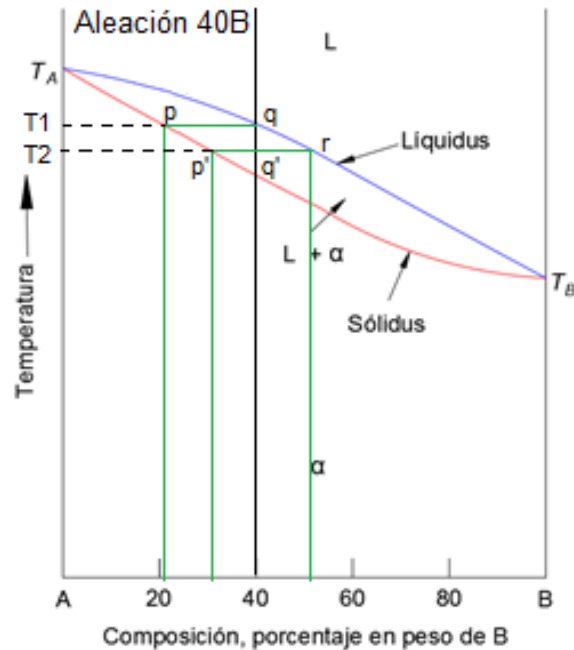
Análisis de composición en las fases (Regla 1)

Cuando una aleación es completamente soluble ya sea en estado líquido o sólido, la composición, expresado como un porcentaje en peso y es la correspondiente a la composición de la aleación.

En una zona bifásica, a veces, es necesario determinar la composición tanto en la fase líquida como en la sólida. Esto es posible mediante la regla de composiciones y se puede extrapolar para cualquier sistema binario de fases. Analicemos con un ejemplo, el enfriamiento de una aleación desde la fase líquida hasta que termina de solidificar:

Figura 25.

Diagrama de fases con solubilidad completa, regla 1



La aleación 40B (40% en peso del elemento B, 60 % en peso del elemento A), al llegar a la temperatura T1, empieza la formación de núcleos estables para la formación del sólido α , para determinar la composición a la cual empieza a formarse el sólido, se traza una línea de enlace o de vínculo (\overline{pq}) entre la línea liquidus y solidus, se proyecta el corte entre la línea de vínculo \overline{pq} y solidus (punto p) con una línea vertical, que corresponderá a la composición de dicho sólido (α). El sólido alfa (α) empieza a solidificar con una composición 21% en peso del elemento B y la fase líquida se mantiene con la misma composición de la aleación.

En la temperatura (T2), una zona bifásica, con una existencia de líquido + sólido α , del mismo modo se puede determinar la composición de cada fase. Se traza una línea de vínculo que corte la línea líquidas y sólidas $\overline{p'r}$, y se proyecta verticalmente los cortes. El corte con la línea liquidus representará la composición de la fase líquida y el corte con la línea solidus determina la composición de la fase sólida. En el ejemplo, a dicha temperatura la composición de la fase sólida da el punto (p') (31% en peso de B), mientras que en la fase líquida (punto r) la composición es del 51% en peso del elemento B.

Análisis de porcentaje de fases (Regla 2)

La regla 2, también conocida como la regla de la palanca, es una herramienta que permite determinar cuál es el porcentaje de fases presentes en una zona bifásica. Retomando el ejemplo anterior (Figura 25), en la temperatura (T2), donde claramente se distingue la presencia de una fase líquida y una fase sólida α , para determinar cuál es el porcentaje de fases se deben seguir los siguientes pasos:

- Trazar una línea de vínculo ($\overline{p'r}$) que corte la línea liquidus y solidus.
- Proyectar con líneas verticales los cortes con las líneas liquidus y solidus (líneas verticales verdes).
- Determinar el porcentaje de líquido mediante la siguiente ecuación:

$$\%L = \frac{\overline{p'q'}}{\overline{p'r}} * 100 \quad (46)$$

Donde, $\overline{p'q'}$, es la longitud del segmento, dado por los valores de corte de las líneas verticales, y $\overline{p'r}$ es la longitud total de la línea de vínculo, entonces, según la ecuación (47):

$$\%L = \frac{40 - 31}{51 - 31} * 100 = 45\%$$

- Determinar el porcentaje de sólido mediante la siguiente ecuación:

$$\%\alpha = \frac{\overline{q'r}}{\overline{p'r}} * 100 \quad (47)$$

Donde, $\overline{q'r}$, es la longitud del segmento, dado por los valores de corte de las líneas verticales, y $\overline{p'r}$ es la longitud total de la línea de vínculo, entonces:

$$\%\alpha = \frac{51 - 40}{51 - 31} * 100 = 55\%$$

Estos valores indican que, volumétricamente, en la temperatura T2, de la cantidad total de la aleación 100%, el 45% es líquido y el 55% es sólido.

La regla 2, también conocida como la regla de la palanca, toma este nombre debido a su similitud con la palanca mecánica. Si se observa con detención, para determinar la cantidad de líquido, se divide el segmento que va desde la aleación

(40B) hasta la línea solidus y se divide para la longitud total del segmento de vínculo. A diferencia de la regla 1 que, para determinar la composición de la fase líquida, hay que dirigirse a la misma línea liquidus.

e) Verificar que la suma total del porcentaje de fases corresponda al 100%.

$$L + \alpha = 100\%$$
$$45\% + 55\% = 100\%$$

A medida que se realice un análisis a menor temperatura dentro de la zona bifásica, la cantidad de líquido se irá reduciendo, y lógicamente, la cantidad de sólido aumentara, hasta completar la solidificación en ese intervalo de temperaturas.

Ejercicio

Dibuje un diagrama de equilibrio entre dos metales A y B respectivamente, los cuales son solubles completamente en estado sólido, y que solidifiquen en su estado puro a temperaturas de 900 y 1200°C respectivamente. Si la aleación está compuesta por 50% del elemento A:

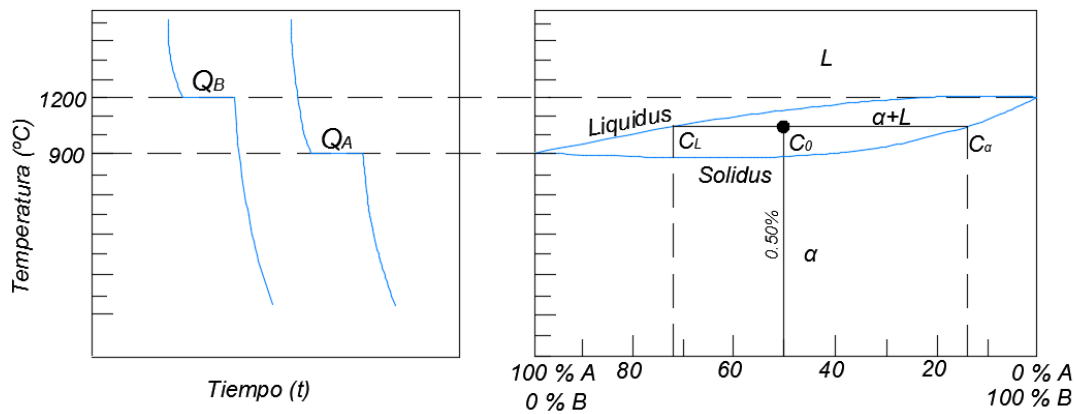
Se pide:

- a) Identifique las fases presentes en región bifásica y determine su cantidad relativa.
- b) Determine la composición de las fases que presenta en dicho punto.

En la gráfica de la izquierda se aprecia las curvas de enfriamiento de los dos metales puros en función del tiempo.

Figura 26.

Curvas de enfriamiento y diagrama de fases



Mientras que en la gráfica de la derecha se puede apreciar el diagrama de fases según los datos del ejercicio planteado.

- a) En el punto en análisis, existen las fases de sólido + líquido.

$$\% \alpha = \frac{50 - 28}{86 - 28} * 100 = 37,9\%$$

$$\% L = \frac{86 - 50}{86 - 28} * 100 = 62,1\%$$

- b) Para determinar la cantidad relativa de las fases, se aplica la regla 1:

Fases	Composición
Líquida	28% en peso de B
Sólida	86% en peso de B

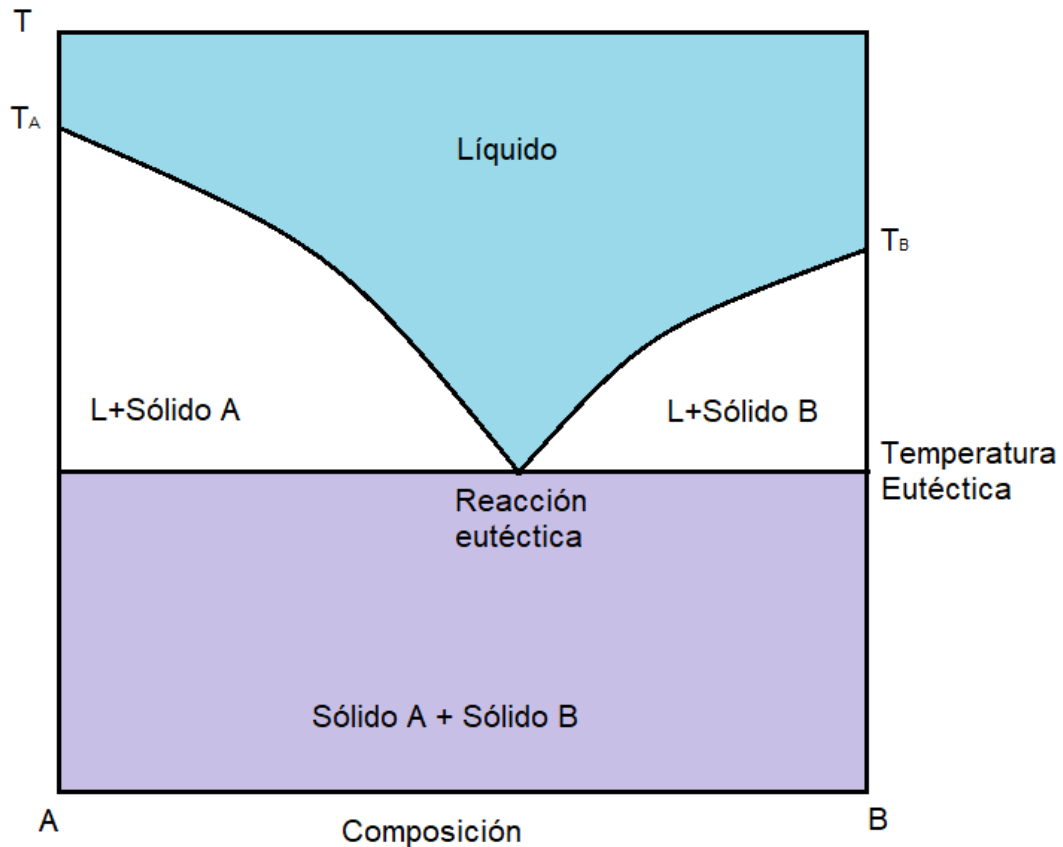
El lector adquiere la destreza de cuantificar la cantidad relativa de fases en zonas bifásicas, con la composición correspondiente.

2.4.2. Tipo II: Insolubles en estado sólido

Dos metales no pueden ser completamente insolubles, sin embargo, debido a que sus componentes son tan distintos, su solubilidad es casi despreciable.

Figura 27.

Diagrama de fases binario que muestra una insolubilidad total en estado sólido



A temperaturas relativamente bajas existe una zona de coexistencia de dos fases para los sólidos puros A y B, lo que resulta consecuente con la observación realizada acerca de la inmiscibilidad de los dos componentes del sistema (A y B). En segundo lugar, el sólidos es una línea horizontal que se corresponde con la temperatura eutéctica. Esta denominación tiene su origen en el término griego eutektos, que significa «fundir bien». En este caso, el material cuya composición es igual a la composición eutéctica funde por completo a la temperatura de la eutéctica. Cualquier composición distinta de la correspondiente a la eutéctica no fundirá completamente a la temperatura eutéctica. En lugar de ello, un material de tales características deberá calentarse aún más, atravesando con ello la región de

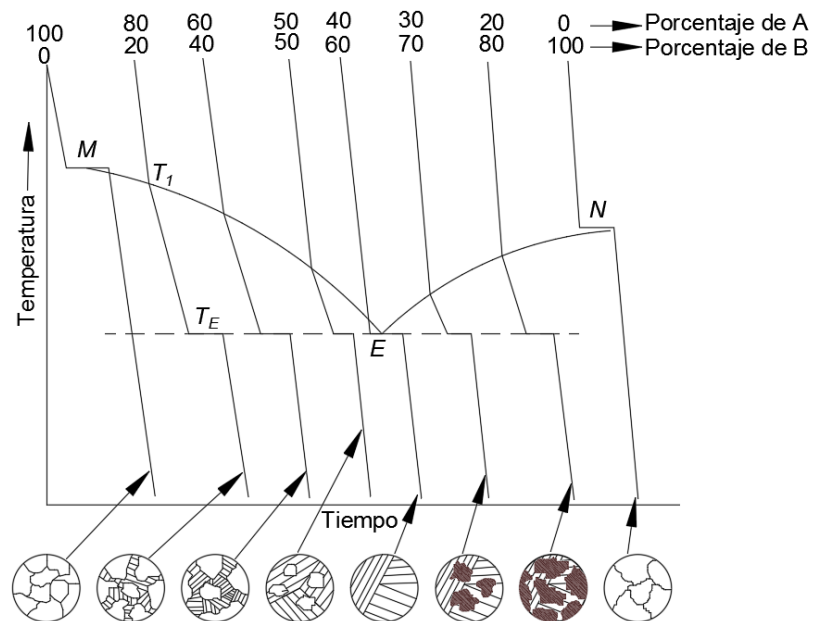
dos fases hasta alcanzar la línea de liquidus. Esta situación es análoga a la correspondiente a la zona bifásica (L + α) del tipo I.

El diagrama eutéctico binario presenta dos regiones bifásicas (A + L y B + L).

De igual manera, este diagrama de fase puede diseñarse a partir de una serie de curvas de enfriamiento, pero en este caso, las curvas experimentales muestran un comportamiento diferente.

Figura 28.

Curvas de enfriamiento y microestructuras a temperatura ambiente para una serie de aleaciones de dos metales insolubles en estado sólido

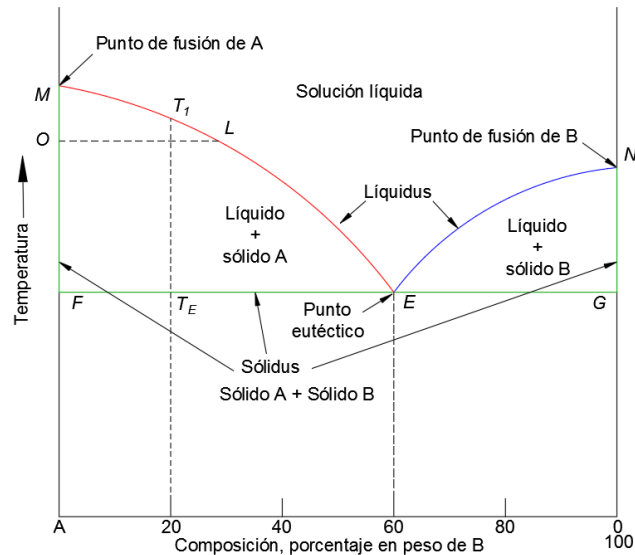


Las curvas de enfriamiento para los metales puros A y B muestran una línea horizontal única en sus puntos de congelación. A medida que se agrega B en A, la temperatura del inicio de la solidificación disminuye; ocurre lo mismo cuando se agrega A en B. Por lo tanto, como cada metal disminuye el punto de congelación del otro, la línea que une los puntos del inicio de solidificación (línea líquidas) debe mostrar un mínimo; este punto mínimo se llama punto eutéctico y la temperatura que pasa por este punto se conoce como temperatura eutéctica.

En una aleación, la composición eutéctica 40A-60B, ocurre la solidificación completa a una sola temperatura, la eutéctica. De la gráfica la línea MEN, es la líquida.

Figura 29.

Diagrama de fase eutéctico



De la Figura 29 la línea MEN, es la líquida que indica el comienzo de solidificación. La línea sólida es siempre una línea continua que une los puntos de fusión de los metales puros, de modo que la línea sólidas completa es MFGN.

Este diagrama está formado por cuatro áreas:

Área de arriba de la línea líquida es una solución líquida homogénea de una sola fase, debido a que los dos metales son completamente solubles en el estado líquido.

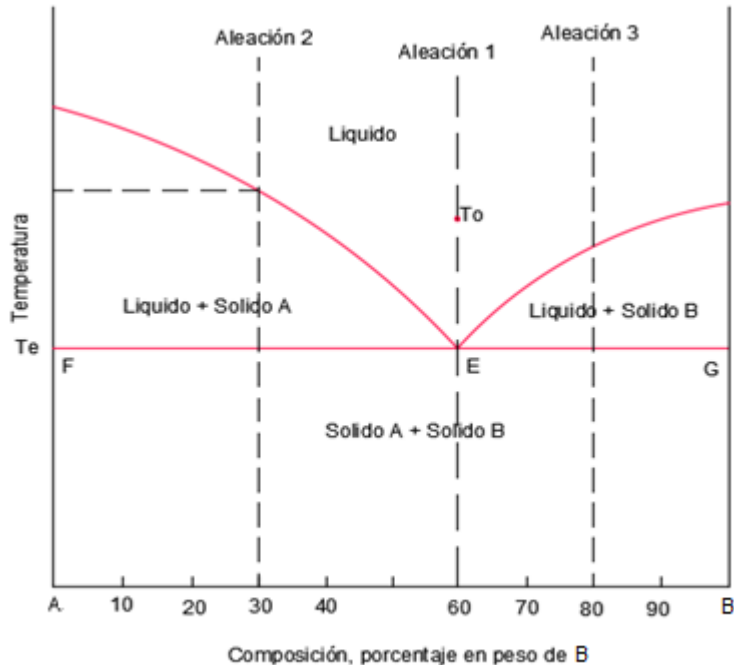
Las áreas restantes son de dos fases: si se traza una línea horizontal que pase por cualquier punto dentro de esta área, se puede observar que estará delimitada por una línea de fase simple en sus dos extremos. Por ejemplo: en la Figura 29. La línea OL en el área MFE interseca la liquidus en L y en O que es el metal puro A, por lo tanto, el metal y el líquido son las dos fases presentes en esta área. El mismo razonamiento se aplica en cualquier diagrama de fase.

El análisis de microestructuras, se entenderá mejor con un ejemplo:

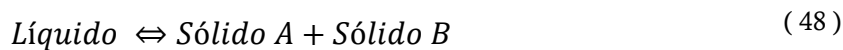
Ejercicio

Figura 30.

Diagrama de fase tipo eutéctico de aleación de oro y plata



Aleación 1: A medida que se enfría desde la temperatura T_o permanece una solución líquida uniforme hasta el punto E. En este punto el líquido empieza a solidificarse y la temperatura no podrá descender hasta que la aleación esté completamente sólida. El líquido solidificará en una mezcla de dos fases que son la de los dos extremos: puntos F y G. Si B se solidifica más de lo normal, la composición del líquido se habrá desplazado hacia la izquierda, requiriendo que Au se solidifique para restablecer el equilibrio. Por tanto, a temperatura constante, el líquido se solidifica alternativamente Au y Pt puros, resultando una mezcla fina visible bajo microscopio. Ésta se conoce como mezcla eutéctica.



La Aleación 2: Ubicada a la izquierda del punto Eutéctico se conoce como una aleación hipoeutéctica constituida por 70A-30B.

Al enfriar la aleación 2, y al cruzar con la línea liquidus, empieza la formación de núcleos para formar sólidos A con una composición de 100% de A, a medida

que se enfría la aleación aumenta el porcentaje relativo de la fase sólida A y se reduce la cantidad de líquido, si se realiza un análisis justo por encima de la reacción eutéctica ($T + \Delta T$), se tiene que:

$$\% L = \frac{30-0}{60-0} 100 = 50\% \}$$

$$\% A = \frac{60 - 30}{60 - 0} 100 = 50\%$$

A este sólido A que se forma sobre la temperatura eutéctica, se la conoce como sólido proeutéctico o primario y se lo representa con un apóstrofe (A') para diferenciar del sólido A eutéctico que se formará en la temperatura eutéctica.

Tabla 13.

Por encima de la reacción eutéctica

Fases	Líquido	Sólido A
Composición	70A-30B	100A
Cantidad Relativa	50%	50%

Cuando se rebasa la temperatura de transformación eutéctica $T - \Delta T$, el líquido deberá transformarse en sólido.

$$\% A_{TOTAL} = \frac{100 - 30}{100 - 0} * 100 = 70\%$$

$$\% B = \frac{30 - 0}{100 - 0} 100 = 30\%$$

Con la regla de la palanca, se obtiene las cantidades totales de fases presentes bajo la temperatura eutéctica y por ende a temperatura ambiente. El porcentaje de sólido A total corresponde a la suma del sólido A primario y sólido A eutéctico, mediante la ecuación:

De donde se puede obtener cual es la cantidad de líquido que se transformó en sólido A, al rebasar por la reacción eutéctica mediante la ecuación (50):

$$70\% = 50\% + \%A_{EUTÉCTICO}$$

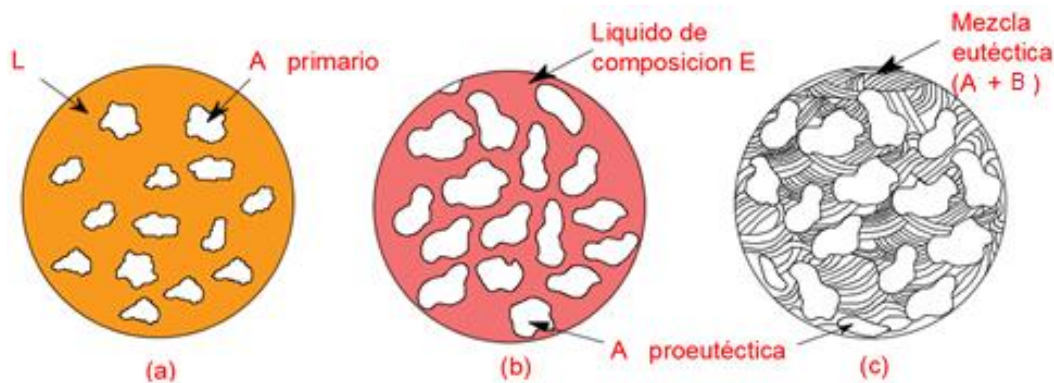
$$\%A_{EUTÉCTICO} = 20\%$$

Como todo el líquido (50%) debió transformarse en una mezcla eutética, el 30% restante corresponde al sólido B.

La microestructura obtenida al final será la presentada en la Figura 31.

Figura 31.

Etapas de enfriamiento lento de una aleación hipoeutética.



La Aleación 3: Ubicada a la derecha del punto eutético se conoce como una aleación hipereutética constituida por 20A - 80B. Esta aleación se tiene un comportamiento similar a la aleación 2 con la diferencia de que los granos primarios serán del elemento B.

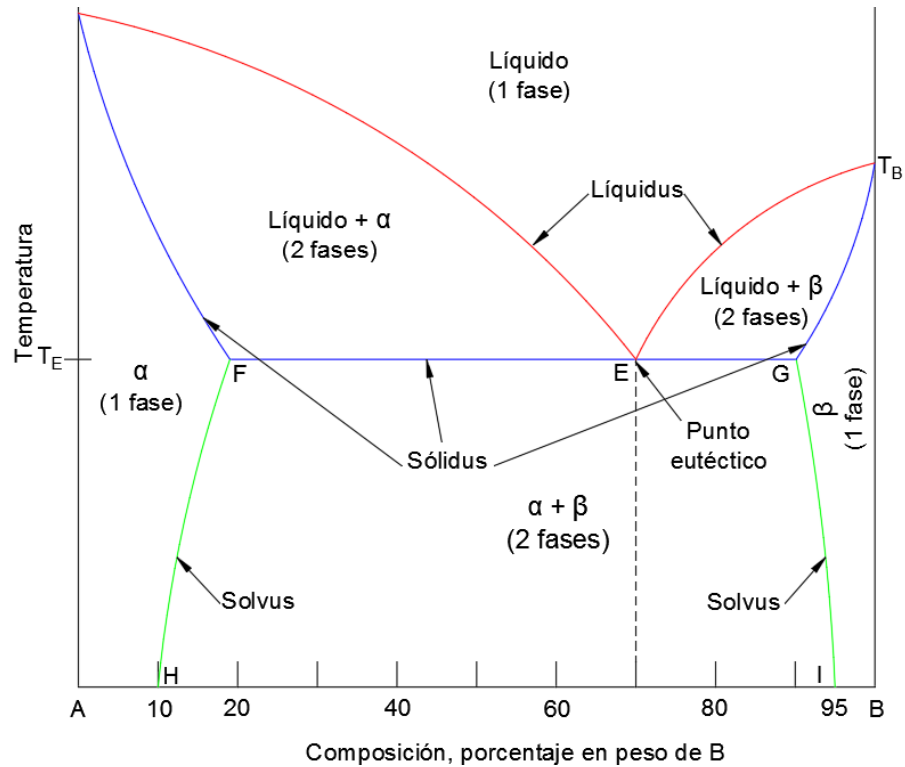
Con este ejercicio se pretende, entrenar y comprender la solidificación de aleaciones que sufren una reacción eutética, muy común en las aleaciones metálicas.

2.4.3. Tipo III: Parcialmente solubles en estado sólido

Este tipo es el más común y el más importante debido a que la mayoría de los metales muestran algo de solubilidad de uno con el otro en el estado sólido.

Figura 32.

Diagramas de fase que muestra solubilidad parcial en estado sólido



Por encima de la línea líquidas hay solo una solución líquida de fase única. En los puntos de fusión, en la intersección de las líneas líquidas y sólidas, el diagrama es semejante al tipo I.

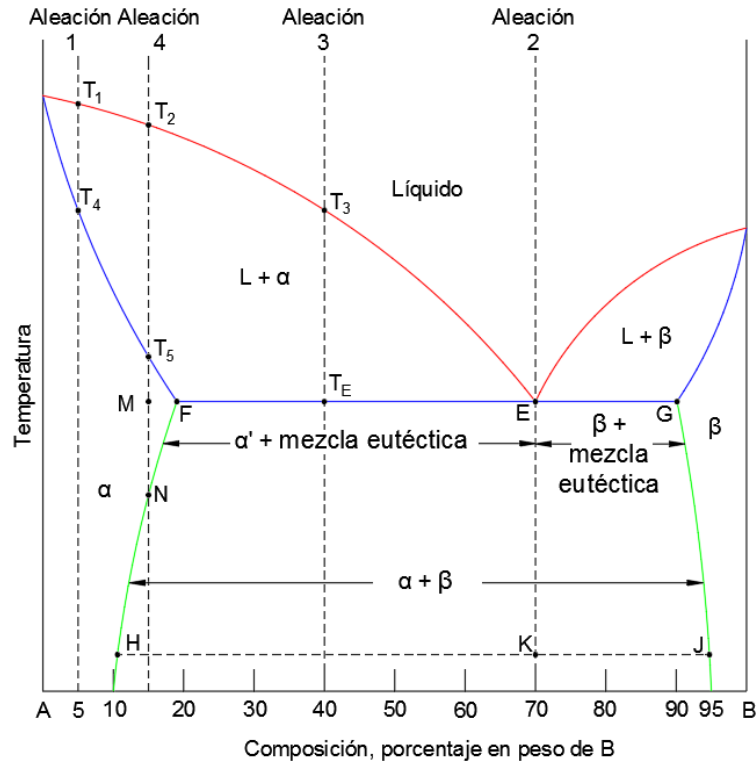
Además, en este tipo, se identifica las soluciones sólidas terminales a las áreas de fase única α (alfa) y β (beta). El resto de áreas es la combinación de las fases presentes en cada región muy parecido al tipo II.

Con la disminución de la temperatura, la cantidad máxima de soluto que puede disolverse disminuye, como lo indica las líneas FH y GJ, las cuales se llaman líneas solvus e indican la solubilidad máxima (solución saturada) de B en A (solución α) o de A en B (solución β) como función de temperatura.

El análisis de microestructuras, se entenderá mejor con ejemplos de enfriamiento de diferentes aleaciones del sistema:

Figura 33.

Diagrama de fase que muestra solubilidad parcial en el estado sólido



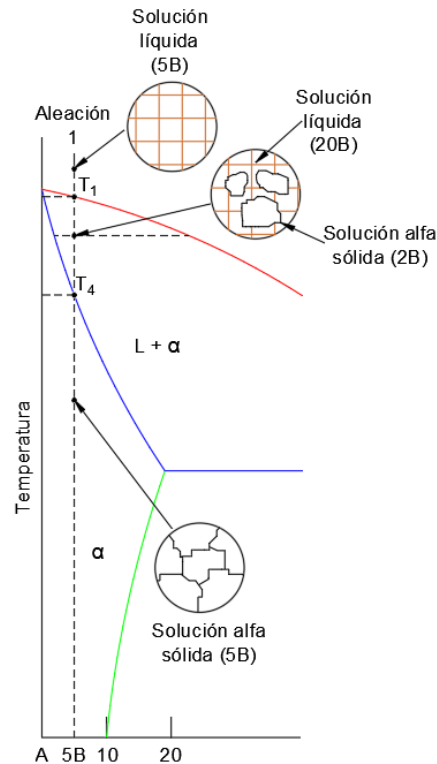
La aleación 1

Constituida por 95A-5B, cuando se enfría lentamente sigue un proceso igual al tipo I. Cuando la línea líquidas se cruza en T1, comenzará a solidificar, formando cristales de solución sólida α extremadamente ricos en A. Este proceso continúa, con el líquido haciéndose más rico en el elemento B y moviéndose hacia abajo gradualmente a lo largo de la línea líquida.

La solución sólida α , también haciéndose más rica en B, se mueve hacia abajo a lo largo de la línea sólidas (línea azul). Cuando finalmente la línea sólidas se cruza en T4 conservando el mismo ritmo de crecimiento del cristal, el sólido total será una solución sólida α homogénea y permanecerá de esta manera hasta llegar a temperatura ambiente.

Figura 34.

Microestructura de la aleación 1



Aleación 2

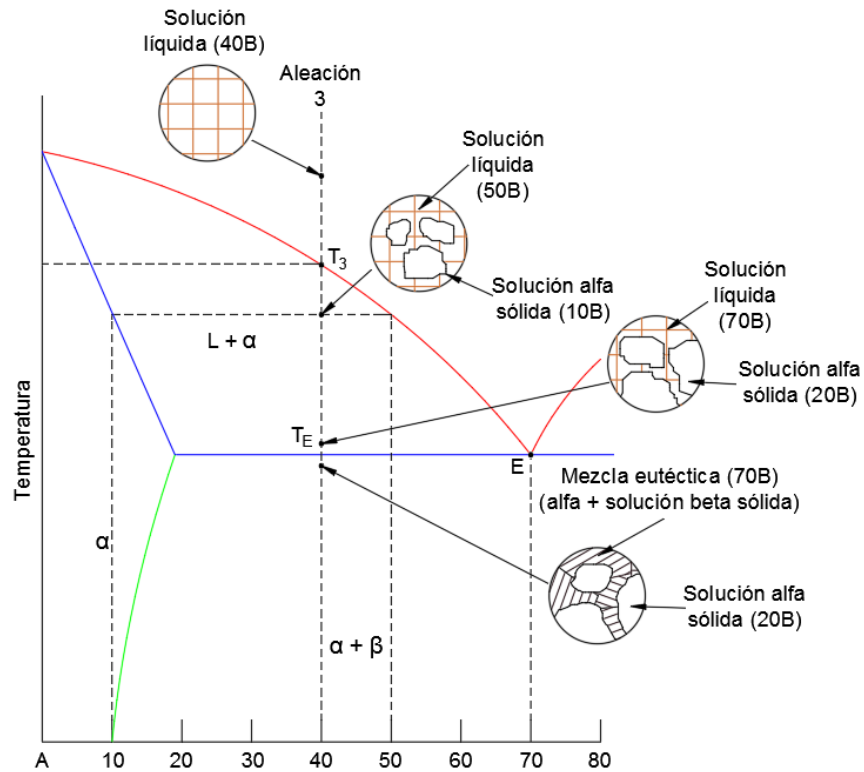
Permanece líquida hasta que la aleación toque el punto eutéctico, aquí se produce la transformación a temperatura constante, en una mezcla fina de dos sólidos; cuyos sólidos están dados por los extremos de la línea eutéctica: α de composición F y β de composición G. A temperatura ambiente debido al cambio de solubilidad de B en A habrá un ligero cambio de cantidades relativas de α y β . A diferencia del tipo II, estos sólidos presentes a temperatura ambiente son soluciones sólidas.

Aleación 3

Permanece líquido hasta que alcanza T3. El líquido empieza a solidificar cristales de solución sólida α primaria o proeutéctica muy rica en A. El líquido se vuelve más rico en B a medida que baja y se mueve hacia la derecha a lo largo de la línea líquidas hasta que alcance el punto E. A medida que continúa bajando la aleación presenta la siguiente microestructura:

Figura 35.

Microestructura de la aleación 3

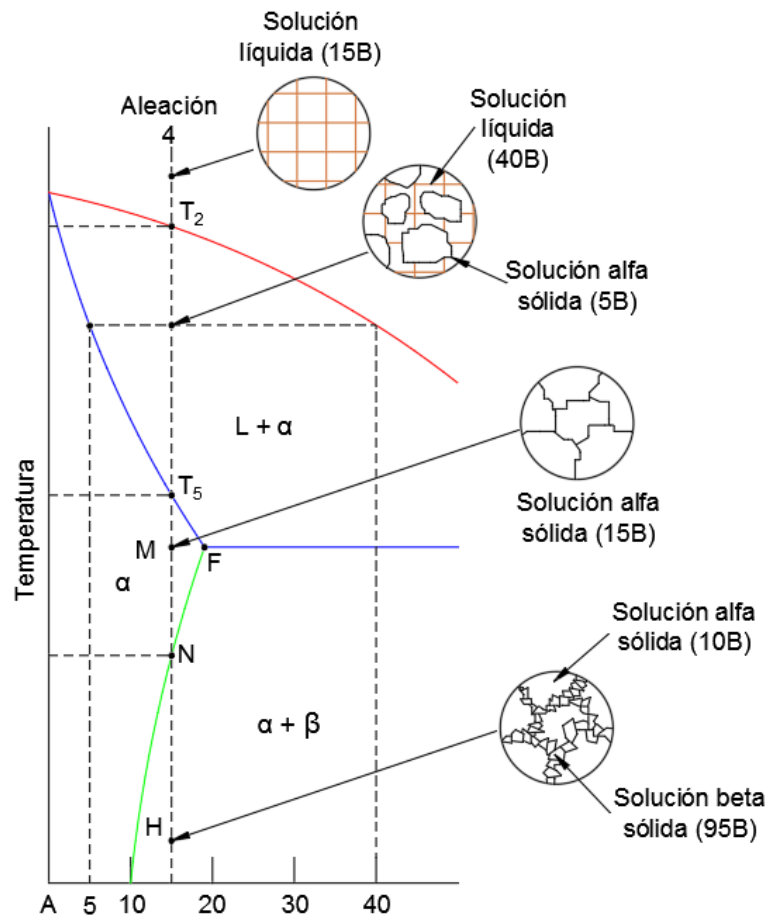


Aleación 4

Sigue el mismo proceso de la aleación 1, empieza la solidificación en T_2 y termina en T_5 ; resultando una fase homogénea única: la solución sólida α . En el punto M, la solución es insaturada. A medida que la solución se enfría, la línea solvus alcanza el punto N donde la solución α se satura ahora de B. este exceso empieza a salir hacia los límites de grano, pero no como elemento B, como son parcialmente solubles empieza a salir como solución sólida β . A temperatura ambiente, la aleación consistirá, grandemente en α con una pequeña cantidad en exceso de β en los límites de grano (presentando fragilidad a la aleación).

Figura 36.

Microestructura de la aleación 4

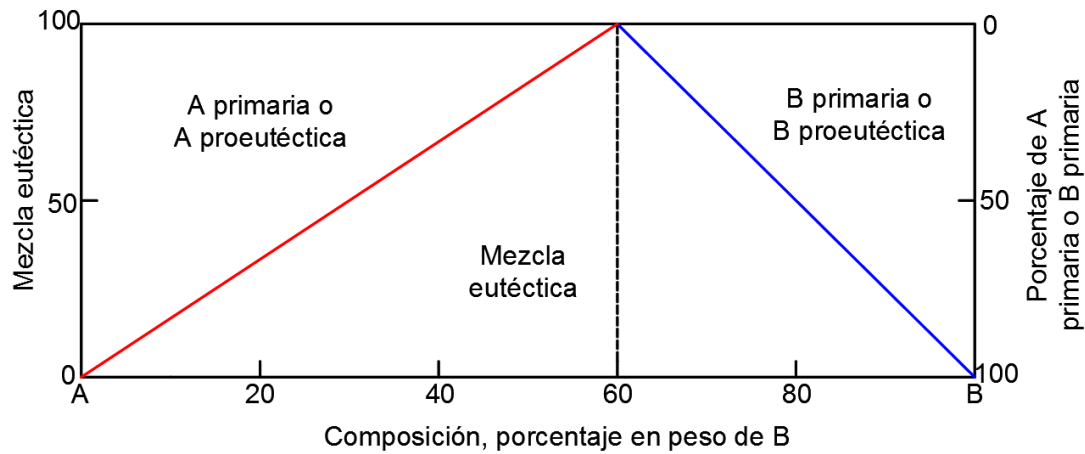


Cantidad de sólidos proeutéticos y de mezcla eutéctica

Según la Figura 37 se da a conocer que hay una relación lineal entre los constituyentes que aparecen en la microestructura y la composición de la aleación para un sistema eutéctico. Por lo que también las propiedades físicas y mecánicas deberían mostrar una variación lineal; sin embargo, ya en la práctica es muy raro encontrar este comportamiento ideal.

Figura 37.

Relación lineal entre las partes de la microestructura y la composición



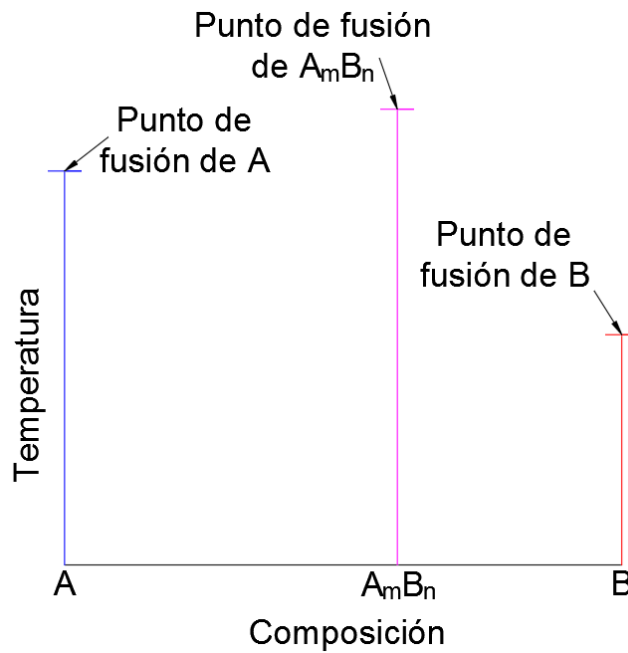
Las propiedades de cualquier aleación multifásica dependen de las características individuales de las fases y la forma en la que estén distribuidos en la microestructura. La resistencia, dureza y ductilidad se relacionan con el tamaño, número, distribución y propiedades de los cristales de ambas fases.

2.4.4. Tipo IV: Formación de una fase intermedia de fusión congruente

Este tipo se da cuando una fase cambia en otra isotérmicamente y sin ninguna modificación en la composición química. Dicho esto, se concluye que todos los metales puros se solidifican congruentemente. Si la fase intermedia tiene un reducido intervalo de composición, como en los compuestos intermetálicos y los compuestos intersticiales, entonces se presenta en el diagrama como una línea vertical y se indica con la fórmula química del compuesto. Algunos autores emplean letras griegas para las fases intermedias.

Figura 38.

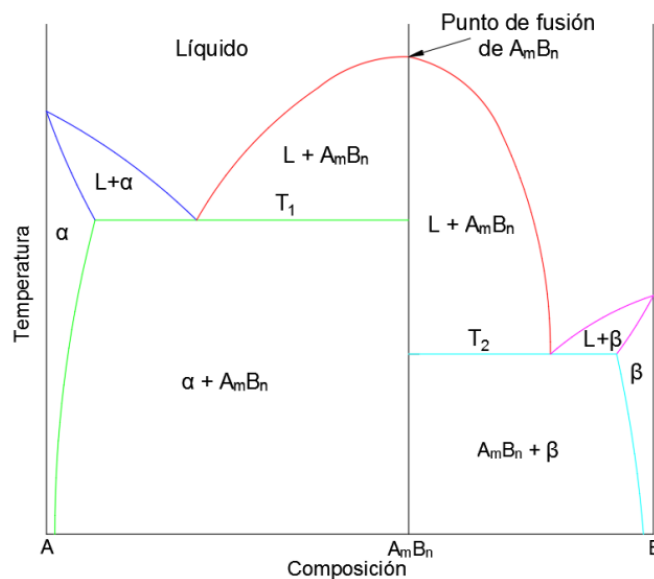
Relación lineal entre las partes de la microestructura y la composición



En la figura se muestra un compuesto A_mB_n , donde m y n son subíndices que señalan el número de átomos combinados en el compuesto; por ejemplo, si se tiene un compuesto formado entre el magnesio y el estaño se tendría Mg_2Sn por lo tanto Mg es equivalente a A; 2 es equivalente a m; Sn es equivalente a B; n es equivalente a 1.

Figura 39.

Diagrama de equilibrio que muestra una aleación intermedia



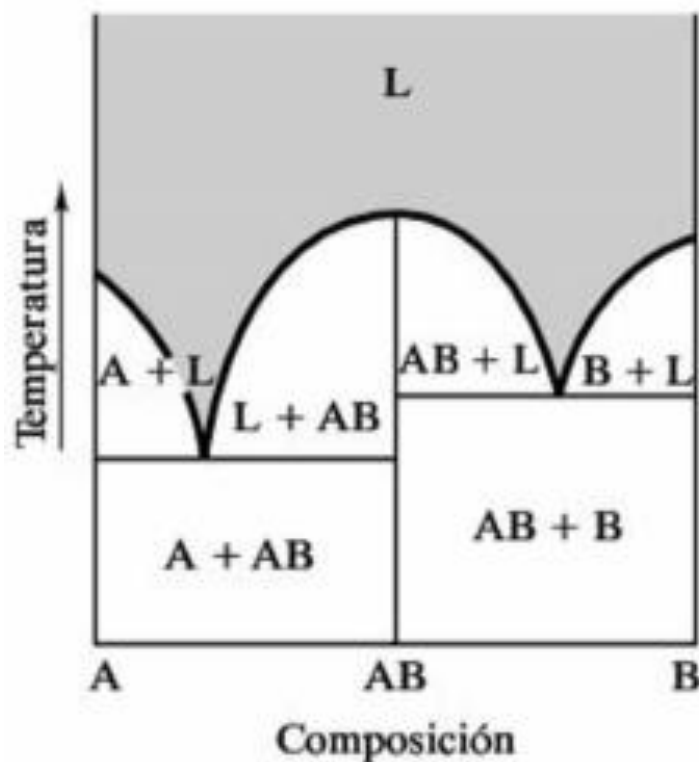
Las ecuaciones eutécticas pueden escribirse:



Otros ejemplos:

Figura 40.

