

Siderurgia y Metalurgia

Los materiales utilizados en ingeniería

A lo largo de la historia, el hombre ha ido desarrollando sus herramientas, sus proyectos y resolviendo sus problemas con el uso de diversos materiales que han sido tan importantes que inclusive le han dado su nombre a largas etapas o edades de la historia de la humanidad, así es que se habla de “la edad de piedra”, “la edad del bronce”, “la edad del hierro”

En la actualidad, podríamos decir que la ingeniería se vale para trabajo de cuatro tipos de materiales a saber:

- 1- Metales
- 2- Cerámicos
- 3- Polímeros
- 4- Compuestos

Los metales son los materiales más importantes de la ingeniería y son los protagonistas de este tema de la materia.

Repasamos algunos conceptos que seguramente han visto en la materia estudio de materiales.

¿Qué es un metal?

Es una categoría de materiales que tienen propiedades que satisfacen una variedad amplia de requerimientos de diseño entre las cuales podemos citar entre otras: ductilidad, maleabilidad, conductividad eléctrica y térmica elevada y brillo o lustre, etc.

Esta categoría incluye tanto a los metales en estado puro como a las combinaciones posibles entre ellos e inclusive con otros como por ejemplo el carbono, conocidas como sus “aleaciones”

Los procedimientos de manufactura con los que se les transforma en productos han sido creados y desarrollados a lo largo de gran cantidad de años, algunos de los procesos datan en realidad de tiempos ancestrales.

La importancia tecnológica y comercial de los metales, se debe a las siguientes propiedades generales que poseen virtualmente todos los metales comunes:

-Rigidez y resistencia elevadas. Los metales pueden alearse para darles rigidez, resistencia y dureza elevadas; se les utiliza para que proporcionen el marco estructural para la mayor parte de los productos de la ingeniería.

-**Tenacidad.** Los metales poseen mejor capacidad para absorber energía que otras clases de materiales.

-**Conductividad eléctrica buena.** Los metales son conductores de la electricidad debido a sus enlaces metálicos, que permiten el movimiento libre de los electrones como portadores de cargas.

-**Conductividad térmica buena.** Los enlaces metálicos también explican porque los metales conducen mejor el calor que los cerámicos y polímeros.

Además ciertos metales tienen propiedades específicas que los hacen atractivos para aplicaciones especializadas, muchos metales se encuentran disponibles a un costo relativamente bajo por unidad de peso y en muchos casos este es el principal motivo de su elección.

De acuerdo al estado inicial que tiene una pieza o producto durante el proceso de manufactura, podemos agrupar a los metales en tres grandes categorías : 1) **metal fundido**, en la que la forma inicial de la pieza es fundida 2) **metal forjado** , en la que el metal es trabajado después de la fundición, dándole forma por algún procedimiento como por ejemplo : rolado, forja, embutido, etc. 3) **metal pulverizado**: el metal está en su inicio en forma de polvos muy finos que se convierten en piezas mediante técnicas especiales.

Los metales se clasifican en dos grupos principales 1) **Ferrosos**: los que se basan en el hierro, 2) **No ferrosos**: todos los demás

La “Industria de la fundición” según sea para materiales ferrosos o no ferrosos se puede dividir de la siguiente manera:

Metalurgia: ciencia y tecnología de los metales, que incluye su extracción a partir de los minerales metálicos, su preparación y el estudio de las relaciones entre sus estructuras y propiedades. Los procesos metalúrgicos constan de dos operaciones: la concentración, que consiste en separar el metal o compuesto metálico del material residual que lo acompaña en el mineral, y el refinado, en el que se trata de producir el metal en un estado puro o casi puro, adecuado para su empleo.

Siderurgia: tecnología relacionada con la producción del hierro y sus aleaciones, en especial las que contienen un pequeño porcentaje de carbono, que constituyen los diferentes tipos de acero. El acero es una aleación de hierro y carbono a la que suelen añadirse otros elementos.

En conclusión: la **metalurgia** es la industria que se ocupa de la elaboración de los metales. En el caso particular del hierro y del acero se llama **siderurgia**.

ALEACIONES Y DIAGRAMAS DE FASES

Aunque ciertos metales son importantes como metales puros (por ejemplo: el oro, la plata, el cobre) la mayor parte de las aplicaciones de ingeniería requiere propiedades mejoradas, que se obtienen a través de las aleaciones. Con estas es posible mejorar, la resistencia, la dureza, la resistencia a la abrasión o a la corrosión y otras propiedades, comparando con los metales en estado puro.

ALEACIONES

Una aleación es un metal compuesto de dos o más elementos, al menos uno de los cuales es metálico. Las dos categorías principales de aleaciones son: 1) ***soluciones sólidas*** y 2) ***fases intermedias***

Soluciones sólidas: es una aleación en la que un elemento se disuelve en otro para formar una estructura de fase única, siendo una fase una masa homogénea de material (por ejemplo todos los granos tienen una misma estructura reticular cristalina).

Se llama “solución” porque hay un solvente metálico y un soluto o elemento disuelto que puede ser metálico o no metálico, cuando los átomos del soluto reemplazan a átomos del solvente en sus celdas cristalinas unitarias, decimos que hay una “**solución sólida sustitucional**”, para lograr este tipo de soluciones sólidas, se deben cumplir varios requisitos tales como similitud de tamaños atómicos y formas reticulares, etc.. Cuando en cambio los átomos del soluto se acomodan en los espacios vacíos que hay entre los átomos del solvente en la estructura reticular, se dice que tenemos una “**solución sólida intersticial**”, en estos casos los átomos de soluto son de tamaño menor a los del solvente, el ejemplo más importante de este tipo de solución es el carbono disuelto en hierro para formar acero.

Fases intermedias: como en toda solución, existe un límite de solubilidad de un elemento en otro, cuando este límite de solubilidad se excede, se forma una segunda fase, que tiene composición química intermedia entre los dos elementos puros, a este tipo de compuestos se los denomina “fases intermedias”, ejemplos de estas aleaciones son el Fe₃C y el Mg₂Pb, estas aleaciones de dos fases, se pueden tratar térmicamente y lograr resistencias significativamente mayores que las que se logran con las soluciones sólidas.

