

# Materiales y materias primas

## Minerales de hierro

Capítulo 5

Guía didáctica

Autor | Miguel Katz

## Autoridades

---

Presidente de la Nación  
**Dra. Cristina Fernández de Kirchner**

Ministro de Educación  
**Dr. Alberto E. Sileoni**

Secretaria de Educación  
**Prof. María Inés Abrile de Vollmer**

Directora Ejecutiva del Instituto Nacional de Educación Tecnológica  
**Lic. María Rosa Almandoz**

Director Nacional del Centro Nacional de Educación Tecnológica  
**Lic. Juan Manuel Kirschenbaum**

Director Nacional de Educación Técnico Profesional y Ocupacional  
**Ing. Roberto Díaz**

---

### **Ministerio de Educación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica.**

Saavedra 789. C1229ACE.  
Ciudad Autónoma de Buenos Aires.  
República Argentina.  
2011

---

Director de la Colección:  
**Lic. Juan Manuel Kirschenbaum**

Coordinadora general de la Colección:  
**Claudia Crowe**

Diseño didáctico y corrección de estilo:  
**Lic. María Inés Narvaja  
Ing. Alejandra Santos**

Coordinación y producción gráfica:  
**Augusto Bastons**

Diseño gráfico:  
**María Victoria Bardini  
Augusto Bastons  
Martín Alejandro González  
Federico Timerman**

Ilustraciones:  
**Diego Gonzalo Ferreyro  
Martín Alejandro González  
Federico Timerman**

Administración:  
**Cristina Caratozzolo  
Néstor Hergenrether**

Colaboración:  
**Jorgelina Lemmi  
Psic. Soc. Cecilia L. Vázquez  
Dra. Stella Maris Quiroga**

---

“Colección Encuentro Inet”.

Director de la Colección: Juan Manuel Kirschenbaum.

Coordinadora general de la Colección: Claudia Crowe.

Queda hecho el depósito que previene la ley N° 11.723. © Todos los derechos reservados por el Ministerio de Educación - Instituto Nacional de Educación Tecnológica.

Reproducción autorizada haciendo mención de la fuente.

Industria Argentina

---

#### ADVERTENCIA

La habilitación de las direcciones electrónicas y dominios de la web asociados, citados en este libro, debe ser considerada vigente para su acceso, a la fecha de edición de la presente publicación. Los eventuales cambios, en razón de la caducidad, transferencia de dominio, modificaciones y/o alteraciones de contenidos y su uso para otros propósitos, queda fuera de las previsiones de la presente edición. Por lo tanto, las direcciones electrónicas mencionadas en este libro, deben ser descartadas o consideradas, en este contexto.

# Colección Materiales y materias primas

Serie producida por el Canal Encuentro junto con el Instituto Nacional de Educación Tecnológica (INET). A lo largo de catorce capítulos\* el ciclo desarrolla el origen, las propiedades, el contexto de descubrimiento y la utilización de diferentes materiales y materias primas, y el impacto que causaron en la vida de la humanidad durante su historia.

Aire, aluminio, hierro, azufre, polímeros, madera, cerámicos son algunos de los protagonistas de esta colección.

## DVD 1

**Capítulo 1**  
Los Materiales y la humanidad

**Capítulo 2**  
Aire

**Capítulo 3**  
Madera

## DVD 2

**Capítulo 4**  
Azufre

**Capítulo 5**  
Minerales de hierro

**Capítulo 6**  
Cerámicos

**Capítulo 7**  
Aluminio

## DVD 3

**Capítulo 8**  
Biomateriales

**Capítulo 9**  
Polímeros

**Capítulo 10**  
Materiales compuestos

## DVD 4

**Capítulo 11**  
Silicio

**Capítulo 12**  
Nanomateriales

\* La versión impresa de la colección **Materiales y materias primas** está constituida por doce capítulos. La parte 1 y 2 de las series **Los materiales y la humanidad** y **Nanomateriales** fueron unificadas respectivamente.

# Imágenes del capítulo



# Índice | Minerales de hierro

## Presentación

### Red conceptual

#### 5.1.1. Minerales de hierro

#### 5.1.2. El hierro

#### 5.1.3. El sistema hierro - carbono

#### 5.1.4. Fundiciones, clasificación y propiedades

#### 5.1.5. Fundiciones especiales

- ◆ Fundición maleable
- ◆ Fundiciones resistentes a la temperatura
- ◆ Fundición acicular
- ◆ Fundición especular

#### 5.2.1. Obtención del hierro a partir de los minerales

#### 5.2.2. Obtención de arrabio en el alto horno

#### 5.3.1. Obtención de acero a partir del arrabio

#### 5.3.2. Convertidores Bessemer

#### 5.3.3. El proceso de pudelado

#### 5.3.4. Convertidores Thomas

#### 5.3.5. Hornos Siemens - Martin

#### 5.3.6. Hornos eléctricos

- ◆ Hornos de resistencia
- ◆ Hornos por arco
- ◆ Hornos de calentamiento mixto
- ◆ Hornos a inducción a baja frecuencia
- ◆ Hornos a inducción a alta frecuencia

#### 5.3.7. Hornos de crisol

#### 5.3.8. Horno básico de oxígeno (BOF)

#### 5.3.9. Hornos de crisol abierto

#### 5.3.10. Proceso de desgasificación del acero fundido

#### 5.3.11. Colada continua

### **5.3.12. Tratamientos térmicos que se aplican al acero**

- ◆ Recocido verdadero o completo
- ◆ Recocido de maleabilidad
- ◆ Recocido de cristalización
- ◆ Recocido de distensión

### **5.3.13. Producción de acero crudo**

#### **5.3.14. Aceros aleados**

- ◆ Aceros al manganeso
- ◆ Aceros al níquel
- ◆ Aceros al cromo
- ◆ Aceros al cromo-níquel

#### **5.3.15. Nomenclatura de los aceros sistema S.A.E - A.I.S.I.**

#### **5.3.16. Aceros inoxidables**

#### **5.3.17. Principales Establecimientos Siderúrgicos del País**

#### **5.3.18. La industria siderúrgica y el Medio Ambiente**

#### **Actividades**

- ◆ Actividad 1. Ensayos para la detección de  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$
- ◆ Actividad 2. Visita guiada a alguna planta siderúrgica

#### **Referencias**

#### **Bibliografía**

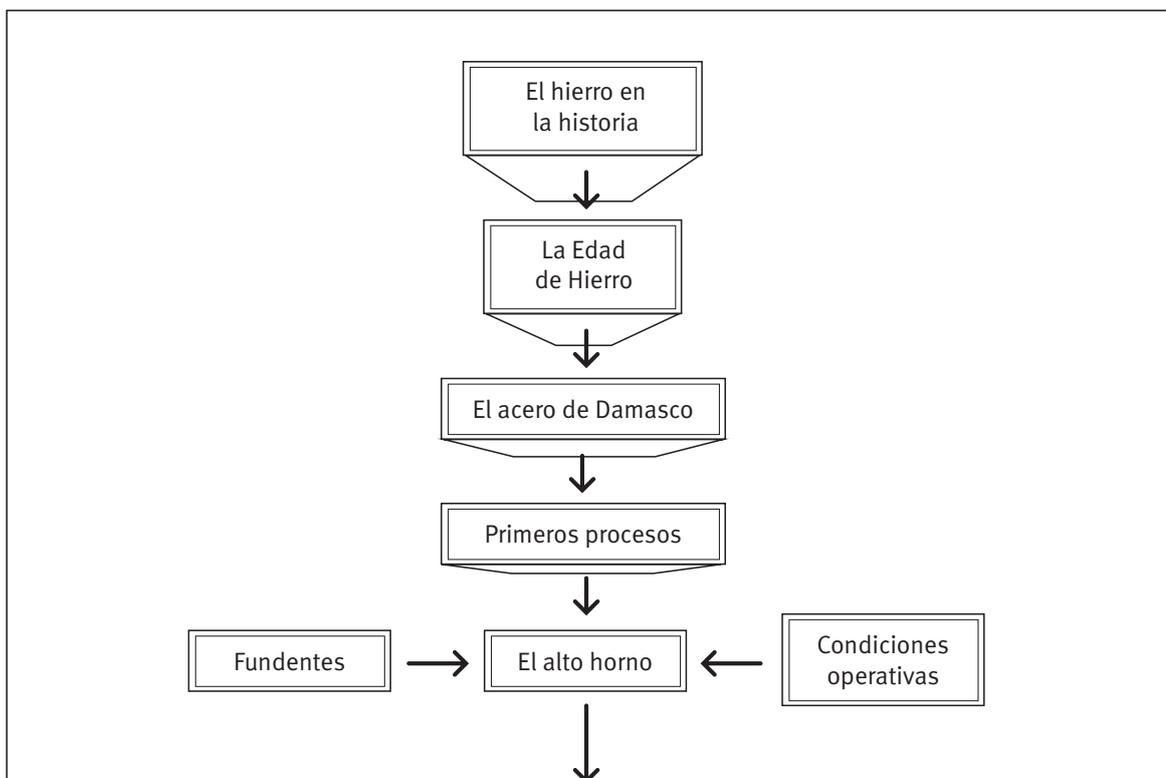
# 5. Minerales de hierro

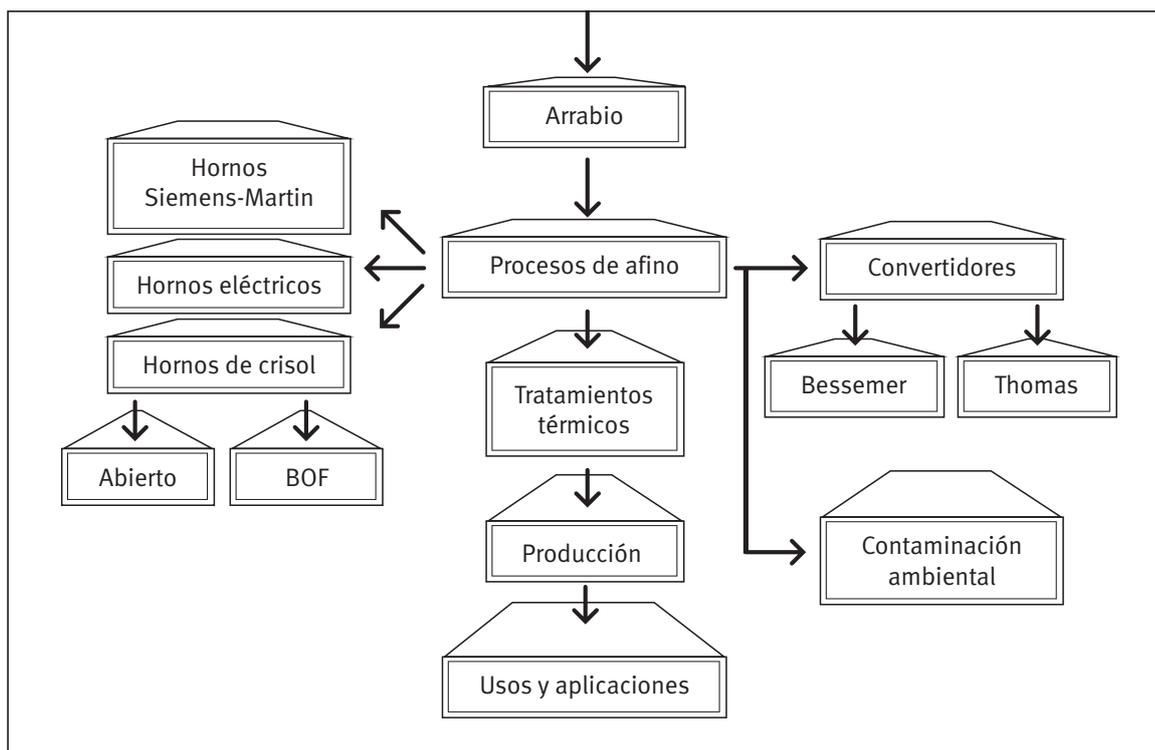
Miguel Katz

## Presentación

En este capítulo intentamos dar una descripción de la producción del acero. Los objetos de hierro y acero son parte de nuestra vida cotidiana y es de particular interés que los estudiantes conozcan los procesos mediante los cuales se obtienen, así como los volúmenes de producción y la importancia de la industria siderúrgica para el desarrollo de un país. También es importante que tomen conciencia del efecto ambiental que provoca la reducción del metal por el carbón. La producción mundial de acero crudo ronda los 2.000 millones de toneladas métricas al año y por cada tonelada de metal se liberan a la atmósfera 20 – 2,2 toneladas de CO<sub>2</sub>, lo que hace que la industria siderúrgica sea una de las mayores emisoras de ese gas. Para el docente que desee ampliar la información sobre algunos procesos se indican sitios en Internet, así como bibliografía de consulta. También se agregan algunos encuadres teóricos y referencias biográficas de personas que han contribuido al desarrollo tecnológico de esta industria. Esperamos que el contenido de este trabajo sea de utilidad al docente y le sugiera algunas ideas para su traslado al aula.

## Red conceptual





### 5.1.1. Minerales de hierro

El hierro constituye cerca del 1,51% en peso de la corteza terrestre. Es uno de los siete metales conocidos desde la antigüedad. Aunque muy raramente se encuentra libre en la naturaleza, la facilidad con que sus óxidos son reducidos por el carbón y la abundancia de los mismos en la superficie terrestre, hicieron posible su descubrimiento y aplicación a la fabricación de utensilios y armas.

El hierro se encuentra en numerosos minerales y mineraloides, magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), limonita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), siderita ( $\text{FeCO}_3$ ), pirita ( $\text{FeS}_2$ ), etc. Si bien hay una diversidad de minerales de hierro distribuidos sobre la corteza terrestre (óxidos, carbonatos, sulfuros, sulfatos, silicatos, etc.) son pocos los minerales usados comercialmente como fuente de hierro. La razón estriba en la cantidad de metal, o ley, que el mineral contenga. Para ser utilizados en la industria siderúrgica estos materiales deben contener un mínimo de 40% de hierro. Las impurezas (ganga), que siempre acompañan a los minerales, disminuyen el porcentaje de hierro en los mismos. La magnetita contiene, teóricamente 72,3 % de hierro, la hematita 69,9 %. En cambio, el contenido teórico de hierro en la pirita es de apenas 46,6 %. Los porcentajes reales disminuyen debido a la ganga.

Otro factor que puede condicionar el uso de un mineral de hierro como materia prima para la obtención de acero, es la presencia de ciertos elementos que puedan dificultar el proceso o que le comuniquen al producto características indeseadas.

En Argentina hay yacimientos de minerales de hierro en la región Noroeste (Jujuy, Salta, Catamarca y La Rioja), en la región cuyana (Mendoza, San Juan y San Luis) y en ciertas zonas de la Patagonia. Pero el único yacimiento ferrífero en funcionamiento en escala de explotación industrial es el yacimiento de Sierra Grande, en la Provincia de Río Negro. El yacimiento se encuentra en la cuenca ferrífera de Sierra Grande. Está ubicado en las proximidades de la locali-

dad del mismo nombre, a 130 kilómetros de la localidad de San Antonio Oeste. La estructura dominante de este yacimiento es un anticlinal cuyo núcleo ha sufrido un proceso intrusivo que transformó la hematita original ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) en magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Tiene la forma de un manto de dirección general N-S y aflora a lo largo de más de 3 km. El espesor medio es de 10 m, en tanto la profundidad alcanzada hasta el presente con conocimiento de las características del mineral, es de 800 m. La mineralización se compone principalmente de magnetita, con turinitas y hematitas como minerales secundarios.

Las reservas comprobadas del yacimiento son cercanas a los 90 millones de toneladas, mientras que las probables más posibles alcanzarían los 200 millones de toneladas. Este complejo minero industrial está integrado por la mina subterránea propiamente dicha, las plantas de beneficio magnética y por flotación, transporte del concentrado, pelletización, playa de productos terminados y embarcadero. Su producción se exporta, mientras que la industria siderúrgica se provee íntegramente de mineral de hierro importado, especialmente, desde Brasil.