Diagrama de fase binario con un compuesto de fusión congruente intermedio

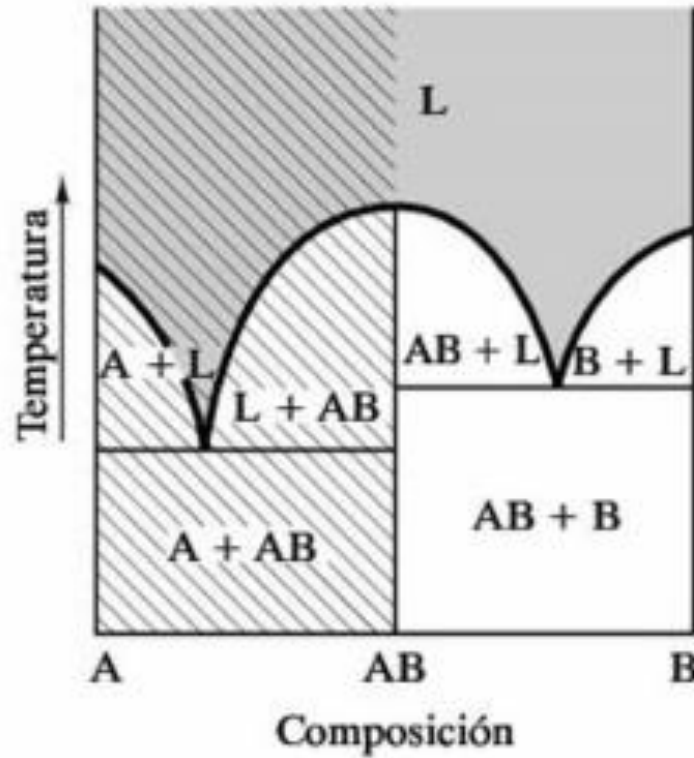


Fuente: (Shackerlford, James, 2005)

Estos diagramas son equivalentes a dos diagramas eutécticos adyacentes del tipo II. Para simplificar el análisis no se toma en cuenta la posibilidad de que exista solubilidad en estado sólido, además consiste en considerar el sistema binario más pequeño asociado con la composición total que se pretende estudiar y prescindir del resto (Shackerlford, James, 2005). Este tipo de diagrama puede considerarse como uno general ya que es un compendio de lo que ya se ha visto en los tipos anteriores.

Figura 41.

Análisis de la microestructura de una composición total correspondiente al sistema AB-B (solo necesario considerar dicho diagrama eutéctico)



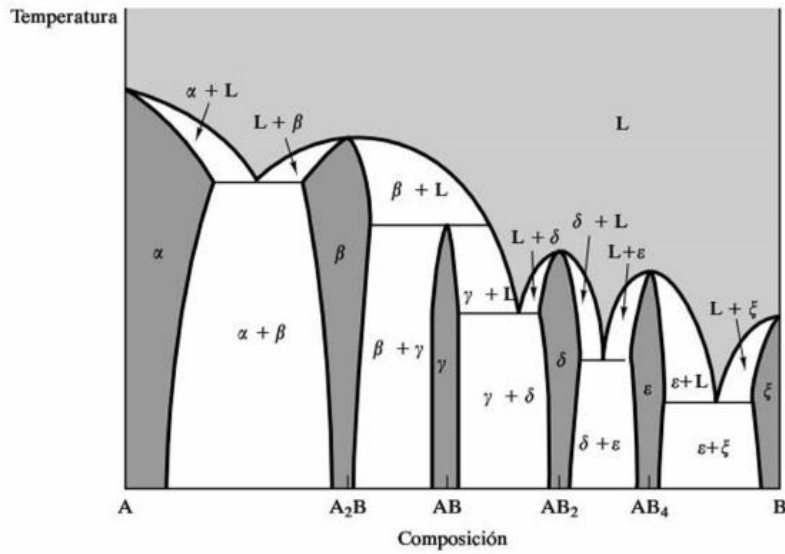
Fuente: (Shackerlford, James, 2005)

Diagramas complejos

En la siguiente figura se presenta un diagrama general de relativa complejidad con cuatro compuestos intermedios (A₂B, AB, AB₂ y AB₄) y varios ejemplos de diagramas binarios individuales.

Figura 42.

Diagrama de base de relativa complejidad

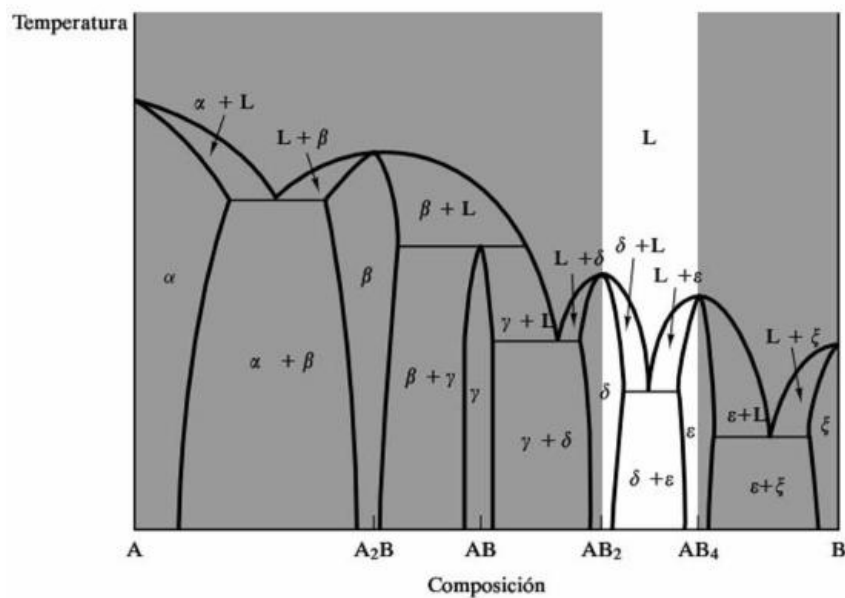


Fuente: (Shackerlford, James, 2005)

Pero, por ejemplo, para obtener las composiciones de la región en blanco de la Figura 43 solo es relevante tomar desde AB2 hasta AB4.

Figura 43.

Región para el análisis de una composición total situada



Fuente: (Shackerlford, James, 2005)

TpD → Línea de Reacción Peritética

Aleación 1

T1 → Empieza la solidificación formando cristales puros en A

Tabla 14.

Por encima de la reacción peritética

Fases	Líquido	Sólido A
Composición	60A-40B	100A
Cantidad Relativa	50%	50%

Tabla 15.

Por debajo de la reacción peritética

Fases	AmBn	Sólido A
Composición	67,5A-32,5B	100A
Cantidad Relativa	66,67%	33,33%

Tabla 16.

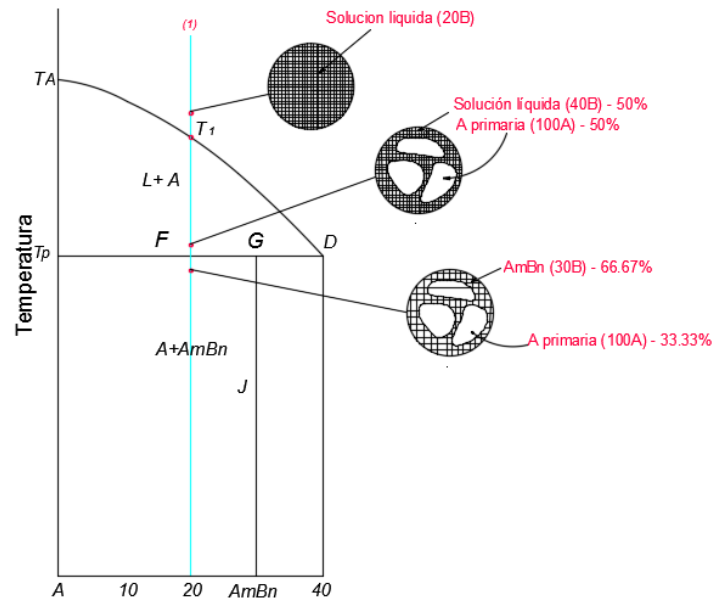
Reacción a temperatura peritética

Fases	Sólido AmBn	Sólido A
Composición	70A	100A
Cantidad Relativa	66,67%	16,67%

La reacción tiene lugar en la superficie de grano de A donde el líquido la toca. Cuando se alcanza la composición correcta la capa solidifica en AmBn rodeando cada grano de A.

Figura 46.

Microestructura de la aleación 1



Aleación 2

T2 → Cristaliza 100 A

En la línea GD

Algún líquido debe reaccionar con A para formar AmBn.

Tabla 17.

Reacción a temperatura peritética

Reacción	Líquido	Sólido A	→	AmBn
Composición	60A	100A		67,5
Reacción % L	33.33			

Cuando había 81,25% y 18,75% A → reacciona 47,92% L con el sólido A para formar 47,92 %L y 66,67% AmBn a temperatura peritética.

Temperatura Eutéctica (Solidifica a AmBn+B)

$$\%L = \frac{7.5}{50} = 15\%$$

$$\%AmBn = 85\%$$

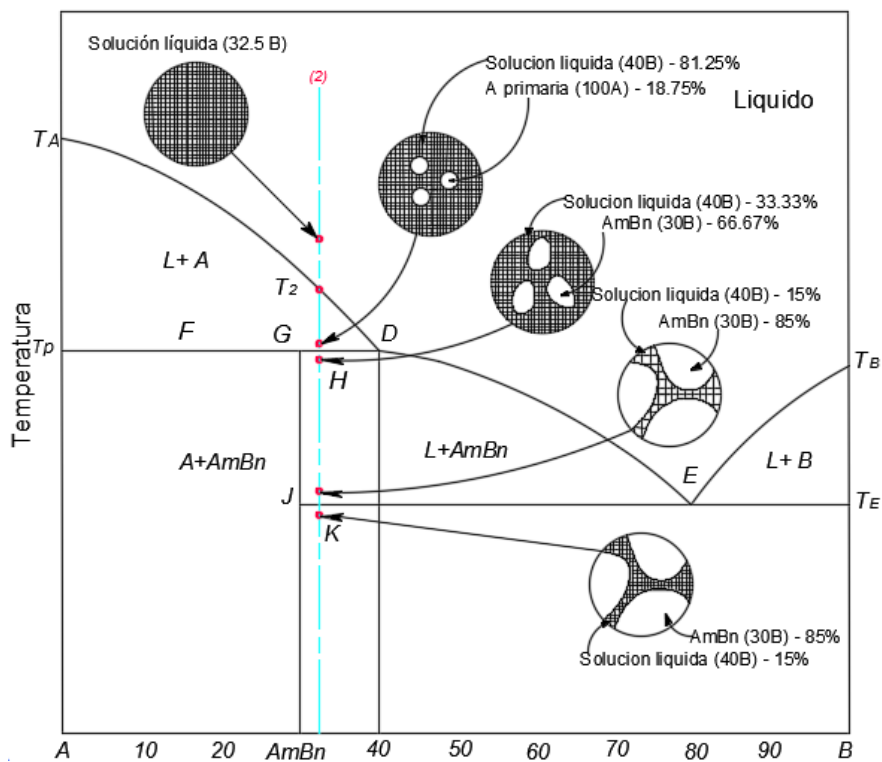
Temperatura ambiente

$$\%AmBn = 85\%$$

(Proeutectico primario rodeado del 15% de mezcla eutectica (AmBn + B))

Figura 47.

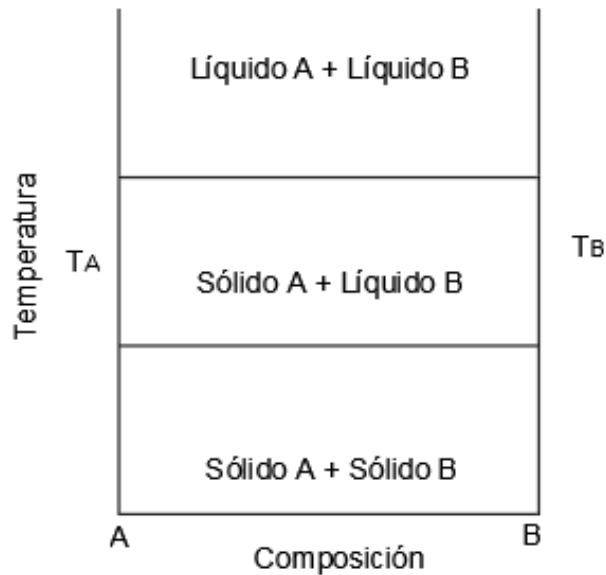
Microestructura de la aleación 2



2.4.6. Tipo VI: Componentes insolubles en estado líquido e insoluble en estado sólido

Figura 48.

Diagrama hipotético de equilibrio para dos metales



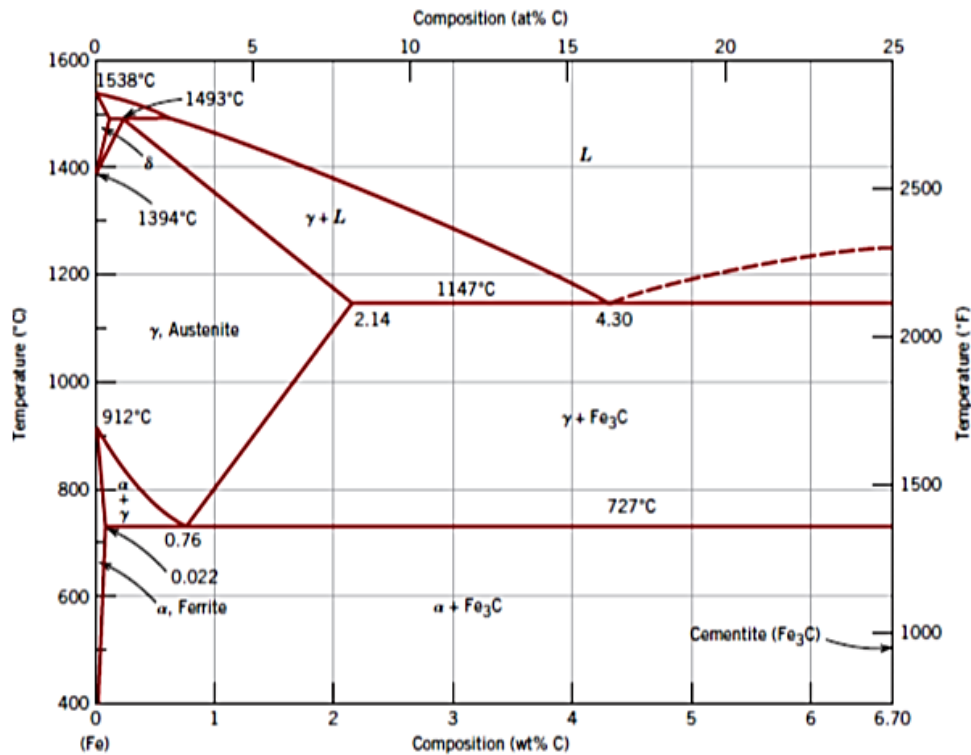
Hay muchas combinaciones de metales que son insolubles entre sí. Cuando se enfrían parecen solidificarse en sus puntos de congelación individuales en dos capas distintas, con una aguda línea de contacto y casi sin difusión. De las dos líneas horizontales, la superior representa una reacción monotéctica y la línea inferior representa una reacción eutéctica.

2.5. Diagrama hierro – carbono

Las fases presentes en las aleaciones de hierro y carbono enfriadas muy lentamente a diferentes temperaturas y con diferentes composiciones de hierro hasta llegar a 6,67% de carbono se muestran en el diagrama de fases Fe₃C de la Figura 49. Este diagrama de fases no es un verdadero diagrama de equilibrio porque el compuesto carburo de hierro (Fe₃C) que se forma no está en una fase de equilibrio real. En ciertas condiciones, el Fe₃C, que se llama cementita, se puede descomponer en las fases de hierro y carbono (grafito) que son más estables. Sin embargo, el Fe₃C es muy estable en la mayoría de las condiciones prácticas y, por lo tanto, se considerará como una fase de equilibrio.

Figura 49.

Diagrama hierro – carbono



Fuente: Newell (2016)

2.5.1. Fases sólidas en el diagrama de fases hierro – carbono

Aunque las soluciones sólidas presentes en este diagrama tienen o están designadas con letras griegas, se suelen dar otros nombres a las estructuras que se pueden encontrar en el diagrama.

Existe una reacción peritética a 1493 °C, una reacción eutéctica a 1147 °C y una reacción eutectoide a 727° C (Newell, 2016).

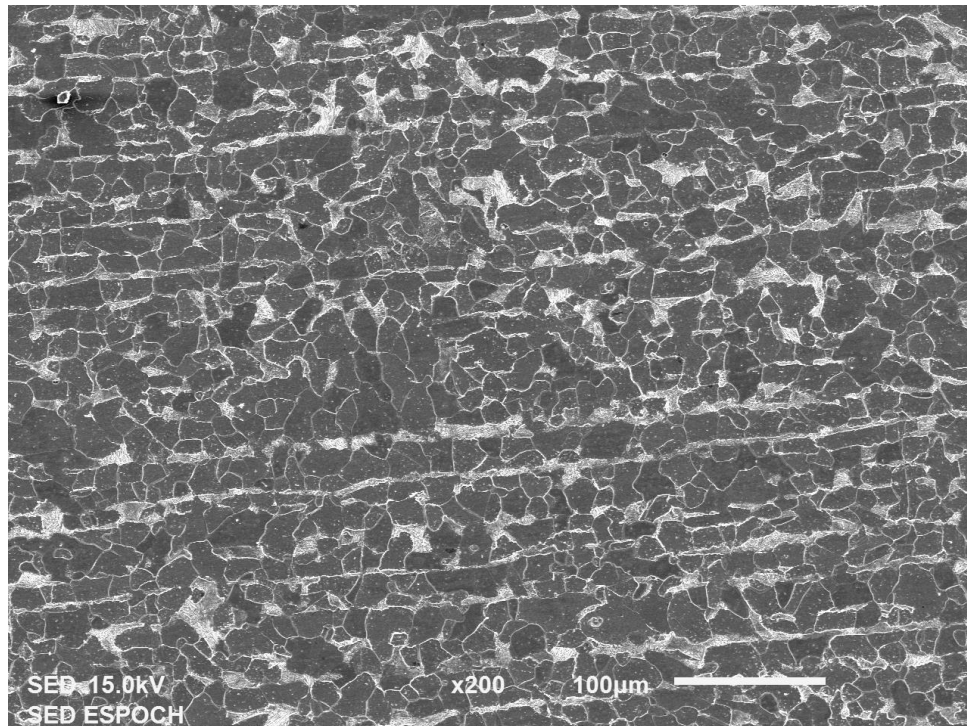
El diagrama Fe-C contiene las siguientes fases sólidas: ferrita α , austenita (γ), cementita (Fe_3C) y ferrita δ .

Ferrita (α). Esta fase es polimórfica, ya que posee diferentes estructuras cristalinas a diferentes temperaturas. A temperatura ambiente posee una estructura cristalina BCC. Como se indica en el diagrama de fases Fe-C, el carbono es sólo ligeramente soluble en ferrita α y alcanza una solubilidad

máxima de 0,022% a 723 °C. La solubilidad del carbono en ferrita α disminuye a 0,008% a 0 °C. En la fotomicrografía obtenida a partir de microscopia electrónica de barrido, se ve la ferrita de fondo gris con perlita de color blanco, en un acero dulce.

Figura 50.

Ferrita en un acero de bajo carbono



Es el constituyente más blando, dúctil y maleable de los aceros. El valor medio de sus propiedades es:

$$\sigma_t = 28 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \text{ (39,8 Ksi), } A = 35 - 40\% \text{ y } HB \leq 90$$

Donde:

σ_t = esfuerzo a la tracción

A = % de alargamiento

HB = dureza Brinell

Austenita (γ). La solución sólida intersticial del carbono en hierro γ se conoce con el nombre de austenita. La austenita tiene una estructura cristalina FCC y existe entre 912 °C y 1394 °C con una solubilidad mayor de carbono que la ferrita α . La solubilidad sólida del carbono en la austenita alcanza un máximo de 2,08% a 1 148°C y disminuye a 0,8% a 723°C. Sus propiedades dependen del porcentaje de C y de los elementos de aleación:

$$HB = 300; HRC = 40; \sigma_t = 88 \text{ a } 105 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} (125 - 149 \text{ Ksi}), \text{ y } A = 30 \%$$

Una de las formas de encontrar este constituyente a temperatura ambiente es con la introducción de elementos aleantes como níquel o manganeso, que son elementos estabilizadores de la austenita, reduciendo la temperatura eutectoide incluso hasta la temperatura ambiente. (Ejemplo: acero inoxidable austenítico 304).

- **Cementita (Fe_3C).** El compuesto intermetálico Fe_3C se llama carburo de hierro o comúnmente cementita. Tiene límites de solubilidad insignificantes y una composición de 6,67% de carbono C y 93,3% Fe. La cementita es un compuesto duro y frágil. Se estima que tenga una resistencia tensil de $\sigma_t = 228 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$ (324 Ksi).
- **Esferoidita (Cementita globular).** Esta estructura se obtiene en los aceros por medio del recocido de globulización o por revenidos a altas temperaturas (cerca de A1). En estos tratamientos no se forma la perlita. Estructuralmente está formada por glóbulos de cementita en una matriz de ferrita. Es la estructura más blanda que se obtiene para una determinada composición. Sus propiedades dependen del porcentaje de C y del tamaño de los glóbulos. Se puede deducir aproximadamente que la dureza Brinell de esta estructura es:

$$HB = 90 + 100C \quad (51)$$

Donde:

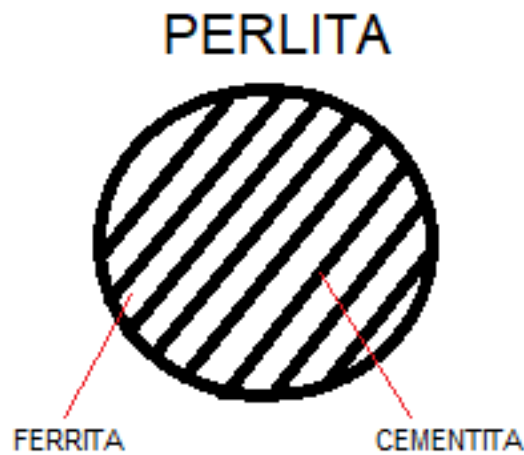
$$HB = \text{Dureza Brinell}$$

$$C = \% \text{ de carbono del acero}$$

- **Ferrita (δ).** La solución sólida intersticial de carbono en hierro δ se llama ferrita δ . Tiene una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (BCC) igual que la ferrita α , pero con una constante de red más alta (longitud de la celda cubica unitaria). La solubilidad sólida máxima del carbono en la ferrita δ es de 0,09% a 1 465 °C.
- **Perlita.** Es una mezcla fina entre placas de cementita y ferrita. Contiene aproximadamente un 87 % de ferrita y un 13% de cementita.

Figura 51.

Esquema de la perlita

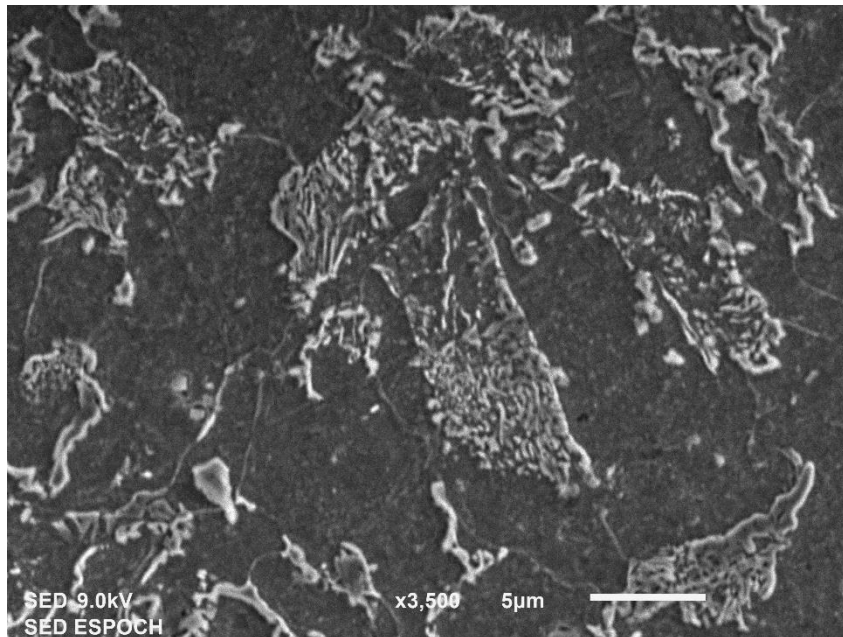


Es usual distinguir 3 tipos de perlita: gruesa, media y fina, esto no significa que el tamaño de grano es mayor, a lo contrario especifica el espesor entre laminas contiguas (ferrita + cementita). Las mejores propiedades mecánicas se obtienen con perlita fina (esfuerzo de fluencia, dureza) mientras que la perlita gruesa aporta con mayor ductilidad.

En la fotomicrografía obtenida a partir de microscopia electrónica de barrido, se ve la perlita (marcas blancas) en una matriz ferrítica. Las franjas blancas es cementita y las franjas grises es ferrita.

Figura 52.

Perlita (blanco) en una matriz de ferrita, un acero de bajo carbono



2.5.2. Reacciones invariantes en el diagrama de fases Fe-C

- **Reacción peritética**

En el punto de reacción peritética, el líquido con 0,53% C se combina con ferrita δ de 0,09% C para formar austenita γ de 0,17% C. Esta reacción, ocurre a 1495 °C. La ferrita δ es una fase de alta temperatura y, por lo tanto, no se encuentra en los aceros al carbono simples a temperaturas más bajas (Barreiro, 2002).

- **Reacción eutéctica**

En el punto de reacción eutéctica, el líquido de 4,3 por ciento forma austenita γ de 2,08% C y el compuesto intermetálico Fe_3C (cementita), que contiene 6,67% C. Esta reacción, ocurre a 1148 °C. Esta reacción no se produce en los aceros al carbón simples porque su contenido de carbono es demasiado bajo.

- **Reacción eutectoide**

En el punto de reacción eutectoide, la austenita sólida de 0,8% C produce ferrita alfa con 0,022% C y Fe₃C (cementita) que contiene 6,67% C. Esta reacción, ocurre a 723 °C. Esta reacción eutectoide, que se produce íntegramente en estado sólido, es importante para algunos tratamientos térmicos de aceros al carbono simples.

Un acero al carbono simple que contiene 0,8% C se conoce como acero eutectoide porque cuando la austenita de esta composición es enfriada lentamente a menor temperatura de la eutectoide se forma una estructura alterna de ferrita α y Fe₃C. Cuando un acero al carbono simple contiene menos de 0,8% C se llama acero hipoeutectoide, y si el acero contiene más de 0,8% C se le llama acero hipereutectoide.

Enfriamiento lento del acero.

Aleación eutectoide con 0,8% C

- a) La aleación de composición 0,8 %C tiene la microestructura austenítica indicada en la Figura 53. Al enfriar no ocurre ningún cambio hasta llegar a la temperatura eutectoide (727 °C).
- b) Por debajo de esta temperatura la austenita se transforma, la austenita de composición 0,8 %C forma ferrita, con bajo contenido en carbono (0,022 %C) y Fe₃C con un contenido de 6,7 %C. Este cambio de fase necesita la difusión del carbono porque las tres fases tienen distintas composiciones.

Figura 53.

Representación esquemática de las microestructuras de un acero eutectoide de composición (0,8 %C)

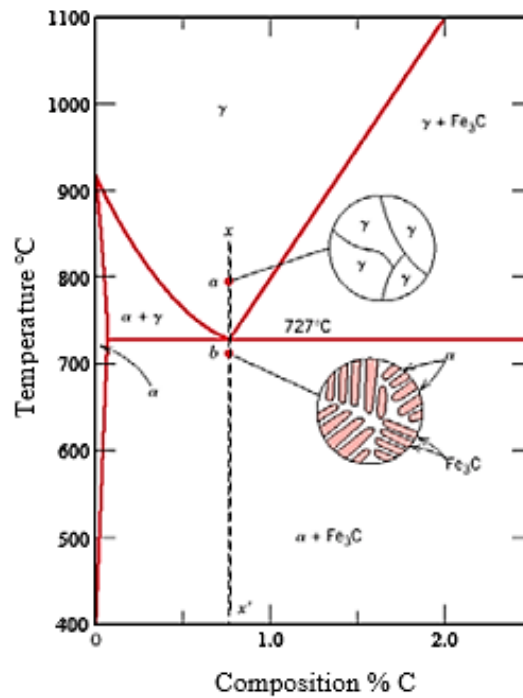
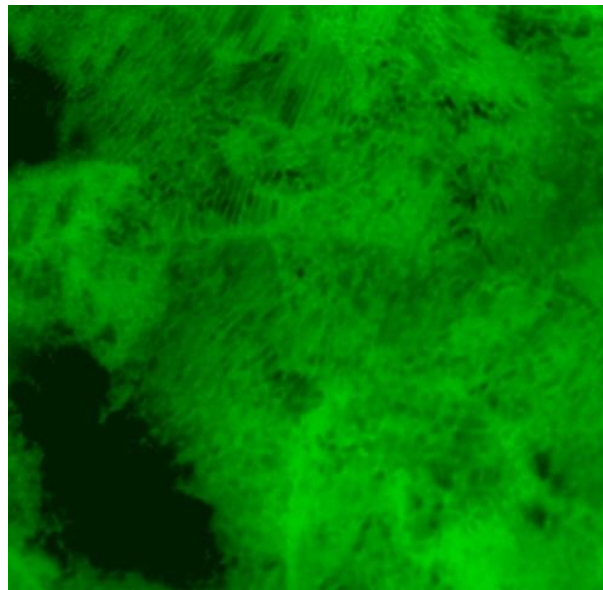


Figura 54.

Microestructura perlítica de un acero eutectoide mostrando laminas alternas de ferrita (fase oscura) y Cementita (laminas más delgadas verdes). 400X. atacada químicamente con nital al 2%



Aleación hipoeutectoide con Co % de Carbono

- a) Los granos de austenita que contienen Co% de carbono disuelto en la estructura reticular FCC. No existen mayores cambios hasta que se cruza la línea de temperatura crítica superior (A3) donde la estructura cristalina cambia de FCC a BCC (cambio alotrópico).
- b) La ferrita comienza a formarse en los límites de grano de la austenita. Los átomos de carbono comienzan a salir de la ferrita ya que esta puede disolver muy poco carbono. Como resultado, este carbono migra a la austenita que se enriquece en carbono a medida que la temperatura se reduce.
- c) Continuando con el enfriamiento lento se alcanza la línea de la temperatura crítica inferior (A1). Esta es la temperatura mínima a la que el hierro FCC puede existir en condiciones de equilibrio. A esta temperatura la austenita restante experimenta una reacción eutectoide. La ferrita de la perlita se denomina ferrita eutectoide y la ferrita formada sobre la T_e (temperatura eutectoide) se denomina ferrita proeutectoide o primaria.

La estructura resultante muestra una microestructura compuesta de perlita (α eutectoide y Fe_3C) y ferrita proeutectoide (Figura 55).

Figura 55.

Representación esquemática de las microestructuras de un acero hipoeutectoide de composición C_0 (menor de 0,8%C) a medida que se enfría desde la fase austenítica hasta por debajo de la temperatura eutectoide

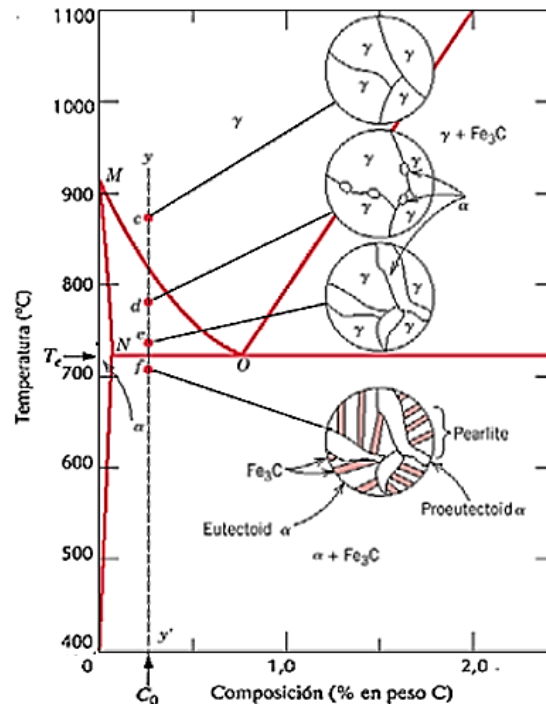


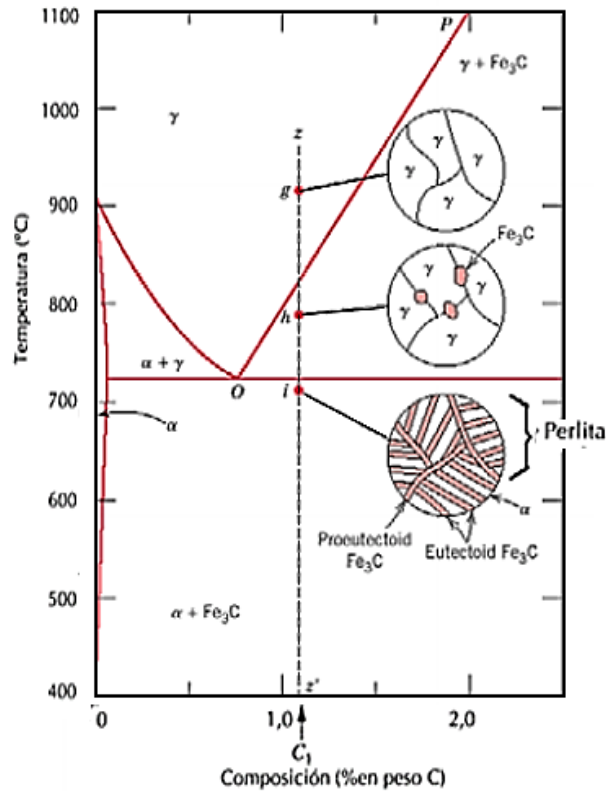
Figura 56.

Fotomicrografía de un acero 0,25%C con una microestructura constituida por perlita (oscuro) y ferrita proeutectoide (Blanco). 100X atacada químicamente con Nital al 2%.



Figura 57.

Representación esquemática de las microestructuras de un acero hipereutectoide de composición Co (mayor de 0,8%C) a medida que se enfría desde la fase austenítica hasta por debajo de la temperatura eutectoide.

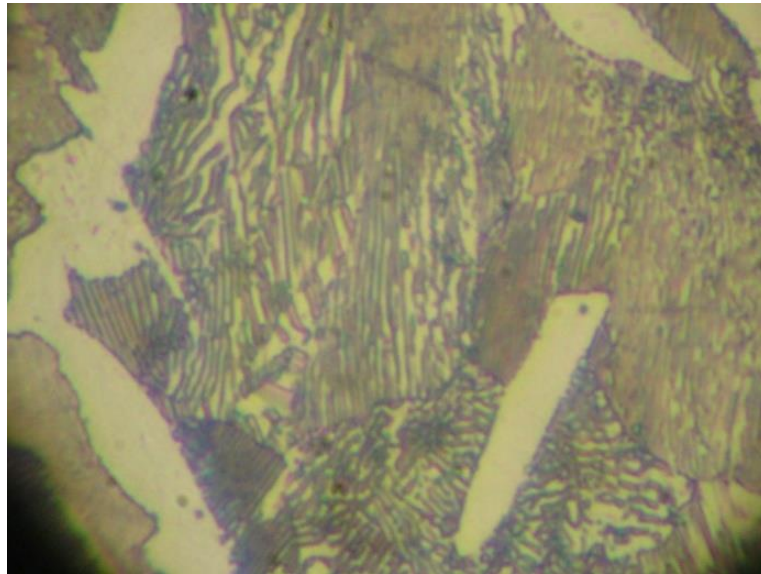


Aleación hipereutectoide con 1% de carbono

- d) Granos de austenita que contienen 1% de carbono disuelto intersticialmente en la estructura FCC. No existen mayores cambios hasta que se cruza la línea de temperatura crítica superior (Acm).
- e) La máxima cantidad de carbono que puede disolverse en austenita disminuye con la temperatura. El exceso de carbono que no se disuelve en la austenita forma una red de cementita en las fronteras del grano (Cementita proeutectoide).
- f) Finalmente, la microestructura resultante contendrá perlita (Fe_3C eutectoide y α) y cementita proeutectoide (Figura 56).

Figura 58.

Microestructura de un acero con 1,4% C formado por cementita proeutectoide blanca reticulada alrededor de las colonias de perlita a 1000X



2.6. Problemas resueltos de diagramas de fase

- (1) Un acero al carbono simple hipereutectoide, se ha enfriado en condiciones de equilibrio y se obtiene un porcentaje de 10,42% de cementita eutectoide a temperatura ambiente, suponiendo que no hay cambio con el enfriamiento desde una temperatura ligeramente inferior desde una temperatura eutectoide hasta la temperatura ambiente, ¿cuál es la cantidad de carbono del acero?

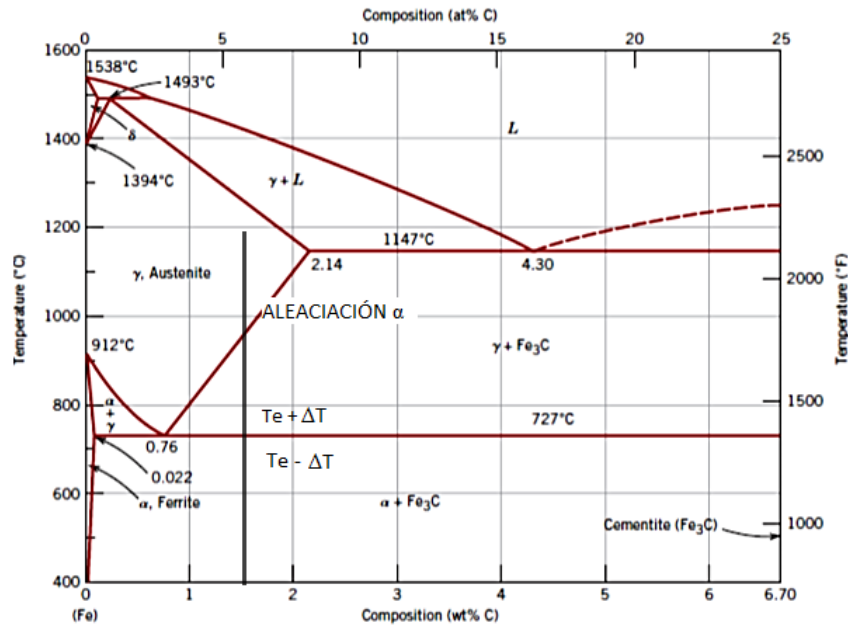
Solución:

Como se trata de un acero y hay presencia de cementita eutectoide se debe prever que la cantidad de carbono presente en esta aleación se encuentra entre el 0,76 y 2,14.

La aleación que se está buscando es α , se analiza a una temperatura apenas inferior a T_e es decir $(T_e - \Delta T)$.

Figura 59.

Análisis de la aleación alfa en $T \pm \Delta T$



El porcentaje de cementita total vendría dado por:

$$\%Fe_3C = \frac{C_\alpha - C_A}{C_{Fe_3C} - C_A} \quad (52)$$

$$\%Fe_3C = \frac{C_\alpha - 0,022}{6,70 - 0} * 100$$

Se debe tomar en cuenta que este valor sería el total, necesitamos encontrar el valor de la cementita eutectoide, es decir la que se ha formado al atravesar T_e . Sabemos que de acuerdo con la reacción eutectoide:

$$\%Fe_3C_{total} = \%Fe_3C_{proeutectoide} + \%Fe_3C_{eutectoide} \quad (53)$$

Hace falta el porcentaje de cementita proeutectoide que se calcula mediante la regla de la palanca:

$$\%Fe_3C_{proeutectoide} = \frac{C_\alpha - C_A}{C_{Fe_3C} - C_A} \quad (54)$$

$$\%Fe_3C_{proeutectoide} = \frac{C_\alpha - 0,76}{6,70 - 0,76} * 100$$

Tomando en cuenta el valor proporcionado por el enunciado donde:

$$\%Fe_3C_{eutectoide} = 10,42\%$$

Entonces:

$$\frac{C_\alpha - 0,022}{6,70 - 0} * 100 = \frac{C_\alpha - 0,76}{6,70 - 0,76} * 100 + 10,42$$

$$\frac{C_\alpha - 0,022}{6,70} = \frac{C_\alpha - 0,76}{6,70 - 0,76} + 0,1042$$

Resolviendo la ecuación se tiene que:

$$C_\alpha = 1,0715$$

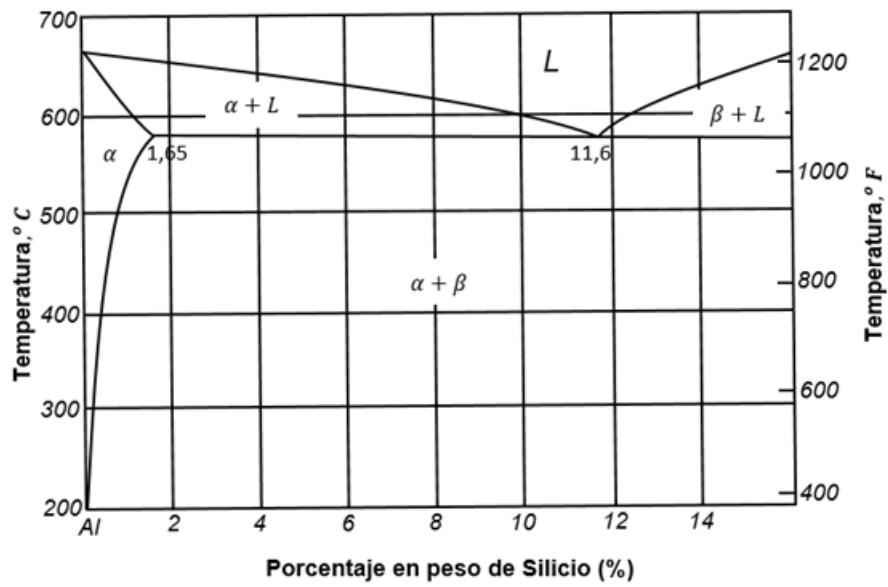
Por lo que el acero tiene un 1,07% en peso de Carbono.

Con este ejercicio, se adquiere la destreza de encontrar un aproximado del porcentaje de carbono, a partir de datos como la cementita eutectoide en un acero hipereutectoide, esto familiariza al lector, para una posterior caracterización de un acero.

- (2)** En el ejercicio se representa una porción del diagrama de fase Aluminio-Silicio, realice el análisis de una aleación que representa el 1% Si, una aleación hipoeutética que tiene 5% Si y una aleación eutética, hasta la temperatura ambiente. (Porcentajes de fase, microestructuras y composiciones).

Figura 60.