DIAGRAMAS DE FASE

Un diagrama de fase es un medio gráfico de representar las fases de un sistema de aleación metálica como una función de la composición y la temperatura, a los fines prácticos nos interesan los denominados diagramas de fase binarios, que representan sistemas de aleación de dos componentes, a continuación podemos observar algunos ejemplos:

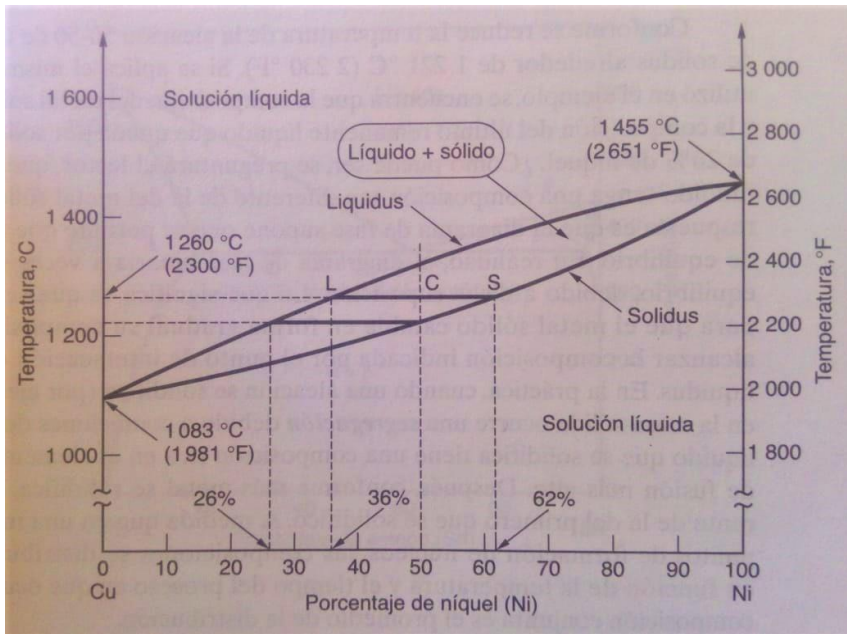


fig.1 - diagrama de fase para el sistema de aleación Cobre - Níquel

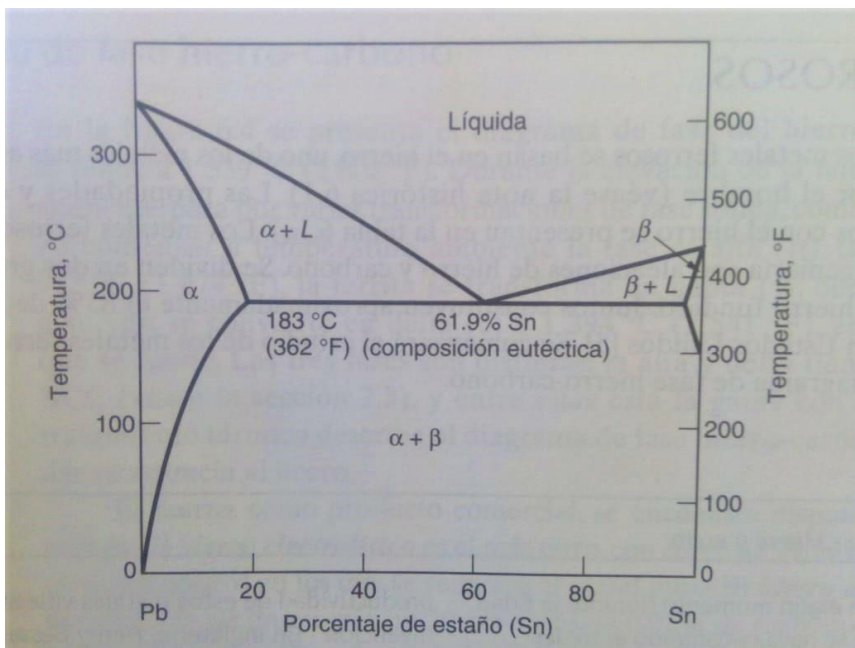


fig.2- diagrama de fase para el sistema de aleación Plomo - Estaño

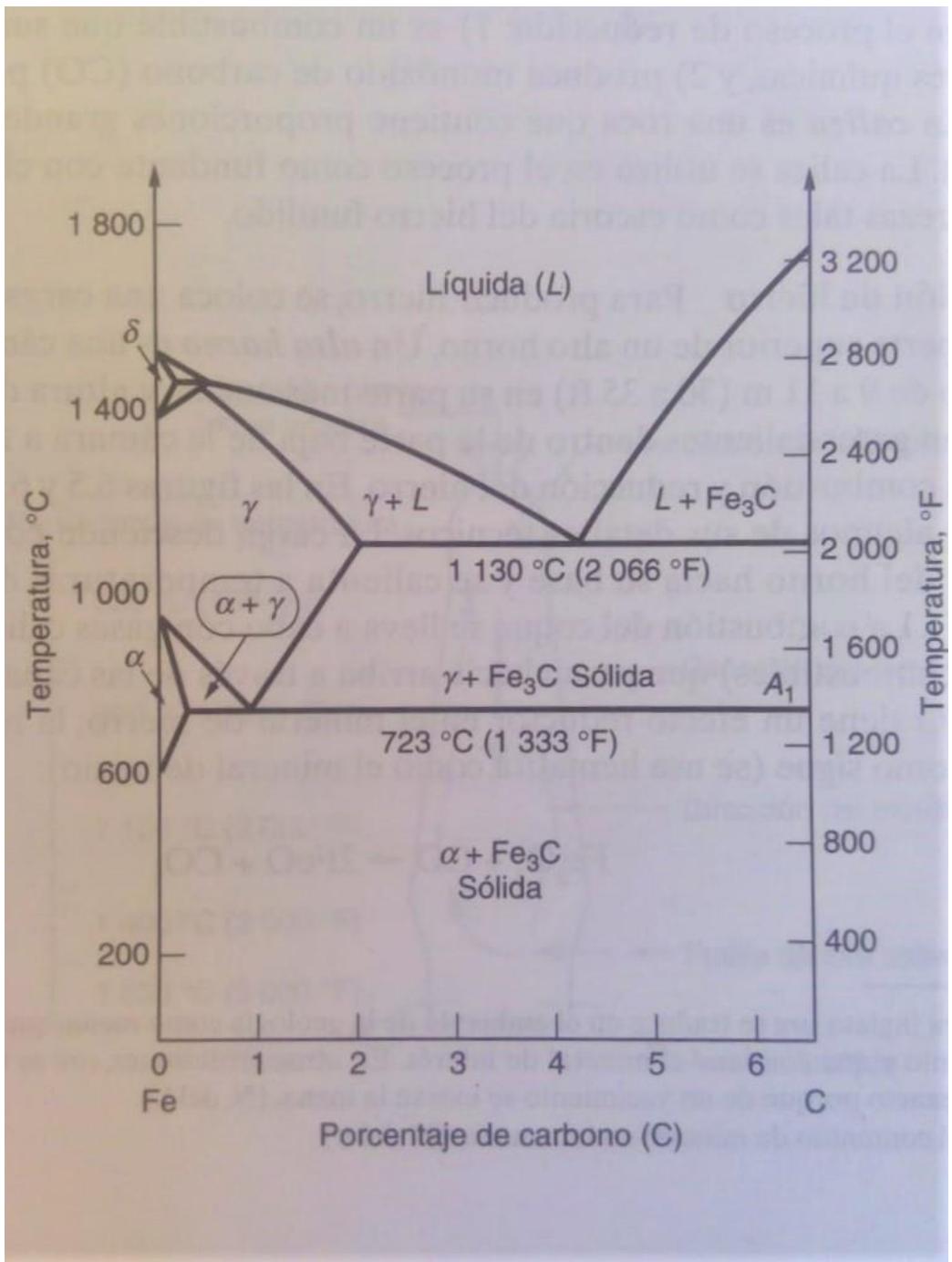


fig. 3- diagrama de fase para el sistema de aleación Hierro – Carbono hasta un 6% de carbono

LA SIDERURGIA

Por su gran importancia estratégica en el desarrollo de un país, vamos a comenzar por la descripción de la industria siderúrgica

Algunos antecedentes históricos

El hierro, se descubrió en algún momento durante la edad del bronce, probablemente entre las cenizas de fogatas hechas cerca de depósitos de mineral de hierro. Se comenzó a utilizar y su uso fue creciendo hasta que sobrepasó al bronce en importancia, por lo general se sitúa este momento en el tiempo alrededor del 1200 a C., aunque se han encontrado restos arqueológicos de artefactos hechos con hierro hasta de 2900 años a C. en Egipto, en Israel y el norte de Irak se han encontrado diversos artefactos que datan de unos 1300 años a C., fueron finalmente los romanos, quienes trajeron las técnicas de trabajo del hierro desde las provincias, especialmente desde Grecia, y perfeccionaron las tecnologías, para que alcanzara niveles nuevos se difundiera por toda Europa, simplemente el hierro era más duro que el bronce y adoptaba un filo más agudo y resistente, lo cual confería superioridad en la fabricación de armas.