En los últimos años, la producción de mineral de hierro latinoamericana se ha incrementado debido a las fuertes inversiones realizadas en Brasil entre las que se cuentan la construcción de un nuevo muelle en el puerto de Ponta de Madeira, que elevó su capacidad hasta los 56 Millones de toneladas anuales, permitiendo la entrada a barcos de hasta 2.000.000 toneladas de porte bruto. También se han ampliado sus instalaciones, tanto de minería como de beneficio, en Carajás tras el desarrollo de un nuevo depósito, que elevó su producción en un 30%. Estas expansiones son necesarias para suministrar mineral a la planta de pelletización, con capacidad para 6 millones de ton/año, que se terminó de construir en el 2002. Por otra parte, la empresa CVRD firmó un acuerdo con el mayor fabricante de acero de China, Shanghai Baosteel Group Corp., para crear una joint-venture al 50%, Baovale Mineração SA, a fin de explotar una mina en Agua Limpia (Minas Gerais - Brasil) para producir 8 Millones de ton/año de mineral de hierro. MBR, otra empresa brasileña, está ampliando su capacidad de producción en las minas de Tamanduá y Capitao de Mato, que reemplazarán a las de Aguas Claras y Matuca. Una primera línea de su planta de beneficio en Capitao de Mato se amplió en 2001, la segunda línea se completó en 2003. Cada línea tiene una capacidad de producción de 8 millones de toneladas /año de mineral. China, primer productor mundial de acero, seguirá incrementando su producción en los próximos años. Aunque cuenta con grandes recursos propios de mineral de hierro, su contenido en Fe es bajo (aproximadamente 32 %), por lo cual el país está invirtiendo en minas en otros países, a través de joint-ventures, como la ya citada en Brasil y también en Australia. Así, Shanghai Baosteel Group Corp. firmó un acuerdo con Hamersley Iron Ore Pty Ltd. (100 % de Rio Tinto) para formar una joint-venture y explotar mineral de hierro en el oeste de Australia. La nueva mina se sitúa 10 km al este de la mina Paraburdoo, en la región de Pilbara. Hamersley suministrará a Baosteel 200 Mt/año durante los 20 años de duración del joint-venture.

### 5.1.2. El hierro

Las principales propiedades físicas del hierro se representan en la Tabla 1.2.

<b>SÍMBOLO</b>	Fe
<b>NÚMERO DE REGISTRO CAS:</b>	7439-89-6
<b>MASA ATÓMICA PROMEDIO (U.M.A.)</b>	55,847
<b>MASAS ISOTÓPICAS (U.M.A.) Y ABUNDANCIA RELATIVA :</b>	
<sup>54</sup> Fe	53,939612 . (5,82 %)
<sup>56</sup> Fe	55,934939 . (91,18 %)
<sup>57</sup> Fe	56,935396 . (2,1 %)
<sup>58</sup> Fe	57,933277 . (0,28 %)
<b>DENSIDAD A 20 °C (g. cm<sup>-3</sup>)</b>	7,869
<b>PUNTO DE FUSIÓN (K)</b>	1.809
<b>PUNTO DE EBULLICIÓN (K)</b>	3.273
<b>CALOR ESPECÍFICO 0 – 100 °C (cal g<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>)</b>	0,111
<b>CAPACIDAD CALORÍFICA MOLAR A PRESIÓN CONSTANTE ENTRE 298 Y 1809 K EN J. K<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup></b>	23,97449 + 8,67750t + 0,000277t <sup>2</sup> - 0,000086t <sup>3</sup> - 0,000005/t <sup>2</sup> (t =K/1000)
<b>CAPACIDAD CALORÍFICA MOLAR DEL LÍQUIDO A PRESIÓN CONSTANTE ENTRE 1.809 Y 3.133 K EN J. K<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup></b>	46,02400 - 1,884667×10 <sup>-8</sup> t + 6,094750×10 <sup>-9</sup> t <sup>2</sup> - 6,640301×10 <sup>-10</sup> t <sup>3</sup> - 8,246121×10 <sup>-9</sup> /t <sup>2</sup> (t =K/1.000)
<b>CALOR MOLAR DE FUSIÓN (A 1.809 K Y 1 bar)</b>	12,40 kJ.mol <sup>-1</sup>
<b>CONDUCTIBILIDAD TÉRMICA A 18 °C (cal.cm<sup>-1</sup>. °C<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>)</b>	0,16
<b>COEFICIENTE DE DILATACIÓN LINEAL (°C<sup>-1</sup>)</b>	1,3 x 10 <sup>-5</sup>
<b>MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL (kg. mm<sup>-2</sup>)</b>	21.070
<b>RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (kg. mm<sup>-2</sup>)</b>	22,0
<b>ALARGAMIENTO A ROTURA (L = 5D)</b>	50,0 %
<b>DUREZA BRINELL (H<sub>d</sub>)</b>	60

**Tabla 1.2.** Propiedades físicas del hierro. Fuente: Libro del Web de Química. NIST, National Institute of Standards and Technology.

El hierro cristaliza en el sistema cúbico. Por debajo de los 910 °C, la celdilla elemental es cúbica intracentrada. Hasta los 768 °C tiene propiedades magnéticas (hierro  $\alpha$ ) a esta temperatura desaparecen las propiedades magnéticas (hierro  $\beta$ ) y la arista de la celdilla elemental aumenta ligeramente de 2,86 a 2,90 Ångstrom. A los 910 °C se produce la transformación a hierro  $\gamma$  en el cual la celdilla es cúbica de caras centradas. A partir de los 1.401°C es cúbica intracentrada (hierro  $\delta$  estructura que se mantiene hasta los 1.530 °C (temperatura a la que el hierro funde). Por lo tanto, en sentido estricto, el hierro tiene sólo dos formas alotrópicas la  $\alpha$ , estable hasta 910°C y, desde 1.401 hasta 1.530 °C y la  $\gamma$ , que es estable únicamente entre 910 y 1.401 °C. Sin embargo, los cambios de estado son relativamente lentos, especialmente

a medida que disminuye la temperatura del metal, y es bastante frecuente encontrar ambas formas fuera de sus límites de temperatura.

Se puede obtener hierro de elevada pureza electrolizando soluciones de sus sales (cloruros, sulfatos, etc.). En este proceso se utiliza chatarra de hierro como ánodo. El hierro puro, así obtenido, es muy frágil. Sin embargo, sometido al proceso de recocido se vuelve dúctil, adquiriendo buenas propiedades eléctricas y magnéticas. Pero, en la industria no se utiliza el hierro puro sino aleado con otros elementos entre los cuales el más importante es el carbono.

### 5.1.3. El sistema hierro - carbono

El valor de la temperatura de transición de la forma  $\alpha$  a la forma  $\beta$  del hierro se modifica por la presencia de otros elementos. Al agregar otros elementos al hierro se produce un cambio en el intervalo de temperaturas dentro del cual la forma  $\gamma$  es estable. Además, como efecto secundario, se produce una variación de la velocidad del cambio de fase. Entre los elementos que se agregan al hierro, el carbono es el que más influye en sus propiedades, pudiendo formar con aquel tanto mezclas como compuestos definidos. Los distintos cambios que provoca la presencia de carbono en el hierro se suelen representar en un diagrama llamado **diagrama hierro-carbono**. En este diagrama, representado por la figura 1.1, se consideran todas las variantes de composición y sus respectivas temperaturas de equilibrio para mezclas de hierro con hasta un 6,67 % de carbono. Se estudiaron aleaciones con contenidos de hasta 12% de carbono, pero como carecen de valor industrial, la parte correspondiente del diagrama suele despreciarse.

El diagrama es de solubilidad parcial en el estado sólido y puede presentarse en dos tipos:

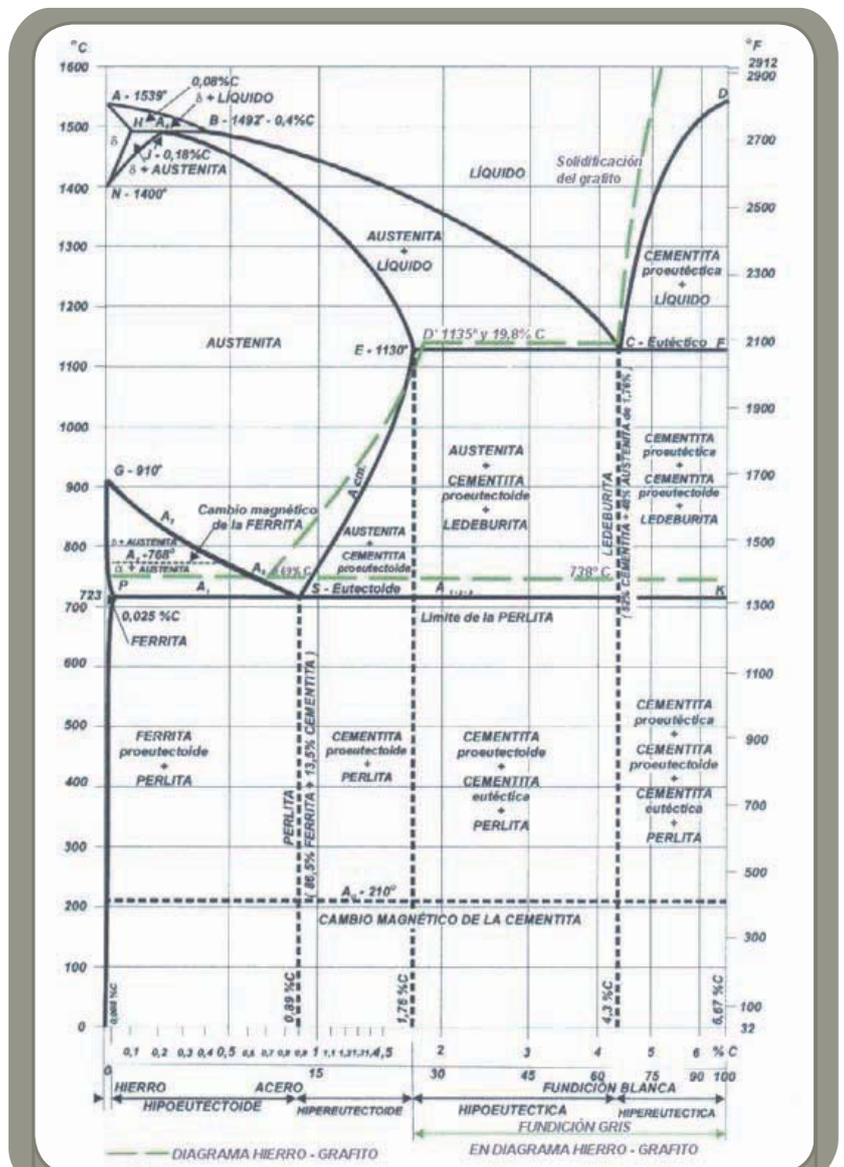


Figura 1.1. Diagrama hierro – carbono

- a) **Estable:** cuando considera las mezclas de hierro con carbono grafitico.
- b) **Metaestable:** cuando considera al carbono formando parte de la cementita.

La cementita es una sustancia que contiene 6,67 % de carbono y que responde a la fórmula  $Fe_3C$ . Es estable a altas temperaturas, pero al enfriarse tiende a descomponerse con separación de grafito.  $Fe_3C \rightleftharpoons 3 Fe + C$ . Si bien desde el punto de vista termodinámico es importante el estudio de las distintas solubilidades bajo condiciones de equilibrio, para las aplicaciones industriales es más importante el diagrama metaestable, ya que a las velocidades con que ocurren los enfriamientos de las aleaciones en los procesos industriales se forma cementita. Las temperaturas a las que se dan las transiciones se suelen indicar con la letra A seguidas de una c (del francés "chauffage") si se verifican al calentar, y con la letra A seguida de una r (del francés "refroidissement") si se registran al enfriar. Para una transformación dada Ac y Ar pueden diferir en varios grados debido a fenómenos de histéresis térmica. Así, para el equilibrio  $Fe(\alpha) = Fe(\gamma)$ , Ac es 910 °C y Ar es 899 °C.

En el diagrama de estado hierro-carbono se representan las temperaturas en las ordenadas y los porcentajes de carbono en el hierro en las abscisas. Las líneas continuas representan el sistema metaestable hierro-cementita, mientras que las líneas punteadas representan el sistema estable hierro-grafito.

Todas las mezclas líquidas que contengan entre 4,3 y 6,67 % de carbono depositan cementita sólida al ser enfriadas. Por lo tanto, al disminuir la temperatura la composición de la fase líquida se empobrece en carbono aproximándose a la señalada por el punto  $E_1$ .

Al enfriar mezclas líquidas que contengan entre 0,5 y 4,3% de carbono, estas depositan austenita (una solución sólida de carbono en hierro). A medida que disminuye la temperatura la composición del líquido se aproxima a la indicada por el punto  $E_1$ .

El punto  $E_1$  corresponde a una mezcla eutéctica en la cual el sólido tiene 52 % de cementita y 48% de austenita. Esta mezcla eutéctica se conoce como ledeburita y funde a 1145 °C.

Las mezclas líquidas que tienen menos de 0,5 % de carbono depositan, por enfriamiento, una fase transitoria de hierro  $\alpha$ .

Si se tiene, por ejemplo, un líquido con 1,5 % de carbono ( $P_1$  en el diagrama de la figura 1.2) y se lo enfría hasta 1.420 °C, comenzará a separarse un sólido austenítico cuya composición estará dada por  $P_2$ . Como este sólido sólo contiene 0,5 % de carbono, el líquido se enriquece en carbono y su composición se mueve a lo largo de la curva AB. A temperaturas elevadas, los fenómenos de difusión son rápidos, de modo que, a medida que se produce el enfriamiento, la composición de la austenita varía según la línea  $P_2D$ . Cuando el líquido alcanza la composición dada por el punto  $P_3$  la austenita depositada tiene el 1,5 % de carbono.

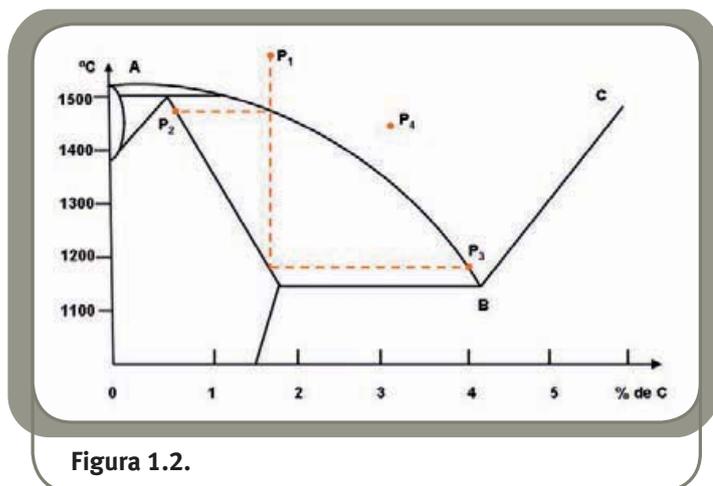


Figura 1.2.

Si el líquido contiene más de 1,7 % de carbono (por ejemplo, un líquido cuya composición y temperatura estén dadas por el punto  $P_4$  del diagrama de la figura 1.2) irá depositando austenita a medida que se enfría y, al alcanzar la composición del eutéctico, solidificará sin cambios

posteriores, con lo cual el sólido estará formado por ledeburita y austenita primaria.

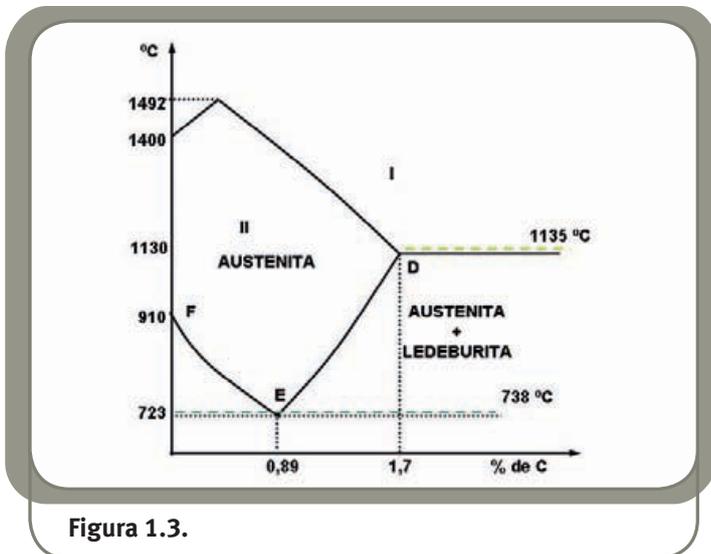


Figura 1.3.

La región I del diagrama de la figura 1.3 corresponde a composiciones y temperaturas a las cuales la austenita es estable en solución. En la región II del mismo diagrama, la austenita es estable como fase sólida homogénea. Como se puede apreciar en el diagrama, el contenido máximo de carbono en esta región es 1,7 %.

El porcentaje de carbono en la aleación permite efectuar la siguiente distinción:

Se definen como **aceros** todas las aleaciones de hierro que contienen menos de 1,7 % de carbono y como **fundiciones** a todas aquellas aleaciones que contienen más de 1,7 % de carbono.

La austenita sólida que se encuentre a temperaturas superiores a los 723 °C y que contenga entre 0,89 y 1,7 % de carbono, al alcanzar por enfriamiento la curva DE, sufre un proceso de disyunción, en el cual se separa cementita. Mediante este proceso, la austenita se empobrece en carbono hasta que, al alcanzar el punto E con un 0,89 % de carbono, se transforma en una mezcla eutectoidea especial. Esta mezcla eutectoidea tiene una estructura cristalina característica llamada **perlita**. La perlita está formada por ferrita (hierro  $\alpha$  con trazas de carbono) y cementita.