Diagrama de fase Al-Si

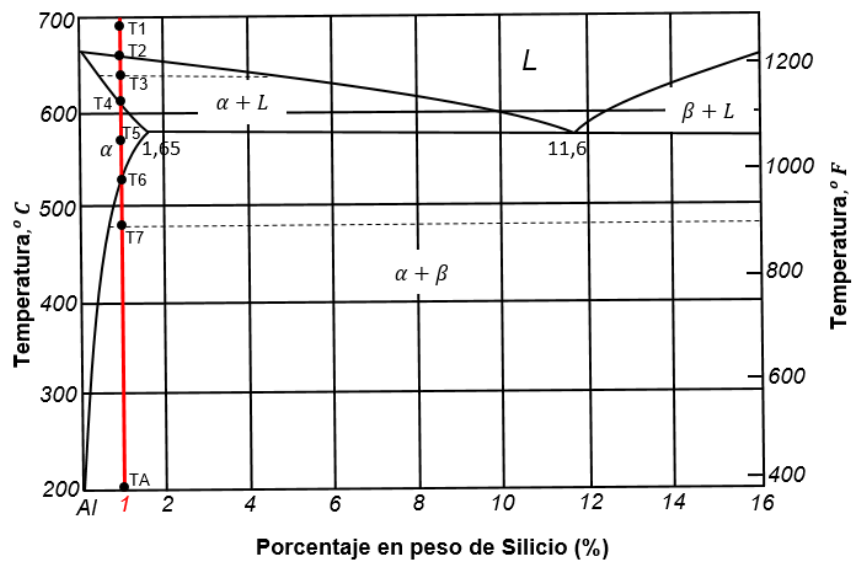


Solución:

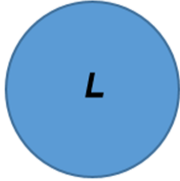
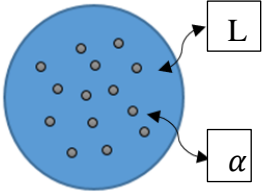
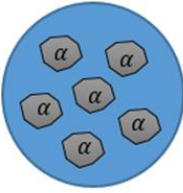
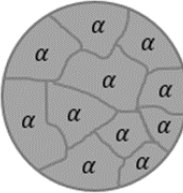
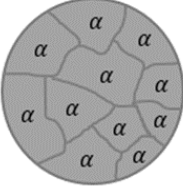
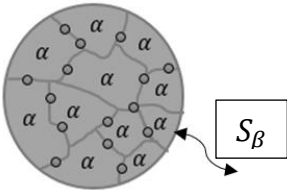
Figura 61.

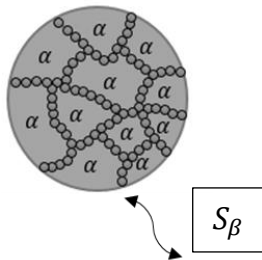
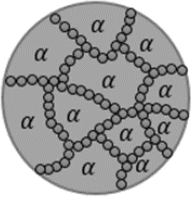
Representación del 1% Si en el diagrama Al-Si

Aleación 1%Si



Para determinar las fases se ha tomado diferentes puntos a diferentes temperaturas.

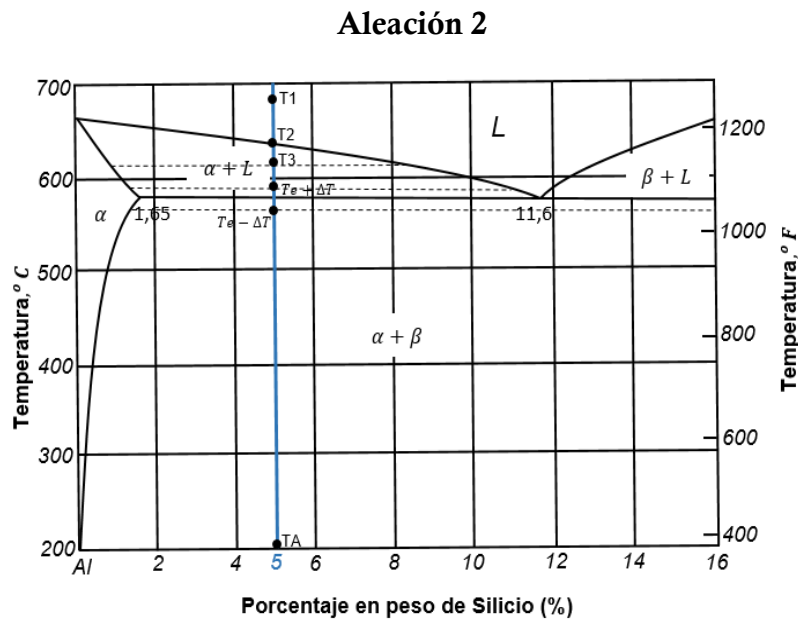
TEMPERATURAS	FASES (%)	COMPOSICIÓN (%)	MICROESTRUCTURAS
T1	Líquido 100%	1% Si 99% Al	
T2 (Al llegar a la línea liquidus su microestructura contiene 100% líquido, y se empiezan a formar núcleos de sólido α)	Líquido 100%	1% Si 99% Al	
T3 (Tenemos una zona bifásica donde los núcleos de sólido α crecen para formar cristales)	$\%L = \frac{1 - 0,4}{4,5 - 0,4} * 100 = 14,63$ $S_{\alpha} = \frac{4,5 - 1}{4,5 - 0,4} * 100 = 85,36$	$L \begin{cases} 4,5\% Si \\ 95,5\% Al \end{cases}$ $S_{\alpha} \begin{cases} 0,4\% Si \\ 99,6\% Al \end{cases}$	
T4 (Al llegar a la línea solidus su microestructura contiene 100% de sólido α)	Sólido α 100%	1% Si 99% Al	
T5 (Microestructura al 100% S_{α})	Sólido α 100%	1% Si 99% Al	
T6 (Al llegar a la línea solvus empiezan a salir los precipitados de sólido β en los límites de grano)	Sólido α 100%	$\begin{cases} 1\% Si \\ 99\% Al \end{cases}$	

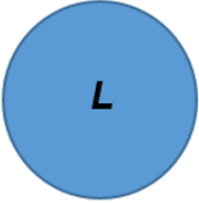
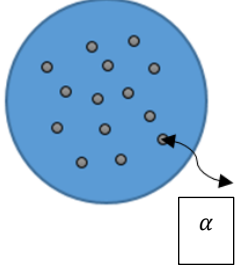
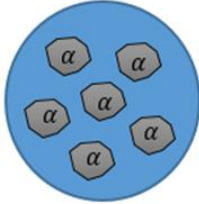
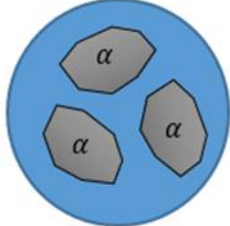
TEMPERATURAS	FASES (%)	COMPOSICIÓN (%)	MICROESTRUCTURAS
T7 (Los precipitados de sólido β se han posicionado por completo en los límites de grano)	$S_{\alpha} = \frac{16 - 1}{16 - 0,6} * 100 = 97,40$ $S_{\beta} = \frac{1 - 0,6}{16 - 0,6} * 100 = 2,59$	$S_{\alpha} \left\{ \begin{array}{l} 0,6\% Si \\ 99,4\% Al \end{array} \right.$ $S_{\beta} \{16\% Si$	
TA (No cambia la microestructura)	$S_{\alpha} = \frac{16 - 1}{16 - 0} * 100 = 93,75$ $S_{\beta} = 6,25\%$	$S_{\alpha} \{100\% Al$ $S_{\beta} \{16\% Si$	

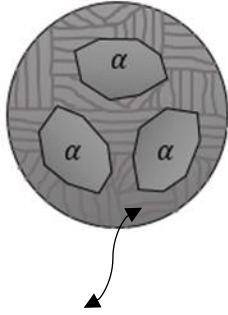
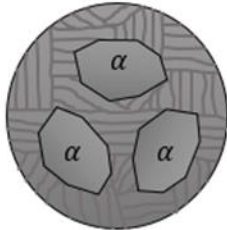
En este punto la fase β es muy frágil y es propenso a sufrir fractura a través del límite de grano.

Figura 62.

Representación del 5% Si en el diagrama Al-Si



TEMPERATURAS	FASES (%)	COMPOSICIÓN (%)	MICROESTRUCTURAS
T1 (Microestructura contiene 100% líquido)	Líquido 100%	$\begin{cases} 5\% Si \\ 95\% Al \end{cases}$	
T2 (Al llegar a la línea liquidus su microestructura contiene 100% líquido, y se empiezan a formar núcleos de sólido α)	Líquido 100%	$\begin{cases} 5\% Si \\ 95\% Al \end{cases}$	
T3 (Tenemos una zona bifásica donde los núcleos de sólido α crecen para formar cristales)	$\%L = \frac{5 - 0,8}{8,4 - 0,8} * 100 = 55,26$ $\%S_{\alpha} = \frac{8,4 - 5}{8,4 - 0,8} * 100 = 44,73$	$L \begin{cases} 8,4\% Si \\ 91,6\% Al \end{cases}$ $S_{\alpha} \begin{cases} 0,8\% Si \\ 95,5\% Al \end{cases}$	
$T_e + \Delta T$ (Los cristales de sólido α crecen, el porcentaje de líquido disminuye haciéndose más rico en Silicio y disminuyendo el porcentaje de Aluminio, por el contrario, el porcentaje del sólido α aumenta haciéndose menos rico en Silicio y más rico en Aluminio)	$\%L = \frac{5 - 1,65}{11,6 - 1,65} * 100 = 33,66$ $(\%S_{\alpha})' = \frac{11,6 - 5}{11,6 - 1,65} * 100 = 66,33$	$L \begin{cases} 11,6\% Si \\ 88,4\% Al \end{cases}$ $S_{\alpha} \begin{cases} 1,65\% Si \\ 98,35\% Al \end{cases}$	

TEMPERATURAS	FASES (%)	COMPOSICIÓN (%)	MICROESTRUCTURAS
<p>$T_e - \Delta T$ (El líquido reacciona y se solidifica formando una mezcla eutéctica)</p>	$\%S_\alpha = \frac{16 - 5}{16 - 1,65} * 100 = 76,65$ $\%S_\beta = \frac{5 - 1,65}{16 - 1,65} * 100 = 23,34$ $S_{atotal} = (\%S_\alpha)' + S_{aeuctectica}$ $76,65\%S_{\alpha T} - 66,33\%S_{\alpha eut} =$ $10,32\%S_{\alpha proeu}$ <p>(Mezcla Eutéctica → 33,66%)</p>	$S_\alpha \begin{cases} 1,65\% Si \\ 98,35\% Al \end{cases}$ $S_\beta \{16\% Si\}$	 <p>Mezcla Eutéctica</p>
<p>TA (No cambia la microestructura)</p>	$\%S_\alpha = \frac{16 - 5}{16 - 0} * 100 = 68,75$ $\%S_\beta = \frac{5 - 0}{16 - 0} * 100 = 31,25$	$S_\alpha \{100\% Al\}$ $S_\beta \{16\% Si\}$	

La Microestructura real observada en el microscopio de una aleación 8% Silicio

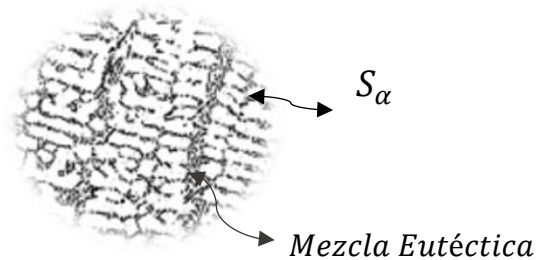
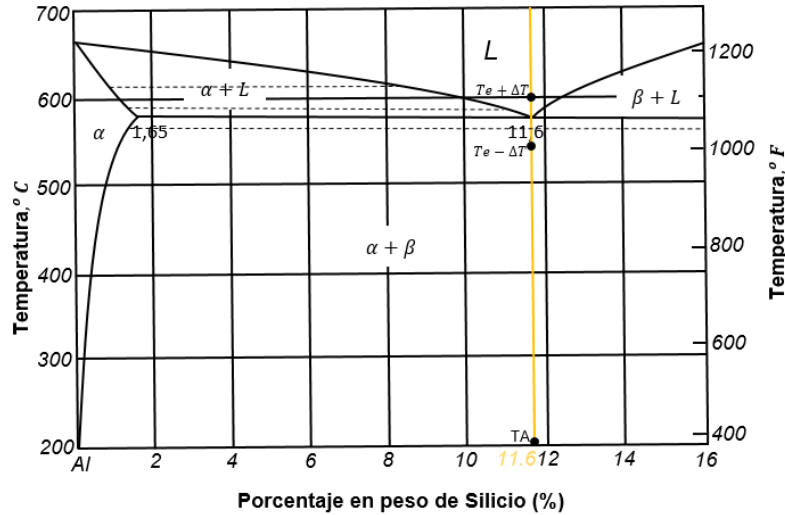


Figura 63.

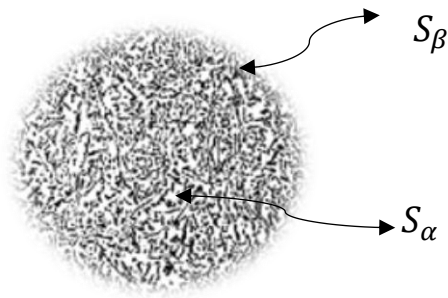
Representación de una aleación eutéctica en el diagrama Al-Si

Aleación 3



TEMPERATURAS	FASES (%)	COMPOSICIÓN (%)	MICROESTRUCTURAS
$T_e + \Delta T$ (Microestructura contiene 100% L)	Líquido 100%	$L \begin{cases} 11,6\% Si \\ 88,4\% Al \end{cases}$	
$T_e - \Delta T$ (El líquido reacciona y se solidifica formando la mezcla eutéctica)	Mezcla eutéctica 100% $\%S_\alpha = \frac{16 - 11,6}{16 - 1,65} * 100 = 30,66$ $\%S_\beta = \frac{11,6 - 1,65}{16 - 1,65} * 100 = 69,33$	$S_\alpha \begin{cases} 1,65\% Si \\ 98,35\% Al \end{cases}$ $S_\beta \begin{cases} 16\% Si \end{cases}$	
TA (No cambia la microestructura)	$\%S_\alpha = \frac{16 - 11,6}{16 - 0} * 100 = 27,5$ $\%S_\beta = \frac{11,6 - 0}{16 - 0} * 100 = 72,5$	$S_\alpha \begin{cases} 100\% Al \end{cases}$ $S_\beta \begin{cases} 16\% Si \end{cases}$	

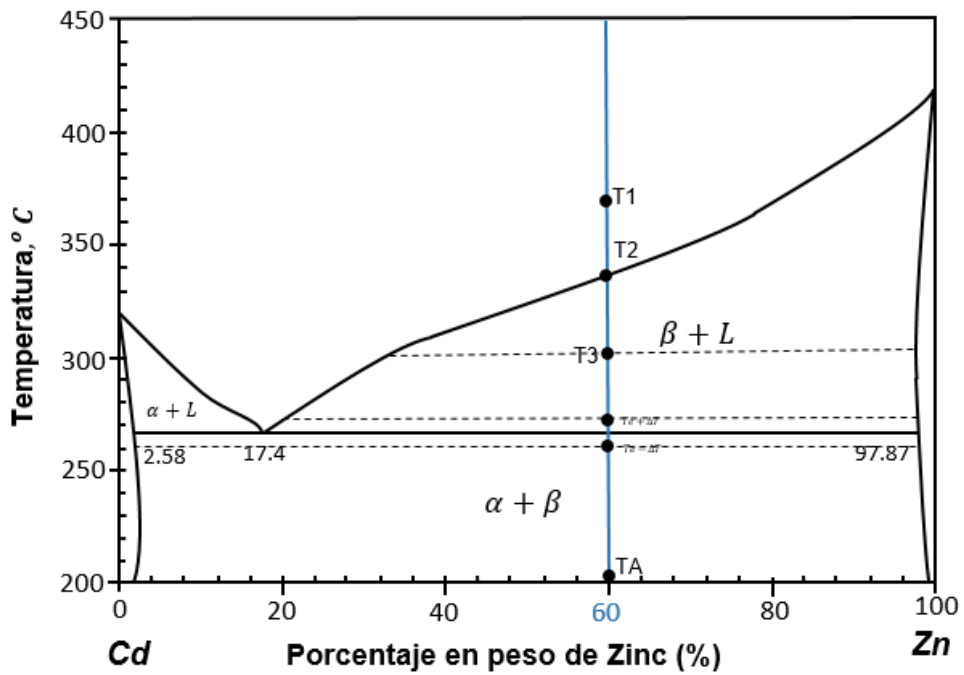
Microestructura real observada en el microscopio de una aleación 12% Silicio.



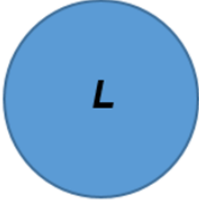
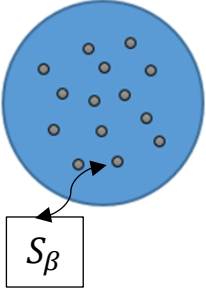
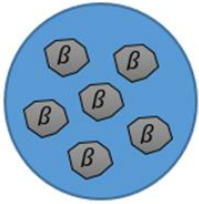
- (3) En el siguiente diagrama de fase Cadmio-Zinc, realice el análisis de una aleación que representa una aleación hipereutéctica que tiene 40% Cd hasta la temperatura ambiente. (Porcentajes de fase, microestructuras y composiciones).

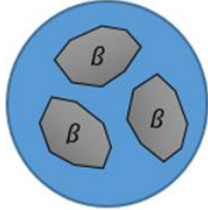
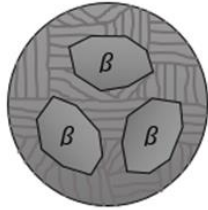
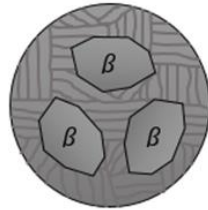
Figura 64.

Diagrama de fase Cd-Zn



Solución:

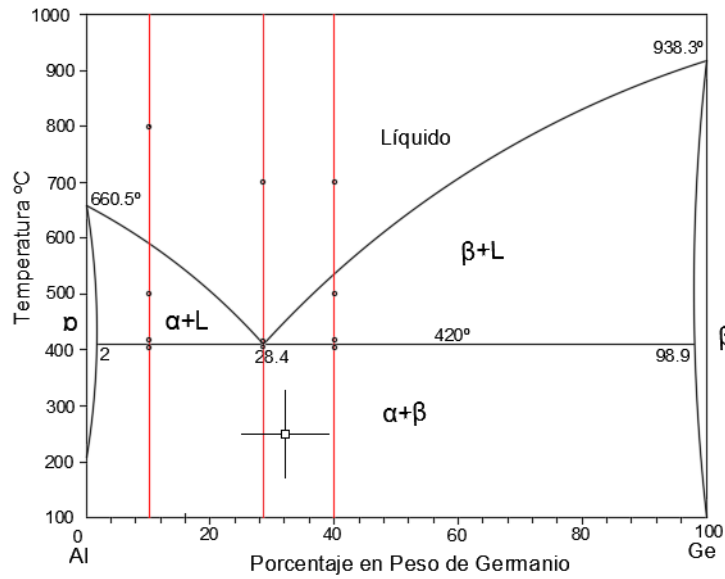
Temperaturas	Fases (%)	Composición (%)	Microestructuras
T1 (Microestructura contiene 100% líquido)	Líquido 100%	$L \begin{cases} 60\% \text{ Zn} \\ 40\% \text{ Cd} \end{cases}$	
T2 (Al llegar a la línea liquidus su microestructura contiene 100% líquido, y se empiezan a formar núcleos de sólido β)	Líquido 100%	$L \begin{cases} 60\% \text{ Zn} \\ 40\% \text{ Cd} \end{cases}$	
T3 (Tenemos una zona bifásica donde los núcleos de sólido β crecen para formar cristales)	$\%L = \frac{97 - 60}{97 - 35} * 100 = 59,67$ $\%S_{\beta} = \frac{60 - 35}{97 - 35} * 100 = 40,33$	$L \begin{cases} 35\% \text{ Zn} \\ 65\% \text{ Cd} \end{cases}$ $S_{\beta} \begin{cases} 97\% \text{ Zn} \\ 3\% \text{ Cd} \end{cases}$	

Temperaturas	Fases (%)	Composición (%)	Microestructuras
<p>$T_e + \Delta T$ (Los cristales de sólido β crecen, el porcentaje de líquido disminuye haciéndose más rico en Zinc y disminuyendo el porcentaje de Cadmio, por el contrario el porcentaje del sólido β aumenta haciéndose menos rico en Zinc y más rico en Cadmio)</p>	$\%L = \frac{97,87 - 60}{97,87 - 17,4} * 100 = 47,06$ $\%S_\beta = \frac{60 - 17,4}{97,87 - 17,4} * 100 = 52,94$	$L \begin{cases} 17,4\% Zn \\ 82,6\% Cd \end{cases}$ $S_\beta \begin{cases} 97,87\% Zn \\ 2,13\% Cd \end{cases}$	
<p>$\%T_e - \Delta T$ (El líquido reacciona y se solidifica formando una mezcla eutéctica)</p>	$\%S_\beta = \frac{60 - 2,58}{97,87 - 2,58} * 100 = 60,28$ $\%S_\alpha = \frac{97,87 - 60}{97,87 - 2,58} * 100 = 39,74\%S_\alpha$ $S_{\beta total} = (\%S_\beta)' + S_{\beta eutectoide}$	$S_\beta \begin{cases} 97,87\% Zn \\ 2,13\% Cd \end{cases}$ $S_\alpha \begin{cases} 2,58\% Zn \\ 97,42\% Cd \end{cases}$	
	$60,28\%S_{\beta total} - 52,94\%S_{\beta proeu} =$ $7,34\%S_{\beta eutectico}$ <p style="text-align: center;">(Mezcla Eutéctica →</p>		
	$47,06\% =$		
<p>TA (No cambia la microestructura)</p>	$\%S_\beta = \frac{60 - 2,5}{99,5 - 2,5} * 100 = 59,27$ $\%S_\alpha = \frac{99,5 - 60}{99,5 - 2,5} * 100 = 40,72$	$S_\beta \begin{cases} 99,5\% Zn \\ 0,5\% Cd \end{cases}$ $S_\alpha \begin{cases} 2,5\% Zn \\ 97,5\% Cd \end{cases}$	

(4) Con el diagrama de fase Al-Ge. Realice el análisis desde la fase líquida hasta la temperatura ambiente. Con una aleación al 10%, al 40% y al 28,4% de Ge. Determinar los porcentajes relativos de fase, composiciones y microestructuras.




Figura 65.


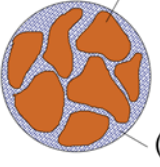
Diagrama de fase Al-Ge




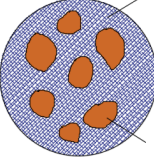
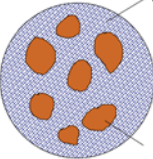
Solución:

Aleación 10% de Germanio


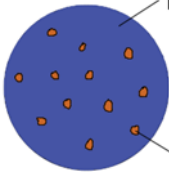
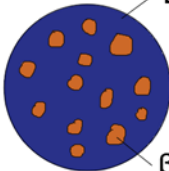
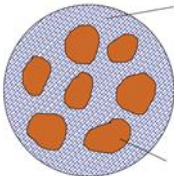
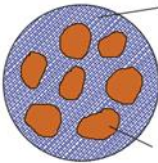
Temperaturas	Fases (%)	Microestructuras y Composición
A 800 °C	Líquido 100%	 L (Ge 10%, Al 90%)
500°C	$\% \alpha = \frac{19 - 10}{19 - 1,5} * 100 = 51,42\%$ $\% L = \frac{10 - 1,5}{19 - 1,5} * 100 = 48,57\%$	 L (Ge 19%, Al 81%) α (Ge 1.5%, Al 98.5%)
Temperatura eutética (Te +ΔT)	$\% \alpha' = \frac{28,4 - 10}{28,4 - 2} * 100 = 69,7\%$ $\% L = \frac{10 - 2}{28,4 - 2} * 100 = 30,30\%$	 L (Ge 28.4%, Al 71.6%) α' (Ge 2%, Al 98%)

Temperaturas	Fases (%)	Microestructuras y Composición
Temperatura eutética (Te- ΔT)	$\% \alpha = \frac{98,9 - 10}{98,9 - 2} * 100 = 91,74\%$ $\% \beta = \frac{10 - 2}{98,9 - 2} * 100 = 8,26\%$	 <p>α' (Ge 98.9%, Al 1.1%) ($\beta + \alpha$)(Ge 2%, Al 98%)</p>
A 25°C	$\% \alpha = \frac{99,5 - 10}{99,5 - 0,5} * 100 = 90,4\%$ $\% \beta = \frac{10 - 0,5}{99,5 - 0,5} * 100 = 9,6\%$	 <p>α' (Ge 99.5%, Al 0.5%) ($\beta + \alpha$)(Ge 0.5%, Al 99.5%)</p>

Aleación 28,4% de Germanio

Temperaturas	Fases (%)	Microestructuras y Composición
A 700°C	Liquido 100%	 <p>L (Ge 28.4%, Al 71.6%)</p>
Temperatura eutética (Te- ΔT)	$\% \alpha = \frac{98,9 - 28,4}{98,9 - 2} * 100 = 72,7\%$ $\% \beta = \frac{28,4 - 2}{98,9 - 2} * 100 = 27,3\%$	 <p>α (Ge 2%, Al 98%) β (Ge 98.9%, Al 1.1%)</p>
A 25°C,	$\% \alpha = \frac{99,6 - 28,4}{99,6 - 0,02} * 100 = 71,6\%$ $\% \beta = \frac{28,4 - 0,02}{99,6 - 0,02} * 100 = 28,4\%$	 <p>α (Ge 0.02%, Al 99.98%) β (Ge 99.6%, Al 0.04%)</p>

Aleación 40% de Germanio

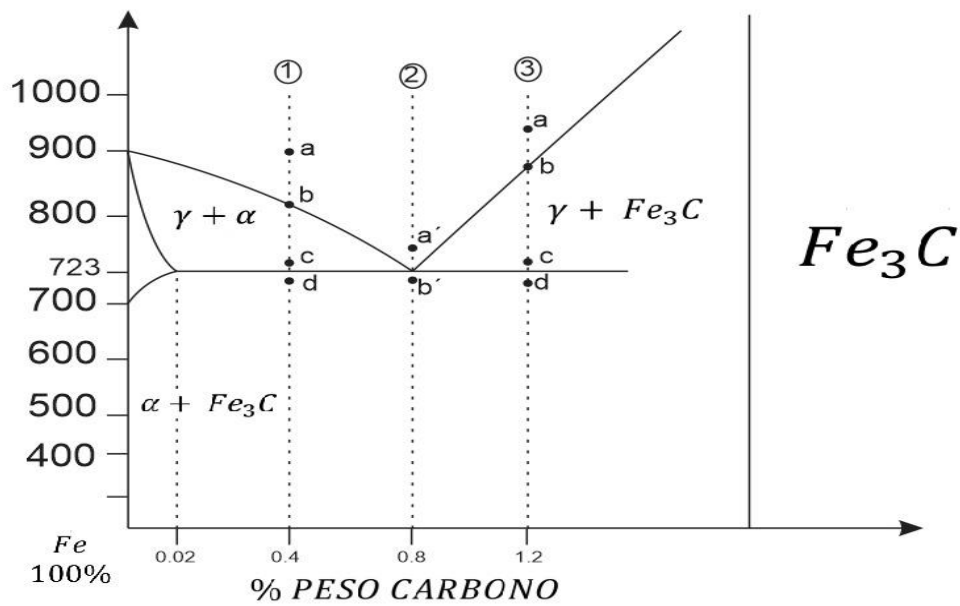
Temperaturas	Fases (%)	Microestructuras y Composición
A 700°C	Líquido 100%	 L (Ge 40%, Al 60%)
A 500°C	$\% \beta = \frac{40 - 36}{98 - 36} * 100 = 6,45\%$ $\% L = \frac{98 - 36}{98 - 36} * 100 = 93,55\%$	 L (Ge 36%, Al 64%) β (Ge 98%, Al 2%)
Temperatura eutética (ΔT +Te)	$\% L = \frac{98,9 - 40}{98,9 - 28,4} * 100 = 83,5\%$ $\% \beta' = \frac{40 - 28,4}{98,9 - 28,4} * 100 = 16,5\%$	 L (Ge 28.4%, Al 71.6%) β' (Ge 98.9%, Al 1.1%)
Temperatura eutética (Te-ΔT)	$\% \alpha = \frac{98,9 - 40}{98,9 - 2} * 100 = 60,78\%$ $\% \beta = \frac{40 - 2}{98,9 - 2} * 100 = 39,22\%$ $(\alpha + \beta) = 83,5\%$	 (α+β)(Ge 2%, Al 98%) β' (Ge 98.9%, Al 1.1%)
A 30°C	$\% \alpha = \frac{99 - 40}{99 - 1,1} * 100 = 60,27\%$ $\% \beta = \frac{40 - 1,1}{99 - 1,1} * 100 = 39,73\%$	 (α+β)(Ge 1%, Al 99%) β' (Ge 99%, Al 1%)

(5) En el diagrama de hierro carbono mostrado a continuación realice:

- El análisis de enfriamiento en condiciones de equilibrio para una aleación hipoeutectoide de 0,4% de carbono.
- una aleación eutectoide de 0,8% de carbono y para una aleación hipereutectoide de 1,2% de carbono.

Figura 66.

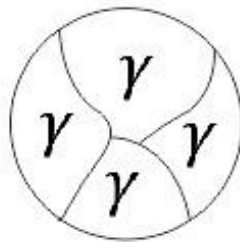
Diagrama de Fe - C



a) Aleación 1

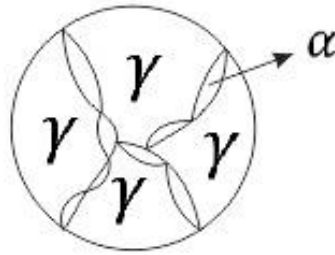
T1 Punto a

100% Austenita Acero Hipoeutectoide 0,4% de peso en carbono



T2 Punto b

Empieza la transformación de Austenita en Ferrita α (Ferrita Proeutectoide).

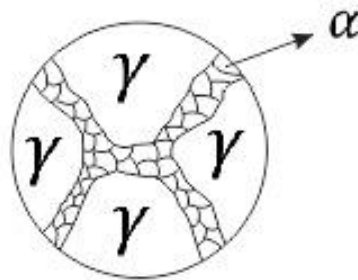


T3 Punto c Sobre Te

Acero en forma de ferrita proeutectoide

$$\alpha' = \frac{0,8-0,4}{0,8-0,02} = 0,513 \quad \gamma = \frac{20-8}{35-8} = 0,4445$$

$$\alpha' = 51,3\% \quad \gamma = 44,45\%$$



T4 Punto d Bajo Te

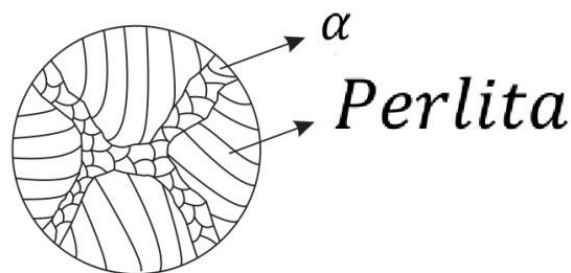
$$\alpha_{total} = \frac{6,67-0,4}{6,67-0,02} = 94,3\% \quad Fe_3C = \frac{0,4-0,02}{6,67-0,02} = 5,7$$

$$\alpha_{total} = \alpha' + \alpha_{eutectoide}$$

$$\alpha_{eutectoide} = \alpha - \alpha'$$

$$\alpha_{eutectoide} = 94,3 - 51,3 = 43\%$$

$$Perlita = \gamma = 44,45\%$$

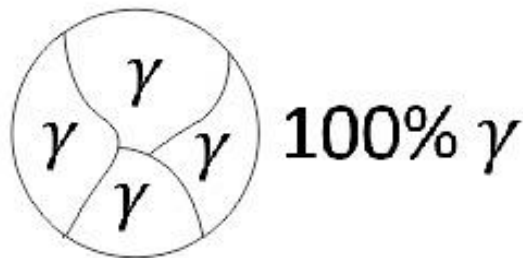


Cabe mencionar que la microestructura del acero no cambia hasta llegar a la temperatura ambiente, pero si existe una variación ligera del porcentaje de fases debido a los grados de solubilidad que cambian a menor temperatura.

b) Aleación 2

Concentración de 0,8% de carbono

Punto a' Sobre Te, Acero Eutéctico, Austenita 100%



Punto b' Bajo Te, Acero Eutéctico, 100% Perlita (Ferrita α y Cementita Fe_3C)

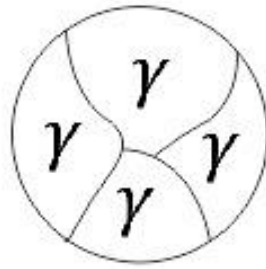


Cabe mencionar que la microestructura del acero no cambia hasta llegar a la temperatura ambiente, pero si existe una variación ligera del porcentaje de fases debido a los grados de solubilidad que cambian a menor temperatura.

c) Aleación 3

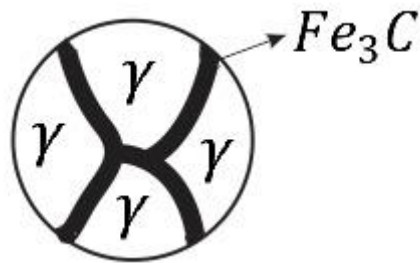
T1 Punto a

100% Austenita Acero Hipereutéctico 1,2% de peso en carbono



T2 Punto b

Empieza la transformación de Austenita en Cementita Fe_3C primaria

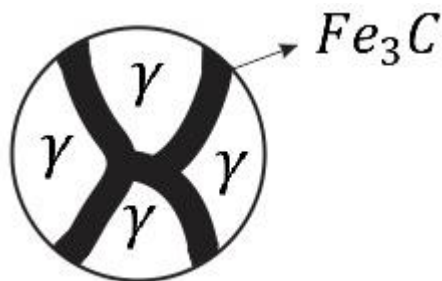


T3 Punto c Sobre Te

Formación cementita proeutectoide o primaria en los límites de grano

$$Fe_3C' = \frac{1,2-0,8}{6,67-0,8} = 0,068 \quad \gamma = \frac{6,67-1,2}{6,67-0,8} = 0,932$$

$$Fe_3C' = 6,8\% \quad \gamma = 93,2\%$$



T4 Punto d Bajo Te

La austenita se transforma en cementita más ferrita α (Perlita)

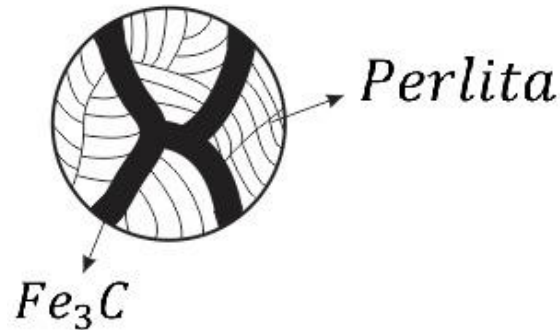
$$Fe_3C_{total} = \frac{1,2-0,02}{6,67-0,02} = 0,177 \quad \alpha = \frac{6,67-1,2}{6,67-0,02} = 0,823$$

$$Fe_3C' = 17,7\% \quad \alpha = 82,3\%$$

$$Fe_3C_{total} = Fe_3C' + Fe_3C_{eutectoide}$$

$$Fe_3C_{eutectoide} = Fe_3C_{total} - Fe_3C'$$

$$Fe_3C_{eutectoide} = 17,7 - 6,8 = 10,9\%$$



$$\alpha + Fe_3C_{eutectico} = Perlita$$

$$Perlita = 82,3\% + 10,9\%$$

$$Perlita = 93,2\%$$

Cabe mencionar que la microestructura del acero no cambia hasta llegar a la temperatura ambiente, pero si existe una variación ligera del porcentaje de fases debido a los grados de solubilidad que cambian a menor temperatura.

Luego de un análisis de los ejercicios resueltos sobre diagramas de fase, se adquiere destrezas para la cuantificación de porcentajes de fases y su composición a diferentes temperaturas, se ha mostrado ejemplos de diagramas de fases reales en las aleaciones metálicas, para que el lector se familiarice del porqué, de la distribución de constituyentes a temperatura ambiente de dichas aleaciones.

2.7. Aplicación del diagrama Fe-C en la caracterización metalográfica de un acero hipoeutectoide

La metalografía es la disciplina que estudia microscópicamente las características estructurales de un metal o aleación para relacionarlas con las propiedades físicas y mecánicas de los mismos, como lo es el tamaño de grano, forma y distribución de las fases que comprenden la aleación, y de las inclusiones no metálicas como sopladuras, micro cavidades de contracción, escorias, así como la presencia de segregaciones y otras heterogeneidades que tienen gran efecto sobre las propiedades mecánicas y el comportamiento general de un metal. La microestructura revelará el tratamiento mecánico y térmico del material y, bajo un conjunto de condiciones dadas, podrá predecirse su comportamiento esperado.

El microscopio es la herramienta más importante del metalurgista tanto desde el punto de vista científico como desde el 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, se podrá predecirse su comportamiento esperado.

La experiencia ha demostrado que el éxito en el estudio microscópico depende en gran parte del cuidado que se tenga para preparar la muestra y el objetivo es obtener una superficie plana, sin rayaduras, semejante a un espejo y así poder obtener un diagnóstico y/o un pronóstico.

El examen metalográfico puede realizarse antes de que la pieza sea destinada a un fin, a los efectos de prevenir inconvenientes durante su funcionamiento, o bien puede ser practicado sobre piezas que han fallado en su servicio, es decir, piezas que se han deformado, roto o gastado. En este caso la finalidad del examen es la determinación de la causa que produjo la anomalía.

2.7.1. Tipos de metalografías

Dentro de la metalografía se puede distinguir la metalografía cuantitativa y la metalografía cualitativa:

Metalografía cuantitativa: su objetivo es determinar el tamaño medio de los granos, el porcentaje en cada fase que contiene el material, la forma y el tipo de inclusiones no metálicas, la forma y el tipo del grafito, en el caso de hierros fundidos y otros datos específicos de cada componente. Con estos datos, es posible identificar cada componente, prever el comportamiento mecánico y el método con el que el material fue procesado. Este tipo de análisis puede ser hecho a través de la observación directa de la muestra, utilizando una ocular adonizada, o de forma experimental, a través del Método Planimétrico de Jeffries (muestras con granos equiaxiales) y del Método de los Interceptos de Heyn (tamaño de grano en muestras producto de tráfico y laminación), además existen otros métodos como el Método de Graff-Snyder (muestras martensíticas), método de Hilliard. Los métodos experimentales pueden ser utilizados de forma manual y de forma automatizada, a través de un sistema computadorizado de análisis de imágenes.

Metalografía cualitativa: consiste sólo en observar la microestructura, determinándose cuáles son los microconstituyentes que la compone. Los microconstituyentes varían de acuerdo con el tipo de muestra analizada y de acuerdo con los tratamientos térmicos, tratamientos mecánicos, procesos de fabricación y otros procesos a que el material haya sido sometido. Para los aceros, los principales constituyentes son: ferrita, cementita, austenita, perlita, martensita, bainita, etc.

2.7.2. Porcentaje de fases presentes

Generalmente, los cálculos de la fracción de volumen a partir de las mediciones cuantitativas sobre una superficie de un material opaco solamente pueden proporcionar valores aproximados. No obstante, los métodos detallados en la Norma “ASTM E-562” son empleados casi sin excepción.

Un método sencillo y eficaz para el cálculo del porcentaje de fases es el de análisis por áreas, que consiste en insertar la micrografía en un software de análisis de imagen.

2.7.3. Preparación de una muestra metalográfica

El objetivo de una preparación metalográfica es el obtener una superficie muy pulida y libre de impurezas, para llevar al microscopio óptico o electrónico de

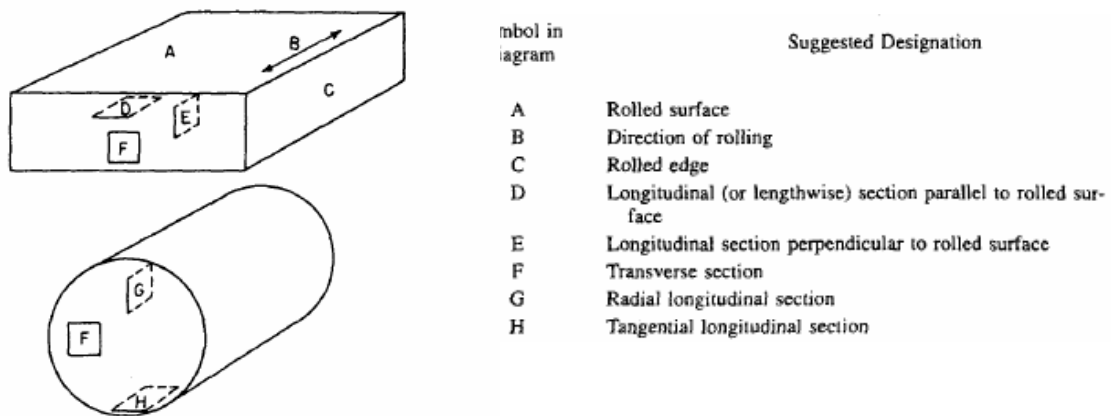
barrido y extraer fotomicrografías para un posterior análisis de imagen y de cuantificación de fases. En este apartado se discutirá un ejemplo aplicativo para la determinación del porcentaje de carbono de un acero hipoeutectoide a partir de una muestra obtenida en campo. La preparación metalográfica conlleva una serie de pasos que se discutirá brevemente a continuación y hace referencia a la norma “ASTM E3” (Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens):

a) Extracción de las probetas

De forma cualitativa una fotomicrografía tomada de una muestra obtenida en el sentido longitudinal de laminación indica si el proceso de manufactura previo a la obtención de un elemento estructural fue laminado en caliente o en frío. Una fotomicrografía con granos deformados en el sentido de laminación da una perspectiva que fue laminado en frío, mientras que los granos sin deformación indican que fue laminada en caliente, debido a la nucleación de nuevos granos sin deformación sobre la temperatura de recristalización. El análisis se realiza en dos probetas (Sentido longitudinal y transversal respecto al laminado) obtenidas a partir de una barra de acero de transmisión que se distribuye en el mercado nacional.

Figura 67.

Esquema, extracción de probetas para metalografía

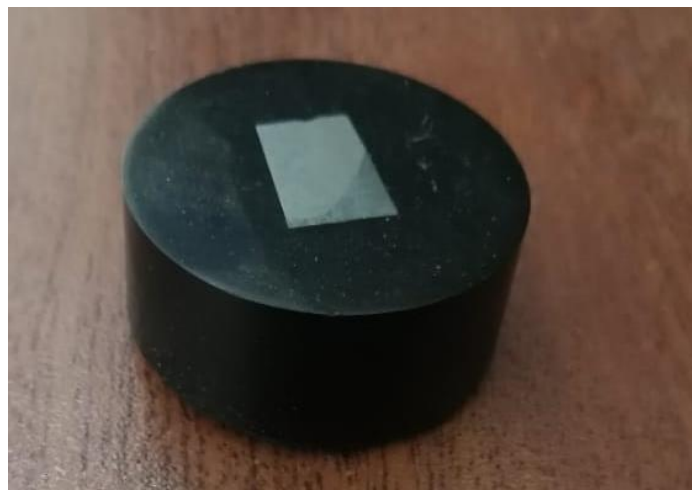


b) Empastillado

En ocasiones las probetas extraídas son muy pequeñas para la manipulación y preparación, optando por encapsular en un material polimérico (baquelita generalmente).