Recién durante la edad media, la invención del cañón, generó el primer incremento considerable de la demanda de hierro y luego en siglos venideros, la invención de artefactos como la estufa de hierro (la salamandra), disparó la demanda de este metal de forma significativa, ya en el siglo XIX las industrias ferroviarias, navieras, construcción y la industria militar, generaron un crecimiento gigante de la demanda de hierro no solo en Europa sino también en América.

El alto horno que en breve describiremos, permitió producir grandes cantidades de arrabio, pero producir hierro forjado y acero era un proceso lento, fue así que en 1856, Henry Bessemer inventó el proceso de soplar aire a través del hierro fundido lo que condujo al “convertidor Bessemer”, que se utilizó hasta el año 1970 aprox., en Francia por otro lado los hermanos Martin en conjunto con los hermanos Siemens, construyeron el primer “horno de hogar abierto” denominado “Horno Siemens Martin” en 1864, que permitió producir partidas de hasta 15 toneladas en una sola colada, lo cual incremento en gran medida el rendimiento respecto de los métodos anteriores.

En EEUU al terminar la guerra civil, la expansión de los ferrocarriles y a partir de 1880, el uso de vigas de acero en la construcción de edificios (comenzando la era de los rascacielos), generó una demanda enorme.

Cuando se dispuso en abundancia de energía eléctrica al comenzar el siglo XX, la aparición del horno eléctrico con desarrollos hechos en Italia y en América por Héroult, se convirtió en la tecnología principal para el desarrollo de los aceros aleados.

Ya en épocas más recientes, al inicio de la segunda guerra mundial, se desarrolló el método de soplar oxígeno puro, en lugar de aire, que terminada la guerra, derivó a través de trabajos realizados en Austria en el convertidor LD (Linz – Donawits, que son localidades de Austria donde se desarrolló el proceso) y el horno de oxígeno básico BOF, tecnología esta que se volvió la más moderna, superando al horno de hogar abierto Siemens Martin

La producción del hierro y el acero

Este estudio puede dividirse en cuatro etapas a saber:

- A- Obtención en yacimientos de mineral de hierro y de otras materias primas que se requieren y acondicionamiento de las mismas.
- B- Producción del hierro por reducción a partir de los minerales que lo contienen
- C- Afino del acero para obtener la composición de la aleación deseada.
- D- Laminación del acero para obtener diversos productos intermedios y finales.

A- Obtención y acondicionamiento de las materias primas

El mineral de hierro

Pocas veces el hierro se encuentra en estado nativo, por ejemplo en los meteoritos que contienen hierro en un 90%, son abundantes en cambio en la naturaleza, los minerales de hierro esparcidos por toda la tierra, sin embargo no en todos los casos es económicamente viable la extracción industrial del metal. Para que haya viabilidad económica el contenido en hierro por lo general debe estar por encima del 50%.

En estos minerales, además del compuesto útil de hierro, existen una cierta cantidad de compuestos minerales que constituyen en conjunto lo que se conoce con el nombre de “ganga”, esta está constituida por arena, arcilla y compuestos de cal, también hay compuestos de azufre y fósforo que luego pasan al hierro como impurezas perjudiciales, la ganga, no contribuye en nada al proceso de obtención y se debe tratar de separar previamente.

Los principales minerales explotables son:

- **Hematita** , Fe_2O_3 , óxido férrico, contiene hasta un 70% de hierro, se presenta en masas terrosas de color rojo

- **Limonita**, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, óxido férrico hidratado con un 60% de hierro, se presenta en masas terrosas de colores variables del pardo al amarillo.
- **Magnetita**, Fe_3O_4 , se llama óxido magnético, por su magnetismo se llama piedra imán, contiene el 70% de hierro.
- **Siderita**, CO_3Fe , carbonato ferroso, con un contenido de 48% de hierro, es de color blanco
- **Pirita**, SFe_2 , disulfuro de hierro, no utilizable en la industria del hierro, pero si en la del azufre

En la República Argentina, hay yacimientos aprovechables en Zapla, provincia de Jujuy, formados por Hematita con alto contenido de fósforo y contenido de hierro entre el 40 y 70% y los de Sierra Grande, en la Patagonia, cerca del Golfo de San Matías, formados por magnetita y Hematita con 55% de hierro e impurezas indeseables de fósforo y azufre. Tanto en Zapla como en Sierra Grande, los yacimientos y el desarrollo industrial fue desarrollado en principio por Fabricaciones Militares, pero a posteriori fueron privatizados siguiendo situaciones diversas, Los yacimientos de Zapla fueron plenamente explotados durante muchos años y dieron origen al primer complejo siderúrgico argentino, hoy en día la empresa Aceros Zapla S.A. de capitales privados, sigue la explotación del complejo a partir de chatarra de acero, pero no la explotación del yacimiento que se encuentra cerrado (minas 9 de octubre y puesto viejo), en lo que respecta a Sierra Grande, luego del proceso de privatización, el gobierno provincial de Rio Negro intentó salvar la mina que se llamaba HIPASAN, creando la empresa provincial HIPARSA, pero no lo logró, luego se concesionó a la empresa de capitales chinos MCC, la cual exportaba el mineral a China, pero al cabo del tiempo se paralizó la explotación del yacimiento en 2016, actualmente el yacimiento está cerrado y el remanente (bienes inmuebles, etc.) está siendo liquidado por el estado provincial,

Al presente la casi totalidad del mineral de hierro que se utiliza en Argentina proviene de la importación desde Brasil, en el caso de la empresa SIDERAR por ejemplo, el mineral arriba por barco al puerto mineralero que la empresa posee en San Nicolás sobre la margen derecha del Rio Paraná.

Preparación de los minerales y las demás materias primas

Preparación del mineral

Para que los minerales puedan ingresar a los hornos, donde se va a separar el hierro, es necesario que los trozos tengan el tamaño adecuado y que se encuentren al estado de óxidos y privados de agua, a tal efecto se siguen procesos que comprenden varias etapas a saber:

1ro- Rotura con martillos neumáticos y masas de los grandes bloques extraídos, se puede hacer a lo largo de una cinta transportadora en la que los operarios se encuentran a ambos lados con las herramientas

2do- reducción de tamaño, molido de acuerdo a lo requerido para el buen funcionamiento del horno (se utilizan diversos tipos de trituradoras, a rodillos, a mandíbulas, a tambor excéntrico, etc.) se separan en zaranda de clasificación las partículas de entre 6 y 12 mm, que se denominan **pellets**, las partículas más finas de 6 mm van a la planta de sinter y las más gruesas de 12 mm vuelven a molienda. En otros tipos de procesos, se utilizan **lumps**, que son trozos calibrados de mineral en estado natural de ¼" a 1 ¼" de tamaño.