Las aleaciones austeníticas que contengan menos de 0,89 % de carbono liberarán ferrita a lo largo de la curva FE hasta alcanzar la composición eutectoidea.

A los aceros que contienen menos de 0,89 % de carbono se los suele llamar **hipoeutectoideos** y a los que tienen entre 0,89 y 1,7 % de carbono **hipereutectoideos**. Análogamente, las aleaciones que contienen entre 1,7 y 4,3 % se dicen **hipoeutécticas** y las que contienen más de 4,3 % **hipereutécticas**. Asimismo, las fases sólidas que se forman antes de alcanzar la composición eutéctica o eutectoidea se denominan, respectivamente, proeutéctica y proeutectoidea. Un acero que contenga 0,5 % de carbono formará ferrita proeutectoidea y perlita, mientras que una mezcla que contenga 3% de carbono separará inicialmente austenita proeutéctica y ledeburita. La solubilidad del carbono en la austenita disminuye de un 1,7% a 1.135 °C hasta el 0,89 % a 723. Por ese motivo, a medida que disminuye la temperatura, la austenita libera carbono como cementita. Cuando el enfriamiento alcanza los 723 °C, la austenita se vuelve inestable y se transforma en perlita.

La cementita es inestable a bajas temperaturas y se descompone en carbono y ferrita. La grafitación de aceros y fundiciones puede ser acelerada por otros elementos. Todas las fundiciones comerciales tienen grafito libre, ya sea como copos gruesos, como partículas finas o como flóculos o nódulos.

## 5.1.4. Fundiciones, clasificación y propiedades

Las fundiciones tienen innumerables usos. Sus ventajas más importantes son:

- Son más fáciles de maquinar que los aceros.
- Se pueden fabricar piezas de diferente tamaño y complejidad.
- En su fabricación no se necesitan equipos ni hornos muy costosos.
- Absorben las vibraciones mecánicas y actúan como autolubricantes.
- Son resistentes al choque térmico, a la corrosión y tienen buena resistencia al desgaste.

El carbono presente en las fundiciones, puede encontrarse como grafito, como cementita y en solución sólida asociado tanto a la forma  $\alpha$  como a la forma  $\gamma$ . El silicio, producido por reducción parcial de la escoria, promueve la formación de grafito. Por el contrario, un enfriamiento rápido de la aleación fundida, puede mantener al carbono combinado en el sólido. De allí, que las cantidades relativas de carbono libre y combinado están determinadas por la historia térmica previa, por el contenido de silicio y, en menor medida, por otros elementos.

La llamada "fundición blanca" presenta formas estructurales inestables a temperatura ambiente ya que, fundamentalmente, consiste en perlita y cementita. La llamada "fundición gris" presenta formas estructurales con equilibrio estable a temperatura ambiente, conteniendo principalmente ferrita y grafito.

Se suele distinguir otra variedad de fundición: la llamada *atruchada*. Su característica es que presenta puntos claros sobre fondo oscuro, o viceversa, debido a que tiene una matriz de fundición blanca combinada parcialmente con fundición gris. El carbono se encuentra libre y combinado, por lo que resulta difícilmente maquinable.

El color de la fundición no está determinado por el porcentaje de carbono (que generalmente no supera el 4,3 %), sino por el estado en que se encuentre: combinado o como grafito. Generalmente, la fundición gris tiene un porcentaje de carbono inferior a la blanca. La temperatura de fusión varía entre 1.100 °C para la fundición blanca y 1.200 °C para la fundición gris.

La fundición blanca, perlítica, es de una dureza muy elevada, pero es frágil. Su dureza y fragilidad hacen que sea muy difícil mecanizarla en máquinas-herramientas normales. La fundición gris, ferrítica, es lo suficientemente tenaz para los usos comunes y puede mecanizarse con relativa facilidad. La fundición gris ideal debe tener el grafito disperso regularmente en nódulos pequeños, ya que las láminas de grafito actúan como celdas de corrosión.

Se puede obtener una buena fundición gris a partir de un metal fundido con 3,5 % de carbono y 1 % de silicio. Justo antes de producirse la fusión, se le agrega un 2 % de silicio como ferro-silicio o siliciuro de calcio y alrededor de 0,1 % de cerio o magnesio. A veces se prefiere agregar níquel en vez de silicio ya que el níquel no afecta la estructura perlítica y descompone a la cementita, dando grafito en copos pequeños. Las fundiciones con base de níquel tienen la ventaja de presentar una estructura consistente, aunque varíe el tiempo de enfriado. Si se aumenta el contenido de níquel hasta un 4~5 % se estabiliza la forma austenítica de hierro y formada en la solidificación inicial.

Uno de los elementos que afectan el proceso de obtención de una fundición es el azufre. La presencia de azufre aumenta la viscosidad de la fase líquida, dificultando la colada. Si bien

estabiliza a la cementita, el azufre forma un sulfuro ferroso de bajo punto de fusión que torna quebradizas a las fundiciones y facilita el agrietamiento del material al solidificar.

Mientras que el silicio favorece la separación del grafito, el manganeso, en pequeños porcentajes, favorece la permanencia del carbono combinado como cementita.

El fósforo forma un eutéctico de bajo punto de fusión que contiene  $Fe_3P$ . La adición de 0,1 % de fósforo da mayor fluidez a la colada, pero disminuye la carga de ruptura de la fundición resultante.

Las fundiciones sufren una contracción de volumen al solidificar con la consiguiente formación de tensiones internas. Después de solidificar la fundición blanca continúa su contracción a medida que se enfría. Su contracción es casi igual a la del acero (16 a 18 por 1.000). En la fundición gris se observa un aumento de volumen debido a la separación de grafito cuya densidad es considerablemente más baja que la de la fundición o del hierro.

Por calentamiento prolongado a 300 – 400 °C y, especialmente por calentamientos repetidos, las fundiciones experimentan un aumento irreversible de volumen que, en algunos casos, puede llegar hasta un 30 %. Este aumento de volumen se debe tanto a la descomposición de la cementita como a la oxidación del hierro y del silicio. Esta característica hace inadecuado el uso de la fundición a temperaturas superiores a los 400 °C.

Según el tipo de fundición, la carga de ruptura varía entre 1.750 y 4.400 kg/cm<sup>2</sup>, la densidad oscila entre 7,1 y 7,2 g/cm<sup>3</sup> y la conductibilidad térmica entre 0,11 y 0,12 cal.s<sup>-1</sup>.cm<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>.

Generalmente, a la fundición blanca no se le realizan tratamientos térmicos, excepto cuando se emplea para obtener función maleable. En cambio, la fundición gris se somete al tratamiento de recocido para eliminar las tensiones internas producidas durante la colada, para mejorar las propiedades mecánicas transformando la perlita laminar en globular o para descomponer la cementita que pudiera hallarse presente.

### **Peso específico**

El peso específico relativo varía con la composición y, por consiguiente, con el aspecto de la fundición. Por término medio se puede admitir:

Fundición gris = 7 a 7,2

Fundición atruchada = 7,3 a 7,4

Fundición blanca = 7,4 a 7,6

### **Temperatura de fusión**

Varía con la composición y el aspecto de la fundición. En promedio es:

Fundición negra gris 1.200° C

Fundición blanca 1.100° C

### **Dureza**

La dureza de las fundiciones es relativamente elevada. La fundición gris tiene una dureza de 140 a 250 Brinell. Se puede mecanizar fácilmente, porque la viruta se desprende mejor y por la presencia de grafito liberado que lubrica el paso de la viruta sobre el corte de la herramienta. La dureza de una fundición blanca puede tomar valores superiores a los 350 - 400 Brinell.

## 5.1.5. Fundiciones especiales

Las fundiciones especiales se producen para obtener materiales con alta resistencia mecánica, para aumentar la resistencia a la corrosión, para poder trabajar a altas temperaturas o para conferirles determinadas propiedades magnéticas, eléctricas, químicas, etc.

**Fundición maleable:** se obtiene empaquetando fundición blanca en recipientes cerrados fabricados de una aleación de hierro resistente a la temperatura y calentando esa fundición en un horno hasta 900 °C durante tres o cuatro días. Durante el calentamiento, la cementita se descompone gradualmente en grafito y ferrita, mientras que la perlita se transforma en austenita. Al enfriar lentamente se deposita más grafito que cementita, de modo que el material frío contiene principalmente ferrita y grafito, este último bien disperso como flóculos o nódulos pequeños. Debido a la manera de enfriar, el interior de la fundición tiene mayor porcentaje de carbón libre, de allí que se la llame fundición maleable de núcleo negro. Se puede obtener una fundición maleable de núcleo blanco recubriendo la fundición primaria con  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  molidos antes de recocer. De esta manera, se oxida el carbono obteniéndose una ferrita residual casi completamente libre de grafito o cementita muy parecida al hierro batido pero sin las inclusiones laminares de escoria que presenta este último. Una forma menos común de fundición maleable se obtiene aumentando la velocidad de enfriamiento después que se ha estabilizado la forma austenítica. De esta manera se logra una estructura perlítica. Las fundiciones maleables constituyen materiales tenaces y fácilmente deformables en frío. Tienen una carga de ruptura del orden de los 3.180 kg/cm<sup>2</sup> y su contenido de fósforo suele ser de 0,1 % para las de núcleo blanco y de 0,2 % para las de núcleo negro. Se las utiliza principalmente en las juntas de cañerías y asiento de válvulas.

**Fundiciones resistentes a la temperatura:** generalmente contienen de 5 a 10 % de silicio. Estas fundiciones pueden ser utilizadas sin peligro hasta 850 °C sin que sean atacadas seriamente por el aire. Poseen una matriz de ferrita-silicio y grafito finamente dividido. Pueden ser maquinadas, pero la presencia de silicio hace algo más quebradiza a la base ferrítica.

**Fundición acicular:** es una fundición que contiene 4 % de níquel, 1 % de manganeso y 1 % de molibdeno. Tiene una estructura intermedia entre la perlita y la martensita (solución sólida de carbono en hierro que cristaliza en agujas), una resistencia a la tracción de 4.000 a 5.000 kg/cm<sup>2</sup>, una elevada resistencia al impacto y una dureza Brinell de 300 a 350 lo que permite que sean maquinadas.

**Fundición especular:** es una aleación de hierro con hasta un 20 % de manganeso que se utiliza para fabricar aceros especiales.

*Se puede consultar, en formato digital, el libro: “EL ACERO: lo que hay que saber”. Disponible en: <http://www.acerosarequipa.com> de Corporación Aceros Arequipa S.A. Se recomiendan los capítulos: Historia del Acero, El Acero y su Microestructura, Fabricación y Laminación.*

### 5.2.1. Obtención del hierro a partir de los minerales

La historia del hierro es la historia del hombre. Desde su descubrimiento, en tiempos primitivos, el hombre con su inventiva logró convertirlo en acero y adecuarlo a los múltiples usos que hoy tiene. Desde una aguja hasta un buque; desde un delicado instrumento hasta la Torre Eiffel. Si bien el hierro es conocido por el hombre desde hace más de 6000 años, se tienen muy pocos datos sobre su modo de obtención en la antigüedad. En los Pirineos tuvo origen un procedimiento de obtención denominado “forja catalana”, que se utilizó hasta el siglo XIV. Las forjas catalanas consistían en pequeños pozos o en crisoles, con las paredes revestidas de arcilla, dentro de los cuales se introducía el mineral junto con una gran cantidad de carbón vegetal. El fuego era atizado con fuelles manuales o accionados a pedal. En estos hornos no se alcanzaba la temperatura de fusión del hierro, sino que se obtenía una masa metálica esponjosa impregnada en escorias que se separaban mediante un batido enérgico. De esta manera, apenas si se obtenía un tercio del hierro, el resto se perdía con la escoria. A partir del siglo XIV se comenzó a utilizar un horno llamado alto



**Figura 2.1.** Los primeros hornos “alto fuego” accionados por fuelles manuales (Siglos XIV ó XV)

fuego, precursor de los actuales hornos de cuba. En estos hornos se alcanzaba una temperatura más elevada lo que provocaba una fusión parcial del hierro. Según las técnicas de trabajo, se podía obtener hierro dulce, hierro duro y un material duro, pero frágil llamado *arrabio*. El *arrabio* se consideraba un producto desechable debido a su fragilidad. Más tarde, se comenzó a aprovechar fundiéndolo y colándolo en moldes. Todos estos procedimientos eran directos, es decir, se obtenía el hierro a partir del mineral. Posteriormente, fueron sustituidos por el proceso indirecto, mediante el cual, a partir del mineral, se obtiene primero el *arrabio* y de este, por un tratamiento posterior, la aleación de hierro con el contenido de carbono deseado.

### 5.2.2. Obtención de *arrabio* en el alto horno

El mineral de hierro se calcina para eliminar el agua, descomponer los carbonatos y oxidar los sulfuros y la materia orgánica que pudiera contener. Luego se debe someter a un proceso de reducción de tamaño para que la reacción química ocurra eficientemente. Para eso, se puede triturar el material o pelletizarlo. Mediante la trituración se obtienen granzas, que es la forma más común de hierro comercializable. Es la forma más tradicional en que se comercializa el mineral proveniente de las minas de hierro generalmente, se le somete a un proceso de beneficio para separarlo de la ganga, con lo que aumenta su ley de hierro al 60 – 63 %. Sus dimensiones son de 10 a 30 mm.

Un porcentaje cada vez más importante del mineral de hierro que se emplea para la obtención del acero viene en forma de pellets.

Los pellets son preconcentrados de hierro aglomerado en forma de nódulos. Se manufacturan con un aditivo especial alcalino, como caliza o dolomita, en plantas de pelletización (en la figura 2.4 se esquematiza el proceso de pelletización). Sus dimensiones son de 9 a 16 mm.

Las materias primas que se emplean en el proceso de obtención de aceros y fundiciones son, además del mineral de hierro, el carbón (ya sea coque o carbón vegetal) y fundentes.

Cuando el coque (o el carbón vegetal) es de tamaño grueso, se lo tritura hasta un tamaño adecuado y, por cribado, se separan las partículas pequeñas del polvo.

En el interior del horno alto, los distintos componentes del mineral de hierro deben ser transformados en productos fusibles susceptibles de ser separados. Para ello, se utilizan



Figura 2.2. Granzas de mineral de hierro



Figura 2.3. Pellets de mineral de hierro

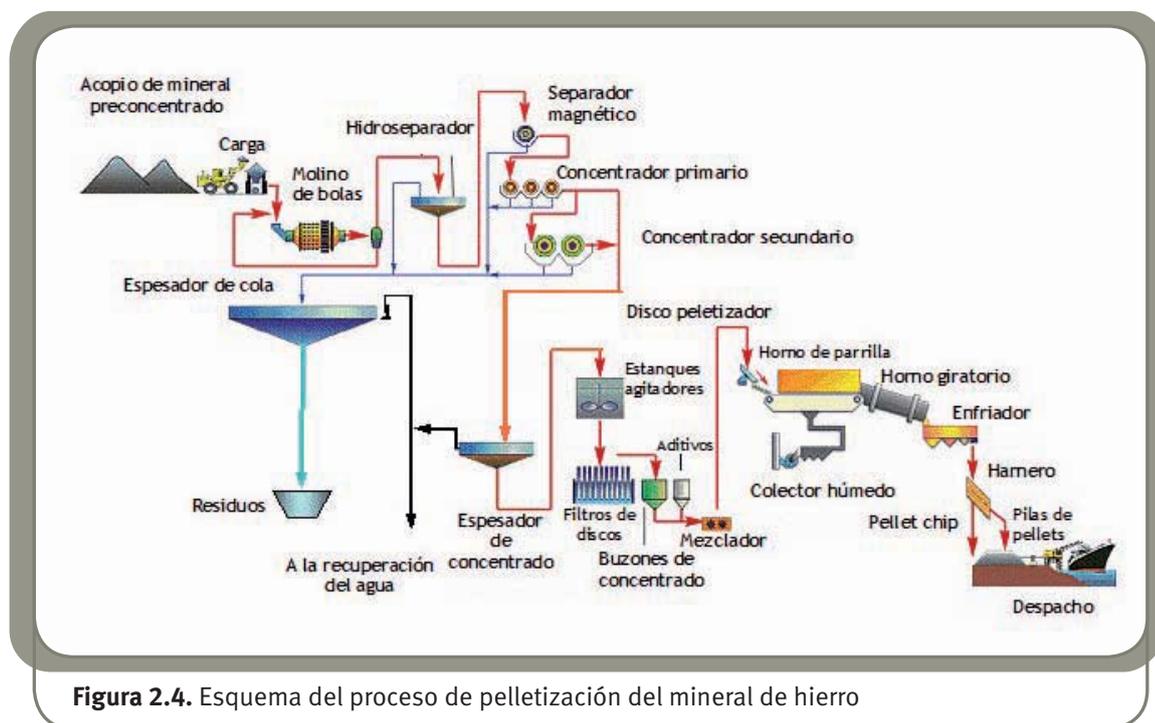


Figura 2.4. Esquema del proceso de pelletización del mineral de hierro

distintos fundentes. Si el mineral contiene gangas calcáreas, se usa un fundente ácido, tal como arena o arcilla, cuya combinación con el material alcalino forma una escoria fusible. En cambio, si las gangas son silíceas se utiliza caliza o dolomita como fundentes. Para minerales con gangas silíceas y calcáreas se emplea bauxita.