Figura 68.

Empastillado de probetas para metalografía

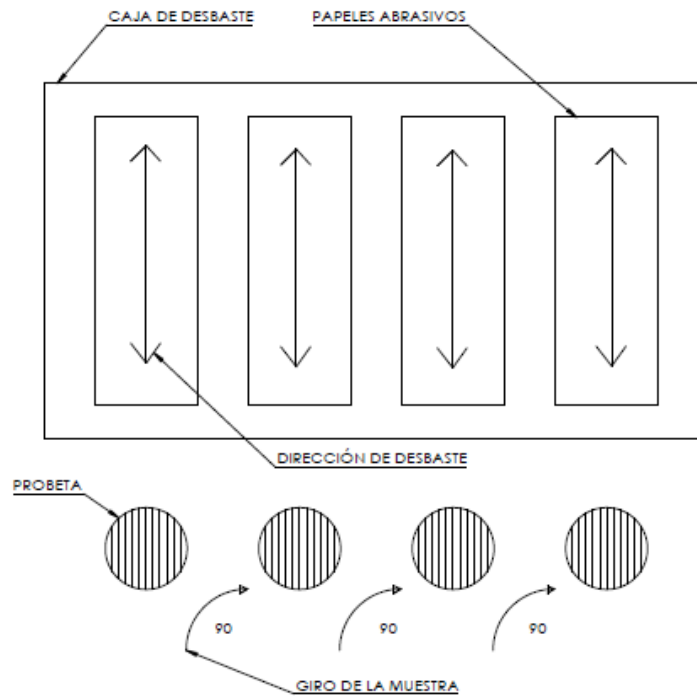


c) Desbaste

La técnica consiste en desbastar material con papeles abrasivos a la superficie que se va analizar posteriormente en el microscopio. Se empieza utilizando una lija gruesa 240 (240 granos/ in^2) hasta obtener líneas paralelas en la superficie de la probeta, eliminando cualquier ralladura producida en la extracción de la muestra, posteriormente se gira 90 la probeta y se emplea una lija más fina (360 granos/ in^2) para el desbaste, hasta desaparecer las líneas producidas por la lija más gruesa. El proceso continua hasta obtener una superficie muy brillante, esto se logra con una lija muy fina (2000 granos/ in^2).

Figura 69.

Proceso de desbaste



d) Pulido

A fin de evitar cualquier línea o líneas dejadas por la lija más fina en el proceso de desbaste, y que obstaculice o se mal interprete la observación microscópica, es necesario pulir la superficie de la muestra, el proceso consiste en presionar la probeta contra un paño que tiene partículas de Alúmina de $0,1\mu\text{m}$ de diámetro que gira en sentido horario.

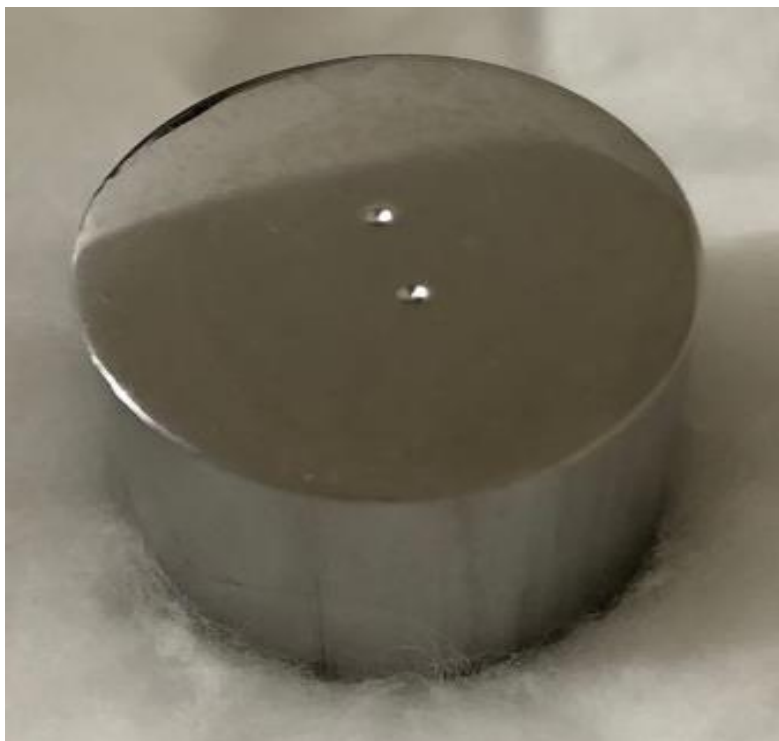
Figura 70.

Pulido



Figura 71.

Probeta metalográfica pulida.



e) Ataque químico

La Norma ASTM E407 (Standard Practice for Microetching Metals and Alloys) cubre las soluciones químicas y el procedimiento para realizar un ataque químico de metales y aleaciones previo a la observación microscópica. El objetivo es corroer los límites de grano para una observación general y contrastar las fases presentes a en una aleación. En el caso de un acero hipoeutectoide se realiza un ataque con el reactivo nital al 2% ($2\text{mL HNO}_3 + 100\text{mL de metanol}$), sumergiendo la probeta por unos 5 segundos.

f) Observación

Un microscopio óptico metalográfico puede brindar varias ampliaciones que depende del número de aumentos del lente ocular y del lente objetivo, por ejemplo, sin el lente objetivo tiene 10x de aumentos y el ocular 10x, la ampliación total será de 100x. Para el análisis se han tomado fotomicrografías a 100x, 200x y 500x. Las fases presentes son ferrita proeutectoide (Granos blancos) y perlita (Granos negros). La fase proeutectoide se forma sobre la temperatura eutectoide ($723\text{ }^\circ\text{C}$) del diagrama Fe-C, el sobrante de austenita se transforma en una mezcla de láminas finas de ferrita más cementita, dando lugar a la perlita.

Figura 72.

Microestructura del acero hipoeutectoide (sección transversal al laminado). El componente blanco es ferrita proeutectoide; el componente oscuro es perlita (Decapante: nital al 2%; ampliación 100×)

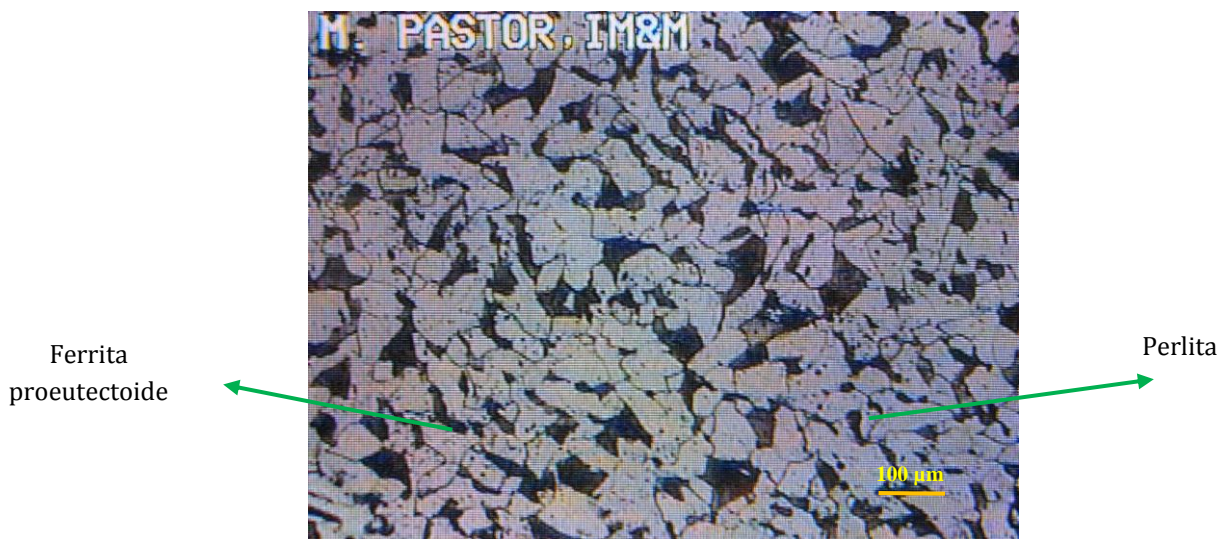


Figura 73.

Microestructura del acero hipoeutectoide (sección transversal al laminado). El componente blanco es ferrita proeutectoide; el componente oscuro es perlita (Decapante: nital al 2%; amplificación 200X)

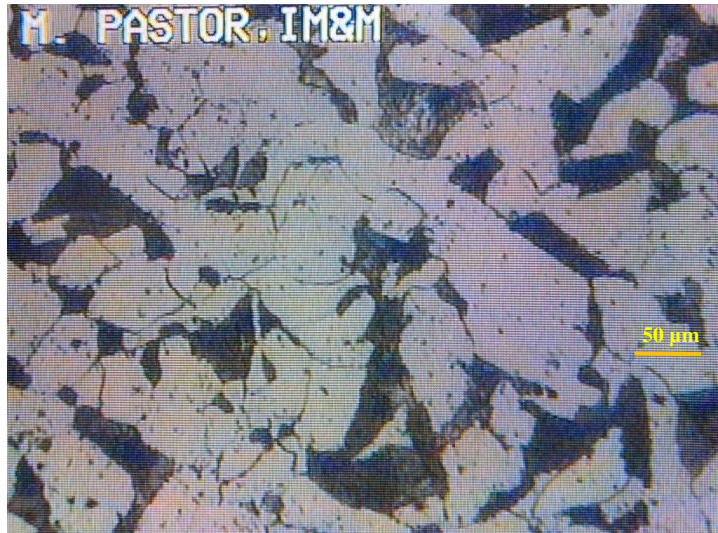


Figura 74.

Microestructura del acero hipoeutectoide (sección longitudinal al laminado). El componente blanco es ferrita proeutectoide; el componente oscuro es perlita (Decapante: nital al 2%; amplificación 200X)



Figura 75.

Microestructura del acero hipoeutectoide (sección transversal al laminado). El componente blanco es ferrita proeutectoide; el componente oscuro es perlita (Decapante: nital al 2%; amplificación 500×)



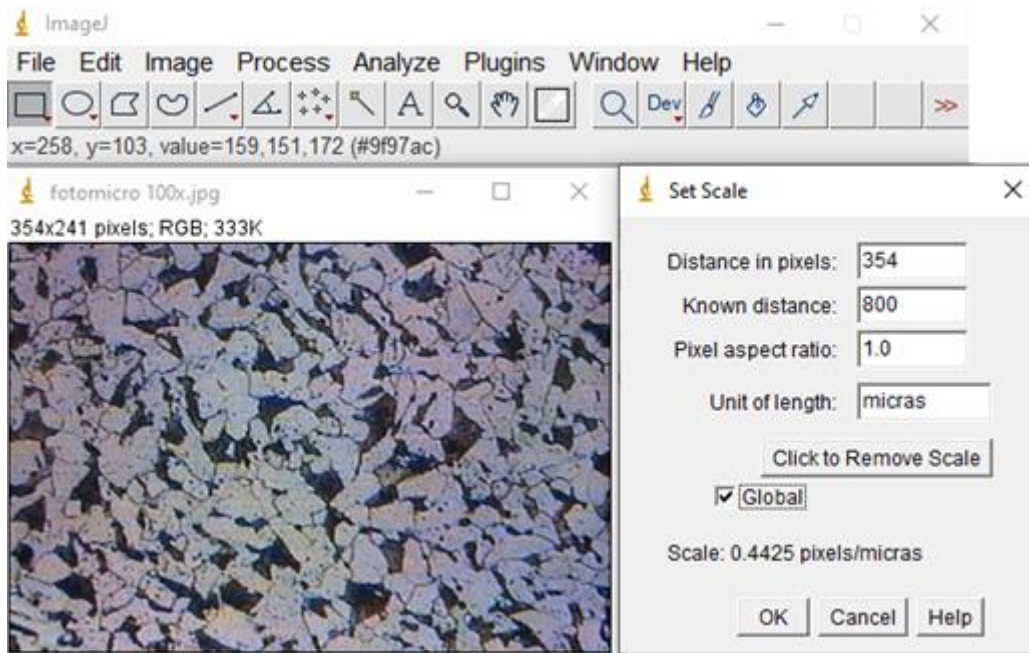
g) Análisis de imágenes

El objetivo de analizar la imagen es determinar el porcentaje de ferrita proeutectoide y el porcentaje de perlita en un área de la fotomicrografía que representa el 100%, para ello, se utiliza el programa imageJ que es de acceso gratuito. Un resultado más aproximado a la realidad se obtiene con fotomicrografías de menor aumento (100x), ya que revelan mayor área a inspeccionar.

El primer paso es escalar la fotomicrografía, esto significa transformar las medidas de una foto, de pixeles a micras, para ello en la imagen proyectada del microscopio a un medio digital se mide la longitud con una regla estandarizada (ancho de la foto), e introduciendo la medida real de la fotomicrografía en el software.

Figura 76.

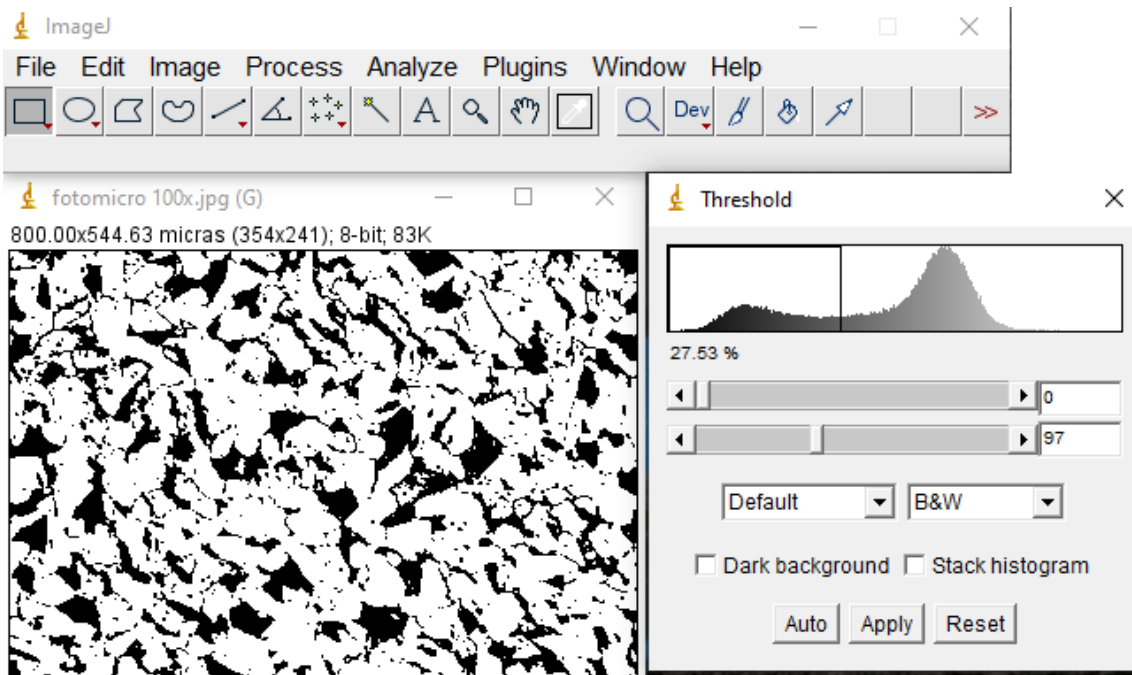
Escalamiento de fotomicrografías en imagen



El siguiente paso es transformar la fotomicrografía a binaria de 8bit para posibilitar la transformación a una imagen de dos colores (blanco y negro) que contraste la ferrita proeutectoide con la perlita.

Figura 77.

Transformación de la fotomicrografía a binaria



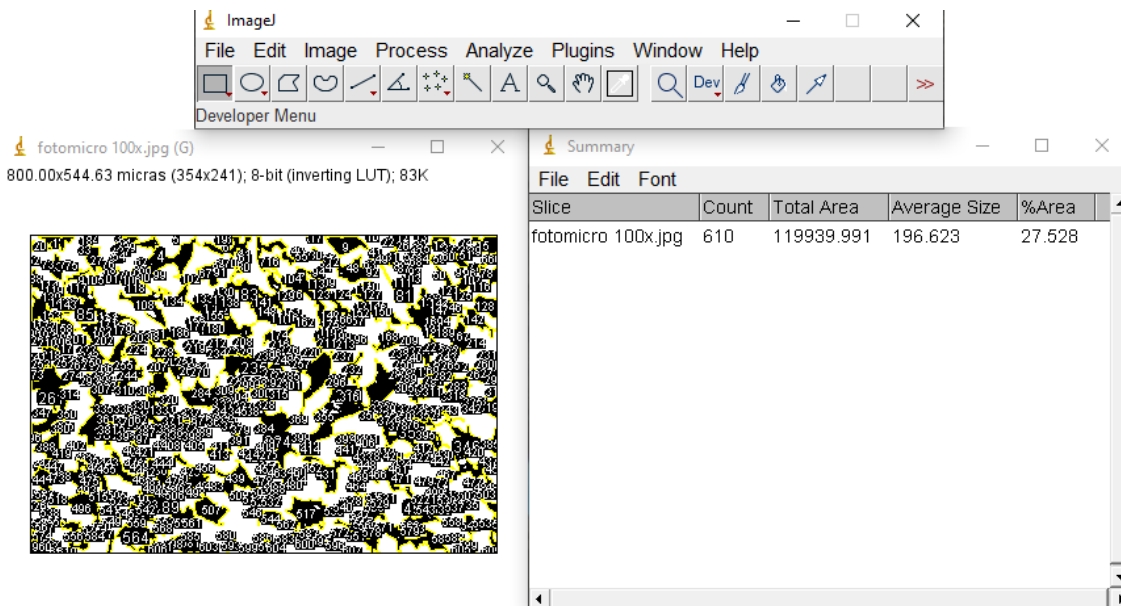
Finalmente se determina el porcentaje en área de la parte oscura (perlita), en relación al área total de la imagen mediante el uso de analizador de partículas. Sabiendo que el área total de la imagen es:

$$A_T = 435704 \mu\text{m}^2$$

Se obtiene un porcentaje de área de perlita del 27,528%

Figura 78.

Porcentaje de área (Perlita) en la fotomicrografía.



Si el porcentaje de perlita corresponde al 27,528% entonces la ferrita proeutectoide (α') es del 72,477%. Mediante el uso de la regla de la palanca y sabiendo que se trata de un acero hipoeutectoide se plantea las ecuaciones correspondientes para determinar el porcentaje de carbono en el diagrama Fe-C.

$$\alpha' = \frac{0,8 - C}{0,8 - 0,022} * 100$$

$$72,477 = \frac{0,8 - C}{0,8 - 0,022} * 100$$

$$C = 0,23\% \text{ de carbono}$$

A partir de una fotomicrografía se ha podido estimar el porcentaje de carbono que tiene un acero y predecir sus propiedades mecánicas frente a condiciones de carga externas. Sabiendo que mayor porcentaje de perlita (mayor carbono), mayor resistencia mecánica y mayor dureza presentará, mientras que, a mayor porcentaje de ferrita proeutectoide (menos carbono), más dúctil será la aleación ferrosa.

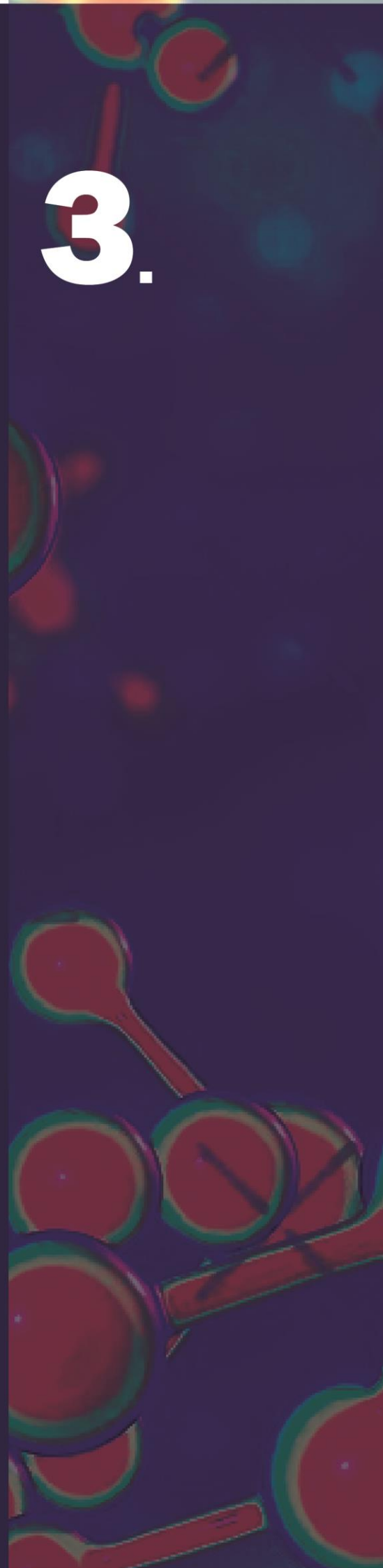
Resumen

En el capítulo tratado, se extrae la información más relevante y útil respecto a diagramas de fase, con un análisis de la terminología, previa a tratar las transformaciones que sufren las aleaciones metálicas. Fue trascendental, el plantearse la pregunta ¿para qué sirven los diagramas de fase?, identificando tres variables intensivas e independientes (presión, temperatura y composición) de las cuales, en los diagramas utilizados en ingeniería de materiales se representa la composición en el eje horizontal y la temperatura en el eje vertical, esto no implica que la presión ha quedado fuera del análisis, simplemente se considera constante a 1 atmósfera. Con estos antecedentes, se ha respondido a dicha pregunta: lucrativos para identificar las fases a diferentes composiciones y temperaturas, averiguar el grado de solubilidad entre componentes y determinar las temperaturas a la que inician la solidificación y/o fusión de aleaciones. La solidificación de las aleaciones, comúnmente sufren reacciones a altas temperaturas, modificando la forma de repartición de los microconstituyentes, con ello se resuelve a una pregunta que comúnmente se hace en un laboratorio de metalografía ¿por qué los constituyentes tienen esa distribución en una x aleación? Adicionalmente, para resolver esta última cuestión, se pauta una serie de ejercicios resueltos por los autores, mostrando paso a paso la solidificación de diferentes aleaciones en varios diagramas de fases.

Finalmente, uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción (el acero), tiene un origen microestructural a partir del enfriamiento lento desde la fase líquido en el diagrama Fe-C., proporcionando información valiosa de la distribución de los constituyentes y por ende un claro panorama de estimación de propiedades mecánicas.

CAPÍTULO
TRATAMIENTOS
TÉRMICOS
DE MATERIALES
METÁLICOS

3.



CAPÍTULO III

TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE MATERIALES METÁLICOS

3.1. Introducción

El presente capítulo trata de la modificación de las propiedades mecánicas del acero mediante calentamiento o enfriamiento controlado, a este fenómeno se conoce como tratamiento térmico e incluye los procesos de reblandecimiento, endurecimiento y reset (regresar a un acero a su condición inicial de fabricación) de un acero.

Un tratamiento térmico queda definido por su ciclo térmico y no por las propiedades que se obtienen con él. Para cada caso particular hay que fijar: la temperatura de calentamiento, el tiempo de permanencia a dicha temperatura y la velocidad de enfriamiento.

El tratamiento térmico se utiliza para modificar la microestructura de un material con fin de aumentar la resistencia mecánica, dureza, mejorar la ductilidad, mejorar la facilidad de trabajo en frío, liberar esfuerzos, endurecer herramientas para evitar desgaste prematuro y modificar las propiedades eléctricas y magnéticas de los materiales.

El proceso incluye tres etapas: calentamiento, mantenimiento a cierta temperatura y enfriamiento de la pieza de trabajo para alterar su estructura y no su composición. Para evitar o minimizar los efectos indeseables de la configuración de la pieza de trabajo, en el acabado de la superficie y en las tolerancias dimensionales, la preparación del trabajo y el tipo de pieza de trabajo antes del tratamiento, son factores que deben considerarse.

Tipos de tratamientos térmicos

Al calentar los elementos de máquinas o herramientas a temperaturas convenientes durante un cierto tiempo y luego enfriarlas adecuadamente se logra: modificar su estructura microscópica, produciendo transformaciones físicas (variación de las propiedades mecánicas) y a veces cambios en la composición química de ellas (solo en tratamientos superficiales como cementación).

El calentamiento debe realizarse lentamente y lo más uniforme posible, especialmente cuando se trata de piezas con espesores apreciables. Con ello se trata de no crear tensiones internas por calentamiento disparejo entre las secciones delgadas y las más gruesas, siendo el ideal la mantención de una misma temperatura en el centro y en la periferia de la pieza.

El tiempo de permanencia se estima como una hora por cada 25 milímetros de espesor de la pieza tratada.

Los tratamientos térmicos más usados en la industria son:

- Recocido, normalizado, temple y revenido.

Efectos de los tratamientos térmicos en los aceros

Para el estudio de los tratamientos térmicos de los aceros es conveniente hacer uso del diagrama hierro-carbono y en especial la zona de transformación eutectoide, sabiendo que un acero tiene como máximo 2% de carbono teóricamente, pero comercialmente se puede encontrar hasta un máximo de 1,5 %C.

Los aceros se pueden clasificar como: hipoeutectoides, eutectoides e hipereutectoides.

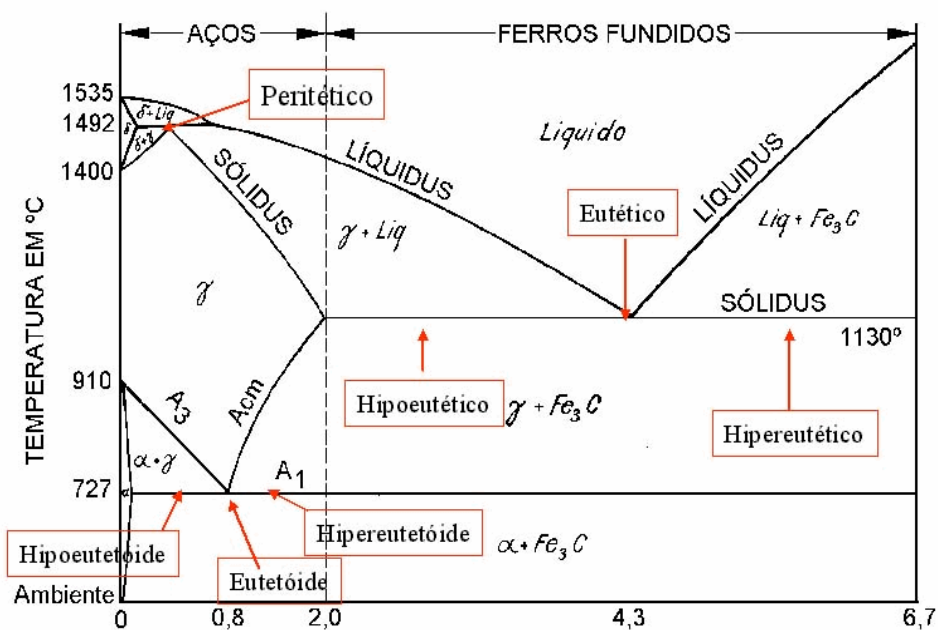
- Los aceros hipoeutectoides son aquellos en que su contenido en carbono es menor que el contenido eutectoide ($<0,8\% \text{ C}$).
- Los aceros eutectoides contienen $\approx 0,8\% \text{ C}$, y,
- Los aceros hipereutectoides, cantidades mayores de carbono ($>0,8\% \text{ C}$).

El ejercicio (5) del capítulo anterior indica esquemáticamente las microestructuras metalográficas resultantes de enfriar lentamente desde la región austenítica (recocido) los tres tipos de aceros. Un acero eutectoide se transforma totalmente a perlita (láminas alternadas de cementita y ferrita) mientras que en los hipoeutectoides contienen ferrita proeutectoide y perlita. En los aceros hipereutectoides se forma primero cementita en los límites de grano de la austenita y luego la perlita en la reacción eutectoide.

Utilizando este indicio, es posible estimar el porcentaje (%) de carbono de un acero recocido por medio de un análisis metalográfico sin necesidad de un análisis químico, ya que en aceros hipoeutectoides a mayor cantidad de ferrita corresponda un menor % de C y en los aceros hipereutectoides, a mayor presencia de cementita indica un aumento en % de carbono. (Ver caracterización metalográfica de un acero hipoeutectoide del capítulo anterior)

Figura 79.

Diagrama hierro-carbono



Fuente: Acosta.(s.f.)

Los constituyentes de un acero (ferrita y perlita) son característicos bajo condiciones de enfriamiento lento o condiciones de equilibrio en donde la difusión es completa y existen las transformaciones polimórficas, cuando el enfriamiento es distinto a las de equilibrio (enfriamiento rápido) no existe una difusión completa o simplemente no existe, es por ello que el carbono no puede abandonar la estructura cristalina de la austenita (FCC) quedando atrapado. Como la austenita no es una fase estable a temperatura ambiente, se produce una transformación a ferrita (BCC) pero debido al carbono atrapado se distorsiona formando una estructura tetragonal o también conocida como una solución intersticial sobresaturada de carbono en hierro, dicha distorsión produce el endurecimiento del acero con pérdida de la ductilidad.

3.2. Constituyentes de los aceros tratados térmicamente

En el capítulo anterior se analizó los constituyentes de los aceros cuando los enfriamientos son extremadamente lenta, cuando un acero se enfría desde la región austenítica a velocidades altas, existen constituyentes fuera del equilibrio que se forma en los aceros, éstos se describen a continuación:

3.2.1. Martensita

Es el constituyente típico de los aceros templados, se define como una solución intersticial de carbono en ferrita. Se produce debido al enfriamiento rápido de un acero desde la fase austenítica, a consecuencia de tiempo insuficiente para que el carbono segregue y forme perlita. La martensita tiene una estructura tetragonal centrada en el cuerpo y es el constituyente más duro y frágil en un acero tratado térmicamente. La dureza de la martensita depende del porcentaje de carbono según la ecuación:

$$HRC = 60\sqrt{C} + 20 \quad (55)$$

Donde:

HRC= Dureza Rockwell escala C

C=% de carbono del acero

Esta ecuación es útil para aceros con un porcentaje de carbono menor al 0,6%, y cuando se ha formado 100% de martensita, así un acero hipoeutectoide de 0,35% de carbono tendría una dureza de 55 HRC y un acero con 0,55% de carbono una HRC=64. Hay que mencionar también que, debido a la velocidad de enfriamiento alta, no toda la austenita se transforma en martensita, quedando también como constituyente austenita retenida y reduciendo en parte la dureza teórica.

Otra de las fórmulas para determinar la dureza Vickers cuando se ha obtenido 100% de martensita, para aceros con un porcentaje de carbono menor a 0,33% es:

$$HV = 802C + 305 \quad (56)$$

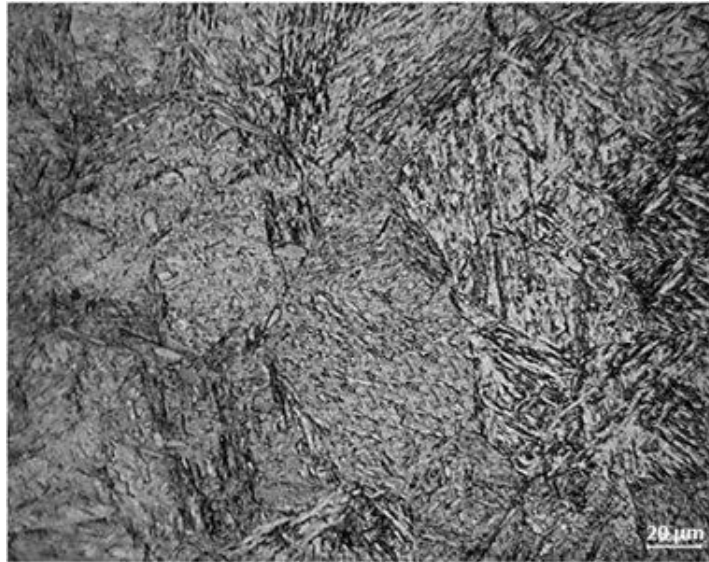
Donde:

HV= Dureza Vickers

C=% de carbono del acero

Figura 80.

Microestructura de la martensita en un acero AISI 4340



La resistencia tensil de la martensita está alrededor de 1661-2447 MPa (241 a 355 Ksi) con un porcentaje de alargamiento que oscila entre el 0,5 y 2,5%. Su forma es parecida a la de agujas en todas las direcciones.

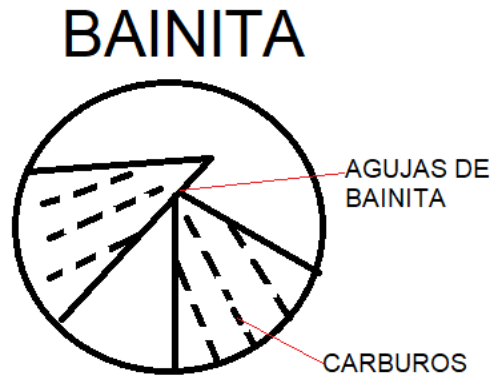
3.2.2. Bainita

Es un constituyente con propiedades mecánicas entre la perlita y la martensita, típico de los aceros con tratamientos isotérmicos, que se forma entre 250 y 550 °C, La bainita que se forma entre los 250 y 350 °C se la conoce como bainita inferior y se asemeja mucho a la martensita, mientras que la que se forma sobre los 350 °C es parecida a la perlita y se la conoce como bainita superior.

La bainita es un constituyente que se forma a partir de la austenita, con segregados de carburos de hierro, se puede diferenciar de la martensita, si las agujas tienen varios segregados de cementita en una matriz ferrítica.

Figura 81.

Esquema de crecimiento de la bainita



Una de las fórmulas probabilísticas para determinar la dureza viene dada por el porcentaje de elementos aleantes, según Duren:

$$HV_B = 305CE_B + 101 \quad (57)$$

Donde:

HV_B = Dureza Vickers de la vainita

CE_B = Carbono equivalente para bainita de un acero

El carbono equivalente para bainita de un acero viene dado por la siguiente ecuación:

$$CE_B = C + \frac{Si}{11} + \frac{Mn}{8} + \frac{Cu}{9} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{17} + \frac{Mo}{6} + \frac{V}{3} \quad (58)$$

Así por ejemplo un acero AISI 4340 con la siguiente composición y suponiendo que se ha obtenido un 100% de bainita mediante un tratamiento térmico:

%C	%Ni	%Cr	%Mo
0,4	1,85	0,8	0,25

Presentaría un $CE_B = 0,71$ y una dureza Vickers de 317,7, que corresponde a 32 HRC aproximadamente.

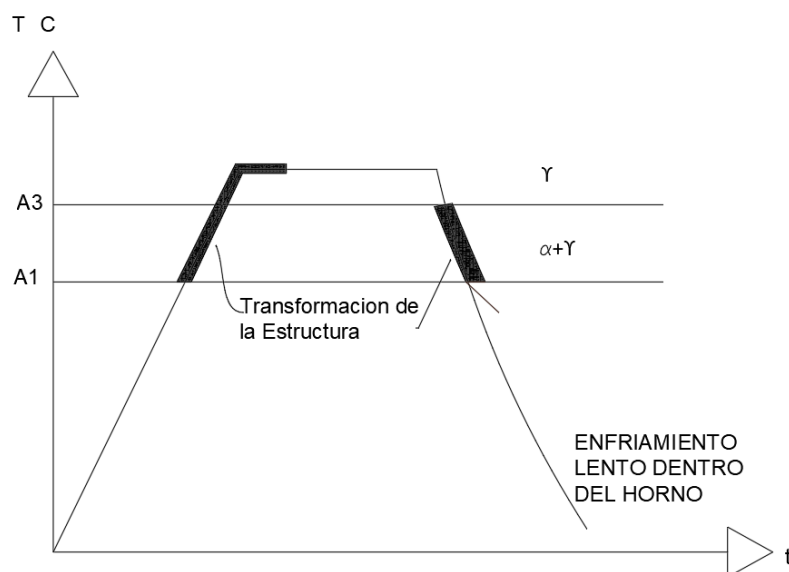
3.3. Recocido

El calentamiento se hace a una temperatura ligeramente superior a A3 y luego se enfría lentamente (por lo general dentro del horno). El principal objetivo es ablandar el acero, deseándose a veces también regenerar su estructura o eliminar tensiones internas.

La Figura 83 muestra en forma esquemática las transformaciones que se producen en un acero con hipoeutectoide cuando su enfriamiento corresponde a condiciones de equilibrio.

Figura 82.

Ciclo térmico utilizado en un T.T de recocido

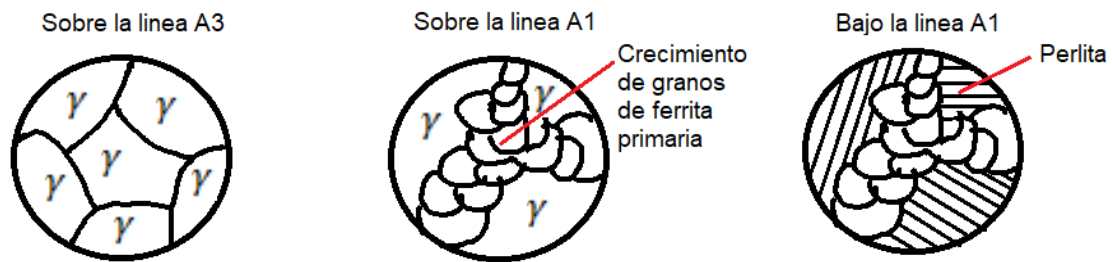


Existen dos tipos de recocido, un total y de proceso, la diferencia es que en el recocido total el objetivo es ablandar el acero a costa de una pérdida de dureza y resistencia tensil y es aplicable a todos los aceros, mientras que el recocido de proceso se aplica solo a aceros de bajo porcentaje de carbono ($<0,3\%C$) que previamente han sido deformados en frío para alivio de tensiones. Además, el

recocido total se lo realiza a temperaturas superiores a la línea A3 para aceros hipoeutectoides y sobre la línea A1 para aceros eutectoide e hipereutectoides, el recocido de proceso se lo realiza bajo la línea A1 correspondiente solo a aceros de bajo carbono.

Figura 83.

Esquema de las transformaciones que se producen en un acero hipoeutectoide durante el recocido

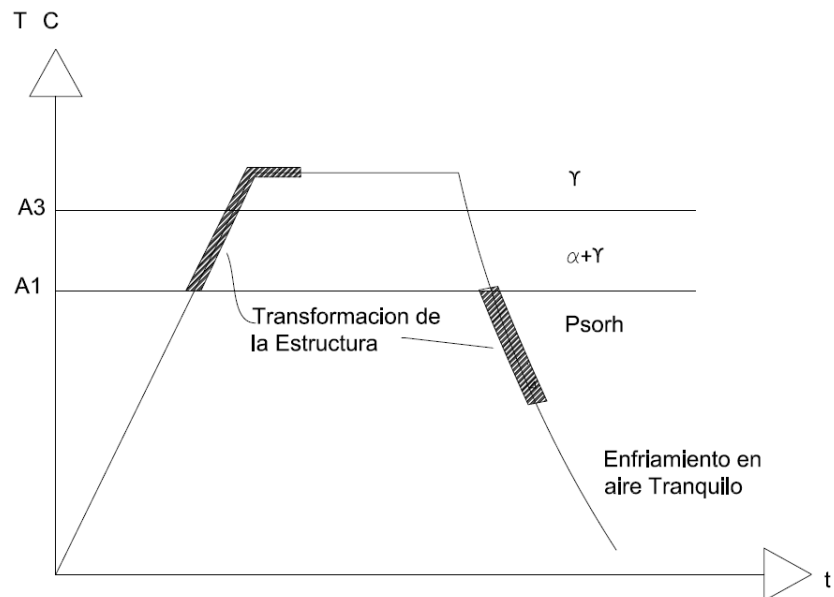


3.4. Normalizado

Se emplea en piezas fundidas, forjadas o conformadas mecánicamente. Su objetivo es afinar la estructura y eliminar las tensiones que suelen aparecer en la solidificación u otras operaciones posteriores. Los aceros se calientan a una temperatura superior a la crítica A_3 (hipoeutectoides) o A_{cm} (eutectoides e hipereutectoides) y luego se dejan enfriar al aire. Tratamiento típico en el proceso de manufactura de aceros laminados en caliente.

Figura 84.

Ciclo térmico utilizado en un T.T. de normalización

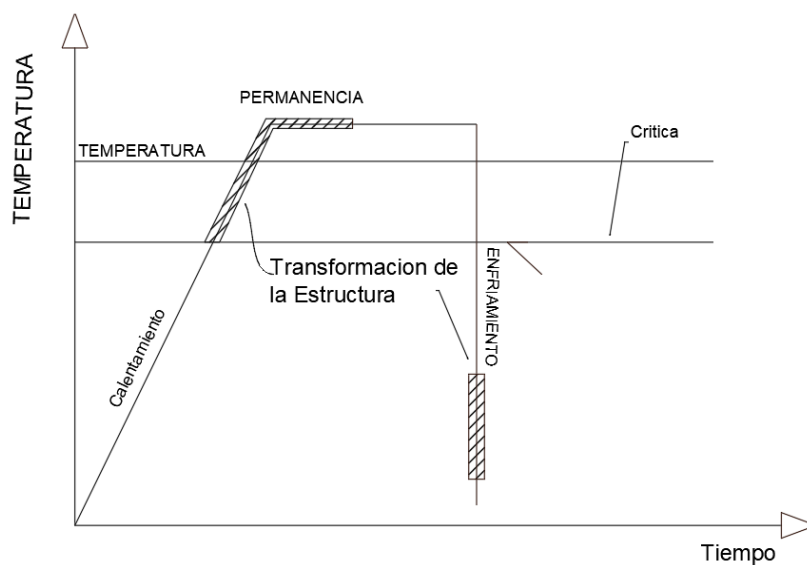


3.5. Temple

El temple se lo define como un tratamiento térmico de materiales metálicos (aceros generalmente) que consiste en calentar, mantener y enfriar a velocidades muy altas (en medios como agua, aceite o sales fundidas) para obtener fases duras como la martensita (solución sobresaturada de carbono en hierro).

Figura 85.

Ciclo térmico utilizado en un T.T de temple



La capacidad de un acero para transformarse durante un determinado temple depende de la composición química y está relacionada con un parámetro denominado templabilidad (facilidad para que penetre microestructuras como la martensita hacia el núcleo del material). Todos los aceros aleados tienen una relación específica entre las propiedades mecánicas y la velocidad de enfriamiento. La templabilidad no significa dureza (capacidad que tiene un material a ser penetrado por un indentador), aunque se utiliza medidas de dureza para determinar la extensión de la transformación martensítica desde la superficie templada hacia el otro extremo de la probeta. Un acero aleado de alta templabilidad es aquel que endurece, o forma martensita, no solo en la superficie sino también en su interior; es decir, la templabilidad es una medida de la profundidad a la cual una aleación específica puede endurecerse.