3ro-Separación magnética, se aplica cuando el mineral es pobre, permite separar las partículas ferrosas de la ganga.

4to- La fracción pulverulenta del mineral puede sinterizarse o aglomerarse con un aglutinante adecuado como la cal o el coque, en caliente, formando trozos o briquetas, ver más adelante , Planta de Sinter.

5to- Los minerales de siderita (CO_3Fe) deben tostarse (calentamiento en presencia de aire, en un horno de cuba) para transformarse en óxido $2\text{CO}_3\text{Fe} + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{CO}_2$

El material así preparado se almacena en playas de mineral, desde la cual será cargado al alto horno

Preparación del Coque, la coquería

La función más importante del sector coquería es obtener una mezcla económica y técnicamente óptima de carbón para producir coque.

El origen de los carbones habitualmente es:

- Carbón mineral importado de Australia
- Coque de petróleo nacional proveniente de destilerías YPF y ESSO
- Coque de petróleo importado de EEUU e Indonesia

La coquización consiste en la destilación del carbón en ausencia de oxígeno para obtener **coque metalúrgico**.

El coque se traslada de la playa de minerales hasta los molinos para obtener granulometría adecuada, se almacenan los distintos tipos de carbón en silos para obtener el mix requerido, luego la conversión a coque metalúrgico se realiza en hornos, con calentamiento indirecto hasta $1300\text{ }^\circ\text{C}$, al calentarse el carbón se reblandece, formando una masa viscosa que permite la unión más íntima de las moléculas y el desprendimiento de volátiles, este proceso permite obtener un coque con mayor concentración de

carbono fijo, luego el coque es transferido a unos 1000 °C a un vagón de apagado sobre el cual se descarga agua para enfriarlo y apagarlo, esta operación tarda un minuto , con el calor residual , el coque se seca, finalmente el coque va a una criba donde se realiza una clasificación por tamaño.

Funciones del coque en el alto horno

- . **Combustible**, provee calor necesario para la fusión de los óxidos de Fe y fundentes
- . **Reductor**, genera CO necesario para reducir el mineral
- . **Carburante**, proveer C que está presente en el arrabio.
- . **Sostén de carga**, soporta el peso de la carga dentro del horno
- . **Formador de intersticios**, forma los intersticios por los cuales pasa el gas reductor hacia la parte superior del horno, o sea hace posible la permeabilidad en la zona pastosa

Preparación del SINTER – La planta de SINTER

Es en parte un material reciclado, es un aglomerado en caliente de finos (partículas que no cumplen con la granulometría requerida para el proceso)

Los finos se cargan a un mezclador junto con agua y luego esa mezcla es volcada a la cadena de sinterización , en dicha cadena, los finos de mineral de hierro, el fino de coque, se agrega fundente y el material de reciclaje industrial (polvos recuperados de los humos y gases del horno) mediante un proceso de fusión por calor, se transforman en un material poroso, resistente y de alta ley (concentración de Fe), al salir de la cadena de sinterización el material pasa por un quebrantador y por una zaranda que lo clasifica en dos granulometrías , los finos son reciclados y el resto es enviado al alto horno

Resto de las materias primas

Los fundentes: se utilizan como fundentes Caliza, Dolomita, Gravilla, Mn y Otros.

La función de los fundentes es combinarse con impurezas tales como sílice, azufre y alúmina dando reacciones que producen una escoria fundida que flota sobre el hierro fundido

Los gases de alimentación: aire precalentado enriquecido en oxígeno y gas natural

El aire se precalienta en una serie de estufas llamadas “estufas de Cowper” formadas por tubos de material refractario que se caldean quemando combustible y que luego una vez calientes se hace pasar el aire por ellas para precalentarlo y enviarlo a las toberas ubicadas en la parte baja del horno (llamada etalaje).