Los materiales de partida, previamente pesados en carros-balanza, se vuelcan en vagonetas que llevan esta carga hasta la boca del horno.

El alto horno (figura 2.5) está constituido por dos troncos de cono de distintas longitudes unidos por sus bases más anchas. El superior recibe el nombre de **cuba** y el inferior se denomina **etalage**. La parte superior de la cuba, llamada **tragante**, lleva un doble cierre para impedir que escapen los gases. La parte más ancha del horno se llama **vientre**. Debajo del etalage se halla el **crisol** donde se recogen el hierro fundido y la escoria. Cerca del fondo, hay varios tubos de bronce llamados **toberas** a través de los cuales se introduce aire caliente a



Figura 2.5. Esquema de un alto horno

presión. La escoria y el hierro se extraen por diferencia de densidad a través de dos orificios llamados **escoriero** o **bigotera** y **piquera**, respectivamente.

El horno alto se construye en acero revestido interiormente de ladrillos refractarios arcillosos o sílico-aluminosos que deben resistir, además del calor, la erosión producida por el descenso de las cargas y por las reacciones químicas que se producen en su interior.

La obtención del arrabio (hierro de primera fusión) en el horno alto insume grandes cantidades de aire (de 4 a 5 m<sup>3</sup> por kilogramo de carbón) para su obtención se

utilizan turbosoplantes accionados por el vapor que producen las calderas de una central termoeléctrica. El aire procedente de los turbosoplantes ingresa a un sistema de estufas en las cuales se calienta a 600 - 800 °C. Las estufas utilizan como combustible gas proveniente del horno alto que ha sido convenientemente depurado. El aire caliente se inyecta al horno a través de las toberas, que son refrigeradas, exteriormente, con agua.

En la zona de introducción de la carga, la temperatura es de unos 150 °C y a medida que la carga desciende por la cuba, encuentra temperaturas cada vez mayores.

Cuando se alcanzan los 400 °C se produce la desecación de los materiales y los óxidos hidratados se transforman en anhídros.

Alrededor de los 450 °C se produce una reducción parcial del dióxido de carbono proveniente de la combustión del coque en las capas inferiores y se forma carbón que favorece la carburación del hierro.

Cuando la temperatura alcanza los 700 °C se produce la reducción de los óxidos de hierro por acción del monóxido de carbono.

Entre los 700 y los 1.350°C aumenta la reducción del óxido de hierro por reacción directa con el carbón y tiene lugar la disociación de los carbonatos de calcio y de magnesio. En esta zona también se produce una reducción parcial de los óxidos de manganeso, lo que, posteriormente, producirá sulfuro y silicatos de manganeso.

A los 700 °C comienzan a formarse las escorias primarias. Inicialmente se forma silicato ferroso, que al reaccionar con la cal producida por la descomposición de los carbonatos libera óxido ferroso.

En el etalage la temperatura varía entre 1.350 y 1.550 °C. En esta zona se produce la carburación del hierro, que pasa del estado esponjoso al líquido. El óxido de manganeso se reduce por acción del carbón y el silicato de manganeso se descompone por acción de la cal.

El manganeso liberado se diluye en el arrabio. Además, la escoria sufre ciertas transformaciones, no muy bien estudiadas.

Las toberas insuflan aire a presión que quema rápidamente el coque produciendo dióxido de carbono y liberando gran cantidad de calor. De allí que en la zona de combustión se alcancen temperaturas del orden de los 1.800-2.000 °C. Es en la zona de combustión donde se completan las reacciones de formación de escoria y la desulfuración del arrabio.

Debido a la refrigeración exterior, la temperatura en el crisol es de 1.500 - 1.600 °C. Allí se separa el arrabio de la escoria que, por ser menos densa, forma la capa superior protegiendo al metal de la oxidación.

Al término de la operación, para extraer la escoria, se perfora el tapón de arcilla cocida que cierra la bigotera. Esta operación se conoce como **sangrado de la escoria**. Luego se sangra el crisol por la piqueta desde donde se extrae el arrabio.

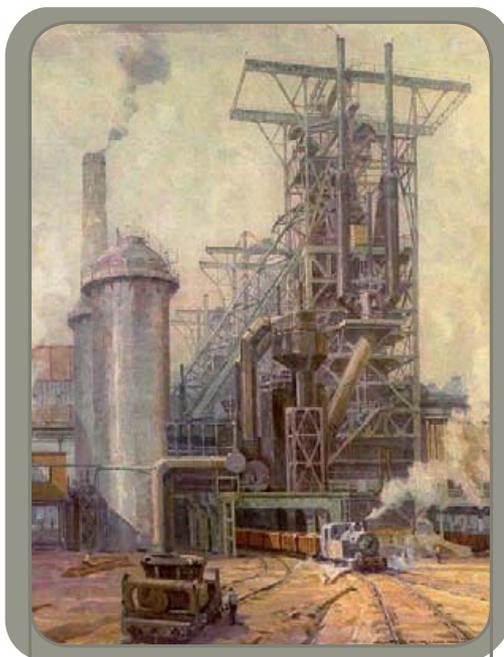
Por la chimenea sale una mezcla gaseosa que contiene aproximadamente 24 % de CO, 12% de CO<sub>2</sub>, 2 % de H<sub>2</sub>, 2 % de CH<sub>4</sub> y un 60 % de N<sub>2</sub> (todos los porcentajes en volumen). Esta mezcla se destina, previa purificación, para calefacción del aire o como combustible en la central termoeléctrica.

En la figura 2.7 se esquematizan las reacciones mencionadas anteriormente.

En el horno alto, los materiales se van cargando a medida que los productos fundidos (el arrabio y la escoria) son sangrados del crisol. Así, el horno alto se mantiene siempre cargado y, en sus distintas zonas, siempre se producen las mismas reacciones.

En la plataforma del horno alto hay dos canales: el canal de escoria por donde la escoria fluye desde la bigotera hacia las vagonetas que la recoge y el canal de arrabio por donde el arrabio líquido fluye hacia vagones-termos (colada). Los vagones-termos transportan parte del arrabio líquido hacia la acería. Otra parte se conduce a una lingotera con cangilones que lo transforma en lingotes fríos. Estos lingotes pueden ser utilizados como carga fría en los hornos Siemens- Martin o destinados a talleres de fundición.

El arrabio suele contener 91,0 - 94,0 % de hierro, 3,5 - 4,5 % de carbono, 0,5 - 2,5 % de manganeso, 0,0017 - 0,1 % de azufre, 0,03 - 0,1 % de fósforo y 0,03 - 0,1 % de silicio.



**Figura 2.6.** “Planta de arrabio en Hattingen”. Pintura de Josef Steib (1883 – 1957). Realizada en 1954

FENÓMENOS	REACCIONES DE LOS MINERALES	REACCIONES DE LOS MINERALES CON LOS GASES	REACCIONES DE LAS CORRIENTES GASEOSAS
Eliminación de agua higroscópica, de hidratación, etc. Reducción indirecta del mineral.		$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} \rightleftharpoons 2\text{Fe} + 3\text{CO}_2$	$2\text{CO} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{C}$ $\text{CO}_2 + \text{C} \rightleftharpoons 2\text{CO}$
Depósito de C a partir de CO Descomposición de $\text{CaCO}_3$ y $\text{MgCO}_3$			
Reducción directa del mineral Formación de las primeras escorias. Reducción de los óxidos de Mn. Fusión incipiente	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{C} \rightleftharpoons \text{Fe} + 3\text{CO}$ $\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{CaO} + \text{CO}_2$ $\text{FeO} + \text{SiO}_2 \rightleftharpoons \text{FeSiO}_3$ $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2 + 2\text{CaO} \rightleftharpoons \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{FeO}$		
Fusión completa. Reducción de MnO, $\text{SiO}_2$ y $\text{P}_2\text{O}_5$ Carburación y sulfuración	$\text{MnO} + \text{C} \rightleftharpoons \text{Mn} + \text{CO}$ $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightleftharpoons \text{Si} + 2\text{CO}$ $\text{P}_2\text{O}_5 + 5\text{C} \rightleftharpoons 2\text{P} + 5\text{CO}$		
Combustión de coque. Desulfuración y formación completa de escorias	$\text{CaO} + \text{FeS} \rightleftharpoons \text{CaS} + \text{FeO}$ $\text{Mn} + \text{FeS} \rightleftharpoons \text{MnS} + \text{Fe}$		$\text{C} + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO}_2$ $\text{CO}_2 + \text{C} \rightleftharpoons 2\text{CO}$
Separación del arrabio de la escoria.			

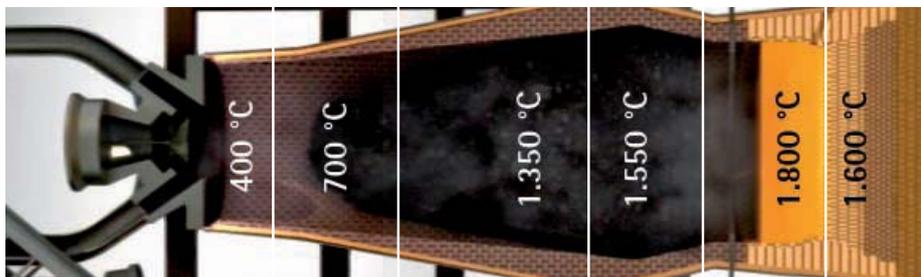


Figura 2.7. Esquema de las reacciones químicas que tienen lugar en el interior de un horno alto

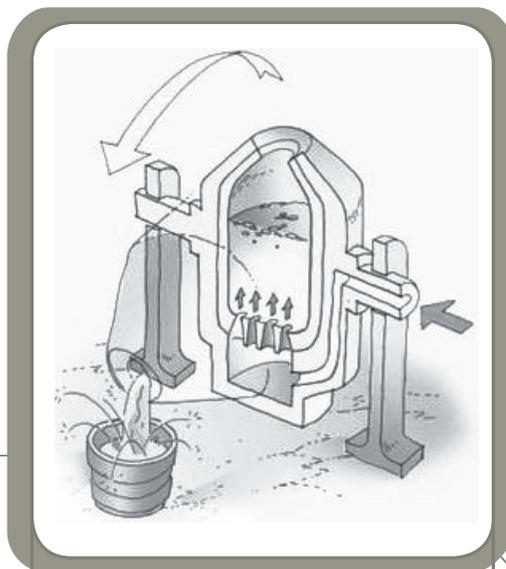
### 3.1. Obtención de acero a partir del arrabio

La transformación del arrabio en acero se llama afino. El afino se puede realizar en distintos aparatos. Entre los tipos de aparatos que se emplean están los llamados **convertidores**.

Un convertidor es un gran recipiente en forma de pera, revestido interiormente de material refractario, cuyo fondo está perforado. Mientras se vierte la colada líquida, el convertidor se mantiene en posición horizontal para evitar que el líquido alcance los orificios del fondo. Una vez que se ha completado la carga, el convertidor se endereza, al mismo tiempo que comienza el soplado de aire a 2 - 3 atm de presión a través de los orificios del fondo. El oxígeno del aire oxida al hierro formando FeO. Este se disuelve y oxida el silicio y al manganeso. Los óxidos formados reaccionan con el  $\text{SiO}_2$  y con el revestimiento formando una escoria que flota sobre el material fundido. Luego, comienza la oxidación del carbono. Cuando el CO llega a la atmósfera se observan llamaradas de 7 a 9 metros en la boca del convertidor, alcanzándose en el interior una temperatura de 1.600 °C. Una rápida disminución en el largo de la llama revela que la descarburation ha terminado. El proceso en el convertidor dura unos 20 minutos durante los que se pueden afinar de 10 a 25 toneladas de arrabio. Esta rapidez no permite un control muy exacto del proceso y, por lo tanto, de la composición final del acero.

### 5.3.2. Convertidores Bessemer

Si la colada está exenta de fósforo, se usan los convertidores Bessemer (Figura 3.1) revestidos de refractario ácido, cuarzo o arena amasada con arcilla. Con el aire insuflado, se eliminan del arrabio el silicio, el carbono y el manganeso.



**Figura 3.1.** Funcionamiento del convertidor Bessemer.

Sir Henry Bessemer, nació en Charlton, Hertfordshire. Fue, en gran medida, un autodidacta. Un inventor prolífico, pero se le conoce sobre todo por sus innovaciones en la siderurgia que elevaron enormemente la producción anual de acero en Inglaterra, consiguiendo un acero de gran calidad, disponible a un costo muy reducido.

En 1856, Bessemer desarrolló un horno especial llamado Convertidor que podía producir cantidades mayores de acero refinado que los procesos hasta entonces conocidos. El sistema consistía en insuflar aire en el fondo del horno para que burbujeara a través del hierro fundido para que el calor generado por la oxidación del carbono no sólo funde el metal sino que lo refine. En 1860 patentó el convertidor inclinado que produjo acero más eficazmente que el horno fijo anterior. Mediante este horno, se logró reducir el costo del acero de 40 libras a 20 libras por tonelada. Con el proceso Bessemer, Gran Bretaña aumentó la producción de acero de 50.000 toneladas/año en la década de 1850 hasta 1.300.000 toneladas/año en la década de 1880.



Por su contribución al desarrollo de la tecnología del acero, Bessemer fue nombrado caballero en 1879. Ese mismo año, fue electo miembro de la Royal Society.

### 5.3.3. El proceso de pudelado

El hierro dulce es un metal que contiene menos del 0.01% de carbono y no más de 0.003% de escoria. Para su obtención, se requiere del proceso conocido como **pudelado**. Antiguamente, el pudelado se hacía fundiendo arrabio y chatarra en un horno de reverbero de 230 kg. Este horno se calentaba con carbón, fuel oil o gas. La temperatura se elevaba lo suficiente para que se produjese la oxidación el carbón, el silicio, y el azufre. Para eliminar todos los elementos diferentes al hierro, el horno de pudelado debía estar recubierto con refractarios básicos (ladrillos refractarios con magnesita y aluminio). El material se retiraba del horno en grandes bolas en estado pastoso. En la actualidad, existen otros procedimientos como el llamado proceso Aston, en el que en lugar del horno de reverbero se usa un convertidor Bessemer, con lo que se obtiene mayor cantidad de material. El producto se utiliza para la fabricación de aleaciones especiales de metales.

### 5.3.4. Convertidores Thomas

Como los convertidores Bessemer están revestidos interiormente de materiales ricos en sílice, el silicio y el manganeso se separan del acero pero todo el fósforo queda en el hierro. Por esta razón, el procedimiento Bessemer no es aplicable a materiales ricos en fósforo.

En 1875, Sydney Thomas empleó como revestimiento del convertidor un aglomerado básico de óxido de magnesio y dolomita calcinada y termofraguada para separar el fósforo en el proceso.

Posteriormente, el proceso se perfeccionó adicionándole CaO al hierro para que se forme fosfato cálcico, que queda en las escorias. De esta manera, las escorias Thomas se emplean como fertilizantes, suministrando fósforo al suelo. En la figura 3.2 se esquematiza el proceso Thomas.

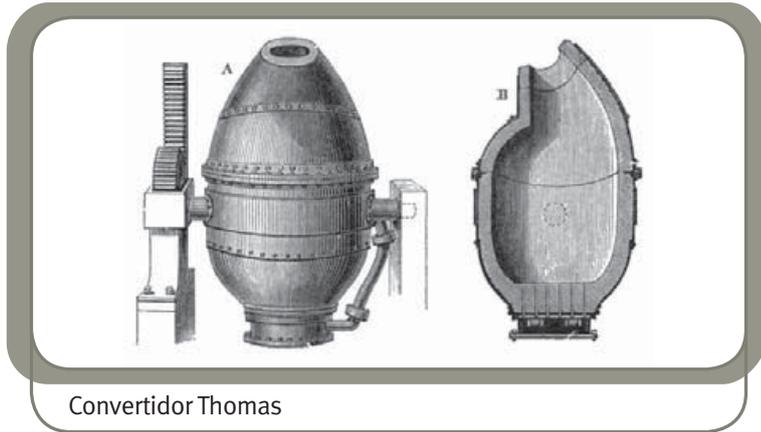
El calor liberado en la oxidación del fósforo para formar  $P_4O_{10}$  es muy elevado, alrededor de 3.000 kJ/mol, lo que contribuye a facilitar el proceso de obtención del acero. El convertidor Thomas es de hierro forjado fuerte y suele tener alturas superiores a los 6 metros. Se carga hasta ocupar 1/8 de su volumen. Si la materia prima es pobre en fósforo, se añaden escorias ricas con 12- 25 % de  $P_4O_{10}$ . El hierro queda casi completamente descarburado. Para corregir el porcentaje de carbono hasta los porcentajes deseados, posteriormente, se añade fundición espeular para carburarlo adecuadamente.