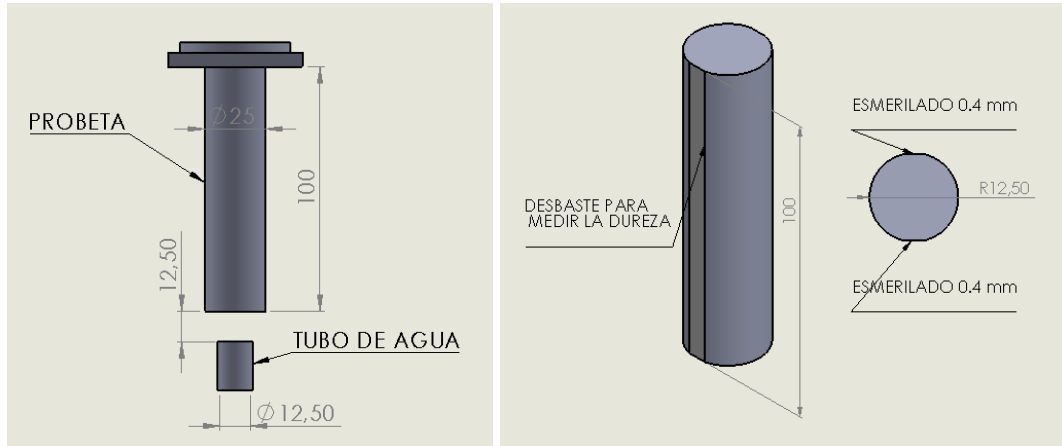
La templabilidad es una medida cualitativa de la velocidad con que la dureza disminuye con la distancia al extremo templado.

3.5.1. Ensayo de Jominy

Un procedimiento estándar utilizado ampliamente para determinar la templabilidad es el ensayo de Jominy. En este ensayo se mantienen constantes todos los factores que influyen en la profundidad del endurecimiento de la pieza, como por ejemplo la composición, el tamaño y la forma de la pieza. Una probeta cilíndrica de 25 mm de diámetro y 100 mm de longitud se austeniza a una temperatura y tiempo determinado. Después de retirar del horno se instala inmediatamente en el equipo Jominy, del modo que indica la Figura 86a. El extremo inferior se temple mediante un chorro de agua a una temperatura de 24 °C con una velocidad de enfriamiento constante. De este modo, la velocidad de enfriamiento es máxima en el extremo templado y disminuye a lo largo de la probeta. Una vez que la probeta se ha enfriado a temperatura ambiente, se desbasta una tira de 0,4 mm de espesor y se determina la dureza a lo largo de los 50 primeros milímetros de la probeta; en los primeros 12,5 mm las lecturas de dureza se toman a intervalos de 1,6 mm y en los 37,5 mm siguientes cada 3,2 mm. Se traza una curva de templabilidad representando los valores de dureza en función de la distancia al extremo templado.

Figura 86.

Representación esquemática de la probeta del ensayo de Jominy (a) instalación y (b) después del esmerilado para medir la dureza



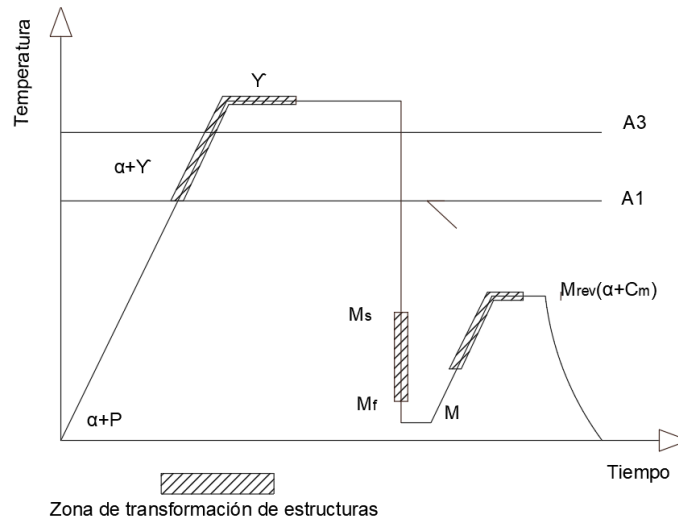
La gran dureza obtenida sobre 60 HRC se debe al componente estructural fuera de equilibrio llamado "Martensita" que se ve al microscopio bajo la forma de agujas en V o en Z (Martensita acicular). La martensita es el constituyente estructural típico del temple.

3.6. Revenido

Es el tratamiento térmico que acompaña al temple. El objetivo es modificar y no eliminar los efectos del temple. El revenido consiste en calentar el acero, previamente templado, a temperaturas inferiores a la crítica A1 (723°C), mantenerlo un tiempo adecuado y luego enfriarlo a temperatura ambiente como se indica en la Figura 87.

Figura 87.

Ciclo térmico utilizado en un T.T de temple y revenido

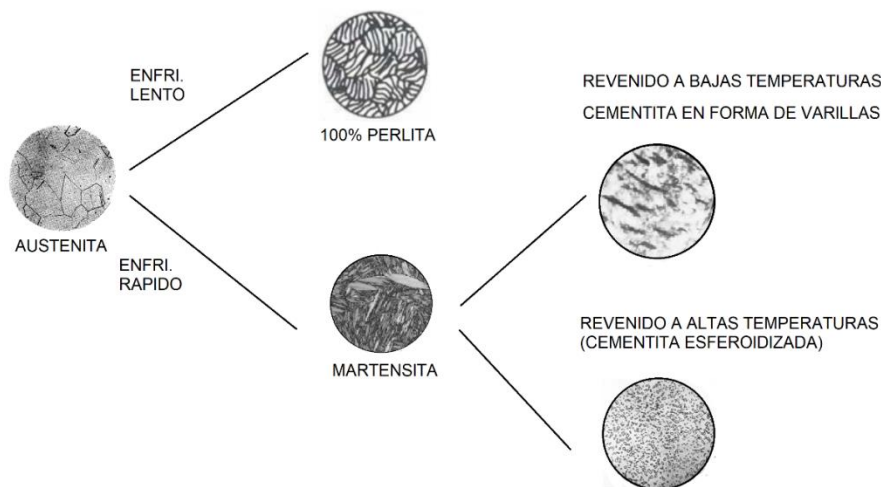


El microconstituyente típico del Revenido es la "Martensita revenida".

En la Figura 88 se presenta un esquema que muestra las microestructuras de un acero eutectoide que se obtienen al someterlo a distintos tratamientos térmicos. Se aprecia la diferencia en morfología (forma y distribución de las fases ferrita y cementita) entre las estructuras producidas por un normalizado y las de un temple y revenido. Esto produce una diferencia en las propiedades mecánicas del acero.

Figura 88.

Microestructura de un acero eutectoide sometido a distintas velocidades de enfriamiento.



El acero eutectoide normalizado (enfriamiento lento) contiene sólo perlita (láminas alternadas de ferrita y cementita), en tanto, en que el acero templado y revenido a altas temperaturas se observa la cementita esferoidizada en una matriz ferrítica.

Esto ilustra categóricamente que no basta sólo saber la composición química de un acero, sino que mucho más importante es conocer su microestructura, la que se determina con ayuda del microscopio metalográfico, herramienta fundamental del metalurgista físico.

3.7. Tratamientos isotérmicos

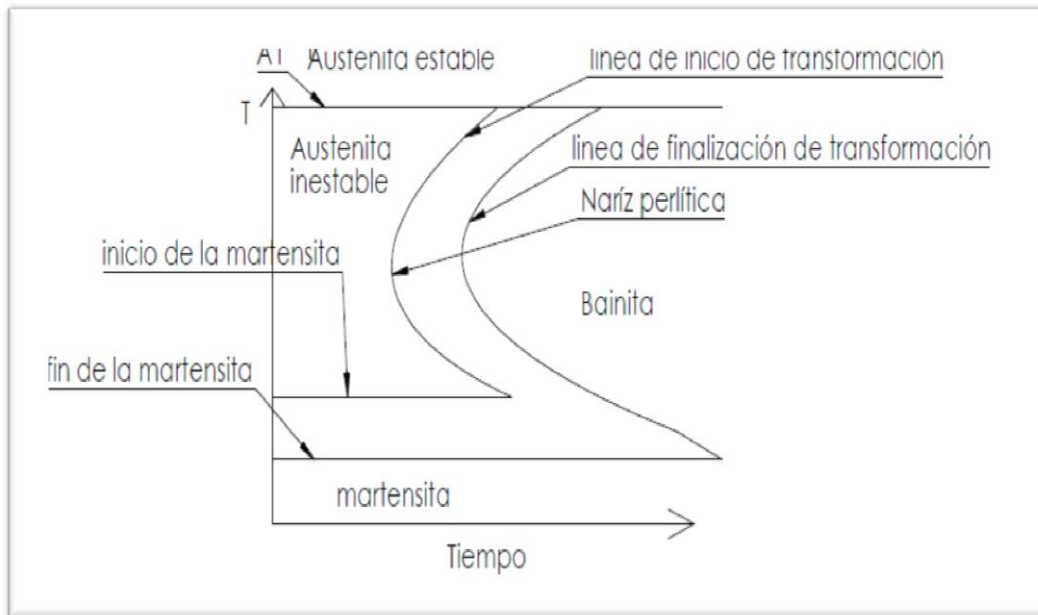
Este tipo de tratamientos térmicos se aplican para obtener microconstituyentes con propiedades de dureza intermedias entre la martensita (dura) y la perlita gruesa (blanda) (ejemplo en un acero eutectoide). Son tratamientos que se utilizan principalmente cuando el cliente lo solicite (bajo pedido) caso contrario no es muy común su utilización en la industria ecuatoriana.

El tratamiento térmico de transformación isotérmica, utilizado para la obtención de la bainita, simplemente consiste en la austenización del acero, mantenimiento hasta la homogenización de la fase y temple en caliente, luego mantener a cierta temperatura hasta que empiece la transformación.

A partir de este tipo de tratamientos térmicos se obtiene los diagramas TTT (Tiempo - Transformación - Temperatura) para diferentes aceros. Si se toma como ejemplo, un acero eutectoide, para un análisis de las transformaciones que sufre la fase austenítica cuando se aplica tratamientos isotérmicos, se determina que al reducir levemente la temperatura por debajo de la línea A1, se puede encontrar a qué tiempo empieza y finaliza la transformación a perlita gruesa. Si este experimento se repite con varias probetas a diferentes temperaturas por debajo de la línea A1, se puede unir los puntos y trazar las líneas de inicio y finalización de la transformación (Figura 89.) Es obvio que al realizar temple en caliente a temperaturas lo suficientemente inferiores a A1 ya no se producirá una transformación a perlita gruesa, sino a perlita fina o bainita.

Figura 89.

Nariz perlítica

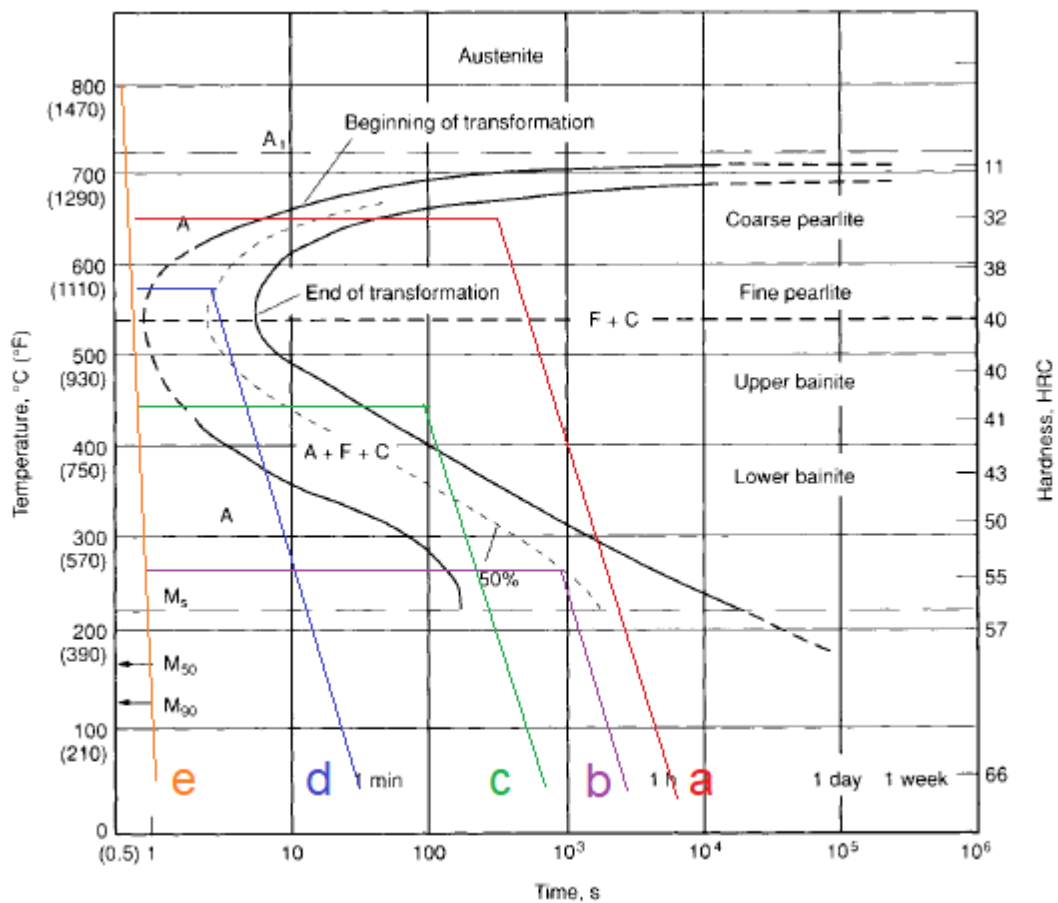


El recocido y el normalizado normalmente se utiliza para controlar la finura de la perlita en los aceros eutectoides. La perlita que se forma mediante un tratamiento isotérmico puede dar propiedades más uniformes.

Como ejemplo se puede tomar un diagrama TTT de un acero eutectoide para un análisis de formación de constituyentes a diferentes tratamientos isotérmicos.

Figura 90.

Diagrama TTT de un acero eutectoide



Fuente: Allen & Boardman (2005)

De acuerdo al código de colores e identificados con letras los diferentes tratamientos isotérmicos se predice los constituyentes presentes a temperatura ambiente:

- a) Se realiza un temple en caliente hasta los 650 °C y permanece durante aproximadamente 350 segundos, iniciando la transformación de austenita inestable a perlita gruesa a los 9 segundos y al rebasar la línea de finalización (80s), todo se ha transformado a 100% de perlita gruesa.
- b) Un temple en caliente a los 265 °C y permanece hasta 1000s aproximadamente, formando un 50% de bainita, luego un enfriamiento

- rápido, formando 50% de martensita a partir de la austenita inestable sobrante de la transformación isotérmica (50% bainita, 50% martensita).
- c) Temple en caliente hasta los 440 °C y permanencia hasta los 100 segundos, el diagrama TTT indica que todo se ha transformado a bainita superior, ya que el tratamiento rebasa la línea de finalización de la transformación (100% bainita superior).
 - d) Temple hasta la austenita inestable a 580 °C, permanencia de 4 segundos aproximadamente con una transformación del 50% a perlita fina, luego un temple rápido, formando el restante de austenita no transformada a martensita (50% perlita fina, 50% de martensita).
 - e) Temple brusco en menos de 1 segundo, formaría 100% de martensita. Si bien es cierto este tipo de enfriamientos es muy difícil obtener, ya que no toda la austenita se transformará en martensita en menos de 1 segundo, presentando también austenita retenida en todas las transformaciones y reduciendo la dureza de la martensita.

3.7.1. El diagrama TTT para aceros hipoeutectoides e hipereutectoides

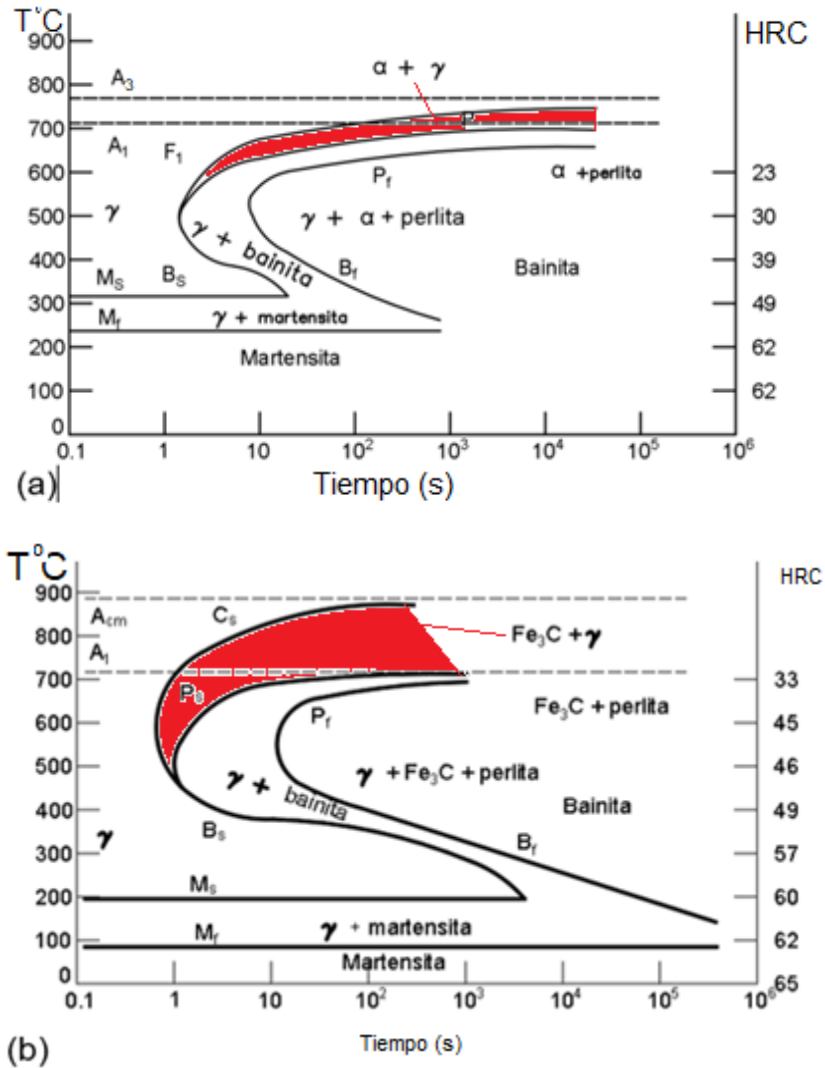
Tanto para aceros hipoeutectoides, como para aceros hipereutectoides, el diagrama TTT debe reflejar la posible formación de una fase proeutectoide.

En la Figura 91 aparecen los diagramas de transformación isotérmicos para aceros 1050 y 10110. El cambio más notable es la presencia de un región que empieza en la nariz de la curva, volviéndose asintótica con la temperatura A_3 o con la temperatura A_{cm} . Dicha región representa el tiempo de inicio de la ferrita (α) en los aceros hipoeutectoides o el tiempo de inicio de la cementita ($[\text{Fe}]_{3\text{C}}$) en los hipereutectoides.

Cuando un acero 1050 se austeniza, se temple y se mantiene entre A_1 y A_3 , la ferrita primaria nuclea y crece; finalmente, resulta cantidades en equilibrio de ferrita proeutectoide y de austenita.

Figura 91.

Diagrama TTT para un acero (a) 1050 y (b) 10110



De manera similar, en un acero 10110 mantenido entre las temperaturas A_{cm} y A_1 , la cementita proeutectoide se nuclea y crece hasta su valor de equilibrio.

Si un acero austenizado 1050 se temple entre las temperaturas de nariz y A_1 , de nuevo la ferrita primaria se nuclea y crece hasta alcanzar el valor de equilibrio. El resto de la austenita entonces se convierte en perlita. Una situación similar, pero produciendo cementita y perlita primaria, ocurre para el acero hipereutectoide.

Si se temple por debajo de la nariz de la curva, sólo se formará bainita, independientemente del contenido de carbono en el acero.

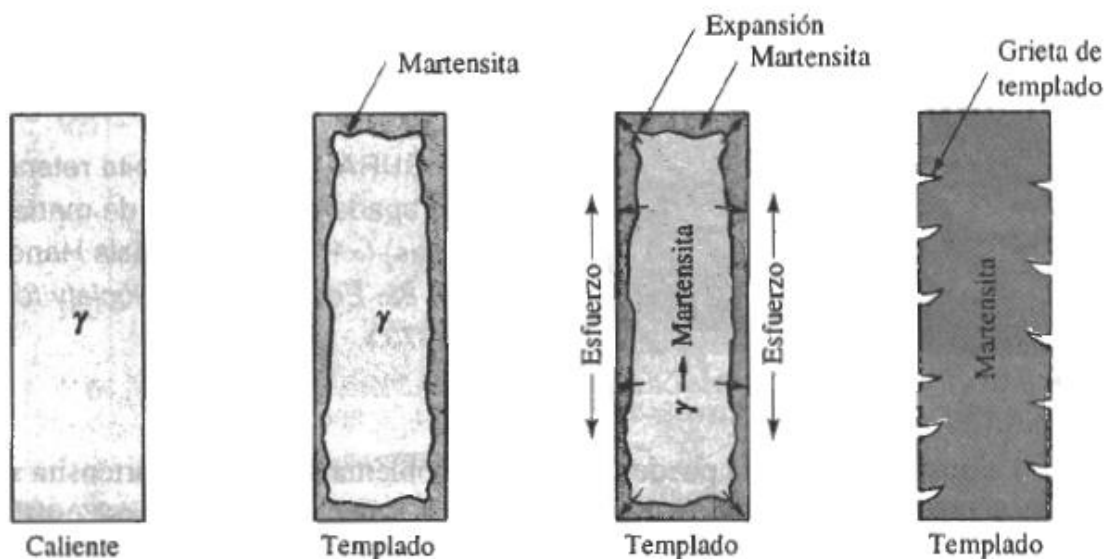
A medida que se reduce el porcentaje de carbono en un acero (más dulce) también se reduce la posibilidad de transformación de austenita a martensita. Esto porque no habrá la suficiente cantidad de carbono para formar la sobresaturación.

3.8. Esfuerzos residuales y agrietamiento

Con el cambio de volumen se producen agrietamientos residuales. La superficie del acero templado se enfría rápidamente, transformándolo en martensita. Cuando posteriormente la austenita del acero se transforma, la superficie dura queda en tensión, mientras que el centro se comprime. Si los esfuerzos residuales exceden el límite elástico, en la superficie se forman grietas de templado. Sin embargo, si primero se enfría justo por encima de la temperatura de transformación martensítica, y se mantiene así hasta que en todo el acero la temperatura sea igual, un templado posterior permitiría que se transforme en martensita casi al mismo tiempo. Este tratamiento térmico se conoce como templado arriba de M.

Figura 92.

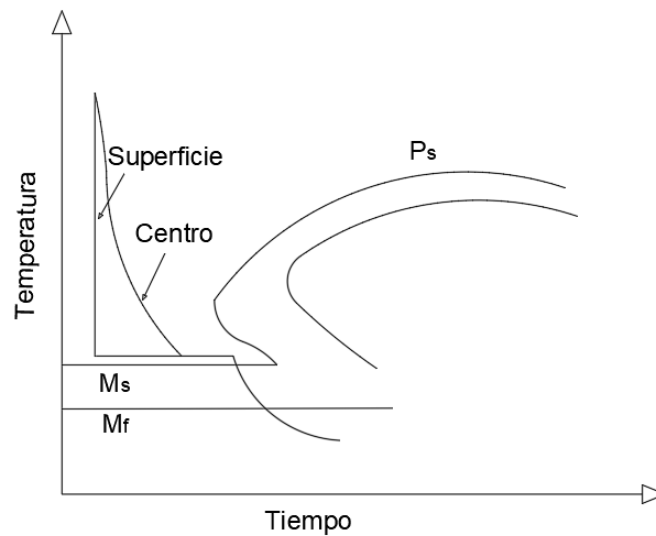
Formación de grietas de templado causadas por esfuerzos residuales producidas durante el templado. Ilustra el desarrollo de esfuerzos, al transformarse la austenita en martensita durante el enfriamiento.



Fuente: Askeland (s.f.)

Figura 93.

Tratamiento térmico por templado arriba de M_s , diseñado para reducir esfuerzos residuales y grietas de templado



3.9. Rapidez de templado

Al utilizar el diagrama TTT, se asume que es posible enfriar desde la temperatura de austenizado, hasta la temperatura de transformación de manera instantánea.

Dado que esto no es cierto, es probable que durante el templado se formen microconstituyentes no deseables, por ejemplo, se puede formar perlita al enfriarse más allá de la nariz de la curva, particularmente si el tiempo de la nariz es menor de un segundo en aceros de bajo carbono.

La velocidad a la cual se enfría el acero durante el templado depende de varios factores.

Primero, la superficie de la pieza se enfría siempre más rápidamente que el centro. Además, conforme el tamaño de la pieza aumenta, es menor la rapidez de enfriamiento en cualquiera de sus partes. Finalmente, la velocidad de enfriamiento depende de la temperatura y de las características térmicas del medio usado para el temple (Tabla 18). Por ejemplo, el temple en aceite produce un coeficiente H menor, es decir, una velocidad menor de enfriamiento que se temple en agua o en salmuera.

Tabla 18.

Coefficiente H, es decir severidad del templado, para diversos medios de templado

Medio	Coefficiente H	Rapidez de enfriamiento en el centro de un eje de 1 plg ($^{\circ}\text{C} / \text{s}$).
Aceite (sin agitar)	0,25	18
Aceite (agitado)	1,0	45
Agua (sin agitar)	1,0	45
Agua (agitada)	4,0	190
Salmuera (sin agitar)	2,0	90
Salmuera (agitada)	5,0	230

Esto no significa que al enfriar un acero desde la temperatura de austenización en salmuera con agitación, sea más duro o con mayor resistencia mecánica que al enfriar en aceite sin agitación. La dureza de un acero, luego de un tratamiento térmico viene dado por su contenido de carbono y de los elementos aleantes (templabilidad). Un acero con mayor porcentaje de carbono tiene una temperatura de inicio de transformación martensítica menor que un acero de bajo carbono (M_s).

3.10. Diagramas de transformación de enfriamiento continuo

Es muy usual realizar tratamientos térmicos en la industria con enfriamientos continuos, debido a la sencillez y al bajo costo.

Se puede desarrollar un diagrama de transformación de enfriamiento continuo (TEC) determinando las microestructuras producidas en un acero a varias velocidades de enfriamiento.

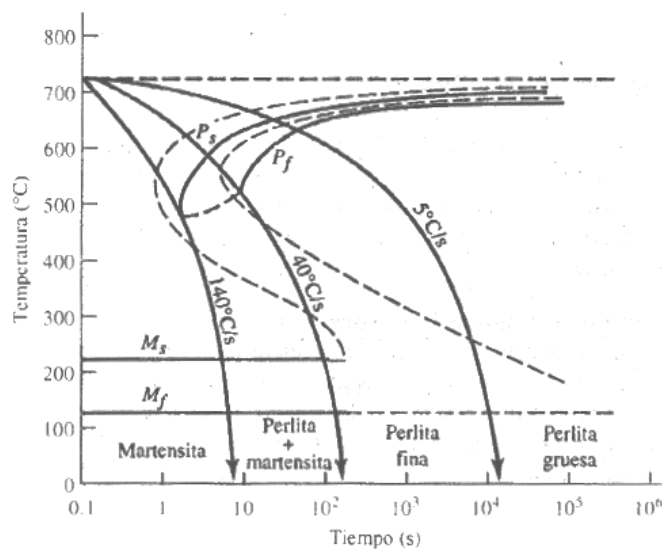
Si se enfría un acero eutectoide a $5^{\circ}\text{C}/\text{s}$ o a menores velocidades de enfriamiento, el diagrama TEC señala que se obtendrá perlita gruesa como constituyente a temperatura ambiente. Si se enfría entre 5 y $40^{\circ}\text{C}/\text{s}$ se obtendrá perlita fina en su totalidad, típico de un tratamiento térmico de normalización.

El enfriamiento entre 40 y 140 °C/s permite la iniciación de perlita fina, pero la reacción no es completa y la austenita restante se transforma en martensita (línea entrecortada indica que no ha finalizado la transformación).

Se obtendría 100% de martensita y, por lo tanto, existen las condiciones para efectuar un tratamiento térmico por templeado y revenido, solo si se enfría a una velocidad superior a la crítica de temple 140 °C/s.

Figura 94.

Diagrama TEC (líneas sólidas) para un acero 1080 en comparación con el diagrama TTT (líneas punteadas)



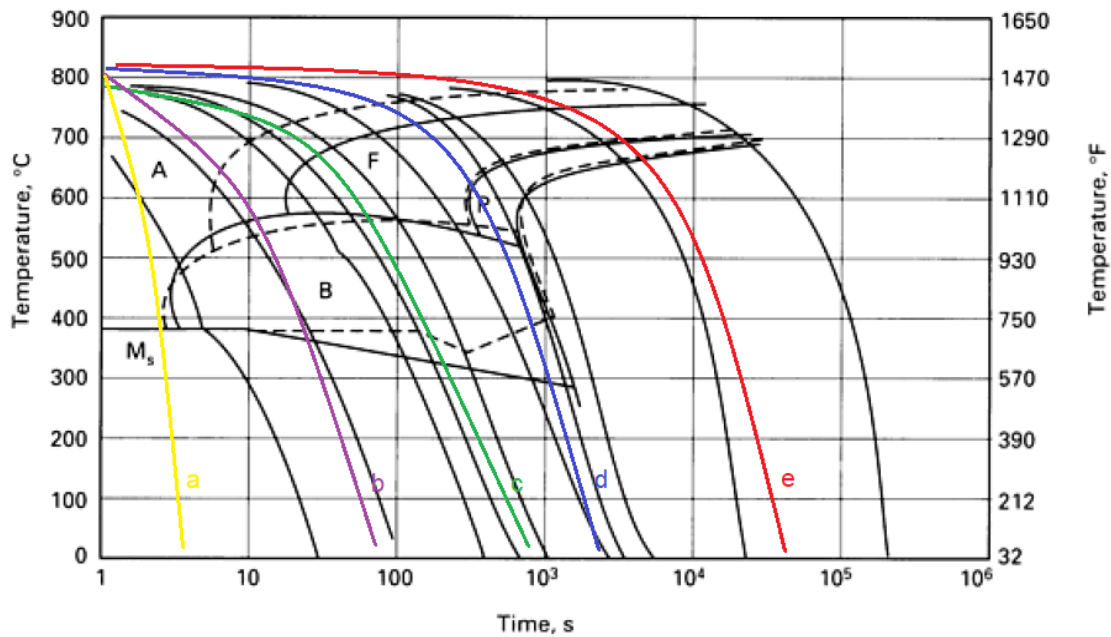
Fuente: (Askeland, 2009)

La Figura 94 muestra un diagrama TEC de un acero 4130 (0,3%C, 0,64%Mn, 1%Cr, y 0,24% Mo), obtenida a partir de cálculo (líneas entrecortadas) y experimentalmente (línea continua) con diferentes velocidades de enfriamiento se puede obtener una variedad de constituyentes presentes a temperatura ambiente. A continuación, se describe las transformaciones de fase que ocurre en el acero desde una temperatura de austenización con cinco diferentes velocidades de enfriamiento (a, b, c, d, e)

- a) Ésta curva describe un temple a una velocidad aproximada de enfriamiento de $200\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ según el diagrama experimental se formará martensita con una dureza aproximada de 52 HRC.
- b) Con una velocidad de enfriamiento de aproximadamente $80\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ (curva b), la austenita empieza a transformarse en bainita a los $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente en la curva experimental, a los $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ la austenita no transformada cruza la línea M_s , iniciando la transformación en martensita. Finalmente, los constituyentes presentes a temperatura ambiente serán bainita y martensita.
- c) A una velocidad más lenta, aproximadamente de $1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, la transformación inicia a los $680\text{ }^{\circ}\text{C}$ de austenita en ferrita, como la transformación no ha finalizado aún existe austenita inestable en el metal, transformándose en bainita ($580\text{ }^{\circ}\text{C}$) y finalmente en martensita desde los $320\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente. El acero con esta velocidad de enfriamiento, presentaría ferrita, bainita y martensita.
- d) A una velocidad mucho más lenta, aproximadamente de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, la transformación toma efecto a los $720\text{ }^{\circ}\text{C}$ de austenita en ferrita, el sobrante de austenita sin transformarse empieza a formar perlita desde los $620\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta los $530\text{ }^{\circ}\text{C}$ como la transformación no ha finalizado aún existe austenita inestable en el metal, transformándose en bainita y finalmente en martensita en pocas cantidades. El acero con esta velocidad de enfriamiento, presentaría ferrita, perlita, bainita y martensita.
- e) A una velocidad de enfriamiento de $0,02\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, extremadamente lenta (debe enfriarse desde los $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta la temperatura ambiente en 8,3 horas) los únicos constituyentes presentes en el acero serán ferrita y perlita.

Figura 95.

Diagrama TEC para un acero 4130



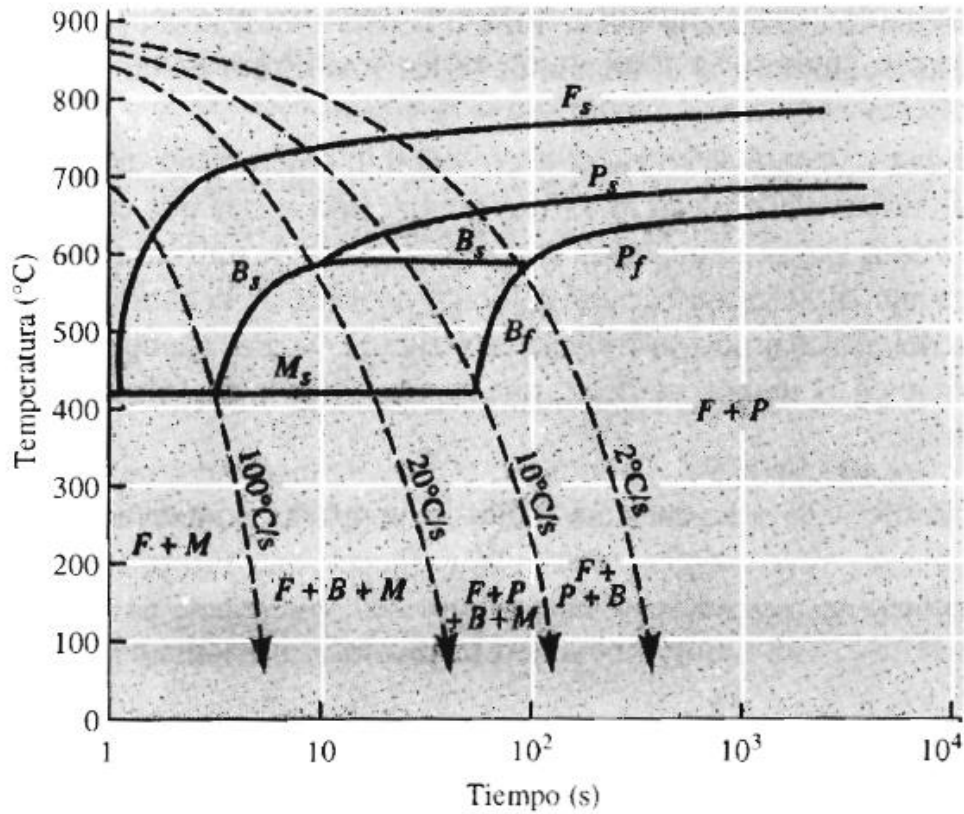
Fuente: Cai et al. (2017)

Un acero con menos porcentaje de carbono, va a ser muy difícil poder formar martensita, incluso con un enfriamiento desde los 800 °C en menos de 1 segundo, con un enfriamiento lo suficientemente rápido (>100 °C) se formará ferrita y luego martensita.

Entre 100 y 20 °C/s la transformación inicia con ferrita, la austenita no transformada formará bainita y martensita respectivamente. A velocidades menores (20 -10 °C/s) la transformación desde la austenita se da a ferrita, perlita, bainita y martensita respectivamente. Entre 10 y 2 °C/s empieza la transformación en ferrita, luego perlita y finalmente a bainita, a estas velocidades es muy difícil obtener constituyentes como la martensita, motivo a que existe tiempo suficiente para la difusión del carbono. A velocidades más lentas que las de 2 °C/s los únicos constituyentes que será parte del acero son ferrita proeutectoide y perlita.

Figura 96.

Tratamiento TEC para una baja aleación acero 0,2% C



Fuente: Askeland (2009)

Las tensiones residuales se producen no sólo durante el endurecimiento en tratamientos térmicos, sino también durante el procesamiento de piezas con microestructuras como ferrita o perlita. Por ejemplo, el mecanizado y el trabajo en frío pueden introducir tensiones residuales debido a diferencias en la cantidad de deformación entre la superficie y regiones del interior de una pieza. La soldadura es otro proceso que produce tensiones de tracción residuales ya que existen diferencias en la velocidad de enfriamiento y por ende regiones con mayor reducción de volumen que otras.

En piezas endurecidas, las dimensiones finales pueden ser producidas por la molienda, pero excesiva molienda puede causar un calentamiento que causa el

ablandamiento e incluso la formación de austenita que posteriormente se transforma en martensita, creando tensiones residuales indeseables e incluso grietas de rectificado.

Las tensiones residuales producidas por los procesos que se acaba de describir se reducen o eliminan mediante tratamientos térmicos para alivio de tensiones aplicado a temperatura subcrítica entre 550 y 650 °C (1020 y 1200 °F) para aceros al carbono y de baja aleación, y entre 600 y 750 °C (1110 y 1380 °F) para los aceros rápidos (arrancan la viruta a velocidades muy rápidas sin calentarse mayormente).

El calentamiento y enfriamiento para llegar a la temperatura de alivio de tensión debe realizarse lentamente, especialmente en secciones grandes, uniones soldadas, con el fin de evitar la introducción de nuevas tensiones térmicas y agrietamiento posible durante los tratamientos de alivio de esfuerzos residuales.

El objetivo de aliviar esfuerzos, no es producir cambios importantes en las propiedades mecánicas. Por otro lado, el alivio de tensiones se logra mediante mecanismos de recuperación que reorganizan y reducen la densidad de dislocaciones (plano extra de átomos que produce distorsión en la red cristalina) sin causar recristalización (formación de nuevos granos sin deformación) con sus principales cambios en la microestructura y las propiedades mecánicas. Por ejemplo, la investigación de alivio de tensiones en las barras de acero dulce obtenidas por extrusión en frío mostró que las tensiones residuales fueron cuasi aliviadas en su totalidad sin ninguna disminución de dureza después de calentar a 500 C (930 F) durante una hora (Krauss, 2005).

3.11. Problemas resueltos

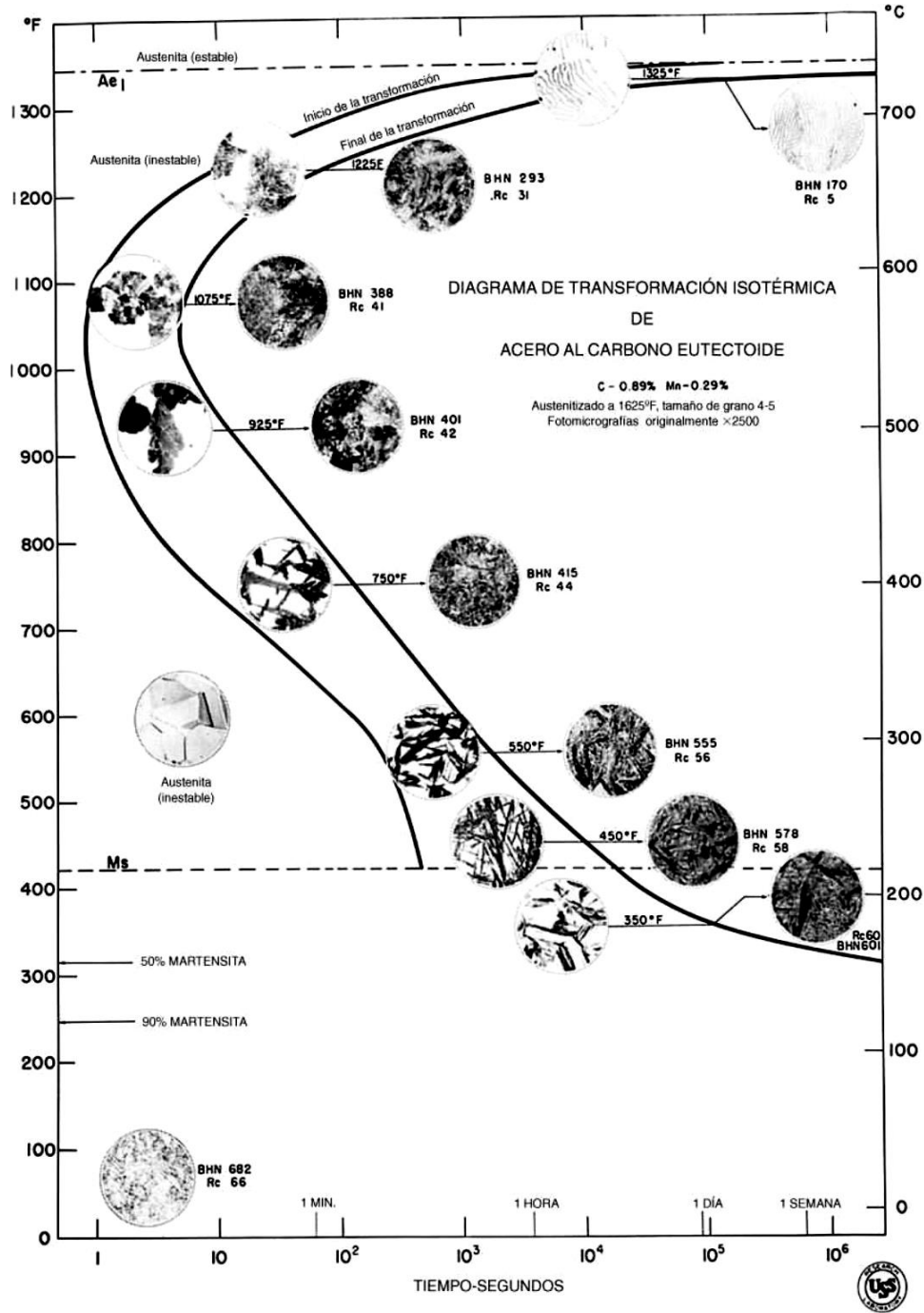
1. Plaquetas de un acero AISI 1080 de 0,25 mm de espesor laminadas en caliente, son calentados durante 1 hora a 850°C y después se les dan los tratamientos térmicos mencionados en la lista siguiente. Usando el diagrama

de transformación isotérmica de la Figura 97, determine las microestructuras de las muestras después de cada tratamiento térmico.

- a) Templado con agua a temperatura ambiente.
- b) Templado en caliente en sal fundida a 690°C y mantenido 2 h; templado en agua.
- c) Templado en caliente a 610°C y mantenido 3 min; templado en agua.
- d) Templado en caliente a 580°C y mantenido 2 s; templado en agua.
- e) Templado en caliente a 450°C y mantenido 1 h; templado en agua.
- f) Templado en caliente a 300°C y mantenido 30 min; templado en agua.
- g) Templado en caliente a 300°C y mantenido 5 h; templado en agua.

Figura 97.