B) Producción del hierro

EL ALTO HORNO

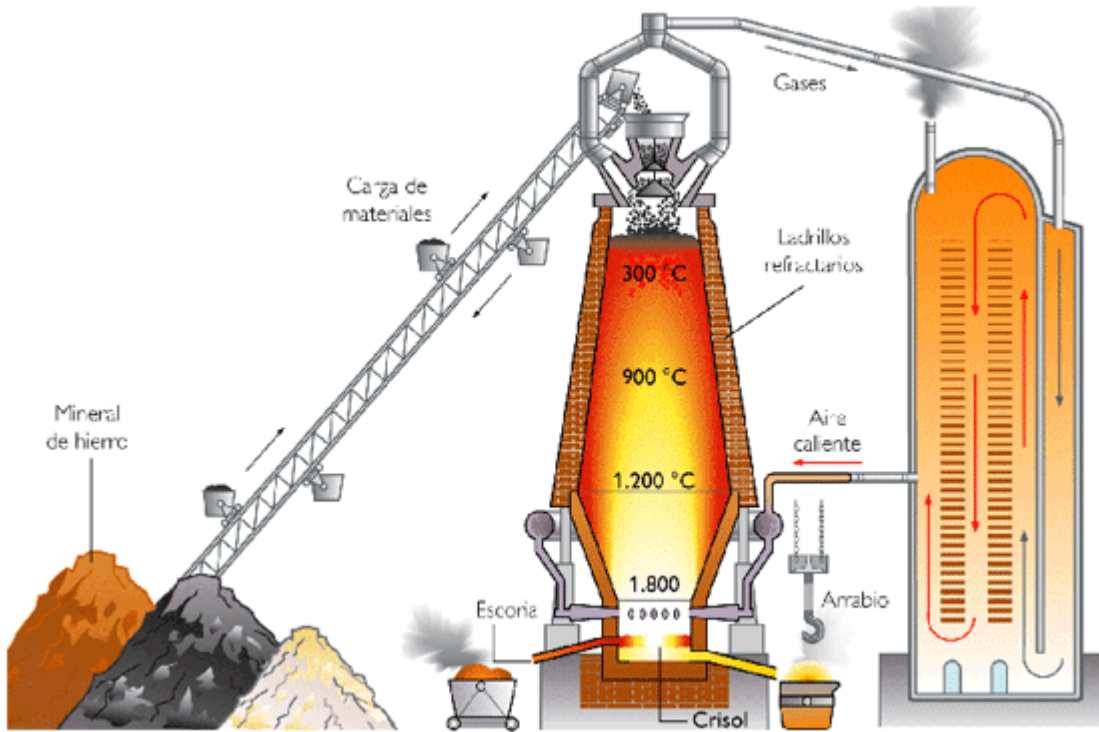


Fig. 4 esquemas de flujos y temperaturas de un alto horno

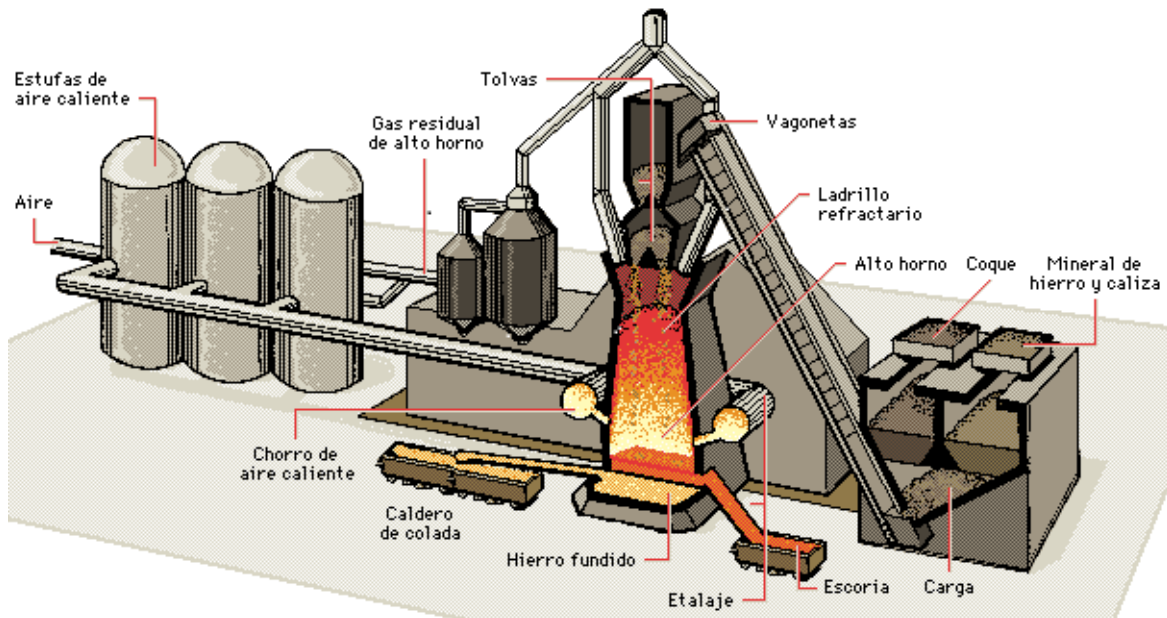


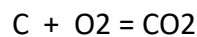
Fig.5 distribución en planta de un alto horno

El alto horno tiene la forma de dos troncos de conos unidos por sus bases, está formado por una envoltura metálica revestida interiormente de gruesas paredes de ladrillos refractarios silico aluminosos (70 % de sílice y 30 % de alúmina), sus medidas aproximadas son altura: 30 metros, diámetro mayor: 7 metros en los hornos clásicos, pero en Alemania y en Japón se los ha llegado a construir en 90 m de altura y 14 m de diámetro mayor.

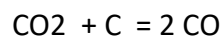
La forma cónica de la parte superior se justifica porque facilita el descenso de la carga de materiales evitando obstrucciones y se mantiene la velocidad de ascenso de los gases que van disminuyendo su volumen al disminuir su temperatura, a su vez la forma cónica de la parte inferior se justifica porque allí ya todo fluye licuado y hay disminución de volumen, que debe compensarse de forma tal que no haya un descenso brusco, para que haya tiempo y contacto adecuado para que se realicen las reacciones.

Por la tolva superior, denominada Tragante, se cargan el mineral y el sinter, el carbón y el fundente en capas alternadas.

El proceso se inicia con la combustión del carbón en la parte superior del crisol que se realiza con la inyección de aire precalentado por las toberas a 900°C

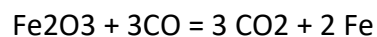


El anhídrido carbónico formado al ascender a través de diversas capas de coque, reacciona con el carbono, generando monóxido de carbono



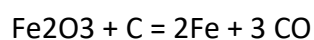
Siendo este CO el gas activo para la reducción.

El mineral, el fundente y el combustible que se van introduciendo por el tragante, se secan y van descendiendo, encontrándose con los gases ricos en CO que van ascendiendo en contracorriente, en la parte superior de la cuba van reaccionando produciendo la reducción del mineral.



Los minerales de manganeso que hay presentes también se reducen en este proceso dando MnO

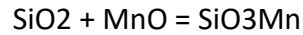
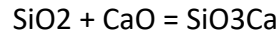
En las partes bajas de la cuba, el carbón hace un efecto de reducción directa también sobre el mineral



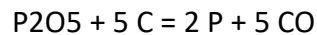
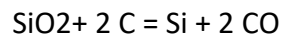
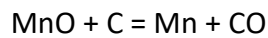
La piedra caliza se disocia por el calor dando: $CO_3Ca = CaO + CO$

La acción de la escoria

Los óxidos de calcio y manganeso reaccionan con la sílice para formar la escoria:

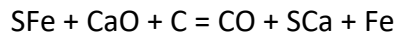
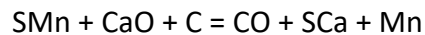


El hierro que ha descendido hasta el vientre del horno se encuentra en estado pastoso, en el vientre (la parte más ancha del horno) y en el etalaje (parte cónica por debajo del vientre) se produce la fusión final del metal, en esta zona del horno también ocurren otras reacciones: a) el hierro absorbe carbono b) los óxidos de Mn, Si, S y P se reducen pasando al hierro en estado líquido



El azufre, tiene más afinidad por el manganeso y forma preferentemente SMn, el resto del S forma SFe.

El óxido de calcio (forma parte de los fundentes) produce la **desulfuración** (aunque no es total)



Los sulfuros de calcio así formados se incorporan a la escoria, cuando el metal fundido cae al crisol, la escoria es más liviana y sobrenada sobre el metal fundido, lo cual permite extraerla periódicamente por un vertedero llamado **escoriadero o bigotera**, el metal fundido que se denomina **arrabio**, que está en el crisol (y que consiste en hierro con un 4% aproximado de carbono y algunas impurezas), se extrae mediante una operación que se denomina sangrado del horno por una abertura en la parte inferior que se denomina **piquera**.

Fin del proceso del alto horno

La escoria vertida en la bigotera se retira en carros con refractario, llamados cazos para escoria para su disposición final (es un sub producto que tiene diversas aplicaciones)

El arrabio fundido, a 1350 °C se retira en la piqueta, cargándolo en vagonetas refractarias con aislación, para ser transportado a la acería para su refinado.

SÍNTESIS DEL PROCESO EN EL ALTO HORNO

Balance de carga del Alto Horno

Se requieren aproximadamente 7 toneladas de materiales de carga del horno para obtener 1 tonelada de Arrabio, las proporciones aproximadas son: 2 ton de mineral de hierro, 1 ton de coque, 0,5 ton de fundentes y 3,5 ton de gases (aire, O₂ y gas natural)

Una proporción significativa de los sub productos, se recicla.

En el alto horno se carga

Por el tragante:

- mineral de hierro, pellet
- sinter
- coque siderúrgico
- fundentes

Por las toberas en la parte baja del etalaje:

- aire precalentado enriquecido en oxígeno
- cuando hay disponible, gas natural, como combustible

Del alto horno sale

Por chimenea:

- gases de horno, que se envían a una planta limpiadora
- polvos retenidos en trampa de polvos, que se reciclan en el sinter

Por parte baja del crisol, piquera:

- arrabio líquido, con destino a lingotera o a acería

Por parte alta del crisol, bigotera:

- escoria siderúrgica, se aprovecha por ejemplo en la elaboración de pavimentos.