**Figura 3.2.** Esquema del funcionamiento de un convertidor Thomas



Sidney Gilchrist Thomas  
(1850 - 1885)

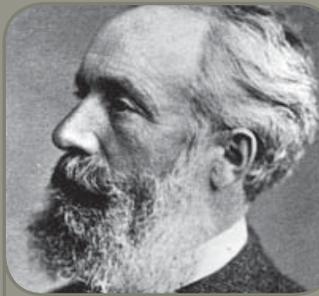


Convertidor Thomas

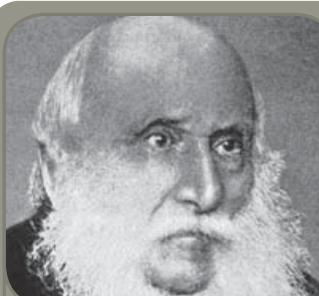
El acero bruto producido por el convertidor Thomas se vierte a calderos de colada y, de estos, a lingoteras de sección prismática donde se solidifica en los llamados **tochos de acero**. Luego, se manipulan en caliente por el laminador para obtener los productos comerciales.

### 5.3.5. Hornos Siemens - Martin

Este tipo de hornos fue desarrollado en 1868 por Friedrich Siemens en Alemania. Ese mismo año, Pierre Martin, en Francia, mejoró el diseño.



Friedrich Siemens  
(1826 - 1904)



Pierre Martin  
(1824 - 1915)

Son hornos de reverbero revestidos interiormente de material refractario ácido o básico, según la naturaleza del material de afino. Tienen forma rectangular (Figura 3 - 3) y utilizan como combustible fuel oil o gas de coque. El horno lleva adosadas cuatro cámaras recuperadoras de calor que permiten alcanzar altas temperaturas y economizar combustible. Los gases producidos por la combustión entran en las cámaras recuperadoras donde calientan a los ladrillos refractarios apilados en ellas. Al cabo de unos minutos, los ladrillos alcanzan los 1.000-1.150 °C, entonces se invierte la circulación de los gases. De esta manera, durante la combustión se pueden obtener temperaturas del orden de los 1.800 °C.

Al arrabio se le puede agregar chatarra, mineral de hierro o ambos. En los dos últimos casos se agregan fundentes. El porcentaje de carbono disminuye, en parte por oxidación y en parte por dilución. Si el arrabio tiene elevados porcentajes de fósforo o azufre se agregan fundentes básicos (caliza o dolomita). Si se desea reducir el porcentaje de manganeso se agregan fundentes ácidos (cuarzo o arena).

La forma en que se realiza la combustión tiene mucha importancia, pues las llamas no sólo ejercen una acción calefactora, sino también química: variando las proporciones de combustible y aire se obtiene una atmósfera oxidante, reductora o neutra. La posibilidad de regular la influencia de la llama permite

reducir notablemente la acción erosiva sobre las paredes y el techo.

El ciclo de fabricación del acero se inicia dejando caer mineral de hierro y fundente y/o chatarra en los hornos. Al comenzar la fusión, se agrega arrabio líquido o en lingotes. Cuando funde toda la carga se realizan sucesivos controles químicos y de temperatura, a fin de efectuar los ajustes necesarios que den al acero las especificaciones previstas. Al cabo de varias horas se destapa

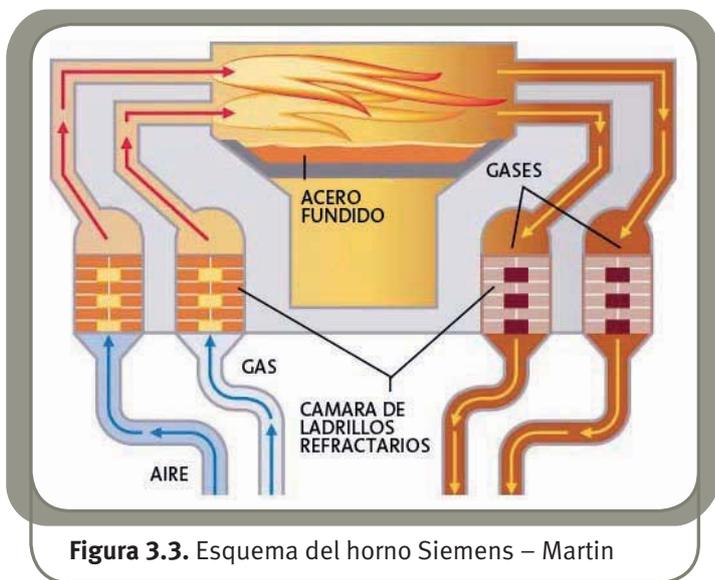


Figura 3.3. Esquema del horno Siemens – Martin

el orificio de colada y el acero fluye (por gravitación) a través de un canal, llenando un recipiente llamado **cuchara de colada**. Eventualmente, a este recipiente se le agregan materiales de aleación para obtener aceros especiales. En la cuchara de colada la **escoria** excedente sobrenada al acero, se la elimina dejándola fluir a través de un canal de desborde hacia un recipiente llamado pote de escoria. Una vez enfriada, es triturada y utilizada en la carga del horno alto.

Desde la cuchara de colada y a través de un orificio ubicado en su fondo, llamado **buza**, el acero es vaciado en lingoteras de formas y tamaños apropiados.

El piso del horno Siemens-Martin sufre la acción continua del baño y la corrosión de la escoria, las paredes y el techo están sometidos a la acción de la llama, de las altas temperaturas y a las salpicaduras de metal fundido y escoria. Los deterioros en la superficie interior del horno requieren reparaciones periódicas. Estas reparaciones se efectúan mediante una máquina que proyecta materiales refractarios granulados, reconstruyendo las zonas afectadas.

### 5.3.6. Hornos eléctricos

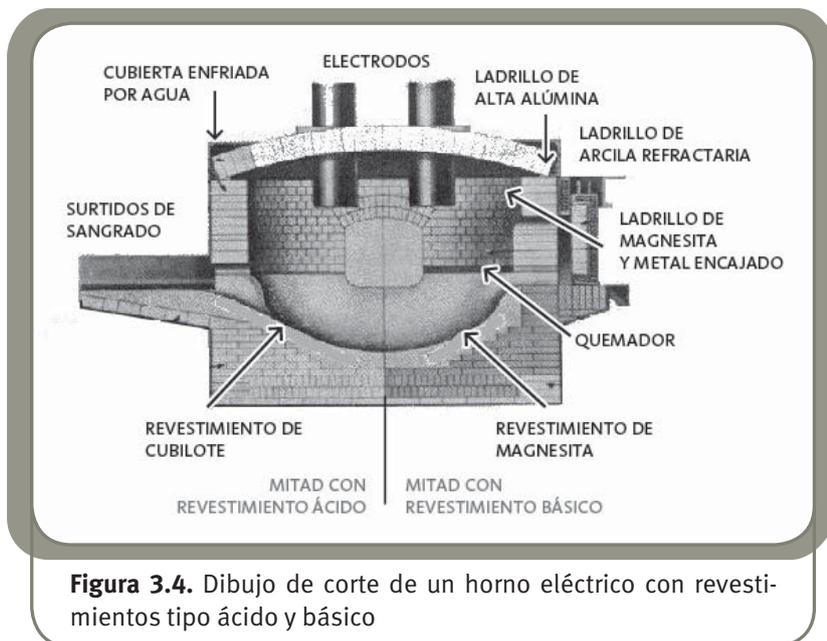
Debido a las exigencias, cada vez mayores, de aceros de calidad, un pequeño porcentaje del producto del horno alto es refinado, posteriormente, en hornos eléctricos. Las principales ventajas que ofrecen estos hornos son:

- Posibilidad de alcanzar temperaturas muy elevadas, del orden de los 2.000 - 2.500 °C en los hornos grandes y hasta 3.600 °C en los pequeños.
- Temperaturas fácilmente regulables.
- Ausencia de impurezas en el material tratado.
- Posibilidad de trabajar en ausencia de aire o en atmósfera especial.
- Rendimiento térmico elevado (hasta un 80 %) que compensa, en gran parte, el alto costo de la energía eléctrica.

Los hornos eléctricos son recipientes de chapas de acero y están revestidos interiormente de material refractario, ácido o básico, de acuerdo a las necesidades.

Estos hornos sólo se cargan con chatarra de acero de alta calidad y están recubiertos con ladrillos de la línea básica.

Existen hornos de arco eléctrico que pueden contener hasta 270 toneladas de material fundido. Para fundir 115 toneladas se requieren aproximadamente tres horas y 50,000 kWh de potencia. También en estos hornos se inyecta oxígeno puro por medio de una lanza. La mayoría de los hornos operan con tensiones de 40 V y con intensidad de corriente eléctrica de 12,000 A.



**Figura 3.4.** Dibujo de corte de un horno eléctrico con revestimientos tipo ácido y básico

Según el modo en que la energía eléctrica se transforma en calor, los hornos eléctricos se clasifican en:

**a) Hornos de resistencia.** En estos hornos la transmisión de calor se efectúa tanto por radiación como por conducción o por convección. Cuando el material a fundir forma parte del circuito eléctrico y hace las veces de resistencia, se dice que el horno de resistencia es de **calentamiento directo**. En cambio, si la resistencia es independiente, el horno se llama de **calentamiento indirecto**. Las resistencias utilizadas en los hornos de calentamiento indirecto son de grafito o carborundum y transmiten el calor por radiación o por convección. En los hornos de resistencia se alcanzan temperaturas de hasta 1.800 °C con rendimientos variables según su construcción.

**b) Hornos por arco.** Utilizando este tipo de hornos, se pueden alcanzar temperaturas de hasta 3.600 °C. En los llamados de arco indirecto (hornos Stassano, Rennerfeldt, Bassanese, etc.) el arco se establece entre dos o tres electrodos y el calor se transmite únicamente por radiación. Los electrodos están inclinados de manera que deslizando uno respecto de otro se puede modificar la longitud del arco. En el ánodo se pueden alcanzar los 3.600 °C siendo la temperatura del cátodo 2.700 - 2.800 °C. El material a afinar se carga en recipientes de cierre hermético para evitar contaminaciones. Estos recipientes son, a menudo, basculantes con lo que se facilita la mezcla. Puedan operar con carga fría o fundida y el revestimiento refractario interior se elige de acuerdo con la naturaleza del material de afino.

Algunos inconvenientes de los hornos por arco indirecto (larga duración de la fusión, reducida capacidad y elevado consumo de energía y electrodos) dieron lugar a su reemplazo por hornos de arco directo (hornos Siemens, FIAT, Héroult, Tagliaferri, Girod, etc.) en los que los electrodos, dispuestos verticalmente, se hacen descender hasta unos pocos centímetros de la superficie y el arco salta entre los electrodos y la carga. El calentamiento se efectúa por radiación desde los electrodos y como resultado del efecto Joule producido por la resistencia que ofrece la carga. Hay hornos de arco directo con solera no conductora

y con solera conductora. En los del primer tipo, el arco salta entre el electrodo y el baño metálico atravesando la carga y saliendo por el otro electrodo (en circuitos trifásicos la corriente de cada arco se cierra en triángulo a través de la carga). Son de fácil manejo y regulación. Los hay de hasta 15 - 20 toneladas (Héroult, Siemens, FIAT, etc.) fijos o basculantes. Los pequeños funcionan con corriente alterna monofásica y usan dos electrodos. Los de mayor capacidad tienen tres electrodos alimentados por una corriente trifásica. El hecho que los arcos estén conectados en serie permite emplear tensiones de 100-120 volts, menor intensidad de corriente y conductores más delgados.

Los hornos de solera conductora (tipo Girod) tienen los arcos en paralelo. La corriente atraviesa el arco y la carga, alcanzando la solera conductora que se refrigera exteriormente. Si bien presenta ciertas ventajas sobre los hornos de arco con solera no conductora, exige un costoso mantenimiento de la solera.

- c) **Hornos de calentamiento mixto.** En ellos el calor es producido en parte por la resistencia eléctrica y en parte por la circulación de corriente a través del material que se afina.
- d) **Hornos a inducción a baja frecuencia.** En estos hornos el calor necesario para fundir la carga se obtiene del efecto Joule originado por corrientes eléctricas inducidas. Están provistos de un arrollamiento primario con núcleo magnético alimentado directamente por la corriente eléctrica. La inducción electromagnética provoca el paso de la corriente por la carga metálica, que funciona como el secundario de un transformador. Estos hornos permiten una regulación amplia, la carga funde rápidamente, con el consiguiente ahorro en crisoles y refractarios. Las pérdidas por radiación son pequeñas y se logra una mayor homogeneidad en el material, debido a los movimientos que la corriente eléctrica produce en el interior de la carga. Trabajan con corriente alterna (250-500 volts) y con una frecuencia de 5 - 25 hertz a fin de que el factor de potencia ( $\cos \phi$ ) no disminuya mucho. La temperatura óptima de trabajo oscila alrededor de los 1.350 °C.
- e) **Hornos a inducción a alta frecuencia.** Estos hornos operan a 500 - 1.000 hertz, lo que permite llegar a los 2.500 °C en 10 minutos. Estos hornos no poseen núcleo magnético, sino que consisten en un enrollamiento espiralado alrededor de un crisol que contiene el material a fundir. Sus rendimientos son algo inferiores a los de baja frecuencia y su costo de instalación es mayor, pero las pérdidas por merma son inferiores al 1%.

### 5.3.7. Hornos de crisol

Los hornos de crisol fueron uno de los primeros hornos empleados para producir aceros de calidad. La carga se introduce en trozos pequeños dentro de un crisol, que se cubre con una tapa para evitar la contaminación del material con los gases de combustión. Una vez lleno, se coloca el crisol en el horno durante 3-4 horas. Después de producida la fusión se deja un tiempo en re-

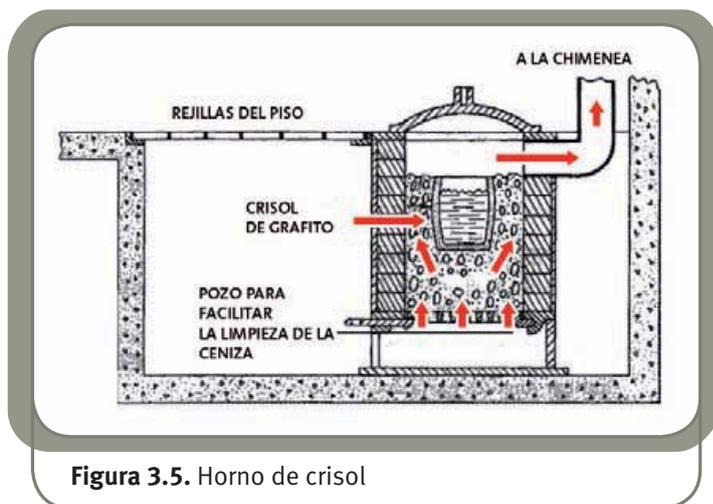


Figura 3.5. Horno de crisol

poso para desoxidar el metal fundido. El horno (Figura 3 - 5) tiene forma cilíndrica. Dentro de él, el crisol se apoya sobre un pilar de material refractario de 8-10 cm de altura. Estos hornos usan gas o petróleo como combustible. Los crisoles son de pequeño tamaño. Su vida útil es limitada porque se estropean tanto al ser apretados por las tenazas durante su transporte como por su exposición a cambios bruscos de temperaturas.



Figura 3.6. Convertidor LD

### 5.3.8. Horno básico de oxígeno (BOF)

Es un horno muy parecido al Bessemer con la gran diferencia que a este horno en lugar de inyectar aire a presión se le inyecta oxígeno a presión, con lo que se eleva mucho más la temperatura que en el Bessemer y en un tiempo muy reducido. El nombre del horno se debe a que tiene un recubrimiento de refractario de la línea básica y a la inyección del oxígeno. La carga del horno está constituida por 75% de arrabio procedente del alto horno y el resto es chatarra y cal. La temperatura de operación del horno es superior a los 1.650°C y es considerado como el sistema más eficiente para la producción de acero de alta calidad. Este horno fue inventado por Sir Henry Bessemer a mediados de 1850, sólo que como en esa época la producción del oxígeno era cara se inició con la inyección de aire, con lo que surgió el convertidor Bessemer, el que ya hemos descrito.