Diagrama de transformación isotérmica de un acero hipoeutectoide



Fuente: Smith(s.f.)

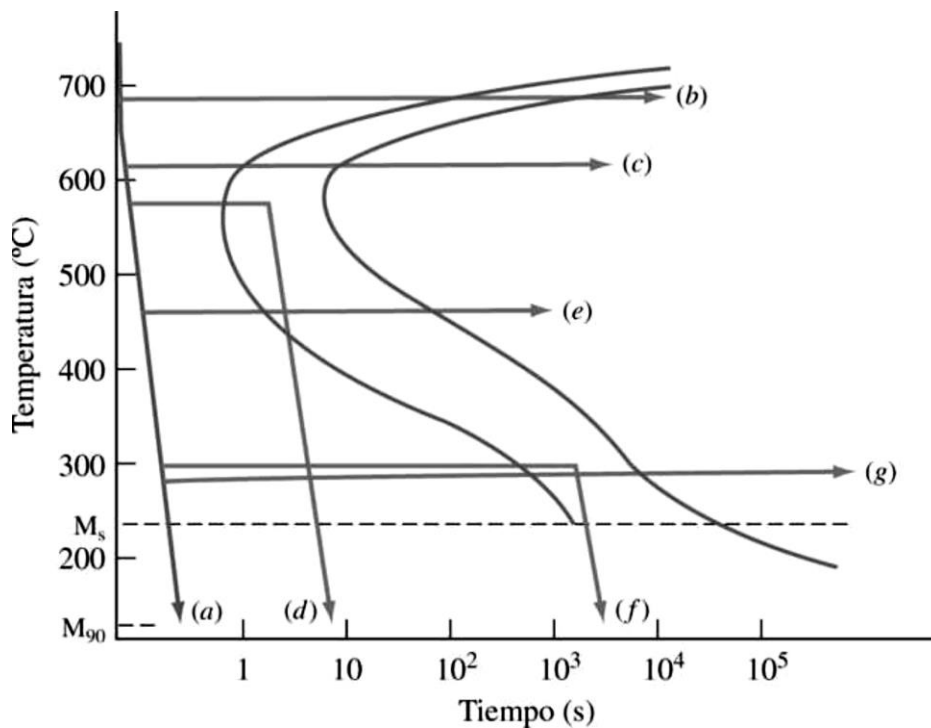
Solución:

Los patrones de enfriamiento se muestran en la Figura 98 y las microestructuras obtenidas aparecen en la siguiente lista:

- a) Solamente martensita.
- b) Sólo perlita gruesa.
- c) Sólo perlita fina.
- d) Aproximadamente 50% de perlita fina y 50% de martensita.
- e) Sólo bainita superior.
- f) Aproximadamente 50% de bainita inferior y 50% de martensita.
- g) Sólo bainita inferior.

Figura 98.

Diagrama de transformación isotérmica para un acero al carbono simple



Fuente: Smith(s.f.)

2. Un elemento de máquina, ha sido diseñado para soportar cargas de tracción y se requiere un esfuerzo de fluencia en el intervalo de 180 Ksi, con un porcentaje de elongación no menor al 10% si se ha seleccionado un acero AISI 1050 para elaborar dicho elemento, elabore un tratamiento térmico ya que el material comercial no cumple con dichas características.

Solución:

Como primer punto se debe saber cuál es el esfuerzo a la fluencia de un acero AISI 1050 comercial:

Figura 99.

Propiedades mecánicas del acero AISI 1050 comercial

Steel designation		Type of processing (a)	Estimated minimum values							Average machinability rating(b)
SAE and/or AISI No.	UNS No.		Tensile strength		Yield strength		Elongation in 50 mm (2 in.), %	Reduction in area, %	Hardness, HB	
			MPa	ksi	MPa	ksi				
Manganese 1.00% maximum										
1044	G10440	Hot rolled	550	80	300	44	16	40	163	
1045	G10450	Hot rolled	570	82	310	45	16	40	163	
		Cold drawn	630	91	530	77	12	35	179	55
		ACD	590	85	500	73	12	45	170	65
1046	G10460	Hot rolled	590	85	320	47	15	40	170	
		Cold drawn	650	94	540	79	12	35	187	55
		ACD	620	90	520	75	12	45	179	65
1049	G10490	Hot rolled	600	87	330	48	15	35	179	
		Cold drawn	670	97	560	81.5	10	30	197	45
		ACD	630	92	530	77	10	40	187	55
1050	G10500	Hot rolled	620	90	340	49.5	15	35	179	
		Cold drawn	690	100	580	84	10	30	197	45
		ACD	660	95	550	80	10	40	189	55

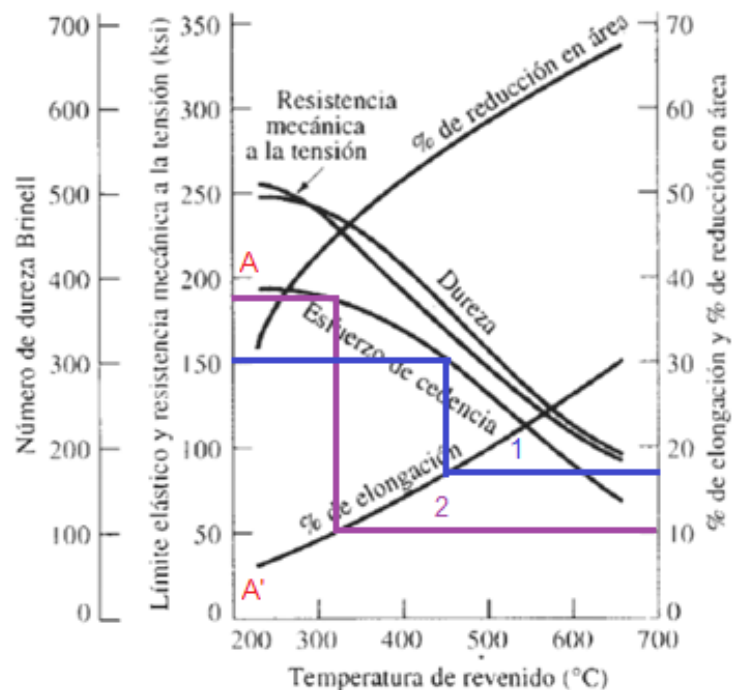
Fuente: Allen & Boardman (2005)

Como se puede observar en la Figura 99, no se podría obtener esta combinación de propiedades ya sea laminado en caliente o estirado en frío. Si se toma un acero AISI 1050 laminado en caliente con 49,5 Ksi de esfuerzo de fluencia con 15% de elongación, se puede realizar un tratamiento térmico de temple para aumentar el esfuerzo de fluencia más un revenido para mejorar la ductilidad.

1. Austenitizar por encima de la temperatura A_1 a 770°C durante una hora. Una temperatura adecuada podría ser $770^{\circ}\text{C} + 55 = 825^{\circ}\text{C}$.
2. Templar rápidamente a temperatura ambiente para formar martensita, con esto se logra un esfuerzo de fluencia de 190 Ksi y un porcentaje de elongación del 8% aproximadamente (punto A y A' respectivamente de la Figura 100)
3. Luego del temple, a fin de mejorar la ductilidad existen 2 alternativas para lograr lo requerido:
 - a) Revenir a 430°C se obtiene un esfuerzo de fluencia justa de 150 Ksi y una ductilidad justa del 18% (curva azul).
 - b) Revenir a 320°C se obtiene un esfuerzo de fluencia de 180 Ksi y una ductilidad justa del 10% (curva lila).
4. Enfriar a temperatura ambiente.

Figura 100.

Efecto de la temperatura de revenido sobre las propiedades mecánicas de un acero 1050



Fuente: Askeland (2009)

En un diseño de este tipo de elemento, se podría recomendar la alternativa en la que se obtenga un esfuerzo de fluencia mayor a 150Ksi y una ductilidad del 10%, ya que es primordial tener un margen de seguridad en la variable directa de diseño mecánico.

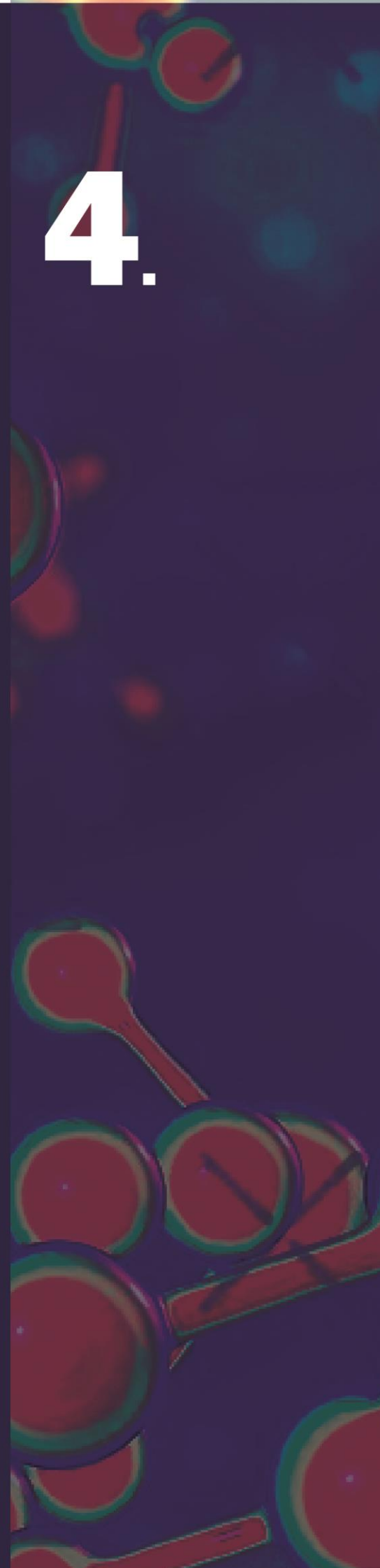
Resumen

Un acero de construcción (ASTM A36) tiene un porcentaje de carbono comprendido entre 0,26 a 0,32 %, en condiciones de enfriamiento moderado (normalizado), tal como se encuentra comercialmente presenta una ponderada resistencia mecánica y buena ductilidad (60Ksi A=20% respectivamente) apto para la construcción, ya que sus constituyentes principales a temperatura ambiente son ferrita proeutectoide y perlita. Si este material se lo requiere para un elemento de máquina como un engrane, por ejemplo, no presentará suficiente dureza para su uso, debido al contacto constante entre engranes, sufre un desgaste prematuro, entonces, ¿cómo mejorar la dureza y por ende mitigar el desgaste de este material? Una alternativa es realizar un tratamiento térmico de temple, para obtener constituyentes duros (martensita) mejorando significativamente la vida útil del elemento. En el capítulo se fundamenta este y otros tratamientos térmicos, a fin de mejorar las propiedades mecánicas de acuerdo a lo requerido por el diseñador.

Es muy común, en la práctica industrial utilizar tratamientos con enfriamiento continuo, como el temple, normalizado y recocido, entonces, el lector adquiere los conocimientos fundamentales sobre los procesos y el rango de formación a diferentes temperaturas y velocidades de enfriamiento de nuevos microconstituyentes que se forman fuera del equilibrio. Esto no se lograría, sin un estudio de los diagramas de enfriamiento como los TTT (Tiempo Transformación Temperatura) y TEC (Transformación Enfriamiento Continuo).

CAPÍTULO
ALEACIONES
NO FERROSAS

4.



CAPÍTULO IV

ALEACIONES NO FERROSAS

4.1. Introducción

Los aceros y otras aleaciones ferrosas son usados en una gran variedad de aplicaciones debido a su gran rango de propiedades metálicas, facilidad de fabricación y su costo de producción. Sin embargo, tienen limitaciones como densidad alta, conductividad eléctrica baja y una facilidad de corrosión dependiendo del medio en el que se encuentren. Por otro lado, las aleaciones que no contienen una cantidad significativa de hierro se consideran como metales y aleaciones no ferrosas. Estos metales poseen baja resistencia a altas temperaturas y tiene mayor contracción que los metales ferrosos. Se utilizan en la industria debido a su alta resistencia a la corrosión, fáciles de fabricar y reciclar (mecanizado, fundición, soldadura, forja y laminación), buena conductividad térmica y eléctrica, colores atractivos y baja densidad, aunque son usualmente más costosos que los materiales ferrosos.

Las aleaciones no ferrosas más comunes y sobre las cuales se tratará en el presente capítulo incluyen elementos cuyo componente principal es aluminio, cobre, níquel, magnesio y zinc.

Estas aleaciones no ferrosas están detalladas en la norma ASME, sección VIII, división 1. A pesar que estos metales no ferrosos fueron los primeros metales utilizados por los humanos en la metalurgia, en la actualidad en comparación con los metales ferrosos, su uso es significativamente bajo y las economías mundiales se enfocan en un uso sostenible mediante procesos de reciclaje lo cual va de la mano con el perspectivas actuales de economías circulares, incrementando la eficiencia energética en el proceso de producción de estas aleaciones.

El uso de estos materiales es extenso en industrias residenciales y comerciales y dependiendo del uso final pueden tener formas ya terminadas o simplemente en lingotes que posteriormente serán trabajados en base a las necesidades. Es importante mencionar que las propiedades de estos materiales pueden diferir considerablemente al momento de someterlos a distintos procesos de formación, incluso si se trata del mismo metal o aleación.

Entre los clientes más usuales de este tipo de materiales se encuentran diversas industrias como la electrónica, automotriz, energético (almacenamiento en baterías), la construcción, etc., por mencionar algunos. De forma general, las industrias han enfocado sus esfuerzos en el uso únicamente de aluminio y sus aleaciones, por las ventajas anteriormente mencionadas, incluyendo el costo de transporte por ejemplo para la importación de materias primas, sin embargo en los últimos años, los países han prestado más atención a la amplia gama y potencial futuro de aleaciones que pueden ser incluidas en distintos procesos industriales, lo cual con un adecuado apoyo de parte de los gobiernos puede llegar a ser una opción sostenible, innovativa y competitiva respecto a los metales ferrosos.

4.2. Aleaciones de aluminio

El aluminio (Aluminium) es un metal blanco con un tinte azulado cuyo símbolo atómico es Al, es el mineral más ampliamente distribuido de los elementos en la tierra junto al oxígeno y silicio, el metal fue descubierto en 1727 pero no pudo ser obtenido en bajas cantidades hasta que fue reducido electrolíticamente en 1885. El aluminio puro (99,99%) presenta una densidad de 2,7 g/cm³, un punto de fusión elevado de 660°C y una conductividad eléctrica y térmica de 2/3 del cobre, además es no magnético y altamente reflectivo, esto se debe a su estructura FCC, además, es resistente a la corrosión debido a una fina capa de óxido de aluminio que se forma en su exterior (Brady et al., 2002).

Se pueden trabajar en frío para mejorar su resistencia mecánica, sin embargo, este proceso disminuye su resistencia a la corrosión. Entre sus elementos aleados se incluyen cobre, magnesio, silicio, manganeso y zinc (Callister, 1996). La característica más llamativa del aluminio es su versatilidad, el aluminio refinado de alta pureza y sus aleaciones poseen una amplia gama de propiedades físicas y mecánicas.

En la actualidad se reconocen más de 300 aleaciones en la industria y sus composiciones varían de acuerdo con la demanda del consumidor, son opciones económicas y muy usadas en el mercado debido a su buena apariencia, bajo peso, facilidad de fabricación y buenas propiedades físicas, químicas. Presenta una excelente resistencia a la corrosión en varios ambientes incluyendo agua, agua

salada, petroquímicos y muchos otros sistemas químicos. Sus superficies son altamente reflectivas y pueden reflejar energía de radiación, luz visible y ondas electromagnéticas. Es no magnético por lo tanto no atrae a otros metales, además no produce chispas por lo cual es aplicado en dispositivos de manejo de productos inflamables, tiene una toxicidad baja y en estado natural presenta una apariencia atractiva y brillante (Davis & Committee, 2000b).

4.2.1. Extracción del aluminio

En estado natural, el aluminio no existe como un metal, esto se debe a su alta afinidad química con el oxígeno, los compuestos de aluminio se encuentran ampliamente distribuidos en la naturaleza y dependen de su pureza e hidratación. El aluminio se encuentra en la naturaleza en un gran porcentaje (27,5%) y se sabe que aproximadamente el 8% de la corteza terrestre está compuesta de aluminio. A pesar de encontrarse en abundancia en la naturaleza, es muy difícil extraer óxidos de aluminio debido a que se encuentran con impurezas, existen varios óxidos de aluminio de los cuales se extrae el mineral, pero los más abundantes en la naturaleza son (Totten & MacKenzie, 2003):

- **Bauxita**

La bauxita es un mineral blanco o rojizo que se encuentra como bloques o granos, químicamente compuesto como $AlO_x(OH)_{3-2x}$ (donde x puede ser un número entre 0 y 1) contiene teóricamente un 74% de aluminio y es el mineral de extracción más importante de todos los que se encuentran en la corteza terrestre, la bauxita se clasifica en base al contenido de alúmina por lo tanto la bauxita grado A contiene un mínimo de 55% de Al y máximo 8% de Si, la bauxita grado B contiene un mínimo de 50% de Al y un contenido de Si de un 8-16%.

Este elemento presenta un punto de fusión alto (1820°C) y puede ser usada como material refractario y puede ser encontrado en mayor cantidad en países como Guinea, Brasil, India, Australia, Surinam, Jamaica, Malasia, Vietnam entre otros (Brady et al., 2002).

Figura 101.

Roca de bauxita



Fuente: USGS (2021)

- **Nefelina**

Después de la bauxita, la nefelina es el segundo mineral de aluminio en importancia, estas rocas contienen $\text{Na}(\text{AlSiO}_4)$ y su composición general es 35,7% de alúmina (Al_2O_3); 42,4% de óxido de silicio(SiO_2) y 21,9% de óxido de sodio (Na_2O). Existen varios tipos de nefelina las cuales son ricas en potasio o sodio y potasio; la nefelina presenta una estructura HCP y pueden ser encontrados como una masa rocosa granular sólida, usualmente tiene un color grisáceo o es translúcida y se disuelve fácilmente en ácidos minerales que contienen SiO_2 en forma de gel.

A pesar de lo antes mencionado, la nefelina contiene silicio y sus porciones significantes de álcalis en su composición ofrecen una reducción de óxido de aluminio y producir productos a partir de una mezcla bifásica de carbonato de sodio o cemento. Usualmente la nefelina se encuentra en forma de masas de montañas (rocas) en combinación con rocas alcalinas (Totten & MacKenzie, 2003).

Figura 102.

Roca de nefelina



Fuente: mindat.org (2021e)

- **Alunita**

La alunita corresponde al grupo de las rocas alcalinas de aluminio y sulfato doble, es un mineral importante en la extracción del aluminio y su composición química puede variar significativamente. Teóricamente está formada 38,60% óxido de sulfato, 37,00% óxido de aluminio, 13,20% de hidróxido de agua y 11,40% óxido de potasio. Además, se pueden encontrar óxido de silicio, óxido de calcio y óxido de hierro.

Cristaliza en un sistema tetragonal y consiste usualmente en pequeños cristales grisáceos, amarillentos o rojizos. Debido a su alto contenido de potasio y azufre se pueden extraer además del aluminio fertilizadores de potasio y ácido sulfúrico (Totten & MacKenzie, 2003).

Figura 103.

Roca de alunita



Fuente: mindat.org (2021e)

- **Cianita (Distena)**

La cianita (Al_2SiO_5) es una materia prima de alta calidad para la reducción electrotérmica del aluminio. Los minerales de este grupo presentan modificaciones polimórficas cuya base esta teóricamente formada por 63,2% de alúmina y 36,8 % de óxido de silicio.

Este mineral cristaliza como una estructura triclinica y presentan coloraciones celestes o azul grisáceo y en menos ocasiones en coloraciones amarillentas o marrones de aspecto vidrioso; al ser elementos anisotrópicos su dureza y coloración es igual en ciertos planos. Su coloración en los planos base es verde oliva y a lo largo de sus planos laterales es marrón rojizo (Totten & MacKenzie, 2003).

Figura 104.

Roca de cianita



Fuente: Geology.com (2021b)

4.2.2. Designación de aleaciones de aluminio

La designación del aluminio no se encuentra estandarizada. Muchos países o compañías manejan sus cartas de designación propias; en Norteamérica esta clasificación la realiza la Asociación del Aluminio (AA) por sus siglas en inglés.

En la actualidad hay más de 400 aleaciones de aluminio forjado y más de 200 aleaciones en forma de piezas fundidas y lingotes que han sido registradas en la AA en el libro “Designaciones y límites de composición química para aleaciones de aluminio en forma de piezas fundidas y lingotes”. Estas publicaciones pueden ser extremadamente útiles para el ingeniero de soldadura cuando desarrolle procedimientos de soldadura y cuando la consideración de la química y su asociación con la sensibilidad a la fisuración sea de importancia.

Esta designación presenta una configuración parecida a la clasificación AISI para aceros donde:

- Primer dígito: constituyente principal de la aleación.
- Segundo y tercer dígito: designación específica de la aleación (número único para cada aleación).
- Cuarto dígito: forma de manufactura (0 en fundición o 1,2 para lingote).

En base a esta clasificación se obtiene que las aleaciones de aluminio se dividen en:

Tabla 19.

Clasificación de aleaciones de aluminio

Numero AA	Composición
1xx-x	Al puro (99%)
2xx-x	Al - Aleaciones de Cu
3xx-x	Al - Mn
4xx-x	Al - Si
5xx-x	Al - Mg
6xx-x	Al - Mg - Si
7xx-x	Al - Zn
8xx-x	Al - Otros elementos
9xx-x	Serie no usada

Fuente: (Kaufman et al., 2004)

A su vez, estas aleaciones pueden presentar condiciones de tratamiento térmico las cuales están designadas de la siguiente manera:

- F como fundición.
- O recocido.
- T2 recocido (solo productos fundidos).
- T3 tratado térmicamente a solución y luego en frío.
- T4 tratado en solución y envejecido en forma natural hasta una condición estable.
- T5 solo envejecido artificial.
- T6 tratado térmicamente y en solución luego envejecida artificialmente.

- T7 tratado térmicamente y en solución luego estabilizada.
- T8 tratado térmicamente, en solución trabajo en frío y envejecida artificial.
- T9 tratados térmicamente en solución, envejecida artificialmente y luego trabajo en frío.
- T10 envejecida artificialmente y luego trabajada en frío seguido de trabajo en frío (Smith & Hashemi, 2003).

Los dígitos adicionales indican alivio del estrés. Por ejemplo:

TX51 o TXX51: el estrés se alivia con el estiramiento.

TX52 o TXX52: tensión aliviada al comprimir.

4.2.3. Grupos de aleación

- **Aluminio (1xxx)**

Aluminio con pureza 99% o mayor (no tratable térmicamente, con una resistencia máxima a la tracción de 10 a 27 ksi). Se caracterizan por una excelente resistencia a la corrosión, alta conductividad térmica y eléctrica, bajas propiedades mecánicas y excelente trabajabilidad. Pueden aumentar su dureza moderadamente mediante endurecimiento por acritud, sus impurezas principales son el hierro y el silicio (Davis & Committee, 2000b).

Son soldables, sin embargo, debido a su estrecho rango de fusión, requieren ciertas consideraciones para producir procedimientos de soldadura aceptables. Cuando se consideran para la fabricación, estas aleaciones se seleccionan principalmente por su resistencia superior a la corrosión, como en tanques y tuberías de productos químicos especializados, o por su excelente conductividad eléctrica como en las aplicaciones de barras colectoras. Estas aleaciones tienen propiedades mecánicas relativamente malas y raras veces se considerarían para aplicaciones estructurales generales. Estas aleaciones a menudo se sueldan con material de relleno correspondiente o con aleaciones de relleno 4xxx dependiendo de la aplicación y los requisitos de rendimiento.

Aplicaciones: Usados ampliamente en el campo eléctrico y químico.

- **Aluminio cobre (2xx)**

En estas aleaciones el elemento principal es el cobre, a veces se usa magnesio como elemento de aleación secundaria y requieren tratamientos superficiales para obtener propiedades óptimas de trabajo; en condiciones de tratamiento térmico sus propiedades mecánicas superan o igualan a las de los aceros de bajo carbono (resistencia máxima a la tracción de 27 a 62 ksi). En ciertas instancias se requiere envejecimiento para obtener mayores propiedades mecánicas logrando un incremento en la resistencia mecánica pero no así, en la resistencia a la tracción (Davis & Committee, 2000b).

Las primeras aleaciones de cobre son usadas ampliamente en forma de fundición en aplicaciones que requieran dureza y resistencia a altas temperaturas, contienen cobre en un 10% y no necesitan tratamientos térmicos en su estado inicial (fundición). Algunas de estas aleaciones se consideran no soldables por los procesos de soldadura por arco debido a su susceptibilidad al agrietamiento en caliente y al agrietamiento por corrosión bajo tensión; sin embargo, otros se sueldan al arco con mucho éxito con los procedimientos de soldadura correctos.

Muchas otras aleaciones contienen de 4 a 5% de cobre y han sido desarrolladas con cantidades variables de magnesio, la plata acelera el envejecimiento y reduce su corrosión, estas composiciones son capaces de soportar tratamientos térmicos y poseen la mayor resistencia a la tracción en las aleaciones fundidas comerciales. La combinación de propiedades tensiles y ductilidad proporcionan una dureza excepcional. Las aleaciones de este tipo son susceptibles a fracturas en la solidificación y roturas inter dendríticas, en estos casos se requieren técnicas de fundición rígidas, enfriamiento controlado y un óptimo refinamiento de grano (Kaufman et al., 2004).

Aplicaciones:

- 2014 estructuras para aviones, remaches, ruedas para camiones.
- 2017 (duraluminio) remaches de aviones.
- 2024 cárteres de motores.
- 2218 cabezas de cilindro y pistones forjados.
- 2085, 2108, 2319, 2380 (Al – Cu – Si) tanques para gasolina y aceite.
-

- **Aluminio manganeso (3xx)**

Estas aleaciones (no tratables térmicamente - con resistencia máxima a la tracción de 16 a 41 ksi) tienen al manganeso como elemento de aleación principal, generalmente no están expuestas a tratamiento térmico, pero presentan un aumento en la resistencia mecánica en un 20% comparadas con las aleaciones 1xxx. Esto se debe a que un pequeño porcentaje del manganeso (1,5%) es agregado efectivamente al aluminio; el manganeso es usado como principal elemento de aleación en pocas aleaciones, a pesar de eso las aleaciones 3003, 3X04 y 3105 son usadas ampliamente en aplicaciones que requieran una resistencia mecánica moderada pero buena trabajabilidad (Davis & Committee, 2000b).

Uno de sus primeros usos fueron las ollas y sartenes, y en la actualidad son el componente principal de los intercambiadores de calor en vehículos y centrales eléctricas. Sin embargo, su resistencia moderada a menudo lo excluye de aplicaciones estructurales.

Aplicaciones:

- 3003 paneles decorativos, azulejos de aluminio.
- 3004 latas de aluminio, contenedor de productos.
- 3104 paneles carcasa TV LCD, componentes eléctricos.
- 3005 aires acondicionados, refrigeradores.

- **Aluminio silicio (4xx)**

Estas aleaciones de carácter binario (adiciones de silicio que varían de 0,6 a 21,5%) presentan fluidez, fundabilidad y resistencia a la corrosión excelentes. Presentan una resistencia mecánica baja y maquinabilidad pobre, su ductilidad puede ser excepcional y es función de la concentración de impurezas en su estructura (tratables térmicamente y no tratables térmicamente - con resistencia a la tracción máxima de 25 a 55 ksi).

En aleaciones hipo eutécticas de Al – Si se puede mejorar su ductilidad, dureza y fundabilidad mediante modificación de las aleaciones eutécticas, esta modificación es ventajosa en fundiciones de arena y se pueden lograr al añadir sodio y/o estroncio. Una tasa de enfriamiento elevada proporciona una estructura

finas en una estructura eutéctica además exhiben coeficientes de expansión térmica y gravedad específica bajas. El silicio, independientemente del aluminio, no se puede tratar térmicamente; sin embargo, varias de estas aleaciones de silicio se han diseñado para tener adiciones de magnesio o cobre, lo que les proporciona la capacidad de responder favorablemente al tratamiento térmico de la solución (Kaufman et al., 2004).

Aplicaciones:

- 4032 pistones forjados para automóviles.
 - 4043 alambre de soldadura MIG, piezas de automóviles, marcos de bicicletas.
 - 4047 forros, juntas herméticas, cubiertas.
 - 4080 perfiles estructurales de aluminio.
-
- **Aluminio magnesio (5xx)**

Son aleaciones binarias de una fase con resistencia mecánica y dureza media – elevada (no tratables térmicamente - con resistencia máxima a la tracción de 18 a 51 ksi) su característica más importante es la resistencia a la corrosión por lo cual es usada extensamente en la industria del procesamiento de bebida y comida. Presentan una soldabilidad excelente, maquinabilidad buena y una apariencia atractiva como fundición, mecanizado, pulido o anodizado. Por estas razones, se utilizan para una amplia variedad de aplicaciones, como construcción naval, transporte, recipientes a presión, puentes y edificios. Las aleaciones a base de magnesio a menudo se sueldan con aleaciones de relleno, que se seleccionan después de considerar el contenido de magnesio del material base y las condiciones de aplicación y servicio del componente soldado.

El magnesio incrementa la tasa de oxidación del aluminio, en su estado fundido las pérdidas de magnesio pueden ser significantes y los óxidos de aluminio y magnesio pueden afectar la calidad de la fundición. Es necesario generar el menor número de inclusiones debido que estas aleaciones requieren superficies pulidas o acabados superficiales finos, las aleaciones que contienen más del 7% de Mg pueden ser sometidas a tratamientos térmicos, aunque estos son usados para mantener y estabilizar las propiedades de la aleación mas no modificar su composición (Kaufman et al., 2004).

Aplicaciones:

- 5005 piezas extruidas con fines arquitectónicos.
- 5050 conductos para gas y aceite para automóviles.
- 5052 conductos de combustibles y aceite de avión.
- 5056 cubierta para cables, remaches.
- 5083 aplicaciones marinas y estructuras soldadas.
- 5214 equipo para manejo de leche y alimentos.

- **Aluminio magnesio silicio (6xx)**

(Tratables térmicamente - con resistencia máxima a la tracción de 18 a 58 ksi). La adición de magnesio a las aleaciones de aluminio y silicio produce una familia extremadamente importante en la industria ya que combina características sobresalientes de fundición con propiedades excelentes después de un tratamiento térmico además, su resistencia a la corrosión es muy buena y presentan un bajo nivel de expansión térmica. La adición de magnesio y silicio al aluminio produce un compuesto de magnesio-siliciuro, que proporciona a este material su capacidad para ser tratado térmicamente en solución para mejorar la resistencia. Es importante también, una modificación eutéctica para mejorar su resistencia, porcentaje de elongación y su fundabilidad (Kaufman et al., 2004).

No son tan resistentes como las aleaciones 2xxx y 7xxx, pero pueden ser templados mediante un temple T4 y endurecidos al máximo obteniendo propiedades mecánicas máximas mediante un endurecido por precipitación T6. Estas aleaciones son naturalmente sensibles al agrietamiento por solidificación y, por esta razón, no deben soldarse con arco de forma autógena (sin material de relleno) (Davis & Committee, 2000b).

Aplicaciones:

- 6061 mallas de pistas de aterrizaje, canoas, pasamanos de puentes.
- 6063 perfiles de carpintería metálica, manillas, herrajes.
- 6065 perfiles de aluminio, marcos de bicicletas.
- 6082 perfiles metálicos, moldes, partes de vehículos industriales.

- **Aluminio zinc (7xx)**

Estas aleaciones están formadas por adiciones de zinc que van del 0,8 al 12,0% y al ser combinadas con porcentajes bajos de magnesio resulta en las aleaciones tratables térmicamente de modera a muy alta resistencia (con una resistencia máxima a la tracción de 32 a 88 ksi). Por lo general, se añaden también cobre y cromo en pequeñas cantidades para mejorar sus propiedades, son muy usados en aplicaciones que requieran trabajar a altas tensiones; las aleaciones de alta resistencia exhiben una reducida resistencia a la corrosión bajo tensiones y a menudo se templen ligeramente sobre envejecidas, para aumentar su resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y a la fractura (Mondolfo, 2013).

Aplicaciones:

- 7005 marcos para bicicletas.
- 7020 placas, barras, perfiles, puentes grúa, tanques de camiones.
- 7040 accesorios para aviones, cubiertas para torres, equipo de radio.
- 7050 aplicaciones aeronáuticas.
- 7075 mosquetones, fuselajes para ala delta, marcos de bicicletas.

4.3. Aleaciones de cobre

El cobre es uno de los metales más útiles y uno de los primeros usados por los humanos. Es aparentemente abundante debido a su facilidad de separar de sus minerales y es a menudo un subproducto de la plata y otras actividades mineras, tiene una estructura FCC y es de color rojo amarillento. Da un destello brillante cuando se pule, tiene un sabor desagradable y un olor peculiar; cobre se refiere al metal al menos con un 99,3% de pureza, pero existen más de 50 grados forjados muchos de los cuales poseen una pureza mayor al 99,7% y están representados por series de cobre desde C10xxx hasta C15xxx además de sus aleaciones (Brady et al., 2002).

En la actualidad, el cobre y sus aleaciones permanece como uno de los grupos de metales más utilizados, solamente detrás del acero y el aluminio en producción y consumo. Este material ha sido extensamente usado debido a su excelente conductividad eléctrica y térmica, además de su notable resistencia a la corrosión,

fácil de fabricar y una buena resistencia a la fatiga. Se amplía algunas de estas ventajas a continuación.

4.3.1. Propiedades del cobre

El cobre tiene muchas bondades las cuales son aprovechadas al máximo por las empresas que lo comercializan, se podría hablar de varios aspectos fundamentales por los cuales el cobre se encuentra en grandes cantidades en la vida cotidiana, pero las más importantes corresponden a:

- Resistencia a la corrosión: el cobre es un metal noble pero contrariamente al oro y demás metales preciosos puede ser atacado por diferentes agentes y ambientes corrosivos. El cobre puro resiste estos ataques de buena manera en la mayoría de las condiciones de corrosión. Sin embargo, algunas aleaciones de cobre tienen una vida limitada en condiciones de corrosión debido a fragilización por el contacto con hidrógeno o agrietamiento por corrosión.

La fragilización por hidrógeno se observa cuando los cobres tenaces, que son aleaciones que contienen óxido cuproso, se exponen a una atmósfera reductora. La mayoría de las aleaciones de cobre están desoxidadas y, por lo tanto, no están sujetas a fragilización por hidrógeno.

- Conductividad térmica y eléctrica: el cobre y sus aleaciones son conductores relativamente buenos de calor y electricidad. El cobre es ampliamente usado en la industria con estos fines en vez del metal, las aleaciones disminuyen invariablemente la conductividad eléctrica y en menor medida la conductividad térmica. El porcentaje de reducción en la conductividad no depende del material de aleación si no del efecto que tienen los átomos de soluto en la celda espacial del cobre.

Como muchos de otros metales, el cobre es intencionalmente aleado para mejorar su resistencia sin degradar su ductilidad y manejabilidad. Sin embargo, es necesario reconocer que estos elementos agregados también degradan la conductividad térmica y eléctrica en varias cantidades, dependiendo en el elemento aleado, la concentración y la ubicación de la microestructura (solución sólida, precipitación). La elección de la aleación y la condición está basada usualmente en la relación entre resistencia y conductividad deseada (Davis & Committee, 2001).

- **Facilidad de fabricación:** el cobre y sus aleaciones son capaces de moldearse en formas y dimensiones requeridas por procesos de fabricación comunes. La mayoría de los países en el mundo usa el cobre para sus monedas y los metales de cobre pueden ser pulidos, texturados, chapados o recubiertos para proporcionar una amplia variedad de superficies funcionales o decorativas. Además, el cobre y sus aleaciones pueden ser ensamblados mediante procesos mecánicos comunes pero la soldadura es el más usado.

4.3.2. Extracción del cobre

El cobre es un elemento relativamente raro a pesar de encontrarse en un 0.005% en la corteza terrestre en comparación con el 5% de hierro y el 8% de aluminio. Incluso en la actualidad es económico extraerlo en lugares donde al menos se concentra 100 veces su promedio en abundancia, en la naturaleza el cobre normalmente se produce combinado con otros elementos en forma de minerales.

El cobre mineral más común es la calcopirita, la cual es un sulfuro de cobre y hierro que contiene cantidades aproximadamente iguales de azufre, cobre y hierro. Casi la mitad de los depósitos mundiales de cobre se encuentran en manera de calcopirita, pero a su vez existen otros minerales como la cuprita, bornita y la azurita (Thompson, 2006).

- **Calcopirita**

También llamada piritita de cobre es un mineral con estructura tetragonal y se encuentra clasificada dentro de los sulfuros. Es la fuente más importante de cobre en el mundo y la que se encuentra en mayor cantidad, debido a su coloración amarillo latón puede ser confundida con el oro. Químicamente está formada por un disulfuro de hierro y cobre metalizado, a pesar de tener menos contenido de cobre que la cuprita, bornita, azurita o malaquita es el mineral de cobre del cual se extrae aproximadamente un 75% de todo el cobre que se produce (Thompson, 2006).

Se trata de un mineral semi pesado, muy poco duro y frágil que se caracteriza por tener un brillo metálico y emitir coloraciones verdes por la presencia de cobre, puede ser encontrada en países como España, Reino Unido, Alemania, México, Brasil, EE. UU., Canadá, Congo y Perú.

Figura 105.

Roca de calcopirita



Fuente: mindat.org, (2021e)

- **Cuprita**

Es un mineral con estructura cúbica, se encuentra dentro de los sulfuros y presenta forma granular o terrosa con cristales microscópicos. Tiene una coloración rojiza y es semi transparente, tiene un brillo adamantino y es conocido como un mineral secundario. Esto se debe a que se forma en la zona de oxidación de los depósitos de otros minerales de cobre, se puede encontrar en Namibia, Gran Bretaña, Rusia, Francia y España (Thompson, 2006).

Figura 106.

Roca de cuprita



Fuente: mindat.org (2021e)

- **Bornita**

Conocida también como erubescita, es un mineral que forma parte de los sulfuros y está conformado por un sulfuro de hierro y de cobre. Se encuentra en depósitos de calcopirita. Se presentan en formas dodecaédricas, octaédricas o pseudocúbicas con caras asperas o curvas. Está cubierta de una tonalidad púrpura y es común encontrarla en países como México, EEUU, Chile y Perú (Thompson, 2006).

Figura 107.

Roca de bornita



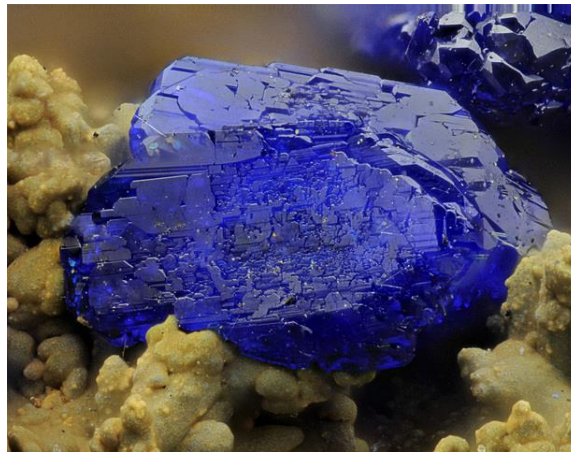
Fuente: mindat.org, (2021e)

- **Azurita**

Denominada también como malaquita azul pertenece al grupo de los carbonatos. Este mineral se forma en los depósitos de cobre abiertos al ambiente, tiene una coloración azul y empaca en un sistema monoclinico. Está asociada con otros minerales del cobre como la bornita o la calcopirita y se puede encontrar en países como EEUU, Pakistán o Namibia (Thompson, 2006).

Figura 108.

Roca de azurita



Fuente: mindat.org (2021e)

4.3.3. Designación de aleaciones de cobre

En Estados Unidos la designación de las aleaciones de cobre está a cargo de la Asociación de Desarrollo del Cobre. Esta clasificación presenta dos grandes grupos como son aleaciones forjadas y aleaciones fundidas. Esta designación se presenta de la siguiente manera:

Tabla 20.

Clasificación de aleaciones de cobre

Aleaciones Forjadas	
C1xxx	Cobres (mínimo 99,3% de Cu), y aleaciones con alto contenido de cobre (menos del 99,3% y más del 96% de Cu)
C2xxx	Cu – Zn (latones)
C3xxx	Cu – Zn – Pb (latones plomados)
C4xxx	Cu – Zn – Sn (latones de estaño)
C5xxx	Cu – Sn (bronces de fósforo)
C6xxx	Cu – Al (bronces de aluminio), Cu – Si (bronces de silicio) y Cu – Zn
C7xxx	Cu – Ni y Cu – Ni – Zn
Aleaciones Fundidas	
C8xxx	Cobres forjados, latones fundidos, aleaciones Mn - Bronce y aleaciones fundidas de Cu – Si – Zn
C9xxx	Aleaciones fundidas de Cu – Sn, Cu – Sn – Pb, Cu – Sn – Ni, Cu – Al – Fe y Cu – Ni – Fe

Fuente: Smith & Hashemi (2003)

4.3.4. Grupos de aleaciones

- **Latones (Cu – Zn)**

Su contenido máximo de zinc es del 36% y se dividen en latones alfa, beta y alfa + beta. Sus propiedades varían dependiendo de su contenido de carbono, aunque su mejor combinación en cuanto a propiedades mecánicas se refiere es 70% de Cu y 30% de Zn.

Para satisfacer todas las necesidades, existen muchas composiciones estándar para latón, con contenidos de cobre que van del 58% al 95%. Aparte del principal elemento de aleación, el zinc, se realizan pequeñas adiciones (menos del 5%) de otros elementos de aleación a algunos latones para modificar sus propiedades de modo que el material resultante sea apto para un propósito determinado. La ductilidad en frío y en caliente de los latones los hace aptos para todos los procesos convencionales de formación de metales. También son fácilmente fundidos. De la gama de composiciones, se pueden seleccionar aleaciones estandarizadas para:

- Varillas y perfiles extruidos (macizos y huecos).
- Estampados en caliente y forjados.
- Placas enrolladas, láminas, tiras y círculos cortados.
- Tubos dibujados: redondos y con forma.
- Alambre estirado: redondo y con forma.

Piezas fundidas: arena, revestimiento, molde permanente (por gravedad y troquel a presión).

En estado recocido, los latones son dúctiles y fuertes, pero cuando se endurecen mediante procesos de trabajo en frío como el laminado o el estirado, su resistencia aumenta notablemente. Se pueden ensamblar estructuras fuertes y rígidas a partir de secciones extruidas y estiradas. La resistencia del latón se conserva sustancialmente a temperaturas de hasta alrededor de 200°C y se reduce solo alrededor de un 30% a 300°C, lo que se compara favorablemente con muchos materiales alternativos y supera fácilmente las propiedades de los plásticos. Los latones son muy adecuados para su uso a temperaturas criogénicas ya que las propiedades, especialmente resistencia y tenacidad, se conservan o mejoran ligeramente en estas condiciones.

Para aplicaciones que exigen mayor resistencia, se encuentran disponibles los "latones de alta resistencia". Estos contienen elementos de aleación adicionales como el manganeso, que mejoran aún más las propiedades. Algunos latones de alta resistencia alcanzan resistencias que son comparables con los aceros.