Características del arrabio obtenido:

Temperatura final: 1350 °C

Composición:

- Carbono 4 a 4,6%
- Silicio 0,45 %
- Manganeso 0,5%
- Fósforo 0,07%
- Azufre 0,025%

B) Producción del hierro

Métodos por reducción directa

El uso del alto horno, actualmente, ha sido reemplazado en muchas plantas por un proceso más moderno que se denomina “reducción directa para la producción de hierro esponja”, esto se debe a que en el alto horno, se llega a altísimas temperaturas que ponen al metal en estado líquido, necesitándose una gran cantidad de energía, por otro lado el alto horno produce hierro con alto contenido de carbono, lo cual obliga a posteriori a realizar la descarburación del mismo y además en el estado líquido el hierro se asocia con varias impurezas como S, P, Mn, Si, todo esto ha hecho que en la actualidad se esté utilizando cada vez más el proceso de reducción directa.

La reducción directa es un proceso continuo que elimina el oxígeno del mineral de hierro dando como resultado **hierro esponja (HE)** (hierro con un pequeño porcentaje de carbono, en forma de trozos con pequeñas cavidades que recuerdan a una esponja) con un alto grado de metalización y un contenido prácticamente nulo de contaminantes. El proceso por el cual se elimina el oxígeno se denomina **Reducción**. El mineral de hierro es reducido con una mezcla de gases reductores formada por hidrógeno (H) y monóxido de carbono (CO₂)

Analizaremos a continuación a modo de ejemplo un proceso de reducción directa denominado **Proceso MIDREX**

Razones para su utilización

- Produce una metalización pareja lograda a través de un proceso continuo
- Con hierro esponja se logran mayor calidad de aceros

- Mayor confiabilidad y menor cantidad de equipos que los otros procesos de reducción con gas.
- El diseño del reformador del gas elimina la necesidad de sistemas generadores de vapor, hervidores auxiliares y sistemas de eliminación de dióxido de carbono (CO₂).
- Proceso integrado a mediana escala.
- Independencia del mercado de la chatarra
- Menor contaminación del medio ambiente

Principales componentes del proceso

- El horno de reducción con alimentación superior.
- El reformador
- Los trenes recuperadores de calor

Flujo del proceso

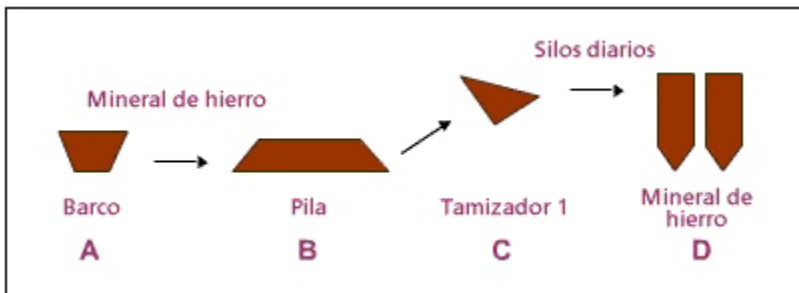


Fig.6 Flujos de proceso de reducción directa

Mineral de Hierro

El proceso de Reducción Directa comienza con la recepción del mineral de hierro.

El mineral de hierro se encuentra en forma de **lumps** o **pellets**.

Se lo almacena al aire libre en pilas.

Una cargadora frontal coloca el material en una tolva y desde allí es enviado por cintas transportadoras hacia una zaranda donde se separan de 1 a 4% de finos, de dimensiones menores a 6,35 mm. Estos finos (que no se utilizan en el proceso de Reducción Directa) son vendidos a la Industrias Cementeras como materia prima.

Luego del tamizado, el mineral de hierro es almacenado en 2 depósitos llamados "Silos diarios"

Diferencias entre Lump y Pellet:

Lump

Se denomina Lump, a piedras calibradas de mineral de hierro, tal cual se encuentran en la naturaleza, de contenido de hierro superior a 67.5 % y dimensiones entre ¼" a 1 ¼" (por ello se los llama "calibrados")

Son productos mayores que 6.3 mm, el límite superior más común es 31.5 mm y el tamaño medio de 17 a 19 mm.

Su resistencia física es generalmente inferior a la de los pellets.

En general la capacidad de reducción y carburización del calibrado es menor que la del pellet.

Pellet

Se forman con finos de mineral aglomerados, son sometidos a un proceso de separación de ganga, con lo cual se obtienen rendimientos del 68% en Fe por rotación en discos, previamente mezclados con aditivos y aglomerantes. Luego se los seca y quema hasta temperaturas de 1350 °C, en hornos de grilla.

Su tamaño medio final es de 12 - 13 mm.

Los pellets ofrecen buena reducibilidad, buena carburización y baja generación de finos

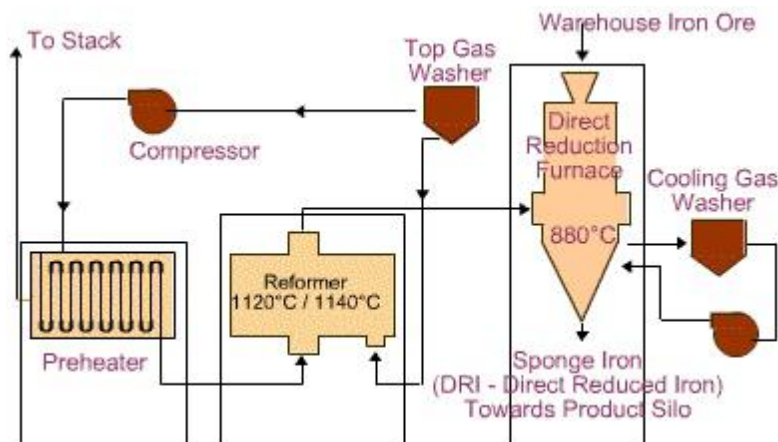


Fig. 7 esquema de proceso de reducción directa

El proceso MIDREX de Reducción Directa convierte óxido de hierro (en forma de pellets o lumps) en puro hierro reducido (o hierro esponja) en un horno de cuba, llamado Horno de Reducción.

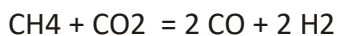
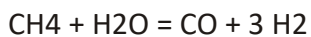
Básicamente, es un proceso continuo que reduce el mineral de hierro con una mezcla de gases reductores formada por hidrógeno (H₂) y monóxido de carbono (CO).

Como aspecto sobresaliente, durante el proceso las temperaturas alcanzadas llegan a 900°C, por lo tanto **el metal no llega al estado de fusión** (como si lo haría en el Alto Horno), por lo que el material no cambia su forma física.

La ventaja más importante de este proceso es la metalización pareja lograda a partir de un proceso continuo.

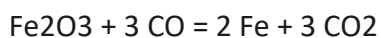
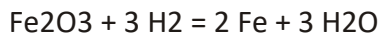
Las reacciones químicas más importantes son:

1.-En el Reformador: en el reformador, se obtiene a partir de la combustión del gas natural, con ciclo completo que incluye la regeneración de gases que ya actuaron en el horno.