Desde mediados del siglo pasado se han logrado notables progresos en la fabricación del acero, especialmente con la introducción de los convertidores a oxígeno, en los que se emplea un chorro de oxígeno puro lanzado sobre la superficie de la carga fundida, para que se produzca la rápida conversión de la colada en acero. Los distintos sistemas - LD (Linzer-Düsenverfahren) OLP, Kaldo, etc. utilizan convertidores similares al Bessemer pero sin perforaciones en el fondo, o bien recipientes cilíndricos de eje horizontal. Los recipientes pueden ser fijos o rotatorios. Mediante lanzas especiales se dirige un chorro de oxígeno que roza la superficie del baño o penetra en su interior. El proceso dura unos 15 minutos, obteniéndose productos de elevada pureza, exentos de nitrógeno, fósforo y azufre. Estos aceros poseen muy buenas propiedades mecánicas y se hallan libres de escorias.

### 5.3.9. Hornos de crisol abierto

Los hornos de crisol abierto funcionan a altas temperaturas gracias al precalentado regenerativo del combustible gaseoso y el aire empleado para la combustión.

En el precalentado regenerativo los gases que escapan del horno se hacen pasar por cámaras llenas de ladrillos, a los que ceden la mayor parte de su calor. A continuación se invierte el

flujo a través del horno, de modo que el combustible y el aire pasen a través de las cámaras y sean calentados por los ladrillos. Mediante esta técnica, los hornos de crisol abierto alcanzan temperaturas de hasta 1.650 °C.

El horno propiamente dicho suele ser un crisol de ladrillo plano y rectangular de alrededor de 6 × 10 m, con un techo a una altura de 2,5 – 2,8 m. El crisol está intercomunicado con una planta de trabajo y ambos están situados sobre las cámaras de regeneración de calor del horno.

El horno se carga con una mezcla de arrabio (fundido o frío), chatarra de acero y mineral de hierro. Como fundente se emplea caliza y se le suele agregar fluorita para que aumente la fluidez de la escoria. Las proporciones de la mezcla varían según la naturaleza de la chatarra y el tipo de producto a obtener.

Por oxidación de la mezcla, se reduce el contenido de carbono a los valores deseados a la vez que impurezas tales como silicio, fósforo, manganeso y azufre se separan por combinación con la caliza formando la escoria. El horno se mantiene a una temperatura comprendida entre 1.550 y 1.650 °C, lo que hace que el metal se encuentre en estado líquido.

La composición del metal fundido se prueba extrayendo una muestra que se somete a análisis físicos y químicos. Cuando se alcanza el contenido de carbono deseado, se sangra el horno a través de un orificio situado en su parte trasera. Un horno de las dimensiones indicadas más arriba produce unas 100 toneladas de acero cada 11 -12 horas.

El acero fundido que sale del horno fluye por un canal corto hasta una gran cuchara situada a ras de suelo. Mediante esta cuchara se vierte el acero en moldes de hierro colado para formar lingotes, generalmente de sección cuadrada de unos 0,50 m de lado, y 1,5 m de longitud. En los procesos de colada continua el metal líquido que fluye del horno se transporta a la sección de elaboración del producto final.

### 5.3.10. Proceso de desgasificación del acero fundido

Una vez que se produjo acero líquido en cualquiera de los hornos vistos anteriormente, ese acero líquido puede refinarse aún más para lograr un producto de alta pureza y homogeneidad. Esto se consigue removiendo los gases (oxígeno, hidrógeno y nitrógeno) que se absorbieron o se formaron durante el proceso de fabricación. Con esto se evita que, al solidificar se produzcan defectos en el acero como inclusiones de óxidos, sopladuras, grietas internas que pueden aumentar la fragilidad del producto terminado.

La desgasificación del acero líquido se efectúa volcándolo en una lingotera en la cual se hace el vacío con lo que se consigue que los gases ocluidos escapen a través de la superficie del metal fundido succionados por una bomba de vacío.

### 5.3.11. Colada continua

Cuando se requiere un material de sección constante y en grandes cantidades se puede utilizar el **método de la colada continua** que consiste en colocar un molde con la forma que se requiere debajo de un crisol, el que con una válvula puede ir dosificando material fundido al molde. Por gravedad, el material fundido pasa por el molde, refrigerado externamente por un

sistema de agua. Cuando el material fundido pasa por el molde frío se vuelve pastoso y adquiere la forma del molde. Posteriormente, el material se conforma con una serie de rodillos, que al mismo tiempo lo arrastran hacia la parte exterior del sistema. Una vez conformado con la forma necesaria y con la longitud adecuada, el material se corta y almacena. Por este medio se pueden fabricar perfiles, varillas y barras de diferentes secciones y láminas o placas de varios calibres y longitudes. La colada continua es un proceso muy eficaz y efectivo para la fabricación de varios tipos de materiales de uso comercial.

### 5.3.12. Tratamientos térmicos que se aplican al acero

Las propiedades del acero pueden modificarse mediante cambios de temperaturas efectuados a determinadas velocidades. Todos aquellos procedimientos destinados a variar la estructura y las propiedades físicas del acero por calefacción y enfriamiento se llaman **tratamientos térmicos**.

Entre los tratamientos térmicos más importantes figuran: el recocido, el templado, el revenido, el cementado y el refinado.

Muchas piezas de acero presentan tensiones internas debidas a las operaciones a las que han sido sometidas. Estas tensiones pueden provocar grietas, y aún la ruptura, de piezas aparentemente muy resistentes. Para evitar estos inconvenientes se recurre al recocido.

El **recocido** consiste en calentar la pieza hasta determinada temperatura dejándola enfriar luego lentamente. El recocido tiende a eliminar las tensiones internas, reconstituir la estructura primitiva y reducir la excesiva dureza de un acero.

Según la temperatura a la cual se calienta el acero se distinguen:

**a) Recocido verdadero o completo.** Consiste en calentar el acero hasta una temperatura superior a la que corresponde a su transformación en austenita, y luego dejar enfriar lentamente. Las velocidades de calentamiento y de enfriamiento deben controlarse rigurosamente. Un calentamiento prolongado puede provocar la coalescencia de las fases o la formación de cristales de tamaño grande que le resta tenacidad al material. Un enfriamiento rápido aumenta la dureza y la fragilidad del acero. Durante el recocido puede producirse la descarburación de la superficie de la pieza o reacciones indeseables con los gases del horno. Estos inconvenientes se evitan efectuando el recocido en atmósfera reductora. Algunas propiedades de los aceros recocidos se esquematizan en el diagrama de la figura 3. 7.

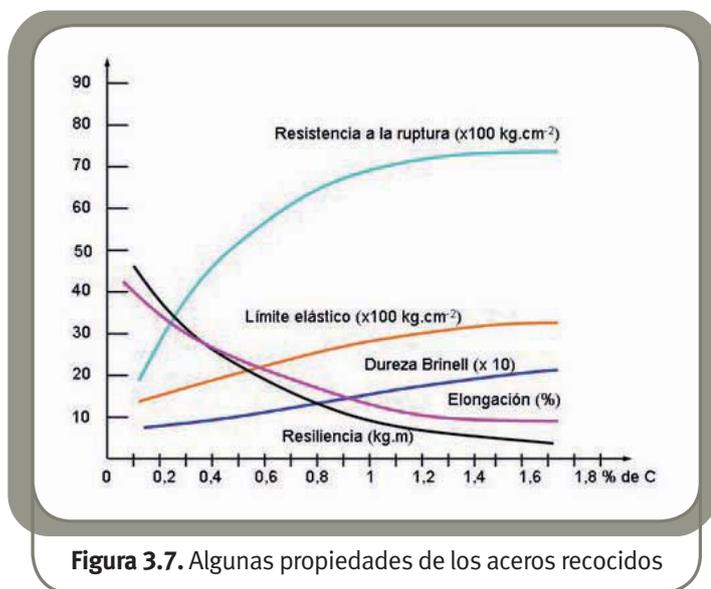


Figura 3.7. Algunas propiedades de los aceros recocidos

- b) Recocido de maleabilidad.** Se efectúa manteniendo los aceros al carbono a 710 - 720 °C durante algunas horas para luego dejarlo enfriar en el horno. Con este recocido se eliminan las zonas quebradizas y el material se vuelve dúctil y apto para ser maquinado.
- c) Recocido de cristalización.** Es un procedimiento similar al anterior, mediante el cual las zonas quebradizas se eliminan por recristalización. Se efectúa a 600 - 700 °C.
- d) Recocido de distensión.** Se efectúa para eliminar las tensiones provocadas por operaciones de deformación en frío. Este recocido se realiza manteniendo al acero a 500 - 600 °C durante unas horas. Luego se lo deja enfriar en el horno. Este tratamiento no provoca cambios estructurales.

Mediante ciertos procedimientos, se puede obtener una mayor dureza que la que le corresponde por su porcentaje de carbono. Estos procedimientos se llaman de **endurecimiento**. El endurecimiento de una pieza de acero puede ser total, cuando afecta a toda su masa; parcial, cuando afecta a una parte de la misma; o superficial, cuando se produce sobre su superficie. El endurecimiento total puede lograrse mediante una variación cristalográfica conocida como temple.

El **temple** consiste en calentar al acero hasta que adquiera una estructura austenítica y enfriarlo bruscamente. Como se recordará, la austenita es una solución de carbono en hierro  $\gamma$ . En algunas celdillas, un átomo de carbono ocupa el centro del cubo. Al pasar a la forma  $\alpha$ , el átomo central debe ser reemplazado por uno de hierro. Esta sustitución requiere cierto tiempo, por eso, enfriando rápidamente el átomo de carbono queda aprisionado en la celdilla cúbica y, cuando el acero se encuentra por debajo de los 250 °C, la sustitución del átomo de carbono por el de hierro es imposible. Esta temperatura se llama punto **martensítico**. Un acero bien templado presenta al microscopio un aspecto acicular, estructura que se llama martensita. Cuando el tamaño de las agujas es muy pequeño, la estructura acicular recibe el nombre de **hardenita**. Enfriando con velocidades inferiores a la crítica (que es la menor velocidad que permite la transformación directa de la austenita en martensita) pueden lograrse estructuras intermedias: **sorbita y troostita**. La martensita es el producto más duro derivado de la austenita. Para aceros con elevado porcentaje de carbono tiene una dureza Rockwell entre 64 y 70.

El temple se efectúa en aceros con más de 0,4 % de carbono. Un enfriamiento rápido y continuo hasta temperatura ambiente permite obtener la máxima dureza, pero es bastante común que el acero se agriete. Para prevenir este inconveniente, el enfriamiento se realiza en dos etapas. Primero se enfría rápidamente hasta 200-250 °C (usualmente sumergiendo la pieza en un baño de aceite) y luego lentamente hasta temperatura ambiente.

Cuando se forja, lamina, estira, etc., un acero por debajo de su punto crítico inferior, se dice que el acero se trabaja **en frío**. Al trabajar un acero en frío, se produce una deformación de su estructura cristalográfica que trae aparejados un aumento de tenacidad, del límite elástico, y de la dureza; pero se reduce la ductibilidad. La deformación en frío produce el deslizamiento de ciertos planos de átomos distorsionando los cristales en la dirección del esfuerzo.

La deformación en frío es particularmente útil para darle mayor dureza a aquellos aceros que, por su reducido porcentaje de carbono, no pueden ser templados.

El endurecimiento superficial puede efectuarse tanto por reacción química sobre la superficie como por un calentamiento local intenso. Los tratamientos químicos más usuales son la cementación, la cianuración y la nitruración. Los métodos más comunes de endurecimiento superficial por calentamiento son el temple por inducción y el temple oxiacetilénico.

La **cementación** es un procedimiento mediante el cual se aumenta el porcentaje de carbono en la superficie de un acero. Se aplica a aceros con menos de 0,4 % de carbono y produce una gran dureza superficial combinada con una gran tenacidad en el núcleo. La superficie endurecida se puede regular a voluntad. Los materiales empleados para cementar pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos. La cementación se efectúa en recipientes cerrados a 870-930 °C. Según el tiempo de exposición, se obtienen capas cementadas de 0,125 a 0,875 mm de espesor.

La química de la cementación es bastante complicada. En todos los casos se verifica una reacción del CO proveniente del material cementante sobre la superficie del acero:  $2 \text{CO} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{C}$ . Parte del carbono se disuelve en la fase austenítica difundiendo hacia el núcleo y parte forma cementita.

El acero cementado se enfría rápidamente y se vuelve a templar a 750 - 800 °C para darle la mayor dureza compatible con el porcentaje de carbono.

La cianuración es un proceso en el cual se emplean como cementantes líquidos, mezclas de cianuros o ferrocianuros alcalinos con  $\text{CaCl}_2$  o NaCl. El baño es calentado a 815 - 900 °C durante 10 - 30 minutos, según el espesor de la capa endurecida que se desee. A altas temperaturas los cianuros o ferrocianuros se descomponen liberando carbono, obteniéndose capas de extraordinaria dureza pero de 0,1- 0,25 mm de espesor. Las piezas cianuradas se enfrían directamente en agua o en aceite.

La nitruración es un proceso de endurecimiento superficial consistente en inyectar amoníaco anhidro a 480-650 °C sobre la superficie de ciertos aceros especiales. El amoníaco se descompone liberando nitrógeno. El nitrógeno forma con el hierro una solución sólida y nitruros complejos ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ) de gran dureza. El tiempo requerido puede llegar hasta las 90 horas alcanzándose capas nitruradas de hasta 0,8 mm de espesor con una dureza de 900 Brinell.

El temple por inducción es un calentamiento superficial producido por corrientes inducidas de altas frecuencias (900-1.100 Hz). Una frecuencia tan alta permite alcanzar temperaturas de hasta 840 °C en menos de un segundo. Cuando el acero alcanza la temperatura deseada, se corta la corriente y se rocía la superficie con un chorro de agua, a temperatura ambiente, que sale del inductor. De este modo se obtiene una estructura martensítica muy fina que, sin embargo, le confiere al acero una dureza mayor que en los procesos comunes de temple. El calentamiento superficial puede también efectuarse mediante la llama de un soplete oxiacetilénico seguido de un rápido enfriamiento con agua. Como la temperatura de la llama del acetileno es de 3.100 °C se verifica un calentamiento más intenso en un lapso de tiempo bastante menor que en el temple por inducción.

Los aceros templados, si bien tienen elevada dureza, son quebradizos y poseen tensiones internas. De allí que en casi todos los casos se suelen calentar las piezas a temperaturas que, usualmente, no superan los 320 °C durante lapsos variables de tiempo, dejándolas enfriar, finalmente, en forma lenta. Este tratamiento se llama **revenido**.

El **revenido** elimina las tensiones residuales y aumenta la tenacidad del acero. Si el tratamiento se produce a más de 200 °C disminuye la resistencia y la dureza. Si la duración del revenido es prolongada, la dureza irá decreciendo paulatinamente, aún a temperaturas de 150- 160 °C.

El **refinado** es un tratamiento térmico destinado a conferirle propiedades particulares a un determinado tipo de acero. Si, por ejemplo, se necesitan aceros que soporten elevadas temperaturas sin sufrir alteraciones en sus propiedades primitivas se lo temple a 1.070 – 1.120 °C,

enfriándolo en aceite y luego se somete a un recocido durante una hora a 720-770 °C. Un acero refinado no se oxida por debajo de los 900 °C, por lo que es particularmente apto para fabricar objetos que estén expuestos a altas temperaturas.

Además de los tratamientos descritos existe un gran número de tratamientos térmicos especiales: **chromodifusión, metalización, chapeado, sherardización**, etc., cuyo estudio escapa a los alcances de esta guía.

### 5.3.13. Producción de acero crudo

La Tabla 3.1 muestra la producción de acero crudo de 62 países (en miles de toneladas métricas).