Además, los latones tienen una excelente resistencia a la corrosión, lo que los convierte en la primera opción natural y económica para muchas aplicaciones. La exposición atmosférica de los latones da como resultado el desarrollo de una

película superficial. La exposición al aire libre finalmente dará como resultado la formación de una fina capa protectora verde que con frecuencia se considera una característica visualmente atractiva en los edificios, pero el latón permanecerá esencialmente inalterado durante un período de tiempo ilimitado, es decir, no se oxidará como el hierro y acero. El agua de mar se puede manejar con éxito siempre que se elija la aleación correcta, y existe una larga historia en el uso de tubos y accesorios de tubos de latón, válvulas, etc. en plomería doméstica, calefacción central, líneas de agua de mar, condensadores de vapor y equipos de desalinización. Los latones de alta resistencia que contienen manganeso, tienen una resistencia particularmente excelente a la corrosión atmosférica; la exposición continua resulta en un oscurecimiento gradual del color bronce.

Latones alfa

La gama de aleaciones conocidas como latones alfa o latones de trabajo en frío contienen un mínimo de 63% de cobre. Se caracterizan por su ductilidad a temperatura ambiente y pueden deformarse extensamente por laminación, trefilado, plegado, hilado, embutido profundo, encabezado en frío y laminado de roscas. El material más conocido de este grupo contiene un 30% de zinc y se denomina comúnmente 70/30 o latón de cartucho (UNS Alloy C26000) debido a la facilidad con la que la aleación puede embutirse.

Los tubos para intercambiadores de calor se fabrican frecuentemente a partir de latón alfa, normalmente de composición 70/30, pero a menudo contienen adiciones de aleación que mejoran la resistencia a la corrosión. Las placas para fabricar tubos están hechas de una variedad de aleaciones de cobre (dependiendo de las condiciones de servicio), entre las que se encuentran latones que contienen 60% de cobre y 40% de zinc, además de otros elementos según corresponda. También se utilizan cantidades sustanciales de aleaciones alfa para la fabricación de sujetadores como tornillos para madera, remaches y cremalleras.

Su resistencia a la corrosión es muy buena pero su conductividad eléctrica es considerablemente inferior a la del cobre puro. Pueden ser forjados, laminados y moldeados, pueden dividirse en:

- **Latones rojos** (5 – 20% de Zn): tienen un tinte rojizo debido a la alta concentración de cobre, este tipo de latón es más valioso y suele ser reciclado.

Existe además una variación que se conoce como latón semi rojo el cual es más económico en su fabricación ya que tiene menos porcentaje de cobre y más aleaciones de metales como estaño, plomo y zinc. El latón rojo es ampliamente usado en la industria mecánica en forma de válvulas, aspersores y componentes de bombas (Brady et al., 2002).

- **Latones amarillos** (20 – 36% de Zn): tienen menos resistencia a la corrosión que los latones rojos, combinan resistencia y ductilidad, son usados para trabajos en frío y pueden estar sujetos a una pérdida de zinc. Es más brillante que el latón rojo y se usa principalmente en elementos decorativos como grifos, tornillos y pernos para puertas, armarios y llaves (Brady et al., 2002).

Latones beta

Presentan una estructura BCC, esta fase es relativamente frágil y alta en dureza comparación con alfa. Sin embargo, su ductilidad aumenta a altas temperaturas proporcionando excelentes propiedades de trabajo en caliente. Estos latones no son muy usados en la industria ya que a medida que aumenta la concentración de zinc el latón se vuelve frágil ($Zn > 50\%$) pasando a ser latones blancos.

Latones alfa + beta

Los "latones alfa-beta", "latones dúplex" o "latones de trabajo en caliente" suelen contener entre 38% y 42% de zinc. A diferencia de las aleaciones del primer grupo (latones alfa), su capacidad para deformarse a temperatura ambiente es más limitada. Sin embargo, son significativamente más manejables que los latones alfa a temperaturas elevadas y pueden extruirse en barras de sección compleja, ya sean sólidas o huecas, y forjarse en caliente en matrices cerradas ("estampadas en caliente") a formas complejas.

Se debe tener en cuenta la necesidad de un control cuidadoso de la temperatura de recocido y la velocidad de enfriamiento si se desea obtener una estructura alfa monofásica en un latón con alto contenido de zinc, como el latón común y el latón resistente al proceso de "descinificación". El uso actual de técnicas de recocido continuo para láminas, tiras, alambres y tubos proporciona una velocidad de enfriamiento mucho más rápida que el recocido por lotes anterior en hornos de campana de atmósfera controlada.

Estos latones están disponibles como varillas, barras y secciones extruidas, que a su vez son el material de partida para la fabricación de una amplia gama de componentes y accesorios de ingeniería. Las piezas forjadas en caliente se utilizan en prácticamente todas las industrias: accesorios de tubería, grifos domésticos, válvulas de radiador, aparatos de gas, herrajes para ventanas y puertas, son solo algunos ejemplos típicos de los productos que se pueden fabricar mediante este proceso. Se mantienen buenas tolerancias durante la fabricación, lo que minimiza la necesidad de mecanizado durante la producción final del componente, mientras que la estructura severamente labrada asegura altas propiedades mecánicas. Con frecuencia, el único mecanizado necesario es el taladrado de los accesorios y el roscado de las conexiones. La adición de un pequeño porcentaje de plomo a estas aleaciones, como en C37700 "latón forjado", ayuda al arranque de viruta durante el mecanizado, produciendo virutas cortas que se despejan fácilmente del área de corte para mejorar la maquinabilidad. Dado que el costo del zinc es menor que el del cobre, los latones con mayor contenido de zinc tienen un costo inicial menor. Esto puede ser importante para evaluar los costos de fabricación y de vida útil total (Gowland, 2018).

- **Bronces**

El bronce es una aleación que se compone principalmente de cobre con la adición de otros ingredientes. En la mayoría de los casos, el ingrediente agregado es típicamente estaño, pero también se pueden usar arsénico, fósforo, aluminio, manganeso y silicio para producir diferentes propiedades en el material. Todos estos ingredientes producen una aleación mucho más dura que el cobre solo. El bronce se caracteriza por su color dorado mate. También puede notar la diferencia entre el bronce y el latón porque el bronce tendrá anillos débiles en su superficie.

Bronce – Sn

En las aleaciones binarias de Cu-Sn, hasta aproximadamente un 8% de estaño permite que la aleación se forme fácilmente en frío y se pueden lograr aumentos significativos de dureza y resistencia. Las propiedades mecánicas se mejoran aún más mediante pequeñas adiciones de aleación de fósforo de hasta un 0,4%, lo que lleva al nombre de bronce fosforoso. Las piezas fundidas pueden contener más del 8% de Sn y, de ser así, pueden requerir remojo a temperaturas de aproximadamente 700 ° C hasta un segundo.

La fase rica en estaño desaparece volviendo a una aleación monofásica más resistente a la corrosión. En general, cuanto mayor sea el contenido de estaño, mayor será la resistencia a la corrosión del agua de mar. Cuando se fabrican correctamente, estas aleaciones tienden a corroerse uniformemente y tienen poca tendencia a picarse. Los bronce de mayor estaño tienen buena resistencia al agua de mar contaminada en comparación con otras aleaciones de cobre (Davis & Committee, 2001).

Aplicaciones: diafragmas, cojinetes, engranes, fuelles, arandelas de sujeción y bujes. La mayor parte de las aplicaciones son orientadas a ambientes marinos.

Bronce – Al

El bronce de aluminio se refiere a una gama de aleaciones de cobre y aluminio que combinan alta resistencia y resistencia a la corrosión y se utilizan ampliamente tanto en formas fundidas como forjadas. Estas aleaciones son básicamente cobre con 4-12% de Al. Tienen una película superficial delgada y adherente de óxidos de cobre y de aluminio, que se curarán muy rápidamente si se dañan. Además, tienen buena resistencia a la erosión y al desgaste, así como buenas propiedades de fatiga por corrosión.

Para hasta aproximadamente un 8% de Al, las aleaciones son de fase alfa y se pueden laminar y estirar fácilmente. Con un 8-12% de Al, se forma una segunda fase, beta, y las aleaciones se pueden forjar o fundir. También pueden estar presentes adiciones de hierro, manganeso, níquel o silicio. Generalmente, la resistencia a la corrosión de los bronce de aluminio aumenta a medida que aumentan el aluminio y otras adiciones de aleación. Al 9-10% de Al, las adiciones de 4-5% de hierro y níquel producen aleaciones con alta resistencia y resistencia a la corrosión en aguas no contaminadas (Brady et al., 2002).

Aplicaciones: Los bronce de aluminio son aleaciones de Cu-Al que se utilizan en formas forjadas o fundidas como bombas, válvulas, hélices, casquillos, cojinetes, ejes y sujetadores.

Bronce – Si

Esta familia de aleaciones es muy similar a la familia de bronce – Al. El contenido de silicio varía desde el 1 hasta el 4% y añade en ciertos casos otros elementos como zinc o manganeso. La presencia de silicio en la aleación aumenta la resistencia mecánica, aunque también aumenta la resistencia eléctrica. Los bronce de aluminio y silicio tienen una resistencia mecánica y a la corrosión excepcional lo cual los convierte en uno de los elementos de trabajo en caliente más adecuados en la industria.

Aplicaciones: construcciones marinas, conductos hidráulicos sujetos a presión, etc.

- **Cuproníqueles**

Los cuproníqueles son aleaciones binarias de cobre y níquel. El cobre y el níquel forman una serie de soluciones sólidas creando aleaciones monofásicas. Por tanto, no son susceptibles al tratamiento térmico. Solo pueden endurecerse mediante trabajo en frío. Los cuproníqueles comerciales generalmente contienen hasta un 30% de níquel. Esta aleación tiene una alta resistencia a la corrosión junto con una resistencia a la fatiga por corrosión. También resisten las acciones corrosivas y erosivas del agua de mar que se mueve rápidamente. La resistencia a la corrosión de los cuproníqueles aumenta al aumentar el contenido de níquel. La resistividad eléctrica de estas aleaciones también aumenta al aumentar la concentración de níquel, además, son moderadamente duros y dúctiles. Los cuproníqueles con 10 y 30% de níquel se emplean muy comúnmente para tubos de condensadores, destiladores, evaporadores e intercambiadores de calor. El tratamiento térmico muy común aplicado al cuproníquel es el recocido después del trabajo en frío. El recocido después del trabajo en frío de cuproníquel que contienen hasta un 30% de níquel (aleaciones C70600, C71000 y C71500) se realiza a 600–825 ° C. (Bhargava & Banerjee, 2017).

Propiedades físicas: al agregar níquel al cobre su color rojizo característico disminuye además de su conductividad térmica y su coeficiente de expansión térmica. Contrariamente a lo antes mencionado, la resistencia eléctrica del cobre se ve mejorada, estas aleaciones no presentan ferromagnetismo, aunque el cobre es diamagnético y el níquel es ferromagnético, estas aleaciones varían de

diamagnéticas a través de paramagnéticas a ferromagnéticas a medida que la concentración de níquel de la aleación aumenta (Davis & Committee, 2001).

Propiedades mecánicas: las propiedades de las aleaciones de cobre y níquel no suelen ser adecuadas para aplicaciones en la industria, pero al agregar elementos de aleación sus propiedades se ven incrementadas volviéndolos aptos para su aplicación. A pesar de ello, al agregar níquel la resistencia de tensión, mecánica y su dureza aumentan. Existe una reducción mínima del porcentaje de elongación, aunque la dureza se ve ampliamente mejorada a condiciones de trabajo a temperatura ambiente.

A bajas temperaturas estas aleaciones presentan buenas propiedades mecánicas, en este caso la resistencia tensil disminuye de acuerdo al descenso de la temperatura con una reducción marcada de elongación y reducción de sección. Esto muestra que las aleaciones no se vuelven frágiles a bajas temperaturas por lo tanto son adecuadas para aplicaciones en ingeniería criogénica.

A su vez, a altas temperaturas mantienen sus buenas propiedades mecánicas, su resistencia en caliente aumenta con la adición de níquel y se ve aun más potenciada con la adición de pequeñas cantidades de hierro. En cuanto a elongación y resistencia tensil, el comportamiento de estas aleaciones presenta un comportamiento recíproco es decir, la resistencia tensil disminuye a medida que la temperatura aumenta y a su vez, la elongación que presenta el material aunque las variaciones de estas propiedades son relativamente bajas respecto del delta de temperatura con que se trabaja (Brady et al., 2002).

En cuanto a resistencia a la corrosión, estas aleaciones son capaces de resistir humedad, ácidos no oxidantes, alcalis y soluciones salinas además de ácidos orgánicos como el oxígeno, cloro, cloruro de hidrógeno, fluoruro de hidrógeno, dióxido de azufre y dióxido de carbono. No existen riesgos de agrietamiento por corrosión bajo tensión, su tendencia a la corrosión selectiva es extremadamente baja y rara vez presentan corrosión por picadura. La resistencia de estas aleaciones presenta el mismo comportamiento de las aleaciones cobre – aluminio donde se puede observar un recubrimiento protector estable en su superficie debido al metal de la aleación (Davis & Committee, 2001).

Aplicaciones:

- Cu Ni₉₅ Sn₂: contactos con resorte en reles, interruptores y conectores, marcos de soldadura, carcasas para subconjuntos eléctricos.
- Cu Ni₁₀ Mn₁: líneas de agua de mar, tubos, placas y bases para intercambiadores de calor y condensadores junto con calentadores de agua de alimentación (baja presión); plantas de aire acondicionado, equipos de proceso, tubos aletados y líneas de freno.
- Cu Ni₂₅: aleación usada para monedas, material de revestimiento.
- Cu Ni₃₀ Mn₁ Fe: tuberías de construcción naval, enfriadores de aceite, planta de desalinización.
- Cu Ni₃₀ Fe₂ Mn₂: tubos de condensadores.
- Cu Ni₂ – Ni₆ – Ni₁₀: terminales de baja resistencia, resistencias eléctricas, cables calefactores con baja temperatura de calentamiento.
- Cu Ni₂₃ Mn: resistencias eléctricas, cables y alambres calefactores.
- Cu Ni₃₀ Mn: resistencias eléctricas, arrancadores e indicadores.
- Cu Ni₄₄: resistores, termocuplas, elementos de calentamiento.
- Cu Ni₁₀ Fe₁ Mn₁ y Cu Ni₃₀ Fe₁ Mn₁ Nb Si: construcción naval, máquinas de papel, industria de alimentos y bebidas, centrales eléctricas, industria química, accesorios de válvulas, instrumentos de medición, agitación y plantas de llenado (Gale & Totemeier, 2003).

- **Platas Níquel (Cu – Ni – Zn)**

Las platas níquel son aleaciones ternarias compuestas por zinc (8 – 45%), cobre (45 – 70%) y níquel (8 – 20%) usualmente su concentración es 60% de cobre, 20% de níquel y 20% de zinc. Estas aleaciones son monofásicas y presentan una buena ductilidad además de ser fáciles de trabajar a temperatura ambiente, fue inventada en Francia y tenía la finalidad de imitar a la cubertería. Presentan varias calidades en las cuales sus propiedades son mejores y a su vez su costo en la industria es mayor (Rosenberg, 1968).

Tabla 21.*Clasificación comercial de la plata níquel*

Cobre (Cu) %	Zinc (Zn) %	Níquel (Ni) %	Calidad
52	26	22	Primera calidad
59	30	11	Segunda calidad
63	31	6	Tercera calidad

Aplicaciones: imágenes religiosas, vajilla de mesa, cremalleras, bisutería, llaves de instrumentos musicales, monedas, instrumentos quirúrgicos y dentales (Gale & Totemeier, 2003).

4.4. Aleaciones de magnesio

Las aleaciones de magnesio se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones estructurales y no estructurales. Las aplicaciones estructurales incluyen equipos automotrices, industriales, manejo de materiales, comerciales y aeroespaciales. Las aplicaciones automotrices incluyen abrazaderas de soporte de pedal de embrague y freno, carcasas de bloqueo de columna de dirección y carcasas de transmisión manual. En la maquinaria industrial, como las máquinas textiles y de impresión, las aleaciones de magnesio se utilizan para piezas que operan a altas velocidades y, por lo tanto, deben ser livianas para minimizar las fuerzas de inercia. El equipo de manipulación de materiales incluye plataformas de carga, palas de granos y transportadores de gravedad. Las aplicaciones comerciales incluyen herramientas de mano, equipaje, carcasas de computadoras y escaleras. Las aleaciones de magnesio son valiosas para aplicaciones aeroespaciales porque son livianas y exhiben buena resistencia y rigidez a temperatura ambiente y elevada.

El magnesio también se emplea en diversas aplicaciones no estructurales. Se utiliza como un elemento de aleación en aleaciones de aluminio, zinc, plomo y otros metales no ferrosos. Se utiliza como eliminador de oxígeno y desulfurante en la fabricación de aleaciones de níquel y cobre; como desulfurizador en la industria siderúrgica; y como agente reductor en la producción de berilio, titanio, zirconio, hafnio y uranio. Otro importante uso no estructural del magnesio está en la reacción de Grignard en la química orgánica. En forma finamente dividida, el magnesio encuentra algún uso en la pirotecnia, tanto como magnesio puro y aleado con 30% o más de aluminio. La posición relativa del magnesio en la serie electromotriz permite que se use para la protección catódica de otros metales contra

la corrosión y en la construcción de baterías de celdas secas, agua de mar y de reserva. Las fundiciones de hierro gris usan aleaciones que contienen magnesio y magnesio como agentes de adición de cucharón introducidos justo antes de verter el molde. El magnesio hace que las partículas de grafito sean nodulares y mejora enormemente la tenacidad y la ductilidad del hierro fundido. Debido a su respuesta rápida pero controlable al grabado y su peso ligero, el magnesio también se utiliza en fotograbado (Committee, 1990).

4.4.1. Obtención del magnesio

El magnesio comercial se obtiene del agua de mar y conchas.

1. Las conchas son pasadas por un horno rotatorio a 1320°C, para producir cal.
2. La cal es mezclada con agua de mar, la que tiene 1300 ppm de magnesio, lo que genera una reacción que produce hidrato de magnesio, el que se deposita en el fondo de un tanque de sedimentación.
3. El hidrato de magnesio se extrae del tanque como una pasta a la que se le agrega ácido clorhídrico, con lo que se logra obtener cloruro de magnesio.
4. La mezcla es filtrada consecutivamente para aumentar su concentración.
5. Se realiza un secado especial hasta que el cloruro de magnesio logra obtener una concentración superior al 68%.
6. El cloruro de magnesio en forma granular se transfiere a una celda electrolítica en el ánodo es de grafito y el cátodo es la propia tina. En la celda se hace circular corriente eléctrica a 60,000A con lo que se logra la descomposición del cloro y el magnesio.
7. El cloro con agua se convierte en ácido clorhídrico, el cual sirve para convertir al hidrato de magnesio en cloruro de magnesio en el inicio del proceso.
8. El magnesio que flota en la tina electrolítica es recogido y moldeado en lingotes de 8kg, los que posteriormente son fundidos y utilizados para las aleaciones de magnesio (Britannica, 2021b).

El magnesio es el elemento químico de símbolo Mg y número atómico 12. Su masa atómica es de 24,305 u. Es el séptimo elemento en abundancia constituyendo del orden del 2% de la corteza terrestre y el tercero más abundante disuelto en el agua de mar. Una vez producido a partir de las sales de magnesio, este metal alcalinotérreo es utilizado como un elemento de aleación. Los compuestos de magnesio, principalmente su óxido, se usan como material refractario en hornos para la producción de hierro y acero, metales no férreos, cristal y cemento, así

como en agricultura e industrias químicas y de construcción. El uso principal del metal es como elemento de aleación del aluminio, empleándose las aleaciones aluminio-magnesio en envases de bebidas. El magnesio se utiliza para tratar problemas digestivos asociados al tránsito intestinal, como el de colon irritable (Pekguleryuz et al., 2013).

Figura 109.

Magnesio



Fuente: Britannica (2021b)

- **Dolomita CaCO_3**

Abunda en la naturaleza en forma de rocas dolomíticas y se utiliza como fuente de magnesio y para la fabricación de materiales refractarios. También se utiliza como fundente en metalurgia, manufactura de cerámica, pinturas y cargas blancas y como componente para fabricar el vidrio. Lo podemos encontrar en la industria metalúrgica y vidriera. La calcinación de la dolomita es un proceso endotérmico que tiene lugar alrededor de los 1000 C y consume una cantidad considerable de energía. El combustible o la materia energética libera dióxido de carbono adicional en los gases de combustión además del dióxido de carbono liberado del material base (Pekguleryuz et al., 2013).



Figura 110.

Dolomita



Fuente: Geology.com (2021a)

- **Brucita $Mn(OH)_2$**

Generalmente forma cristales blandos, cerosos a vidriosos, blancos o verde pálido, grises o azules, agregados de placas o masas fibrosas asociadas con otros minerales de magnesio. Existen yacimientos notables en Nordmark y Jakobsberg, Swed; los Urales, Rusia; Teulada, Italia; y, Pennsylvania en los Estados Unidos.

Figura 111.

Brucita



Fuente: Britannica (2021a)

- **Magnesita $MgCO_3$**

La magnesita es un mineral que tiene un sinfín de aplicaciones industriales, que abarcan campos tan distintos como la industria siderúrgica, la de la construcción o la fotográfica. De la magnesita se obtienen básicamente dos tipos de derivados: el magnesio metálico y las sales de magnesio. El primero se usa sobre todo en la industria metalúrgica para obtener aleaciones ligeras, muy solicitadas en la industria aeroespacial. Las sales de magnesio, en cambio, son utilizadas principalmente en la industria farmacéutica, aunque también ocupan un papel importante en las industrias del caucho y en la papelera, así como en la fabricación de estucos y cementos especiales para la construcción. Antiguamente fueron esenciales en el arte de la fotografía, ya que los flashes de las primeras cámaras funcionaban con sales de magnesio.

Figura 112.

Magnesita



Fuente: mindat.org (2021d)

4.4.2. Designación de las aleaciones de magnesio

Tabla 22.

Sistema ASTM estándar de cuatro partes de aleaciones y designaciones de temple para aleaciones de magnesio. Ver texto para discusión

Primera Parte	Segunda Parte	Tercera Parte	Cuarta Parte
Indica los dos principales elementos de aleación.	Indica la cantidad de los dos elementos principales de aleación.	Distingue entre diferentes aleaciones con el mismos porcentajes de la dos aleaciones principales elementos.	Indica condición (templar).
Consiste en dos letras de código representando las dos principales aleaciones elementos dispuestos en orden de porcentaje decreciente (o alfabéticamente si los porcentajes son:	Consiste en dos números correspondiente a redondeado porcentajes de las dos principales aleaciones elementos y dispuestos en el mismo orden como designaciones de aleación en la primera parte	Consiste en una carta del alfabeto asignado con el fin como las composiciones se vuelven estándar.	Consiste en una carta seguido de un número (separado del tercero parte de la designación por un guion).
A - aluminio B - bismuto C - cobre D - cadmio E - tierras raras F - hierro G - magnesio H - torio K - zirconio L - litio M - manganeso N - níquel Alegar Q - plata R - cromo S - silicio T - estaño W - itrio Y - antimonio Z - zinc	Números enteros	Letras del abecedario excepto y O	F - como fabricado O - recocido H10 y H11 - ligeramente cepa endurecida H23, H24 y H26 - cepa endurecida y parcialmente recocido T4 - solución tratada térmicamente T5 - solo envejecido artificialmente T6 - solución tratada térmicamente y envejecido artificialmente T8 - solución tratada térmicamente, trabajado en frío, y envejecido artificialmente.

Fuente: Committee (1990)

4.4.3. Grupo de aleaciones de magnesio

Hay tres sistemas de aleaciones de magnesio utilizados comercialmente para la fundición: magnesio-aluminio-zinc-manganeso (AZ), magnesio-aluminio-manganeso (AM) y magnesio-aluminio-silicio-manganeso (AS).

Las composiciones nominales y las características se detallan en la Tabla 23 a continuación.

Tabla 23.

Características de las aleaciones fundidas a presión

Aleación	Características Generales
AZ91D	La aleación de fundición a presión más comúnmente utilizada. Buena resistencia a temperatura ambiente, buena moldeabilidad, buena estabilidad atmosférica, excelente resistencia a la corrosión del agua salada.
AM60B	Buena elongación y dureza, excelente resistencia a la corrosión del agua salada, buen rendimiento y propiedades de tracción.
AS21X1	La mejor resistencia a la fluencia de las aleaciones de fundición a presión, buenas propiedades a temperatura ambiente, útil en aplicaciones de alta temperatura.
AS41XB	Buena resistencia a la fluencia hasta 175 ° C (350 ° F), buenas propiedades a temperatura ambiente, excelente resistencia a la corrosión del agua salada, útil en aplicaciones de alta temperatura.

Fuente: Committee (1990)

La aleación de fundición a presión de magnesio más comúnmente utilizada es AZ91D. La aleación AZ91D exhibe buenas propiedades mecánicas y físicas en combinación con excelente capacidad de colada y resistencia a la corrosión del agua salada. La excelente resistencia a la corrosión de la AZ91D de alta pureza es esencialmente el resultado del control del nivel de impurezas de tres contaminantes críticos: hierro, níquel y cobre. La aleación AZ91D de alta pureza ha reemplazado al AZ91B menos pura para la fundición a presión. La aleación AZ91B todavía se usa porque puede producirse fácilmente a partir de chatarra o metal secundario. Esta alternativa de ahorro de costes puede utilizarse para aplicaciones en las que la resistencia a la corrosión no es una consideración importante, por ejemplo, piezas pintadas en un entorno no corrosivo. Las fundiciones a presión se usan en estado fundido.

Para aplicaciones que requieren una mayor ductilidad que las disponibles con AZ91D, se utiliza la aleación de fundición inyectada de alta pureza AM60B. La aleación AM60B tiene mejor elongación y tenacidad que AZ91D. A pesar de la disminución en el contenido de aluminio, las resistencias a la tracción y a la fluencia de AM60B son solo ligeramente más bajas que las de AZ91D. La aleación AM60B se utiliza en la producción de ruedas de automóvil fundidas y en algunos equipos de tiro con arco y otros equipos deportivos. Al igual que con AZ91D, AM60B exhibe una excelente resistencia a la corrosión del agua salada.

La aleación fundida a presión AS41A tiene una resistencia a la fluencia muy superior a la de las aleaciones AZ91D o AM60B a temperaturas de hasta 175 ° C (350 ° F); también tiene buena elongación, límite elástico y resistencia a la tracción. Las aleaciones AS41A se usaron en cárteres de motores de automóviles refrigerados por aire. Una versión de alta pureza de AS41A, que exhibe una excelente resistencia a la corrosión del agua salada, se está introduciendo como AS41XB (Committee, 1990).

Moldes de fundición de arena y molde permanente

Varios sistemas de aleaciones de magnesio están disponibles para fundición de arena y molde permanente:

- Magnesio-aluminio-manganeso con y sin zinc (AM y AZ).
- Magnesio-zirconio (K).
- Magnesio-zinc-circonio con y sin tierras raras (ZK, ZE y EZ).
- Magnesio-torio-zirconio con y sin zinc (HK, HZ y ZH).
- Magnesio-plata-zirconio con tierras raras o torio (QE y QH).
- Magnesio-itrinio-raro-tierra-zirconio (WE).
- Magnesio-zinc-cobre-manganeso (ZC).

Tabla 24.

Características de las aleaciones. Características de la arena y aleaciones fundidas permanentes

Aleación	Templar	Características Generales
AM100A	T4,T6	Aleación de molde permanente. Presión hermética, soldable, buena estabilidad atmosférica.
AZ63A	T4,T6	Buena resistencia a la corrosión del agua salada, incluso con un alto nivel de hierro, buena tenacidad, difícil de moldear. Muy rara vez usado hoy.
AZ91E	T6	Aleación de uso general. Buena resistencia a temperatura ambiente, propiedades útiles hasta 175 °C (350 °F), buena estabilidad atmosférica y excelente resistencia a la corrosión del agua salada. La aleación más utilizada en la familia Mg-AlZn.
AZ92C	T6	Aleación de uso general. Excelente resistencia a temperatura ambiente, propiedades útiles de hasta 175 °C (350 °F), buena estabilidad atmosférica.
EQ21A	T6	Aleación tratada térmicamente Alto límite de elasticidad hasta 250 °C (480 °F), hermético a la presión, soldable.
EZ33A	T5	Resistente al deslizamiento hasta 250 °C (480 °F), excelente moldeabilidad, a prueba de presión, soldable.
HK31A	T6	Resistente al deslizamiento hasta 345 °C (650 °F) para aplicaciones de corta duración, a prueba de presión, soldable.
HZ32A	T5	Resistente al deslizamiento hasta 345 °C (650 °F), a prueba de presión, soldable.
QE22A	T6	Aleación tratada térmicamente, alto límite de elasticidad hasta 250 °C (480 °F), hermético a la presión, soldable.
QH21A	T6	Buena resistencia al deslizamiento, alto límite elástico de hasta 300 °C (570 °F), hermético a presión, soldable.
WE43	T6	Aleación tratada térmicamente, buenas propiedades hasta 250 °C (480 °F) por períodos de tiempo prolongados, a prueba de presión, soldable, buena resistencia a la corrosión.
WE54A	T6	El primero de una nueva familia de aleaciones que contienen itrio. Fuerza excepcional tanto en la habitación como elevadas temperaturas.
ZC63A	T6	Buenas propiedades a temperatura ambiente, resistencia útil a temperaturas moderadamente elevadas, excelente moldeabilidad, hermético a presión, soldable.
ZE41A	T5	Resistencia fácilmente moldeable, soldable, hermética a la presión, a temperaturas elevadas.

Aleación	Templar	Características Generales
ZE63A	T6	Excelentes propiedades de fundición, herméticas a la presión, soldables y altamente desarrolladas en piezas de fundición de paredes finas.
ZH62A	T5	Más fuerte que, pero tan moldeable como, ZE41A. Soldable, hermético a la presión.
ZK51A	T5	Buena resistencia a temperatura ambiente.
ZK61A	T6	Excelente resistencia a temperatura ambiente. Solo moldeabilidad justa pero capaz de desarrollar excelentes propiedades en fundiciones.

Fuente: Committee (1990)

Aleaciones de fundición de aluminio y magnesio

La arena de magnesio y las aleaciones de moldeo permanente que contienen aluminio como ingrediente primario de aleación (AM100A, AZ63A, AZ81A, AZ91C, AZ91E y AZ92A) exhiben una buena moldeabilidad, buena ductilidad y resistencia a la fluencia moderadamente alta a temperaturas de hasta aproximadamente 120 ° C (250 ° F). De estas aleaciones, AZ91E se ha vuelto prominente; ha reemplazado casi completamente a AZ91C porque tiene un rendimiento de corrosión superior. En AZ91E, los contaminantes de hierro, níquel y cobre se controlan a niveles muy bajos. Como resultado, exhibe una excelente resistencia a la corrosión del agua salada.

La aleación K1A se usa principalmente cuando se requiere una gran capacidad de amortiguación. Tiene baja resistencia a la tracción y al límite elástico. Las aleaciones de magnesio que contienen altos niveles de zinc (ZK51A, ZK61A, ZK63A y ZH62A) desarrollan la mayor resistencia a la fluencia de las aleaciones de colada y pueden moldearse en formas complicadas. Sin embargo, estos grados son más costosos que las aleaciones de la serie AZ. Por lo tanto, estas aleaciones se usan cuando se requieren resistencias de elasticidad excepcionalmente buenas. Están destinados principalmente para su uso a temperatura ambiente.

Debido a que ZK61A tiene un mayor contenido de zinc, tiene una resistencia significativamente mayor que ZK51A. Ambas aleaciones mantienen una alta

ductilidad después de un tratamiento de envejecimiento artificial (T5). La fuerza de ZK61A puede aumentarse aún más (3 a 4%) mediante tratamiento con solución más envejecimiento artificial (T6), sin afectar la ductilidad. Ambas aleaciones tienen resistencias a la fatiga iguales a las de las aleaciones de magnesio, aluminio y zinc, pero son más susceptibles a la microporosidad y al agrietamiento en caliente, y son menos soldables. La adición de torio o metales de tierras raras supera estas deficiencias. Las propiedades de resistencia de ZE63A son equivalentes a las de ZK61A, y las de ZH62A son equivalentes o mejores que las de ZK51A.

La aleación ZE63A es una calidad de alta resistencia con excelente resistencia a la tracción y resistencia a la fluencia; estas propiedades superiores se obtienen por tratamiento térmico en una atmósfera de hidrógeno. Debido a que la hidruración procede de la superficie, el tiempo de tratamiento térmico, el grosor de la pared y la capacidad de penetración son factores limitantes. Esta aleación tiene excelentes características de fundición.

La aleación ZE41A fue desarrollada para satisfacer la creciente necesidad de una aleación con resistencia media, buena soldabilidad y capacidad de fundición mejorada en comparación con AZ91C y AZ92A. Tiene buenas propiedades de fatiga y fluencia. A diferencia de las aleaciones AZ, existe una relación muy estrecha entre las propiedades de la barra de prueba de fundición por separado y las obtenidas a partir de la propia pieza fundida, incluso cuando se trata de secciones de fundición relativamente gruesas. La aleación ZE41A se utiliza a temperaturas de hasta 160 °C (320 °F) en aplicaciones tales como motores de aeronaves, componentes de helicópteros y fuselajes, y ruedas y cajas de engranajes (Committee, 1990).

Aleación ZC63 es miembro de una nueva familia de aleaciones de magnesio que no contienen ni aluminio ni zirconio. La aleación exhibe buena capacidad de fundición, es hermética a la presión y soldable. No se requieren refinadores de grano o endurecedores para obtener sus propiedades, pero se debe usar un tratamiento térmico para lograr las propiedades completas. La aleación tiene atractivas propiedades de temperatura ambiente y temperatura moderadamente elevada. La resistencia a la corrosión de la aleación es similar a la de AZ91C, pero es menor que la de AZ91E.

Las aleaciones de magnesio-tierras raras-zirconio se usan a temperaturas entre 175 y 260 °C (350 y 500 °F). Debido a que sus resistencias a altas temperaturas exceden las de las aleaciones de magnesio-aluminio-zinc, se pueden usar paredes más delgadas y es posible un ahorro de peso.

La aleación de magnesio-tierra rara-zinc-zirconio EZ33A tiene una buena resistencia mecánica cuando se expone a temperaturas elevadas. La estabilidad de resistencia es la capacidad de resistir el deterioro de la resistencia a la exposición prolongada a temperaturas elevadas. Esta aleación es más difícil de moldear en algunos diseños que las aleaciones de magnesio, aluminio y zinc. Las coladas de EZ33A tienen una excelente estanqueidad a la presión. La aleación ZE41A, discutida anteriormente, es similar a EZ33A, pero tiene mayor resistencia a la tracción y al límite de elasticidad debido a su mayor contenido de zinc. Se realizan algunos sacrificios en moldeabilidad y soldabilidad en ZE41A para obtener las propiedades mecánicas más altas.

Las aleaciones de magnesio-torio-zirconio HK31A y HZ32A están destinadas principalmente para su uso a temperaturas de 200 °C (400 °F) y superiores; a estas temperaturas, se requieren propiedades superiores a las de EZ33A. Para un desarrollo completo de las propiedades, HK31A requiere el tratamiento T6 (tratamiento térmico de solución más envejecimiento artificial), mientras que HZ32A, que contiene zinc, solo requiere el tratamiento T5 (envejecimiento artificial). Las coladas de HK31A y HZ32A se han usado a temperaturas tan altas como 345 a 370 °C (650 a 700 °F) en algunas aplicaciones. La aleación ZH62A de magnesio-zinc-torio-zirconio difiere de otras aleaciones de magnesio-torio-zirconio en que está destinada principalmente para su uso a temperatura ambiente.

Las aleaciones de magnesio-torio-zirconio son más difíciles de colar que EZ33A porque son más susceptibles a la formación de inclusiones y defectos como resultado de la turbulencia de apertura. La tendencia a que se formen inclusiones en las aleaciones de magnesio-torio-zirconio es particularmente marcada en las partes de paredes delgadas que requieren velocidades de vertido rápidas. Estas aleaciones tienen una capacidad de fundición adecuada para la producción de piezas complejas de espesor de pared moderado a pesado (Committee, 1990).

Aleaciones de fundición de plata y magnesio

La presencia de plata mejora la resistencia a temperatura ambiente de las aleaciones de magnesio. Cuando hay elementos de tierras raras o torio, junto con la plata, la resistencia a temperaturas elevadas también aumenta. Los grados QE22A y EQ21A son aleaciones de alta resistencia a la tracción y resistencia a la fluencia con propiedades bastante buenas a temperaturas de hasta 205 °C (400 °F). La aleación QH21A tiene propiedades similares a QE22A y EQ21 a temperatura ambiente, pero exhibe propiedades superiores a temperaturas desde 205 °C (400 °F) hasta 260 °C (500 °F). Las aleaciones QE22A, EQ21A y QH21A tienen buena capacidad de fundición y soldabilidad. Requieren tratamientos térmicos de solución y envejecimiento para lograr las mayores propiedades mecánicas. Las aleaciones QE22A y QH21A son relativamente caras debido a su contenido de plata; EQ21A, que tiene un contenido de plata inferior, es menos costoso (Committee, 1990).

Las aleaciones WE54 y WE43 tienen altas resistencias a la tracción y resistencia a la fluencia, y exhiben buenas propiedades a temperaturas de hasta 300 °C (570 °F) y 250 °C (480 °F) respectivamente. La aleación WE54 conserva sus propiedades a alta temperatura durante hasta 1000 h, mientras que WE43 conserva sus propiedades a altas temperaturas en exceso de 5000 h. Tanto WE54 como WE43 tienen buena capacidad de fundición y soldabilidad, pero requieren tratamientos térmicos de solución y envejecimiento para optimizar sus propiedades mecánicas. Son relativamente caros debido a su contenido de itrio. Ambas aleaciones son resistentes a la corrosión, con tasas de corrosión similares a las de las aleaciones comunes de fundición a base de aluminio (Pekguleryuz et al., 2013).

4.5. Aleaciones del zinc

Zinc y aleaciones de zinc se usan en forma de revestimientos, piezas moldeadas, láminas enrolladas, alambre estirado, piezas forjadas y extrusiones. Otros usos del zinc son como constituyente principal en latón (vea los artículos sobre aleaciones con base de cobre en este libro) y como ánodo de sacrificio para marino ambientes.

Las aleaciones de zinc forjado también se fabrican en productos forjados y extruidos, pero han encontrado una aplicación limitada. Estas aleaciones son de dos sistemas, zinc-aluminio-cobre y zinc-cobre-titanio. ZA-27 se utiliza para

extrusión y forja, así como para fundición por gravedad y a presión de alta resistencia. La extrusión de ZA-27 mejora su resistencia a la tracción y a la fluencia e imparte una mayor ductilidad en comparación con las propiedades recién fundidas. La aleación Zn – 14.5% en peso Al – 0.7% en peso Cu – 0.02% en peso Mn fue desarrollada para aplicaciones de forja especial que requieren buena resistencia al impacto a bajas temperaturas, y también exhibe alta resistencia y ductilidad. También se utilizan aleaciones de forja de zinc-cobre-titanio y zinc-cobre-titanio-manganeso. Las piezas forjadas y extrusiones de aleaciones de zinc se pueden mecanizar fácilmente, unir mediante soldadura, soldadura o adhesivos y terminar con pinturas, polímeros o recubrimientos electro chapados. Las operaciones de conformado secundarias, como doblar, estampar, ensanchar, estampar y acuñar se pueden realizar fácilmente (Lynch, 2001).

Propiedades de las aleaciones de zinc

El uso de zinc como revestimiento para proteger el acero y el hierro de la corrosión es la aplicación más grande para el metal en todo el mundo. Los revestimientos metálicos de zinc se aplican a los aceros:

- De un baño de metal fundido (galvanizado por inmersión en caliente).
- Por medios electroquímicos (electro galvanización).
- De una pulverización de metal fundido (metalización).
- En forma de polvo de zinc por medios químicos / mecánicos (galvanización mecánica).

Los revestimientos de zinc se aplican a diferentes productos, que varían en tamaño desde pequeños sujetadores hasta bandas continuas para grandes formas estructurales y montajes (Lynch, 2001).

4.5.1. Extracción del zinc

La obtención por vía seca permite obtener metales a partir de sus minerales o de sus concentrados por medio del calor. Se realiza cuando el contenido en zinc del mineral supera el 10% de este. El proceso comienza con el tostado o calcinado del mineral extraído para la obtención de óxido de cinc. Después el óxido de zinc se somete a un proceso de reducción en un horno de retorta a unos 1000°C aproximadamente, con ayuda de carbón y sin contacto con el aire. En este proceso

de obtención por vía seca, el zinc se obtiene con un porcentaje de riqueza del 98%. Posteriormente el metal se puede afinar mediante un proceso de electrólisis.

Obtención por vía húmeda

La obtención por vía húmeda permite obtener metales a partir de sus minerales o de sus concentrados por medio de reacciones químicas. Se realiza cuando el contenido en zinc del mineral es inferior al 10%. El proceso comienza con la trituración del mineral, para obtener mineral de cinc en polvo. Después el mineral triturado se trata con una disolución de ácido sulfúrico. El resultado es una disolución de sulfato de zinc con impurezas, las cuales terminan precipitándose y posteriormente se filtran (Willem Duyvesteyn, Teun Bakker, 1993).

- **Adamita**

Mineral dimorfo de zinc perteneciente a la clase de los arseniatos, mineral de la familia de los arseniatos, de fórmula química $Zn_2(AsO_4)(OH)$. Presenta dos polimorfos cristalinos que corresponden con los sistemas rómbico o monoclinico. La adamita se presenta en muchos colores vivos diferentes. Diferentes impurezas son responsables de los tipos de color. Cuando el cobre está presente en adamita, esto le da un color verde o azul vibrante, y cuando está presente el cobalto, le da un color de rosa a púrpura. Algunas impurezas como el cobre impiden que la adamita tenga el hábito de ser fluorescente.

Los cristales de adamita suelen estar incrustados en una matriz de limonita marrón oxidada y quebradiza que mancha las manos. Dado que la limonita se desmorona cuando se frota, se debe tener cuidado al lavar tales muestras (Minerals.net, 2021).

Figura 113.

Adamita



Fuente: mindat.org (2021a)

- **Esfalerita**

Sulfuro de zinc que se halla en la naturaleza en cristales muy brillantes, de color que varía desde amarillo rojizo al pardo oscuro y se utiliza para extraer el zinc: la esfalerita cristaliza en el sistema cúbico.

Los principales depósitos de esfalerita son depósitos masivos de sulfuros mixtos en rocas metamórficas y depósitos estratificados de reemplazo en rocas carbonatadas; a menudo se asocian con sulfuros de plomo y cobre.

La oxidación de la esfalerita depende de una serie de factores, entre los que se encuentran la concentración de oxidantes, como el O_2 o Fe (III) disuelto en solución, la temperatura y el pH (Blowes et al., 2003).

Figura 114.

Esfalerita



Fuente: mindat.org (2021h)

- **Calcofanita**

La estructura consta de láminas simples de moléculas de agua agrupadas en anillos hexagonales dobles abiertos, que se alternan con capas dobles de oxígeno en las que seis de cada siete sitios octaédricos, están ocupados por manganeso. Los átomos de zinc unidos a las tríadas de oxígenos que delimitan las vacantes en la capa de manganeso completan su coordinación octaédrica con las tríadas de moléculas de agua. Se describe un esquema de unión adicional entre láminas, basado en puentes de hidrógeno entre agua y oxígeno.