Se obtiene así los gases reductores CO y H₂

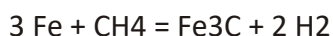
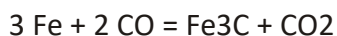
2.- En el horno de Reducción directa:



Se obtiene el hierro esponja y gases.

Tanto el H₂O como el CO₂, se regeneran enviándolos al reformador para enriquecer las reacciones a partir del CH₄

3.- Carburización:



Parte del carbono, se recombina con hierro dando carburo férrico, que es el carbono que acompañará al hierro esponja al proceso de acería.

Recuperador de calor

El recuperador de calor contiene mazos de tubos pre calentadores que se ubican en dos cajas de intercambio por donde pasan los gases de combustión del reformador hacia la chimenea.

De esta forma, la energía remanente de los gases de combustión es aprovechada para el calentamiento de otros gases.

Los gases que se precalientan

son: aire para combustión, gas natural, gas mezcla (gas de proceso + gas natural) es decir, todos los gases del proceso y el aire para el sistema de combustión, aumentando de esta manera la eficiencia energética del proceso y la capacidad del reformador.

Reformador

El reformador está diseñado para convertir el dióxido de carbono (CO_2) y el vapor de agua (H_2O) a monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H_2), mediante el agregado de gas natural (CH_4) y sometiendo la mezcla a calor.

El monóxido de carbono y el hidrógeno son los encargados de la reducción del mineral en el horno reductor.

El reformador contiene cientos de tubos arreglados en filas de igual número de tubos cada una.

Una mezcla de gas proveniente del horno reductor (Gas de Proceso) y Gas Natural es precalentada e introducida a los tubos.

Estos tubos contienen un catalizador que favorece y acelera la acción del reformado

Horno Reductor

El horno reductor está diseñado para reducir óxido de hierro a hierro esponja y para enfriar el hierro esponja antes de que sea descargado.

El óxido de hierro, que llega a la tolva de carga del horno por una cinta transportadora con 45° de inclinación, es distribuido en el horno por un conjunto de dispositivos llamados piernas de distribución.

El horno está dividido en dos zonas, la **zona de reducción** y la **zona de enfriamiento**:

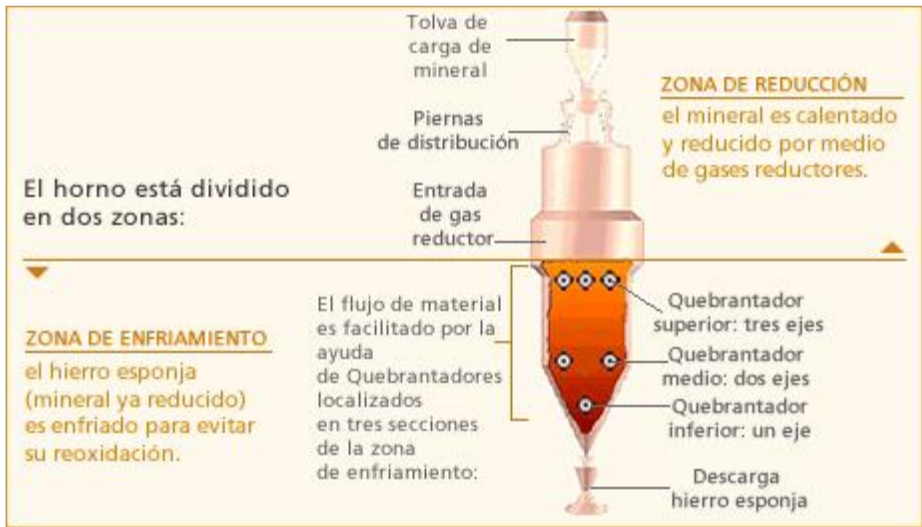


Fig. 8 Diagrama de zonas en que se divide el horno

No olvidar!!, en este proceso se trabaja a temperaturas de hasta 900°C, el material no se funde!!, por eso hay una zona de enfriamiento con quebrantadores, para ayudar a que el material en estado sólido fluya.

Almacenamiento de DRI (Direct Reduced Iron)

El almacenamiento del hierro esponja se realiza en un depósito llamado Silo de Producto. Para disminuir la posibilidad de re oxidación el hierro esponja se mantiene dentro del Silo en atmósfera con bajo contenido de oxígeno, debido a la adición de gas inerte. El manejo de Hierro Esponja, finos y polvo se realiza con precaución y mediante la adición de gas inerte a silos, zarandas y puntos de transferencia que lo requieran, para evitar re oxidación y situaciones de riesgo

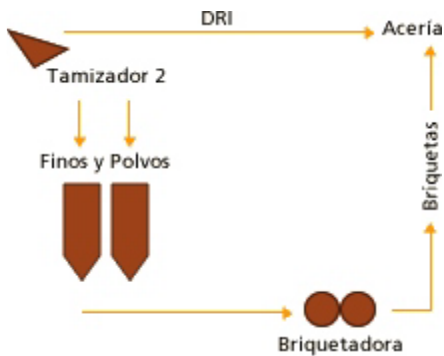


Fig. 9 esquema de flujo de materiales

Antes de su traslado final a la Acería, el hierro esponja pasa por un nuevo tamizador. Los finos (partículas inferiores a 5 mm) producidos son almacenados en un depósito,

el manejo de los sistemas de cintas transportadoras, la fricción dentro de los silos y horno, el calentamiento a altas temperaturas, etc., genera finos y polvo. El Hierro Esponja que se manda a la acería debe tener un contenido mínimo de finos.

Esto es para evitar que los mismos se pierdan al ser aspirados por los sistemas de aspiración de humos o quedar sobre la escoria sin lograr atravesarla disminuyendo la eficiencia de los hornos eléctricos.

Tanto los finos como el polvo de Hierro Esponja son materiales valiosos, ya que tienen las mismas características químicas.

Para su aprovechamiento se procede a su mezclado y briqueteado.

La briquetadora consta de dos rodillos con moldes, que giran en oposición.

Como agente aglomerante, se utiliza una solución de silicato de sodio o potasio.

La mezcla cae entre los dos rodillos mientras éstos giran y son presionados uno contra el otro por un sistema hidráulico de alta presión.

Las briquetas son trasladadas junto con el resto del hierro esponja a la Acería.

SINTESIS DEL PROCESO DE REDUCCION DIRECTA

Ingresar al Reformador

- Gas natural CH₄ , aire agua y CO₂

Egreso del reformador

- Gas reductor formado por CO y H₂

Ingresar al Horno reductor

- Mineral de hierro en forma de pellets y lumps
- Gases reductores

Egreso del horno reductor

- Hierro esponja con destino a la acería
- Finos y polvos de hierro esponja con destino a briqueteado

CARACTERISTICAS DEL HIERRO ESPONJA OBTENIDO

Hierro en forma de “esponja” (trozos con cavidades)

Contenido de carbono 0,2 al 0,4%

Contenido de impurezas: prácticamente nulo.

El material en estas condiciones es re oxidable, por lo que debe ser protegido en el almacenaje y manipulación con atmósfera de gases inertes.