PAÍS	2002	2003	2004	2005	2006
Austria	6.189	6.261	6.530	7.031	7.129
Bélgica	11.343	11.135	11.733	10.420	11.631
República Checa	392	6.791	7.033	6.189	6.862
Finlandia	4.003	4.766	4.831	4.739	5.054
Francia	20.258	19.758	20.773	19.481	19.852
Alemania	45.015	44.809	46.408	44.524	47.224
Estonia	1	1	1	--	--
Grecia	1.835	1.701	1.967	2.266	2.416
Hungría	1.840	1.989	1.942	1.958	2.089
Italia	25.970	26.832	28.334	29.350	31.624
Latvia	520	520	520	550	550 e
Luxemburgo	2.719	2.675	2.684	2.194	2.802
Holanda	6.117	6.571	6.854	6.919	6.372
Polonia	894	9.107	10.648	8.336	10.008
Eslovaquia	4.275	4.588	4.454	4.485	5.093
Slovenia	481	542	565	583	628
España	16.408	16.472	17.665	17.826	18.391
Suecia	5.753	5.707	6.001	5.723	5.466
Reino Unido	11.665	12.965	13.772	13.239	13.871
<b>Unión Europea <sup>(25)</sup></b>	<b>180.896</b>	<b>183.910</b>	<b>193.507</b>	<b>187.213</b>	<b>198.462</b>
<b>Unión Europea <sup>(15)</sup></b>	<b>158.567</b>	<b>160.374</b>	<b>168.344</b>	<b>165.112</b>	<b>173.233</b>
Croacia	33	41	78	73	81
Noruega	694	703	722	705	684
Rumania	5.492	5.691	5.708	6.280	6.263
Serbia & Montenegro	562	711	1.167	1.292	1.823
Turquía	16.472	18.298	20.478	20.965	23.308
<b>Otros Europeos</b>	<b>45.814</b>	<b>25.445</b>	<b>28.153</b>	<b>33.186</b>	<b>36.378</b>
Bielorrusia	1.484	1.591	1.792	2.027	2.324
Kazakhstan	4.814	4.898	5.385	4.451	4.198
Moldavia	514	850	1.011	1.016	785
Rusia	58.590	61.450	64.289	66.146	70.830
Ucrania	34.056	36.932	38.738	38.641	40.899

PAÍS	2002	2003	2004	2005	2006
Uzbekistán	450	499	594	595	730
<b>C.I.S. <sup>(6)</sup></b>	<b>99.908</b>	<b>106.220</b>	<b>111.809</b>	<b>112.876</b>	<b>119.766</b>
Canadá	16.002	15.927	16.428	15.327	15.493
Cuba	268	210	186	245	257
El Salvador	49	57	59	48	72
Guatemala	216	226	220	207	292
México	14.051	15.178	16.701	16.195	16.313
Trinidad and Tobago	817	903	820	712	673
Estados Unidos	92.241	93.677	98.545	94.897	98.557
<b>América del Norte</b>	<b>123.644</b>	<b>126.179</b>	<b>132.960</b>	<b>127.631</b>	<b>131.655</b>
Argentina	4.363	5.033	5.125	5.380	5.533
Brasil	29.604	31.135	32.918	31.610	30.901
Chile	1.280	1.377	1.568	1.537	1.627
Colombia	663	668	745	842	1.220
Ecuador	67	80	70	84	85
Paraguay	80	91	107	101	115
Perú	611	669	710	790	896
Uruguay	34	41	55	64	57
Venezuela	4.164	3.930	4.714	4.910	4.864
<b>América del Sur</b>	<b>40.866</b>	<b>43.024</b>	<b>46.012</b>	<b>45.316</b>	<b>45.298</b>
Argelia	1.091	1.051	1.014	1.007	1.158
Egipto	4.316	4.398	4.757	5.603	6.045
Libia	886	1.007	1.026	1.255	1.151
Sudáfrica	9.095	9.481	9.504	9.494	9.718
Túnez	200	86	63	115	160
Zimbabwe	105	152	152	107	24
<b>África</b>	<b>15.692</b>	<b>16.174</b>	<b>16.517</b>	<b>17.995</b>	<b>18.780</b>
Irán	7.321	7.869	8.682	9.404	9.789
Israel	280	280	280	300	300 e
Jordania	134	135	140	150	150 e
Qatar	1.027	1.055	1.046	1.057	1.003
Arabia Saudita	3.570	3.944	3.902	4.186	3.974
<b>Medio Oriente</b>	<b>11.918</b>	<b>12.868</b>	<b>13.631</b>	<b>15.257</b>	<b>15.376</b>
China	181.688	221.149	272.456	355.790	422.660
India	28.814	31.779	32.626	45.780	49.450
Japón	107.745	110.511	112.675	112.471	116.226
Corea del Sud	45.390	46.310	47.521	47.820	48.455
Taiwan	18.230	18.832	19.347	18.942	20.000
<b>Asia</b>	<b>381.867</b>	<b>428.581</b>	<b>484.625</b>	<b>598.083</b>	<b>675.589</b>
Australia	7.527	7.544	7.414	7.757	7.881
Nueva Zelanda	765	853	868	889	810
<b>Oceanía</b>	<b>8.292</b>	<b>8.397</b>	<b>8.282</b>	<b>8.646</b>	<b>8.691</b>
<b>Total 62 países</b>	<b>885.766</b>	<b>950.798</b>	<b>1.035.495</b>	<b>1.146.203</b>	<b>1.249.997</b>

°: estimada

**Tabla 3.1.** Producción de acero crudo informada por los 62 países miembros del IISI. Fuente: World Steel Organization

**¿Sabía Ud. que ...**

*El puente de acero más largo del mundo es puente Akashi – Kaikyo, entre Kobe Awaji-shima, Japón? Tiene casi 4.000 metros de longitud y para su construcción se emplearon 193.000 toneladas de acero.*



**¿Sabía Ud. que ...**

*La “montaña rusa” más larga del mundo se llama “Dragón de acero”? Está ubicada en Nagashima Spaland Mie, Japón. Tiene 2,5 km de largo y una caída de 97 metros. En ella los coches alcanzan velocidades superiores a los 150 km/h.*

### 5.3.14. Aceros aleados

Los elementos de aleación específicos y sus cantidades determinan el tipo de acero de aleación y sus propiedades particulares.

**Aceros al manganeso.** Son aquellos aceros ternarios con más de 0,8 % de manganeso. El manganeso forma una solución sólida tanto con hierro  $\gamma$  como con hierro  $\alpha$ , disminuyendo la temperatura de la transformación alotrópica. Además, forma con el carbono  $Mn_3C$  isomorfo, con la cementita y es soluble en hierro  $\gamma$ .

El manganeso actúa como desoxidante y también neutraliza los efectos nocivos del azufre, facilitando la laminación, moldeo y otras operaciones de trabajo en caliente. Aumenta el tamaño de los granos de un acero y lo hace sensible al tratamiento térmico, especialmente al templeado, en el cual disminuye la velocidad crítica de enfriamiento. De acuerdo con su estructura, los aceros al manganeso se clasifican en martensíticos, perlíticos y austeníticos. Los martensíticos son extremadamente duros para ser maquinados. Los perlíticos tienen 0,25 - 1,0 % de carbono y 0,8 - 20 % de manganeso. Se utilizan para construcción y para la fabricación de resortes. Los austeníticos tienen 0,90 - 1,3 % de carbono y 10 - 14 % de manganeso. Son aceros de excelente resistencia al desgaste.

**Aceros al níquel.** Reciben este nombre las combinaciones ternarias hierro – carbono – níquel. El níquel no se combina con el carbono, pero disminuye la velocidad crítica de enfriamiento para el templeado. Al igual que los aceros al manganeso se clasifican, según su porcentaje de carbono, en *perlíticos*, *martensíticos* y *austeníticos*. Los perlíticos tienen menos de 0,5 %

de carbono y hasta 3,5 % de níquel. Son de mayor resistencia y ductibilidad que los aceros al carbono. Los *martensíticos* no tienen muchas aplicaciones, debido a que son muy duros. Los *austeníticos* tampoco encuentran mucha aplicación, ya que no son dúctiles y tienen bajo límite elástico. Algunos tipos de aceros al níquel austeníticos encuentran aplicación debido a la influencia del níquel en la dilatación de la aleación. El *Invar* es una aleación con 36 % de níquel cuya dilatación a temperatura ambiente es prácticamente nula. Se la emplea para fabricar instrumentos de precisión. Una aleación con 0,15 % de carbono y 46 % de níquel (Platinite) tiene un coeficiente de dilatación similar al vidrio.

**Aceros al cromo.** Como su nombre lo indica, tienen hierro, carbono y cromo. El cromo es soluble en hierro líquido y forma soluciones sólidas tanto con el hierro  $\gamma$  como con el hierro  $\alpha$ . Se combina con el carbono formando distintos carburos, algunos de los cuales son isomorfos con la cementita y pueden quedar retenidos en solución sólida por un enfriamiento rápido a temperatura ambiente. El cromo aumenta mucho la resistencia del acero a la corrosión (atmosférica, del agua o de ácidos). Los aceros inoxidable tienen 0,30 % de carbono y 10-15 % de cromo.

**Aceros al cromo-níquel.** Son aceros cuaternarios donde el níquel está disuelto en el hierro  $\alpha$  como en el hierro  $\gamma$  y en tanto que el cromo puede estar disuelto como tal o como carburos. Poseen elevado límite elástico combinado con una mayor ductibilidad, dureza y resistencia al desgaste que los aceros al carbono. Los porcentajes de cromo y níquel varían según las propiedades requeridas. Un acero que se ha popularizado es el llamado 18/8, de gran resistencia a la corrosión. Contiene 18 % de Cr y 8 % de Ni y se utiliza para la fabricación de cubiertos, menaje, etc.

Otros elementos que suelen entrar en la composición de aceros son:

- **Aluminio.** Empleado en pequeñas cantidades, actúa como un desoxidante para el acero fundido y produce un acero de grano fino.
- **Boro.** Aumenta la templabilidad del acero (profundidad a la cual un acero puede ser endurecido).
- **Cobre.** Mejora significativamente la resistencia a la corrosión atmosférica.
- **Molibdeno.** Mediante el aumento de la penetración de temple, mejora las propiedades del tratamiento térmico. Aumenta también la dureza y la resistencia a altas temperaturas.
- **Silicio.** Se emplea como desoxidante y actúa como endurecedor en el acero de aleación.

Además de los aceros aleados mencionados existen aceros al cromo-manganeso, al tungsteno, al vanadio, al cromo-vanadio, etc. cuya descripción, aún somera, escapa a los contenidos de esta guía.

### 5.3.15. Nomenclatura de los aceros sistema S.A.E - A.I.S.I.

La mayoría de las propiedades de los aceros está determinada por su microestructura y ésta, a su vez, está determinada por el tratamiento y la composición química. Uno de los sistemas más generalizados en la nomenclatura de los aceros es el que está basado en su composición química.

En el sistema S.A.E. - A.I.S.I, los aceros se clasifican con cuatro dígitos XXXX. Los primeros dos números se refieren a los dos elementos de aleación más importantes y los dos (o tres) últimos dígitos indican cuántos centésimos de % de carbono se encuentra presente en la aleación. Así, por ejemplo, 1040 indica acero al carbono con 0,4 % de carbono; 1330, indica un acero con 1,75% de manganeso y 0,3 % de carbono.

La Tabla 3.2 muestra el sistema de designaciones que recomiendan estas dos instituciones.

ACEROS	COMPOSICIÓN NOMINAL	ACEROS	COMPOSICIÓN NOMINAL
al C		93xx	Ni: 3,25; Cr: 1,20; Mo: 0,12
10xx	Acero al C (Mn: 1,00 máx)	94xx	Ni: 0,45; Cr: 0,40; Mo: 0,12
11xx	Con S agregado	97xx	Ni: 0,55; Cr: 0,20; Mo: 0,20
12xx	Con S y P agregados	98xx	Ni: 1,00; Cr: 0,80; Mo: 0,25
15xx	Acero al C (Mn: 1,00 a 1,65)	al Ni-Mo	
al Mn		46xx	Ni: 0,85 y 1,82; Mo: 0,20 y 0,25
13xx	Mn: 1,75	48xx	Ni: 3,50; Mo: 0,25
al Ni		al Cr	
23xx	Ni: 3,50	50xx	Cr: 0,27, 0,40, 0,50 y 0,65
25xx	Ni: 5,00	51xx	Cr: 0,80, 0,87, 0,92, 0,95, 1,00 y 1,05
al Ni -Cr		Al Cr con	
31xx	Ni: 1,25; Cr: 0,65 y 0,80	alto % de C	
32xx	Ni: 1,75; Cr: 1,07	50xxx	Cr: 0,50; C: 1,00 mín
33xx	Ni:3,50; Cr:1,50 y 1,57	51xxx	Cr: 1,02; C: 1,00 mín.
34xx	Ni:3,00, Cr: 0,77	52xxx	Cr: 1,45; C: 1,00 mín.
al Mo		al Cr-V	
40xx	Mo: 0,20 y 0,25	61xx	Cr: 0,60, 0,80, 95. V: 0,10 y 0,15
44xx	Mo: 0,40 y 0,52	al W-Cr	
al Cr y Mo		72xx	W: 1,75; Cr: 0,75
41xx	Cr: 0,50; 0,80 y 0,95; Mo: 0,12, 0,20, 0,25 y 0,30	al Si - Mn	
al Ni-Cr-Mo		92xx	Si: 1,40 y 2,00; Mn: 0,65, 0,82 y 0,85; Cr: 0 y 0,65
43xx	Ni:1,82; Cr: 0,50 y 0,80; Mo: 0,25	De baja aleación	De baja aleación
43BVxx	Ni: 1,82; Cr: 0,50; Mo: 0,12 y 0,25; V: 0,03 mín	9xx	Varios grados SAE
47xx	Ni: 1,05; Cr: 0,45; Mo: 0,20 y 0,35	al B	
81xx	Ni: 0,30; Cr: 0,40; Mo: 0,12	xxBxx	B denota boro
86xx	Ni: 0,55; Cr: 0,50; Mo: 0,20	Con Pb	
87xx	Ni: 0,55; Cr: 0,50; Mo: 0,25	xxLxx	L denota plomo
88xx	Ni: 0,55; Cr: 0,50; Mo: 0,35		

**Tabla 3.2.** Sistema de designaciones SAE – AISI para aceros

### 5.3.16. Aceros inoxidables

Dentro de la gran variedad de aceros merecen destacarse, por su popularidad, los aceros inoxidables. Los aceros inoxidables son una gama de aleaciones que contienen un mínimo de 11% de cromo. El cromo tiene la particularidad de formar una película pasivante sobre la superficie del acero que impide su corrosión por agentes atmosféricos o químicos. Esa película es extremadamente delgada, continua y estable. La resistencia a la corrosión y la diversidad de propiedades y características secundarias, presentes en los aceros inoxidables, hacen de ellos un grupo de aceros muy versátiles.

Los aceros inoxidables tienen una resistencia mecánica que es más del doble que la del acero al carbono, son resistentes tanto a temperaturas elevadas como a temperaturas bajo cero. Son relativamente fáciles de maquinar y su apariencia estética puede variarse sometiendo el acero a diferentes tratamientos superficiales. Mediante estos tratamientos se obtienen acabados a espejo, satinado, coloreado, texturizado, etc.

Los llamados aceros inoxidables Serie 400, (Aceros inoxidables martensíticos) fueron los primeros desarrollados industrialmente. Se los llama, simplemente, “al cromo” y se los empleaba para la fabricación de cubiertos). Tienen un contenido de carbono relativamente alto de 0,2 a 1,2% y de cromo de 12 a 18%. Los tipos más comunes son el AISI 410, 420 y 431. Las propiedades más relevantes son: elevada dureza (se puede incrementar por tratamiento térmico), gran facilidad de maquinado y moderada resistencia a la corrosión. Actualmente, sus principales aplicaciones son: fabricación de ejes, instrumental quirúrgico y cuchillería.

Los aceros inoxidables Serie 400 (Aceros inoxidables ferríticos) también se consideran simplemente “al cromo”, su contenido varía de 12 a 18%, pero el contenido de carbono es bajo, menos del 0,2%. Los tipos más comunes son el AISI 430, 409 y 434.

La propiedad más relevante es su buena resistencia a la corrosión. Su dureza no es muy alta y no pueden incrementarla por tratamiento térmico. Este tipo de aceros se utilizan, principalmente, para la fabricación de equipos y utensilios domésticos y en aplicaciones arquitectónicas y decorativas.

Los aceros inoxidables Serie 300 (Aceros inoxidables austeníticos) son los más utilizados por su amplia variedad de propiedades. Se obtienen agregando Níquel a la aleación, por lo que la estructura cristalina del material se transforma en austenita (de aquí deriva el nombre). El contenido de Cromo varía de 16 a 28%, el de Níquel de 3,5 a 22% y el de Molibdeno 1,5 a 6%. Los tipos más comunes son el AISI 304, 304L, 316, 316L, 310 y 317.

Entre sus propiedades se destacan: excelente resistencia a la corrosión, muy buen factor de higiene - limpieza, son fáciles de transformar, excelente soldabilidad, no se endurecen por tratamiento térmico, se pueden utilizar tanto a temperaturas muy bajas como a temperaturas elevadas.

Sus principales aplicaciones son: fabricación de utensilios y equipo para uso doméstico y hospitalario; en la industria alimentaria, en la industria química para la fabricación de reactores resistentes a la corrosión, tanques, tuberías, etc.

### 5.3.17. Principales Establecimientos Siderúrgicos del País

**Siderar** es la empresa siderúrgica argentina que tiene el mayor volumen de producción. Partiendo del mineral de hierro y del carbón que llegan a su puerto, elabora coque, arrabio y acero para producir chapas laminadas en caliente, en frío y revestidas.