Las proyecciones de densidad de electrones proporcionan evidencia directa de cantidades fraccionarias de iones de zinc intersticiales, lo que conduce a un mejor acuerdo entre la evidencia de rayos X y los datos químicos y de densidad (Wadsley, 1955).

Figura 115.

Calcofanita



Fuente: mindat.org (2021b)

4.5.2. Grupo de aleaciones del zinc

Zinc Arsenio, Zn_3As_2

La aleación binaria pura no ocurre como un compuesto natural, pero hay varios minerales de arseniato, como barthita, clorofenivita, holdenita y kottigita como hidratos que contienen zinc con manganeso o cobre. Todos ellos son de menor importancia y están asociados con otros minerales de cobre, cobalto y veta de zinc. Como arseniatos o arseniuro ha habido poco o ningún uso en la industria. Los compuestos pueden ser utilizados como pigmentos colorantes en la fabricación de vidrio y cerámica.

Aplicación técnica: poco uso en la fabricación de materiales de estado sólido hasta la fecha, aunque los cristales individuales han sido evaluados como semiconductores binarios y de tipo ternario de tetraedro tipo de celda unidad Grabado: HNO_3 , H_2SO_4 y álcalis (Walker & Tarn, 1990).

Fluoruro de Zinc, ZnF_2

General: No ocurre como compuesto natural. Al igual que otros fluoruros, como la fluorita, CaF_2 , se puede usar como fundente de soldadura en ensambles de aleación de metal, pero los compuestos de zinc tienen uso más amplio como el metal puro o como el óxido. El zinc puro se sumerge como revestimiento de

superficie galvanizado sobre hierro, ya que se estabiliza fácilmente con óxido de zinc grisáceo. Tiene numerosos usos como aleación: latón y bronce, plata alemana (Zn: Ni: Cu), el polvo de zinc puede encenderse explosivamente en el aire.

Aplicación técnica: el fluoruro de zinc no tiene un uso importante en el procesamiento de estado sólido, aunque ha mostrado propiedades semiconductoras como fluoruro dopado, $ZnSiF_2$. Se ha cultivado y estudiado como el cristal puro de ZnF_2 y como el compuesto ternario. El fluoruro de zinc es una fuente de zinc insoluble en agua para su uso en aplicaciones sensibles al oxígeno, como la producción de metales. Los compuestos de fluoruro tienen diversas aplicaciones en las tecnologías y la ciencia actuales, desde el refinado y grabado de petróleo hasta la química orgánica sintética y la fabricación de productos farmacéuticos. El fluoruro de magnesio, por ejemplo, fue utilizado por investigadores del Instituto Max Planck de Óptica Cuántica en 2013 lo que permitirá futuros avances en espectroscopia molecular. Los fluoruros también se utilizan comúnmente para alear metales y para deposición óptica. El fluoruro de zinc generalmente está disponible de inmediato en la mayoría de los volúmenes. Se pueden considerar formas de alta pureza, sub micrónicas y nano pólvoras.

Óxido de Zinc, ZnO

Se produce de forma natural como el mineral zincita, pero la mayor parte del óxido de zinc se produce sintéticamente. Se encuentra en áreas limitadas, pero puede estar en depósitos masivos. Para un óxido es muy pesado, y se puede caracterizar por su color rojo intenso y una franja de color amarillo anaranjado, por ejemplo, la mayoría de los óxidos producen vetas blancas cuando se dibujan a través de una pieza en bruto de alúmina. A menudo ocurre como un subproducto del horno artificial en la reducción de otros minerales de zinc, en particular, los sulfuros.

El óxido de zinc es un compuesto inorgánico utilizado en varios procesos de fabricación. Se puede encontrar en cauchos, plásticos, cerámicas, vidrio, cemento, lubricantes, pinturas, ungüentos, adhesivos, selladores, pigmentos, alimentos, baterías, ferritas, retardadores de fuego y cintas de primeros auxilios. También se usa ampliamente para tratar una variedad de otras afecciones de la piel, en productos como talco para bebés y cremas protectoras para tratar la dermatitis del pañal, crema de calamina, champús anticaspa y ungüentos antisépticos.

Aplicación técnica: el óxido no se utiliza en el procesamiento de estado sólido como material semiconductor, aunque exhibe las características polares de los semiconductores binarios en las superficies basales. Las nanopartículas de óxido de zinc (ZnO NP) también se han estudiado para una variedad de aplicaciones médicas. Si bien el zinc es esencial, es igualmente interesante como nanomaterial biológicamente activo. Uno de los usos más interesantes de las Nano Partículas de ZnO es en partículas de puntos cuánticos de 2 a 10 nm compuestas de núcleos metálicos que exhiben propiedades únicas con respecto a otras nanopartículas. El tamaño pequeño y las propiedades electrónicas únicas permiten aplicaciones biomédicas en el etiquetado celular, la identificación de tumores y el diagnóstico (Burns & Self, 2018). Se ha descrito el mecanismo de destrucción de bacterias mediante nanopartículas de ZnO con dos vías de acción. El primero implica la penetración de la pared celular y el segundo implica la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS). Se ha demostrado que las nanopartículas de ZnO con un diámetro de aproximadamente 20 nm son muy eficaces para matar *Campylobacter jejuni*. Después del tratamiento con una concentración de nanopartículas de ZnO de 0.05 mg / ml, se observó una inhibición significativa del crecimiento celular (Grigore et al., 2017).

El ZnO también se utiliza en células solares planas de perovskita. El ZnO se ha utilizado como capa amortiguadora en las células solares de perovskita, de forma general en aplicaciones fotovoltaicas para reemplazar al TiO₂ (Luo, 2020).

Las nanopartículas de óxido de zinc (ZnONP) han mostrado fenómenos ópticos y eléctricos únicos y se han utilizado ampliamente en varios productos comerciales, incluidos productos de cuidado personal, plásticos, cerámica, vidrio, cemento, caucho, lubricantes, pinturas, pigmentos, alimentos, baterías y retardadores de fuego. La alta toxicidad aguda de ZnO NP en el medio ambiente está altamente relacionada con su disociación iónica (Zn²⁺) de partículas en el agua y sus interacciones con entidades biológicas, por ejemplo, desestabilización de membranas lipídicas y daño a proteínas y estructuras de ADN (Naqvi et al., 2018).

El uso de ZnO en sensores y detectores cubre una gran cantidad de compuestos gaseosos que se pueden encontrar entre los componentes comunes del aire y los contaminantes y la radiación UV. En el caso de los sensores basados en ZnO, los sensores de gas utilizan foto activación en lugar de calefacción. La mayoría de los

sensores de gas estudiados se basan en el cambio de conductancia debido a la adsorción en la superficie de nanomateriales de ZnO. Los sensores de presión se basan en la propiedad piezoeléctrica del ZnO. Los detectores de UV se basan en el fenómeno de fotoconductividad inducida por la luz que consiste en una rápida transición de un estado aislante a uno altamente conductivo al exponerse a una luz UV con una longitud de onda específica (Tudose et al., 2019).

Fosfuro de Zinc, Zn_3P_2

El fosfuro de zinc es un compuesto inorgánico que combina fósforo con zinc. Tiene una forma tetragonal a temperatura ambiente que se convierte en una forma cúbica alrededor de 845 °C. En la forma a temperatura ambiente hay átomos de P discretos, los átomos de zinc están coordinados tetraédricamente y el fósforo tiene seis coordenadas, con átomos de zinc en 6 de los vértices de un cubo distorsionado. Se utiliza en cebos raticidas.

Aplicación técnica: el fosfuro de zinc se usa como raticida en virtud de su capacidad para liberar gas fosfina altamente tóxico una vez que se ha tragado el cebo. Una característica física clínicamente importante del fosfuro de zinc es su capacidad relativamente escasa de hidrolizarse en un entorno de pH más neutro. De hecho, cuando se va a utilizar fosfuro de zinc como fumigante, se debe disponer o suministrar un ambiente ácido o húmedo para que se produzca una hidrólisis significativa y la posterior liberación de fosfina. El fosfuro de zinc y otros metales fosfuros son sumamente corrosivos y, como tales, a menudo producen un fuerte efecto de vómito espontáneo después de la ingestión (Knight, 2013; Wilson, 2012).

Zinc y Selenio, $ZnSe$

No ocurre como compuesto natural, pero se ha cultivado como un cristal único metálico. Hay óxidos de zinc, arseniatos, fosfatos y sulfatos, pero no hay seleniuros, aunque hay otros metales y telénidos en la naturaleza. No hay uso del seleniuro de zinc en la industria (Walker & Tarn, 1990).

Aplicación técnica: se ha realizado un esfuerzo de investigación considerable en ZnSe desde la década de 1960 con la esperanza de fabricar diodos emisores de luz azul (LED) y láseres de inyección utilizables. La mayor parte del trabajo inicial sobre ZnSe consistió en el crecimiento y caracterización de cristales a granel o

películas delgadas epitaxiales que crecieron mediante técnicas de equilibrio como la epitaxia en fase líquida. La degradación del dispositivo demostró ser un problema para los emisores de luz basados en ZnSe y el límite superior para la vida útil del láser de onda continua no aumentó por encima de las 500 horas a temperatura ambiente. Esto, junto con la introducción de LED y láseres de nitruro de galio azul robustos, disponibles comercialmente, a mediados y finales de la década de 1990, llevó a la desaceleración de la investigación sobre los LED de ZnSe (Guha, 2001).

Las nanopartículas inorgánicas son de especial interés debido a su fluorescencia, durabilidad, radiopacidad y propiedades magnéticas (como el seleniuro de zinc). Algunos ejemplos de nanopartículas inorgánicas incluyen oro, materiales de carbono, óxido de hierro, fosfato de calcio, óxido de silicio, seleniuro de zinc y seleniuro de cadmio. Las nanopartículas inorgánicas se modifican fácilmente en la superficie para dirigirse a un tejido, evitar el sistema inmunológico y emitir fluorescencia para imágenes y usos multifuncionales (Maheshwari et al., 2019).

Sulfuro de Zinc, ZnS

El sulfuro de zinc (ZnS), una sal natural, es la principal fuente de zinc. Tiene dos formas cristalinas comunes (polimorfos): esfalerita (“mezcla de zinc”), con una estructura cristalina cúbica, es la forma que predomina en la naturaleza. La wurtzita, con cristales hexagonales, es más escasa, pero se puede hacer calentando la esfalerita a ≈ 1020 °C. En la naturaleza, ambos polimorfos de ZnS generalmente contienen cantidades significativas de hierro que los hace parecer negros. Las sales purificadas son de color blanco a amarillo pálido o gris. El uso más común de ZnS es como pigmento para pinturas, plásticos y caucho.

Aplicación técnica: el sulfuro de zinc es un semiconductor compuesto y se usa en la fabricación de diodos electroluminiscentes y diodos láser. El ZnS es fosforescente, lo que lo hace útil para varias aplicaciones electrónicas y decorativas. Entre sus usos anteriores se encontraban las pantallas de televisión y rayos X y los diales de reloj. En esta era de la nanotecnología, el ZnS forma con frecuencia las capas de los puntos cuánticos semiconductores, con seleniuro de cadmio (CdSe) como núcleos. Tradicionalmente ha mostrado una notable versatilidad y promesa de propiedades fundamentales novedosas y diversas aplicaciones. Se ha demostrado

que las morfologías a nanoescala de ZnS son una de las más ricas entre todos los semiconductores inorgánicos (Fang et al., 2011).

Al igual que el sulfuro de cadmio, CdS, puede depositarse de forma alternativa y secuencial como ZnS / SZn / ZnS. Además de sus propiedades semiconductoras, es de gran interés en el desarrollo de semiconductores para la estructura cristalográfica isométrica-tetraédrica ya que tiene la celda unitaria tetraédrica atípica de muchos de los semiconductores compuestos binarios, como el arseniuro de galio, el fosforo de indio y otros.

Teluro de Zinc, ZnTe

No ocurre como compuesto natural. El teluro de zinc es un compuesto químico binario con la fórmula ZnTe. Este sólido es un material semiconductor con una banda directa de 2,26 eV. Suele ser un semiconductor tipo p. Su estructura cristalina es cúbica, como la de la esfalerita y el diamante.

Aplicación técnica: este compuesto tiene aplicaciones fotovoltaicas y es un material prometedor para su aplicación como diodo emisor de luz puramente verde, en celdas solares, detectores electroópticos, interferometría holográfica y dispositivos láser de conjugación de fase óptica (Aricó et al., 1997; Kumar et al., 2012).

4.5.3. Designación de aleaciones del zinc

Zamak-3 (ASTM AG40A) (aluminio 3.8-4.2%, cobre 2.7-3.3%, magnesio 0.035-0.06%, hierro 0.02%) es la aleación de zinc más utilizada en la industria de fundición a presión de zinc.

- Excelente equilibrio de propiedades físicas y mecánicas deseables.
- Excelente moldeabilidad y estabilidad dimensional a largo plazo.
- Excelentes características de acabado para tratamientos de enchapado, pintura y cromato.
- Excelente capacidad de amortiguación y atenuación de vibraciones en comparación con las aleaciones de aluminio fundido a presión.

Zamak-5 (ASTM AC41A). Se debe considerar el Zamak 5 cuando se requiere una dureza moderadamente mayor y una resistencia a la fluencia que el Zamak 3. El Zamak 5 tiene la misma composición que el Zamak 3 con el 1% adicional de cobre para aumentar la resistencia (aproximadamente en un 10%), dureza y corrosión, resistencia, pero reduce la ductilidad. Zamak 5, o aleación de zinc 5, es la fundición a presión de zinc más utilizada en Europa. Tiene mayor resistencia y menor ductilidad que otros miembros del Zamak.

Aplicaciones: El Zamak es ampliamente utilizado en el sector de los herrajes. Esto se debe, en gran medida, a que logra mejores resultados que los materiales utilizados con anterioridad en este campo, pero a un precio mucho más bajo. Es frecuente en las viviendas y en la vestimenta. A la vez, está también en una gran diversidad de electrodomésticos e incluso en juguetes. Hay automóviles en los que también se hace uso del Zamak. Este elemento aparece especialmente en carburadores y bombas de aceite, como así también en reguladores de tanques de gas y en herramientas de todo tipo. Pero, además, hay otros usos del Zamak que se relacionan con la producción de productos de uso diario y cotidiano. En este sentido, puede mencionarse su aparición en bolígrafos o lapiceras, candelabros, trofeos, adornos de todo tipo, bases de espejos, entre otros.

4.6. Aleaciones de níquel

El níquel es un metal plateado blanquizco con un ligero tinte dorado el cual es usado desde la antigüedad en aleaciones de cobre, fue descubierto por primera vez en 1751 y es un metal muy resistente a la corrosión al ambiente y ácidos. Su conductividad eléctrica es igual al 25% de la del cobre y es magnético hasta los 360°C. Es el segundo metal más encontrado en el núcleo de la tierra detrás del aluminio y es encontrado en la naturaleza en forma de meteoritos de níquel combinados con hierro. Históricamente ha sido usado para chapear hierro y latón, recubrir equipos químicos y fabricar aleaciones que requieran brillo plateado (platas níquel). En la actualidad, alrededor del 9% de níquel es usado para niquelados resistentes a la corrosión, alrededor del 70% de la producción mundial se usa en aceros inoxidable, 12% en aleaciones de níquel cobre, 10% en fundiciones y un 8% para aceros aleados (Davis & Committee, 2000b).

4.6.1. Propiedades del níquel

El níquel tiene varias propiedades muy útiles en la industria, esto lo convierte en uno de los materiales más usados en aleaciones esto se debe principalmente a su excelente resistencia a la corrosión y su capacidad de trabajar a altas temperaturas (punto de fusión 1453°C), aparte de ello no presenta cristalización a bajas temperaturas. Es muy dúctil y maleable por lo que se puede laminar, pulir y forjar. No es reactivo, es insoluble en agua o amoníaco y no se ve afectado por ácidos nítricos, pero si puede ser diluido en ácidos clorhídricos o sulfúricos.

El níquel puede ser estirado en planchas o hilos dependiendo de condiciones de trabajo como la temperatura, tratamiento térmico o la presencia de determinados elementos de aleación. Esto se debe a su gran capacidad de absorber energía y seguir deformándose sin romperse comportándose como un material frágil. Además, es importante tener en cuenta su capacidad de estricción (50 – 75%), y su alargamiento antes de la rotura (30 – 65%) (Committee, 1990).

4.6.2. Extracción del níquel

Aunque se piensa que el níquel es uno de los elementos más abundantes en el universo, no ocurre abundantemente en la corteza terrestre. Pero se puede encontrar en dos tipos de mineral de níquel: sulfuro y laterita. En el mineral de sulfuro, los restos de níquel se concentran en rocas que están a grandes profundidades. En el tipo laterítico, el níquel está en forma de óxido o silicato y ha sido concentrado por meteorización en la superficie de la tierra. La forma común de mineral de minerales que contiene níquel es pentlandita. Además, se asocia al níquel con pirrotina, un sulfuro de hierro donde el níquel sustituye al hierro. En práctica, estos cuerpos de mineral producen níquel tanto de la pentlandita como los minerales de pirrotita. A su vez, el níquel se extrae de yacimientos de niquelina y garnierita los cuales son los más usados por la industria debido que su contenido de níquel es mayor y sin más abundantes (Thompson, 2006).

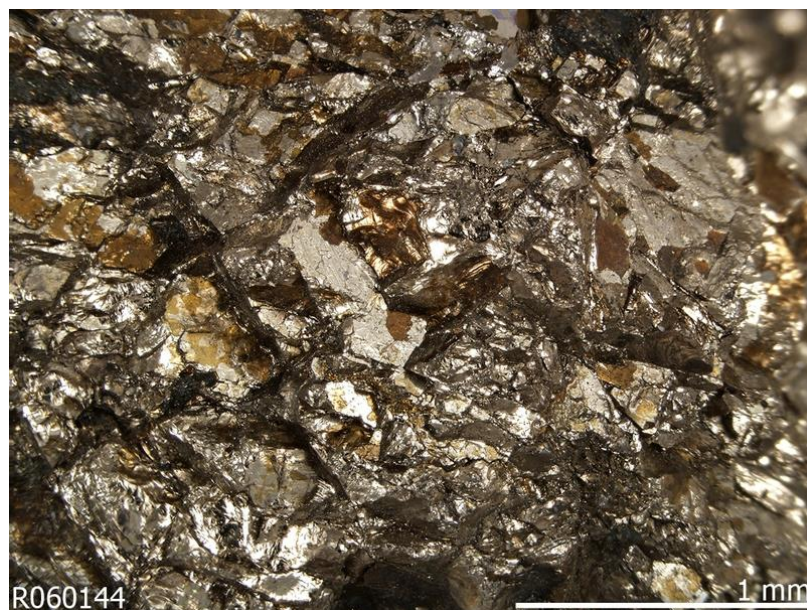
- **Pentlandita**

La pentlandita es un sulfuro de hierro y níquel con fórmula química de [(Fe, Ni) ₉S₈]. El mineral fue descubierto y nombrado en honor al científico irlandés Joseph Barclay Pentland. El color es amarillo-bronce con una franja marrón-bronce

clara y brillo metálico. La dureza varía entre 3.5 y 4.0 en la escala de Mohs con un peso específico moderado entre 4.6 y 5.0. El mineral en su forma más pura contiene 22% de Ni, 42% de Fe y 36% de S. Pentlandita es el sulfuro de níquel terrestre más común; se forma típicamente durante el enfriamiento de las masas fundidas de sulfuro magmático durante la evolución de la masa fundida de silicato parental. La pentlandita se concentra típicamente dentro del margen inferior de un intrusivo estratificado mineralizado. Los mejores ejemplos incluyen los depósitos de Sudbury, Canadá, el intrusivo ígneo estratificado de Bushveld en Sudáfrica y el intrusivo gabro de Duluth en el Estados Unidos. Los otros ejemplos de depósitos de pentlandita son el mineral komatiítico de tipo Kambalda en Australia Occidental algunos otros en Namibia y Brasil. El depósito de níquel supergigante de Sudbury en Canadá se formó por un gran cráter de impacto de meteorito (Haldar, 2017).

Figura 116.

Roca de pentlandita



Fuente: mindat.org (2021g)

- **Niquelina**

La niccolita o niquelinal es un mineral de arseniuro de níquel con una composición química de $(NiAs \pm Fe, Sb, Co \text{ y/o } S)$. El mineral desconocido se informó en 1751, pero se llamó formalmente Nickeline en 1832 y Niccolite en 1868 en honor al latín "niccolum". El color es rojo cobrizo distintivo con rayas negras parduscas pálidas y brillo metálico. La gravedad específica varía entre 5,0 y 5,5 en

la escala de Mohs con una gravedad específica moderadamente alta de 7,3 a 7,7. El mineral en su forma más pura contiene 43,9% de Ni y 56,1% de As. La niquelita se presenta en intrusiones máficas-ultramáficas en capas a alta temperatura magmática y segregación diferencial. El mineral rara vez se usa debido a la presencia de arsénico que es perjudicial para la molienda y la fundición. Sin embargo, el mineral se usa generalmente como mezcla con mineral "limpio" que el molino y la fundición pueden manejar con una recuperación aceptable. Las ubicaciones principales incluyen la cuenca de Sudbury, Canadá, las áreas de Widgiemooltha dome y Kambalda, Australia Occidental (Haldar, 2017).

Figura 117.

Roca de niquelina



Fuente: mindat.org (2021f)

- **Garnierita**

La garnierita es un nombre con el que se conocen a minerales verdes de níquel los cuales no tienen una estructura cristalina fija. Se encuentra en los espacios que presentan las rocas ultramáficas como producto de la erosión. Es común encontrar estos minerales en depósitos de níquel y es muy importante debido a su alto porcentaje de níquel (aproximadamente un 60%). Al no ser un mineral reconocido no presenta una composición exacta pero esta formada por silicatos de Ni – Mg hidratados con o sin alumina. Puede ser encontrada en Canadá, Australia, África Central, Rusia, Chile y EEUU (Thompson, 2006).

Figura 118.

Roca de garnierita



Fuente: mindat.org (2021c)

4.6.3. Grupo de aleaciones del níquel

Generalmente, son extremadamente resistentes a los cáusticos hasta altas temperaturas y al agua neutra y al agua de mar. Resisten algunos ácidos. Las aleaciones como el Inconel tienen una buena resistencia hasta 1170 °C que aumenta con el contenido de cromo. Las aleaciones de níquel tienen una alta resistencia al agrietamiento por corrosión bajo tensión. Diferentes aleaciones tienen resistencia a diferentes ácidos. Las aleaciones de níquel se utilizan para tanques, intercambiadores de calor, piezas de hornos y plantas químicas.

Aleaciones níquel-cobre Monel. Resistencia a los ácidos, álcalis, salmueras, aguas y productos alimenticios. Mejores propiedades mecánicas que los bronce y latones, pero menores que los aceros aleados. Aleaciones níquel-silicio-cobre Hastelloy D. Excelente resistencia al ácido sulfúrico concentrado a elevadas temperaturas. Evaporadores, recipientes para reacción, ductos, tuberías y accesorios en la industria química.

Aleaciones níquel-cromo-hierro Inconel. Resistencia a la corrosión y oxidación, alta resistencia y tenacidad. Equipos para procesamiento de alimentos, múltiples de escape y calentadores de motores de avión, recipientes de nitruración y carburación.

Inconel 718 es la aleación a base de níquel más utilizada y, por lo general, constituye el 50% del peso de un motor a reacción. Los componentes aeroespaciales como las carcasas de motores, blisks y blings, combustores, álabes y sellos son ejemplos comunes. Las superaleaciones a base de níquel (especialmente Inconel 718 que representan hasta el 45% de las aleaciones forjadas a base de níquel) son generalmente conocidas por ser uno de los materiales más duros de mecanizar debido a su alta dureza, alta resistencia a alta temperatura, fuerte afinidad para reaccionar con materiales de herramienta y baja conductividad térmica. Su pronunciada tendencia al endurecimiento por deformación, y el efecto abrasivo de los carburos y las fases intermetálicas, dan como resultado tensiones mecánicas y térmicas excepcionalmente altas en el filo durante el mecanizado. La formación de ranuras en los bordes de corte mayor y menor debido al desgaste de la muesca es típica para operaciones de torneado con plaquitas de corte de cerámica.

Aleaciones níquel-molibdeno-hierro Hastelloy A y B. Alta resistencia a la corrosión por los ácidos clorhídrico, fosfórico y otros no oxidantes. Industria química para manejar, transportar y almacenar ácidos y otros corrosivos.

Aleaciones níquel-cromo-molibdeno-hierro Hastelloy C. Alta resistencia a la corrosión por ácidos oxidantes, como el nítrico, crómico y sulfúrico. Buenas propiedades a altas temperaturas (1050 °C). Industria química, partes de bombas y válvulas, inyectores a chorro, tubos de escape de motores de propulsión, álabes de turbinas y aplicaciones similares.

Aleaciones níquel-cromo-molibdeno-cobre Inconel. Resistencia a los ácidos sulfúrico y nítrico en un amplio intervalo de condiciones de concentración y exposición. Cojinetes de impulso y rotativos, piezas de bombas y válvulas de alta dureza en medios corrosivos.

Aleaciones níquel-hierro-cromo Incoloy. Elevada resistencia a la corrosión y oxidación. Equipos de tratamientos térmicos e intercambiadores de calor para la industria química, petroquímica y nuclear.

Hastelloy C276 es una superaleación de níquel-molibdeno-cromo con adición de tungsteno diseñado para tener una excelente resistencia a la corrosión en un rango amplio de ambientes severos. El alto contenido de níquel y de molibdeno hacen que este acero de aleación de níquel sea especialmente resistente a la

picadura y a la corrosión de rendija en ambientes de reducción, mientras que el cromo lo hace resistente a medios oxidantes (Grzesik, 2017).

4.6.4. Designación del níquel

Tabla 25.

Designación de los aceros al níquel

Aceros al Níquel-Cromo-Molibdeno %	
43xx	Ni 1.82, Cr 0.50 y 0.80, Mo 0.25
43BVxx	Ni 1.82, Cr 0.50, Mo 0.12 y 0.25, V 0.03 min
47xx	Ni 1.05, Cr 0.45, Mo 0.20 y 0.35
81xx	Ni 0.30, Cr 0.40, Mo 0.12
86xx	Ni 0.55, Cr 0.50, Mo 0.20
87xx	Ni 0.55, Cr 0.50, Mo 0.25
88xx	Ni 0.55, Cr 0.50, Mo 0.35
93xx	Ni 3.25, Cr 1.20, Mo 0.12
94xx	Ni 0.45, Cr 0.40, Mo 0.12
97xx	Ni 0.55, Cr 0.20, Mo 0.20
98xx	Ni 1.00, Cr 0.80, Mo 0.25
Aceros al Níquel	
23xx	Ni 3.50
25xx	Ni 5.00
Aceros al Níquel-Cromo	
31xx	Ni 1.25%, Cr 0.65% y C 0.80
32xx	Ni 1.75%, Cr 1.07
33xx	Ni 3.50%, Cr 1.50% y C 1.57
34xx	Ni 3.00%, Cr 0.77

Fuente: Davis & Committee (2000a).

Aplicaciones

Las aleaciones a base de níquel como 800HT (N08811) y 617 (N06617) se han utilizado en el servicio de soldadura para la contención de fluidos y gases en aplicaciones de fluencia limitada en la industria de generación de energía y procesos químicos durante muchos años. Estas aleaciones son materiales reforzados con carburo y solución sólida bien caracterizados. Sin embargo, bajo las condiciones de operación propuestas, se requerirán tubos de paredes muy pesadas y tuberías con capacidad de vapor limitada si se van a utilizar estas aleaciones. Las aleaciones a base de cobalto proporcionan una resistencia algo mayor, pero el costo futuro y la disponibilidad del cobalto son una preocupación. Ese equipo de proyecto consideró entonces la posibilidad de utilizar aleaciones endurecidas por envejecimiento a base de níquel, más fuertes y resistentes a la fluencia del tipo comúnmente llamado "superaleaciones" en el industria aeroespacial (deBarbadillo, 2017).

Las aleaciones de níquel se han seleccionado para los tubos de los generadores de vapor principalmente por su buena resistencia al agrietamiento por corrosión bajo tensión (en comparación con los aceros inoxidable), junto con sus elevadas propiedades mecánicas. Las aleaciones de Ni, también conocidas como Inconel® (marca registrada que hace referencia a una familia de superaleaciones austeníticas de níquel-cromo), que contienen 15% de Cr (Aleación 600) o 30% de Cr (Aleaciones 690) se utilizan principalmente para tubos generacion de vapor, algunas cabezas superior e inferior de recipientes a presión de reactores y soldaduras del sistema de enfriamiento (Aleaciones 182, 82, 52 y 152). La aleación 800 (Incoloy® 800), que no es una aleación a base de Ni pero contiene 33% de Ni y 22% de Cr con 40-45% de Fe, también se utiliza principalmente para tubos generacion de vapor.

Las aleaciones a base de Ni también se han utilizado tradicionalmente para aplicaciones de alta temperatura en muchas industrias. Entonces, en los primeros reactores de alta temperatura enfriados con helio se han utilizado principalmente Aleaciones 800 y aleaciones de níquel ricas en cromo reforzadas con Co y/o Mo (Aleación 617, por ejemplo) (D Féron, 2012).

Las aleaciones níquel-hierro se utilizan como materiales magnéticos blandos, como sellos de vidrio a metal y como materiales con propiedades definidas de expansión térmica. Invar® (UNS K93600) con 36% de níquel y el resto de hierro, es único en tener un coeficiente de expansión térmica casi cero alrededor de la temperatura ambiente. Esto lo hace valioso donde se requiere una alta estabilidad dimensional, como en instrumentos de medición de precisión y varillas de termostato. También se utiliza a temperaturas criogénicas debido a sus tasas de expansión térmica muy bajas.

Las aleaciones que contienen 72-83% de níquel tienen las mejores propiedades magnéticas blandas y se utilizan en transformadores, inductores, amplificadores magnéticos, escudos magnéticos y dispositivos de almacenamiento de memoria.

La aleación de níquel-titanio al 55% (UNS N01555) (también conocida como Nitinol) tiene propiedades de memoria de forma. Cuando se forma a una temperatura y luego se deforma a una más baja, recupera su forma original cuando se recalienta. Las temperaturas de transición se pueden ajustar mediante un control cuidadoso de la composición. Los dispositivos médicos y los conectores especializados son dos de las aplicaciones específicas. La misma aleación también puede sufrir una deformación elástica considerable y aún volver a su forma original (propiedad superelástica). Esta propiedad se ha aprovechado para aplicaciones tan diversas como monturas de gafas y amortiguadores que brindan resistencia a los terremotos en edificios históricos de piedra (Davis & Committee, 2000a).

La aleación a base de Ni se ha utilizado ampliamente en las piezas del motor debido a sus excelentes propiedades mecánicas a temperaturas elevadas. Durante el proceso de mecanizado de alta velocidad, se demostraron las características de corte de un fuerte desgaste de la herramienta, alta fuerza de corte y temperatura de corte, y una pobre integridad de la superficie mecanizada. Sin embargo, las fuerzas de corte, el calor de corte y la energía de corte específica pueden reducirse a velocidades de corte más altas. Para las aleaciones a base de Ni, algunas dificultades de mecanizado pueden aliviarse aplicando la condición de corte de altas velocidades o velocidades ultra altas. Con la creciente demanda de este tipo de material en las industrias clave (como aeroespacial, energía, automóvil, construcción naval, etc.), el desarrollo de herramientas innovadoras de alto rendimiento y la determinación de un proceso de corte razonable se han enfrentado a desafíos sin precedentes.

Se desarrolló la aplicación del proceso de sinterización por prensado en caliente y la herramienta cerámica graduada Sialon/Si₃N₄, que se diseñó construyendo un modelo de estructura graduada a nivel macro y agregando partículas micro-nanocompuestos a nivel micro. Con el objetivo de la súper aleación a base de níquel Inconel 718, se estudió el rendimiento de corte de la herramienta graduada en condiciones de corte de alta velocidad y ultra alta velocidad. A través de la investigación de este trabajo, se espera proporcionar parámetros de corte óptimos para la alta velocidad y mecanizado de alta calidad de superaleación a base de níquel, y popularizar esta herramienta graduada (Zheng & Zhao, 2020).

Resumen

Mucha de la bibliografía existente en la actualidad cubre las necesidades de la academia de forma general, algunos de estos textos se enfocan a los materiales y aleaciones ferrosas, algunos otros destacan la importancia de las aleaciones que no tienen como material base al hierro. Es este el caso del presente texto y capítulo donde se describió las aleaciones más utilizadas en la ingeniería mecánica especialmente, dando énfasis a sus aplicaciones más actuales y que pueden llegar a ser de mucha utilidad en el entorno del ingeniero mecánico.

Las aleaciones no ferrosas estudiadas en el capítulo, se centraron en materiales que tienen como elementos principales al aluminio, cobre, níquel, magnesio y zinc. Debido a su uso, son consideradas como los primeros materiales utilizados por la humanidad y que hasta la actualidad algunas de ellas no han podido ser reemplazadas y al contrario han sido estudiadas a detalle y mejoradas. La primera parte del capítulo se enfoca en aleaciones binarias y ternarias de aluminio como Al-Cu, Al-Mg, Al-Si, Al-Mg-Si, Al-Zn que entre sus aplicaciones más importantes destacan componentes electrónicos, elementos de refrigeración, alambre de soldadura etc., resaltando siempre las características de resistencia a la corrosión, excelentes propiedades mecánicas, las cuales pueden ser mejoradas, y su excelente capacidad de reciclabilidad, hacen que estas aleaciones sean una de las importantes en la ingeniería mecánica.

Posteriormente, el capítulo aborda las aleaciones de cobre, las cuales son la más utilizadas después del acero y aleaciones de aluminio. Entre las propiedades que se resaltan son su conductividad eléctrica y térmica, además de su notable

resistencia a la corrosión, fácil de fabricar y una buena resistencia a la fatiga. Sus aleaciones binarias y ternarias más comunes Cu-Zn, Cu-Ni, Cu-Al, Cu-Ni-Zn, entre otras, son utilizadas ampliamente en elementos decorativos, construcción de puertas, elementos automotrices y aplicaciones marinas, alambres para transmisión de electricidad, etc. Las aleaciones de magnesio por otro lado cubiertas en el capítulo, destacan por sus aplicaciones en equipos industriales e incluso aplicaciones aeroespaciales, además tienen una amplia aplicación en la industria automotriz como carcasas de transmisión y elementos que operan a altas velocidades y que deben ser livianas.

Otra de aleaciones no ferrosas descritas son las aleaciones de zinc, las cuales son utilizadas debido a su excelente equilibrio de propiedades físicas y mecánicas deseables, además su facilidad de moldeo y estabilidad dimensional a largo plazo y su capacidad de amortiguación y atenuación de vibraciones en comparación con las aleaciones de aluminio fundidas a presión. De estas aleaciones destacan las denominadas Zamak-5 y Zamak-3. Otra de las aplicaciones principales a destacar es su uso en celdas solares. Finalmente, se cubre las aleaciones de níquel. Las más utilizadas y conocidas son las denominadas Hastelloy A, B y C las cuales muestran alta resistencia a la corrosión por ácidos y que son deseadas en la industria química y de transporte de sustancias peligrosas. Se puede también resaltar el uso más específico de aleaciones Inconel, Incoloy y Hastelloy C276 que se usan en ambientes corrosivos agresivos. Indispensable mencionar que estas aleaciones también tienen una aplicación importante en equipos e instrumental médico.

BIBLIOGRAFÍA


- A., S. P. (2010). *Fundamentals of corrosion mechanisms, causes, and preventative methods*. Taylor and Francis Group.
- Alarcón, J. (s.f.). *Química de materiales*.
<https://www.uv.es/~uimcv/Castellano/ModuloMatCeramicos/Unidad%2005.pdf>
- Alec, G. (2010). *Corrosion for everybody*. Springer.
- Alien, W. (2012). *Naukas*. <http://naukas.com/2012/02/02/la-magia-de-los-diagramas-de-fases-o-como-puede-haber-hielo-a-mas-de-100oc/>
- Álvarez, C. (19 de enero de 2017). *Beneficios del magnesio*.
<https://salud.uncomo.com/articulo/beneficios-del-magnesio-25435.html>
- Askeland, D. R. (1998). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. International Thomson Editores.
- ASM International. (1991). *Properties and selection: nonferrous alloys and special purpose materials*. ASM Handbook.
- AVNER. (1966). *Introducción a la metalurgia física*. McGraw- Hill.
- Barsoum, M. W. (2003). *Fundamentals ceramics*. MPG Books.
- Bayan, V. C. (2011). *Corrosion chemistry*. Scrivener- Wiley.
- Bergminer. (7 de Febrero de 2009). *Esfalerita Mutiloa.jpg*. Recuperado de Esfalerita Mutiloa.jpg:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Esfalerita_Mutiloa.jpg
- Brady G., Clauser, H. & Vaccari, J. (s.f.). *Materials handbook* (Decimoquinta ed.). McGraw - Hill Handbooks.
- Brandes, E. & Brook, G. (1992). *Smithells metals reference book* (7ma ed.). Butterworth & Co.
- Cabrera, R. (13 de septiembre de 2011). *Capítulo 3. Aleaciones no ferrosas*.
<https://es.slideshare.net/raecabrera/capitulo-3-aleaciones-no-ferrosas-9247493>
- Callister, W. (2002). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Reverté.
- Cárdenas, J. (26 de Junio de 2011). *Magnesio*.
<https://es.scribd.com/document/58766589/MAGNESIO>

- Carter C., Barry, N. M. (2007). *Ceramic materials science and engineering*. Springer.
- Chaussin, C. (1967). *Curso básico de metalurgia y siderurgia*. Buenos Aires: José Monteso.
- Committee, A. I. (1990). ASM handbook volumen 2. En A. I. Committee, *Propierties and selection: Nonferrous alloys and Special-Purpose* (p. 1424).
- Daniel, L., & Jose, B. (2010). *Siderurgia. Fabricación de hierros aceros y fundiciones*. U.T.M FRM.
- Descouens, D. (30 de Diciembre de 2009). *Dolomite-Navarre.jpg*. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dolomite-Navarre.jpg>
- Esche, J. (29 de Diciembre de 2009). *Chalkophanit - Mohawk Mine, Mohawk Hill, Clark Mountains, California, USA.jpg*. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chalkophanit_-_Mohawk_Mine,_Mohawk_Hill,_Clark_Mountains,_California,_USA.jpg
- Fimia, R. (10 de Octubre de 2010). *Minerales del zinc*. <https://mineralesmania.blogspot.com/2011/10/minerales-de-zinc.html>
- Gordo, A. G., & Piris, N. M. (2012). Ciencia de materiales para ingenieros. En A. G. Gordo & N. M. Piris, *Ciencia de materiales para ingenieros* (pp. 166-170). Pearson Educacion
- Höland, W., & Beall, G. (2002). *Glass-ceramic technology*. The American Ceramic Society.
- Hume-Rothery, W. (1969). *Atomic theory for students of metallurgy*. Fifth Reprint.
- J., F. (2018). *Ciencia de los materiales II*. [https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=9&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiC-IvFrOrZAhXKneAKHZtwBIOQFgiXATAI&url=https%3A%2F%2Fmateriales.Jimenez,A.\(2013\).Zinc.http://quimicadel510.blogspot.com/2013/11/zinc.html](https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=9&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiC-IvFrOrZAhXKneAKHZtwBIOQFgiXATAI&url=https%3A%2F%2Fmateriales.Jimenez,A.(2013).Zinc.http://quimicadel510.blogspot.com/2013/11/zinc.html)
- Kaufman J. & Rooy E. (2004). *Aluminum alloy castings*. ASM International.
- Krauss, G. (2005). *Aceros: procesamiento, estructura y rendimiento*. A S M International.
- Lavinsky, R. (Marzo de 2010). *Adamite-179841.jpg*. <http://www.mindat.org/photo-179841.html>
- Lavinsky, R. (Marzo de 2010). *Hemimorphite-227534.jpg*. <http://www.mindat.org/photo-227534.html>

- Lavinsky, R. (Marzo de 2010). *Magnesite-121892.jpg*.
<http://www.mindat.org/photo-121892.html>
- Lovinsky, R. (Marzo de 2010). *Brucite-231242.jpg*.
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brucite-231242.jpg>
- Mackenzie, T. (2003). *Handbook of aluminum* (Vol. I). Marcel Dekker, Inc.
- Materiales*. (2017). Yahuasca.
- Morales Contreras, P., & Hernández Morgado, D. (1 de Septiembre de 2013). *Minerales de magnesio*. <https://es.slideshare.net/davehermor/minerales-de-magnesio>
- Newell, J. (2016). *Ciencia de materiales-aplicaciones en ingeniería*. Grupo Alfaomega.
- Oviedo, M. M. (2014). *Arcelor arranca el horno alto a tras la avería producida por la caída de parte de una cinta transportadora*. La Nueva España.
- Pacini, Roberto. (31 de Julio de 2015). *Soldargen*.
<https://soldargen.blogspot.com/2015/07/soldabilidad-de-materiales-disimiles.html>
- Perrin, W., & H. Tarn, W. (1990). *CRC Handbook of metal etchants*.
- Renzo. (s.f.). *Magnesio*. https://html.rincondelvago.com/magnesio_1.html
- Reve W., U. H. (2008). *Corrosion and corrosion control*. John Wiley & Sons, Inc.
- Rice, R. W., & Virginia, A. (2003). *Ceramic fabrication technology*. Marcel. Dekker, Inc.
- Roberge, P. R. (2007). *Corrosion inspection and monitoring*. Wiley- Interscience.
- Rosenberg, S. (2007). *Nickel and its alloys*. National Bureau of Standards.
- Sastri V., G. E. (2007). *Corrosion prevention and protection*. Wiley.
- Schulz, B. (2003). *Introducción a la metalurgia*. Santiago de Chile.
- Serguéi Brin, L. P. (27 de Septiembre de 1998). *Google*. www.google.com
- Serope, K. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson.
- Shackelford, J. (1998). *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. Prentice Hall.

- Shackelford, J. F. (2005). Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros. En J. F. Shackelford, *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros* (p. 299). Pearson Educación.
- Smith. (2004). *Ciencia e ingeniería de materiales*. McGraw International.
- Smith, W. F. (2004). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales*. McGraw-Hill.
- Thompson M., Green C., MacMillan A. & Crowson P. (2006). *Base metals handbook*. Woodhead Publishing Limited.
- Torre, F. (02 de 05 de 2018). *Conocer los materiales*
<https://sites.google.com/site/conocerlosmateriales/home/proceso-de-fabricacion-los-aceros>
- William D., Callister, J. (Colombia). *Ciencia e ingeniería de materiales*. Bogotá: RevertE.
- Zimbres, E. (Agosto de 2005). *TalcoEZ.jpg*.
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TalcoEZ.jpg>

CIDE
EDITORIAL

The logo for CIDE Editorial features the word "CIDE" in a large, bold, white sans-serif font above the word "EDITORIAL" in a smaller, white sans-serif font. Below the text is a stylized white graphic of an open book with its pages fanning out.

ISBN: 978-9942-844-07-1



9789942844071