Desarrolla sus actividades en 7 plantas industriales, la más importante de todas es la **Planta San Nicolás**. Ubicada sobre la margen derecha del Río Paraná, en el partido de Ramallo, a 7 km de la ciudad de San Nicolás de los Arroyos, provincia de Buenos Aires. Las instalaciones del complejo, de ciclo integrado, comprenden el Puerto Ing. Buitrago, una planta de coque con cuatro baterías, una planta de subproductos, una planta de sinter, dos altos hornos, una acería LD con tres convertidores, horno cuchara, colada continua, laminación en caliente, laminación en frío, instalaciones de terminación en frío, una línea de estañado electrolítico y servicios auxiliares de envergadura. Entre estos últimos se destacan una usina eléctrica propia, una planta de oxígeno, talleres de mantenimiento y una importante red ferroviaria. Todos estos servicios están integrados al Puerto Ing. Buitrago (con un calado de 27 pies al cero local, integrado por dos muelles, uno comercial y otro mineralero).

La **Planta Ensenada** produce, a partir de las bobinas laminadas en caliente que llegan a su puerto, chapas de acero laminadas en frío, en hojas y bobinas. El puerto consta de un muelle de 150 m para barcos de hasta 35.000 t. Esta planta comprende una línea de decapado continuo, un tren de laminación en frío, recocido batch para tratamiento térmico discontinuo, laminador de temple, una línea de aplanado bajo tensión y servicios auxiliares.

En la **Planta Haedo**, Siderar produce chapas galvanizadas para las industrias de la construcción, de base agrícola y vial. Cuenta con una línea de galvanizado por inmersión en caliente y distintas líneas de corte y conformado de chapa.

En la **Planta Sidercolor** (localizada en Florencio Varela, Provincia de Buenos Aires), a partir de chapas laminadas en frío, se producen chapas de acero electrocincadas, chapas prepintadas y chapas revestidas con películas de PVC en una amplia gama de colores, destinadas a la industria automotriz, de artículos para el hogar y de la construcción. Cuenta con líneas de electrocincado, prepintado e instalaciones auxiliares.

Próximas a la Planta Sidercolor, se encuentran las **plantas 1 y 2 de Serviadero**, en cuyas instalaciones se realizan cortes especiales de chapa de acero laminado en frío (flejes, desarrollos, etc.) para diferentes rubros industriales. Las plantas cuentan con varias líneas de corte transversal y longitudinal y un centro de corte automático para producir medidas especiales e instalaciones auxiliares, que le otorgan una capacidad productiva del orden de 150.000 t/año.

La **planta Serviadero 3** se encuentra vecina a la Planta Sidercrom, en el Parque Industrial Comirsa. En ella se realizan cortes de chapa laminada en caliente, que permiten entregar al mercado hojas, tiras y desarrollo a pedido. La planta posee una línea de corte transversal, una línea de corte longitudinal, una línea de granallado y tres guillotinas aptas para entregar

desarrollos. En el corto plazo aumentará su capacidad con una línea de corte longitudinal que permitirá flejar material de hasta 12,5 mm.

La **planta Sidercrom**, está próxima a la Planta de San Nicolás. En ella, partiendo de bobinas estañadas, se producen todas las variantes dimensionales de hojas necesarias para la fabricación de envases industriales, alimenticios y aerosoles. La planta posee dos líneas de corte que le permiten llegar a procesar hasta 120.000 t/año de bobinas estañadas. Un área cerrada y climatizada permite el almacenaje de hojas empaquetadas.

La **planta Canning** está situada en la localidad del mismo nombre, partido de Ezeiza (Provincia de Buenos Aires). A partir de chapa laminada en frío, produce chapa galvanizada por inmersión y galvalume (recubrimiento de aleación cinc - aluminio) en diferentes formas y longitudes destinados a la industria de la construcción, agro y vial. Además, cuenta con una línea de pintura en bobinas que produce galvanizado y prepintado con similares usos finales y aplicaciones. En esta planta, Siderar produce una amplia gama de de caños con costura (para la construcción de gasoductos, oleoductos y entubamientos de pozos de petróleo), hojalata (para la fabricación de envases de alimentos y pinturas), laminados en caliente, en frío y electrocincados (de elevada resistencia a la corrosión), productos galvanizados, cincalum y chapas prepintadas para la línea blanca de electrodomésticos.

Siderca S.A.I.C., una compañía de **Tenaris**, utiliza en Argentina la marca *TenarisSiderca*. Su planta productiva, localizada en la ciudad de Campana, Provincia de Buenos Aires, posee una capacidad de producción anual de 820.000 toneladas de tubos de acero sin costura y una dotación de 4.300 empleados. Tenaris es productor y uno de los proveedores más importantes del mundo de tubos de acero sin costura para las industrias del petróleo y construcción de gasoductos. Posee plantas productivas en Argentina, Brasil, Canadá, Italia, Japón, México, Rumania y Venezuela y una red de centros de servicio al cliente en más de 20 países. Su capacidad de producción anual es de 3,3 millones de toneladas de tubos sin costura y 850.000 toneladas de tubos con costura. Su facturación supera los u\$s 3.000 millones y cuenta con 16.000 empleados en todo el mundo.

Entre sus productos, se destacan el Cromo 3% para Vintage Oil (un acero al cromo resistente a la corrosión por dióxido de carbono), todo tipo de columnas tubulares con o sin costura (para columnas y torres para iluminación, semáforos, estructuras y pórticos para señalización, etc.), cilindros para GNC, gas envasado, estructuras tubulares para construcción, para la fabricación de calderas, tubos para pozos petrolíferos, etc.

**Acindar S.A.** es otra de las empresas siderúrgicas importantes del país. Posee 13 establecimientos industriales, ubicados en varias provincias, destinados a producir diversos materiales. Entre los productos que elabora Acindar se destacan: perfiles conformados en frío y perfiles laminados en caliente, alambres hogareños y para la construcción, alambres industriales y rurales (alambre de púas, boyeros, ovalados, redondos, etc.), sistemas de armaduras de acero para estructuras de hormigón armado, barras para construcción DN-A-420, barras industriales: aleadas para resortes, aleadas de uso industrial, de uso mecánico, laminadas en caliente, varillas de bombeo, rectificadas, trefiladas, aptas para forja, palanquilla, piezas for-

jadas, mallas de acero, clavos, estribos, tubos de conducción, tubos estructurales, caños de luz, planchuelas, laminadas en caliente, vigas reticuladas, cordones de acero para hormigón pretensado, etc.

### 5.3.18. La industria siderúrgica y el Medio Ambiente

Uno de los principales efectos de los procesos siderúrgicos sobre el ambiente lo constituyen las emisiones de  $\text{CO}_2$ . No obstante la mejora en la tecnología evidenciada en las últimas décadas, las emisiones de  $\text{CO}_2$  rondan las 2,0 – 2,2 toneladas de  $\text{CO}_2$  por tonelada de acero crudo. Dado que en el mundo se producen alrededor de 1.000 millones de toneladas anuales de acero crudo, las emisiones de  $\text{CO}_2$  superan los 2.000 millones de toneladas anuales. En estas cantidades no se incluye el  $\text{CO}_2$  generado por centrales térmicas que suministran la energía para los procesos de afino y elaboración de subproductos.

De esta manera, la siderurgia es, entre todas las industrias, la que contribuye en mayor proporción al “efecto invernadero”. A la polución por emisión de  $\text{CO}_2$  se suma la ocasionada por la emisión de  $\text{SO}_x$  ( $\text{SO}_2$  y  $\text{SO}_3$ ) producidos en los procesos de afino. Los  $\text{SO}_x$ , conjuntamente con los  $\text{NO}_x$  son los responsables de la llamada “lluvia ácida”.

Otro problema ambiental lo constituyen los subproductos sólidos y líquidos de los procesos siderúrgicos. En 1950, se generaban 700 kg de subproductos (escorias, barros de sistemas de limpieza de gases y humos de colada, aguas residuales, etc.) por tonelada de arrabio producido. Actualmente, sólo se generan alrededor de 200 kg. Aún así, la contribución al deterioro ambiental es muy grande.

Se están desarrollando estudios acerca de tecnologías que aporten un menor impacto por mayor eficiencia general de proceso (energética, menor residuo generado, efluentes y emisiones controladas, etc.). Por ejemplo: el proyecto de "chapa ultrafina" o Thin Slab Casting, o el proyecto Ultra Light Steel Auto Body (ULSAB), en el que un consorcio internacional integrado por empresas automotrices y varias empresas siderúrgicas diseñó y construyó un prototipo de auto con carrocería ultraliviana, 35% menos pesada que la convencional.

## Actividades

### Actividad 1. Ensayos para la detección de $\text{Fe}^{2+}$ y $\text{Fe}^{3+}$

Materiales:

- Cilindro graduado.
- Tubos de ensayos.
- Solución recién preparada de sulfato de hierro (II) y amonio que contenga el equivalente a 10 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado por litro.
- Solución de cloruro de hierro (III).
- Solución de hexacionoferrato(III) de potasio,  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ .

- Solución de hexacianoferrato (II) de potasio,  $K_4Fe(CN)_6$ .
- Solución de tiocianato de potasio, KSCN.

- 1) En un tubo de ensayos coloque 5 mL de  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$  y agregue 1 mL de solución de  $K_4Fe(CN)_6$ . Observe el color del precipitado que se forma. Deje reposar durante 5 minutos. Observe los cambios. Escriba las ecuaciones correspondientes.
- 2) En un tubo de ensayos coloque 5 mL de  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$  y en otro tubo coloque 5 mL de solución de 5 mL de  $FeCl_3$ . Agregue a cada tubo unas gotas de solución de KSCN. Registre sus observaciones y escriba las ecuaciones correspondientes a las reacciones que se verifican.
- 3) En un tubo de ensayos coloque 5 mL de  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$  y 1 mL de solución de  $K_3Fe(CN)_6$ . Observe el color del precipitado que se forma. Escriba las ecuaciones correspondientes a las reacciones que se verifican.

## Actividad 2. Visita guiada a alguna planta siderúrgica

Para que los alumnos tengan una experiencia práctica de los diversos procesos de la industria siderúrgica, sugerimos tratar de concertar una visita guiada a alguna de las plantas mencionadas anteriormente.

Enumeramos algunas direcciones para establecer los contactos necesario para concertar esas visitas.

### Siderar – Planta San Nicolás

A. Gral. Savio S/N

(2915) Ramallo - Provincia de Buenos Aires.

Tel: 03461-438100 - Fax: 03461-438222 / 03461-438333

### Planta Ensenada

Camino Almirante Brown S/N

(1925) Ensenada - Provincia de Buenos Aires

Tel: 0221-4296100 - Fax: 0221-4296101

### Planta Haedo

Valentín Gómez 210

(B1706FMB) Haedo - Provincia de Buenos Aires

Tel: 011-4489-6900 - Fax: 011-4489-6913

### Planta Sidercolor

Camino Gral. Belgrano Km 32

(1888) Florencio Varela - Provincia de Buenos Aires

Tel: 011-4229-6630 - Fax: 011-4229-6506

**Plantas Serviacero 1, 2 y 3**

Camino Gral. Belgrano Km 31.5  
 (1888) Florencio Varela - Provincia de Buenos Aires  
 Tel: 011-4229-6650 - Fax: 011-4229-6504

**Planta Sidercrom**

Parque Industrial Comirsa  
 (2915) Ramallo - Provincia de Buenos Aires  
 Tel: 03461-438100 - Fax: 03461-438222 / 03461-438333

**Planta Canning**

Calle Barreiro s/n – Canning  
 (1804) Partido de Esteban Echeverría - Provincia de Buenos Aires  
 Tel: 011-4239-4100 - Fax: 011-4239-4010

**Tenaris Siderca**

Av L N Alem 1067 - CP(1001) - Buenos Aires  
 Tel: (011) 4018-2100

Dr J Simini 250 - CP(2804) - Campana – Provincia de Buenos Aires  
 Tel: (03489) 43-3100

**Acindar S.A**

Sede Corporativa  
 Estanislao Zeballos 2739, Beccar.

**Tablada – Planta 1**

Dr. Ignacio Arrieta 4936, La Tablada  
 Produce alambres.

**Tablada – Planta 2 – Armar Buenos Aires**

Presta el servicio de corte y doblado de acero.

**Provincia de Santa Fe**

**Planta Ing. Arturo Acevedo**

Ruta Prov. 21, Km 246,8, Villa Constitución.  
 El establecimiento es la acería principal de la firma. Produce tubos de conducción, flejes, barras, alambroón y alambre.

**Armar Rosario**

Blvrd. Seguí 7618, Rosario  
 Presta el servicio de corte y doblado de acero.

**Planta Heredia**

Blvrd. Seguí 7618, Rosario  
Produce alambres, telas y tejidos de acero.

**Planta Navarro**

Av. Presidente Perón 8000, Rosario  
Produce perfilería y barras.

**Laminfer**

Av. Provincias Unidas 205 bis., Rosario  
Produce tubos estructurales.  
Provincia de San Luis:

**Sampa**

Ex Ruta Nac. 7, Km 3,5 San Luis.  
Presta el servicio de enderezado de barras.

**Acindar Mallas**

Ruta 148 Ext. Sur, Km. 536, Villa Mercedes  
Produce mallas de acero Standard y Trilogic.

**Indema**

Parque Industrial Norte, Ruta NAc. 7, Km. 703, Villa Mercedes  
Produce mallas de acero específicas, Standard y T-500 s.

**Impeco**

Calle 1 y 109, Parque Industrial Norte, Villa Mercedes  
Produce tubos estructurales y de luz.

**Clamet**

Ruta 148, Ext. Sur, Km. 756, Villa Mercedes  
Produce clavos de acero.  
Provincia de Córdoba

**Armar Córdoba**

Mons- Pablo Cabrera 7500, Córdoba  
Presta el servicio de corte y doblado de acero.

# Referencias

## Bibliografía

- 1.- CASTI. *Metals Black Book. North America Ferrous Data*. Fifth edition. En CD-Rom Casti Publishing Inc. Alberta. Canadá 2005.
- 2.- Clausen, C.A. – Mattson, G. *Fundamentos de Química Industrial*. Ed. LIMUSA. México D.F. 1982.
- 3.- Compañía Suramericana de Seguros S.A. *Curso Hornos de la Universidad Pontificia Bolivariana*. Caracas. Venezuela. 2002.
- 4.- Corporación Aceros Arequipa S.A. *El acero, lo que hay que saber*. Primera Edición. Ed. Grupo S.R.L. Lima. Perú .2000.
- 5.- Department of Industry, Tourism and Resources, Australian Government. *The Australian Steel Industry In 2003*. Camberra. Australia. 2003.
- 6.- Felder, R. M.- Rosseau, R.W. *Principios Básicos de los procesos Químicos*. Ed. El Manual moderno S.A. México D.F. 1981.
- 7.- Glasstone, S. *Termodinámica para químicos*. Aguilar S.A. Ediciones. Madrid. 1978.
- 8.- Grjotheim, K, et al. *Aluminum Electrolysis: Fundamentals of the Hall- Héroult Process*. 2nd ed. Aluminium-Verlag. Düsdeldorf. (1982).
- 9.- Grjotheim, Kai, Kvande, Halvor, and Zhuxian, Qiu. “Key improvements to Hall-Hjrault since the end of World War II” *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, November, p. 32-35. (1995).
- 10.- Henglein, F. A. *Chemical Technology*. Franklin Book Company Inc. New York. 1968.
- 11.- Henglein, F. A. *Compendio de Tecnología química*. Para estudiantes de Química e Ingeniería. 5ª. Edición. Manuel Marín, Editor. Barcelona 1951.
- 12.- Hougen, O. A. – Watson, K. M. – Ragatz, R. A. *Principios de procesos químicos*. Tomo II: Termodinámica. Ed. Reverté. Barcelona. 1982.
- 13.- IDITS, Instituto de desarrollo industrial tecnológico y de servicios. *Primer informe sectorial metalmecánico*. Mendoza. Argentina. 2004.
- 14.- International Iron and Steel Institute. *Steel Statistical Yearbook 2005*. Bruselas. Bélgica. 2005.
- 15.- Kirk, R. E., et al. *Aluminum, in Encyclopedia of Chemical Technology*. 4th ed. Vol 2.Wiley Interscience. J. Willey & Sons. New York. (1991).
- 16.- Morel, Paul. *Histoire technique de la production d’aluminium*. Presses Universitaire de Grenoble, 1992.
- 17.- Nauta. *Enciclopedia de la técnica y la Mecánica*. 3ª. Edición. Ediciones Nauta. Barcelona. 1971.
- 18.- Plunkert, P.A., *Aluminum*: Ch. in U.S. Geological Survey Mineral Commodity Summaries, p. 22-23. (2000).
- 19.- U.S. Department of Energy. *Energy and Environmental Profile of the U.S. Aluminum Industry*. Washington, DC. (1997).
- 20.- U.S. Department of Energy. *U.S. Energy Requirements for Aluminum Production: Historical Perspective, Theoretical Limits and New Opportunities*. Washington, DC. (2003).
- 21.- UNEP/IISI, *Environment and the Steel Industry*, Technical Report 38, 1997.
- 22.- Welch, B.J., 1999, *Aluminum production paths in the new millennium*: The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, v. 51, no. 5, p. 24-28.