C) PRODUCCION DEL ACERO – LA ACERIA – EL AFINO

Se conoce como ACERO, a las aleaciones de hierro con carbono, que contienen un porcentaje de carbono por lo general inferior al 1,7%, cuando el contenido de carbono es muy bajo, del orden de 0,15% o menos se los denomina aceros extra dulces (a veces “hierro dulce”), luego a medida que se incrementa el porcentaje de carbono, se van obteniendo los aceros semi dulces, semi duros, duros y extraduros, también se pueden adicionar otros aleantes, obteniéndose aceros con características especiales denominados “aceros aleados”, por arriba del 1,7% de contenido de carbono y hasta un 6,6% las aleaciones de hierro y carbono se denominan FUNDICIONES.

Hemos visto en los puntos anteriores la obtención del hierro para acería, y hemos analizado la obtención del arrabio que tiene entre un 3 y 4,5% de carbono, o sea que el contenido de carbono está por encima del máximo posible para el acero y la obtención del hierro esponja que tiene entre un 0,2 y 0,4% de carbono, lo cual lo ubica prácticamente en la zona de composiciones de aceros extra dulces o semi dulces, por lo tanto en ambos casos, si queremos obtener distintos tipos de aceros con composiciones variadas entre 0,15 y 1,7% será necesario regular la cantidad de carbono y otros elementos presentes. El procedimiento necesario para lograrlo se conoce como **“EL AFINO DEL ACERO”**

Desde la mitad del siglo XIX, en adelante se han desarrollado cierto número de procesos para afinar el hierro de primera fundición y obtener aceros de distintos tipos, actualmente los más utilizados son el horno de oxígeno básico BOF y el horno eléctrico, ambos sistemas se utilizan para obtener aceros al carbono y aleados.

Estos hornos, se conocen con el nombre genérico de **Convertidores** por que se les carga el metal bruto y convierten en metal afinado.

Recordemos como contamos en la síntesis histórica que en 1856, Henry Bessemer, desarrolló el convertidor Bessemer, que tenía como principal característica el hecho de soplar aire a través de un doble fondo perforado, de esta forma el aire atravesaba toda la masa de metal fundido y que sobre el inicio de la segunda guerra mundial, en Austria (localidades de Linz y Donawitz), se realizó la innovación de soplar Oxígeno puro a través de una caña especialmente diseñada, sobre la superficie del metal fundido, lo cual constituyó un importante avance tecnológico que se conoce como **convertidor LD**, en referencia a los pueblos austríacos donde se desarrolló.

Vamos a analizar, que ocurre en un convertidor cuando se sopla oxígeno puro.

En primer lugar, hay que tener en cuenta que los hornos tienen un revestimiento de material refractario importante, que no es neutro respecto del proceso, sino que influye en él.

Existen dos tipos fundamentales de refractarios, los de tipo “ácido” y los de tipo “básico”, esto da lugar a dos tipos de procesos, el **proceso ácido** y el **proceso básico**, la importancia del refractario radica en que cuando es ácido químicamente, no permite desfosforar ni desulfurar, en cambio cuando es básico, si permite eliminar el fósforo y el azufre, la principal consecuencia, es que solo se usará el revestimiento refractario ácido cuando se cuente con materias primas de muy buena calidad, libres de impurezas (hierro esponja, chatarra seleccionada, etc.), en cambio para afinar arrabio que por lo general viene con impurezas diversas, será necesario utilizar un horno con revestimiento refractario básico.

En el **convertidor Bessemer**, el revestimiento es ácido, cuando el revestimiento es básico el convertidor se denomina “**convertidor Thomas**”, en el convertidor Thomas, la escoria también es de naturaleza básica.

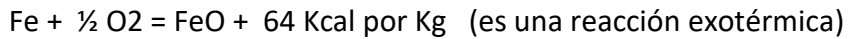
La diferencia entre los convertidores Bessemer y Thomas y el convertidor más moderno LD, radica en que al soplar oxígeno puro, en lugar de aire, el proceso es más rápido, no cambian las reacciones, sino la velocidad de conversión, por otro lado el convertidor LD, es más sencillo de construir al eliminarse la necesidad del doble fondo perforado y la inyección de oxígeno puro, elimina la necesidad de contar con costosos compresores de aire, necesarios en los convertidores más antiguos Bessemer y Thomas.

En conclusión actualmente las tecnologías impuestas son: el **Horno BOF**, por su sigla en inglés: **Basic Oxygen Furnace**, que es un horno convertidor con revestimiento básico y con inyección de oxígeno puro y el **Horno Eléctrico** que también describiremos más adelante

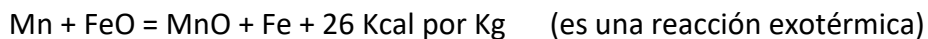
Reacciones que intervienen en el convertidor

El oxígeno, hace su trabajo oxidando los elementos que acompañan al hierro comenzando por el silicio y el manganeso y terminando por el carbono, de la siguiente manera:

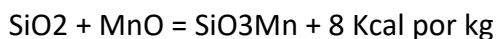
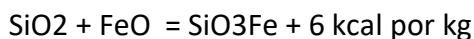
En primera instancia al inyectar el oxígeno, se produce la oxidación del hierro:



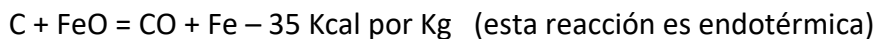
Este óxido ferroso, reacciona con el Si y el Mn a través de las siguientes reacciones:



Tanto el SiO₂ como el MnO, pasan a la escoria, que sobrenada en forma de silicatos



Luego de estas reacciones se produce la descarburación



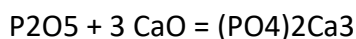
Así se va eliminando el carbono, al final se elimina el exceso de oxígeno mediante el agregado de ferroaleaciones, ferrosilicio FeSi y ferromanganeso FeMn.

A esta altura, en el metal fundido, tenemos hierro fundido con muy poco carbono, entonces debemos recarburar, agregando la cantidad de carbono justa deseada para la calidad de acero que se busca obtener.

Si hemos partido de arrabio como metal, y si contiene porcentajes elevados de impurezas de fósforo (en forma de PFe₃ fosfuro de hierro), entonces el refractario y la escoria básica actuarán eliminando el fósforo de la siguiente manera:



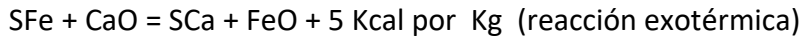
En la escoria se ha agregado cal, que reacciona con el anhídrido fosfórico creado de la siguiente manera:



Este fosfato tricálcico, va a la escoria, en este proceso la cal también escorifica los silicatos de Fe y Mn.

Estas últimas reacciones comienzan lentamente al principio, pero se activan luego de que todo el carbono ha sido quemado.

El azufre, que se encuentra como sulfuro ferroso SFe, también reacciona con la cal:



El sulfuro de calcio, también pasa a la escoria.

La eliminación del azufre, es un poco difícil, se elimina más fácil en los hornos eléctricos básicos, porque en este tipo de hornos se alcanzan mayores temperaturas.

El balance térmico de las reacciones, nos dice que hay calor excedente que contribuye a elevarlas temperaturas, no haciendo falta agregar combustible.

ESQUEMA DE UN CONVERTIDOR LD

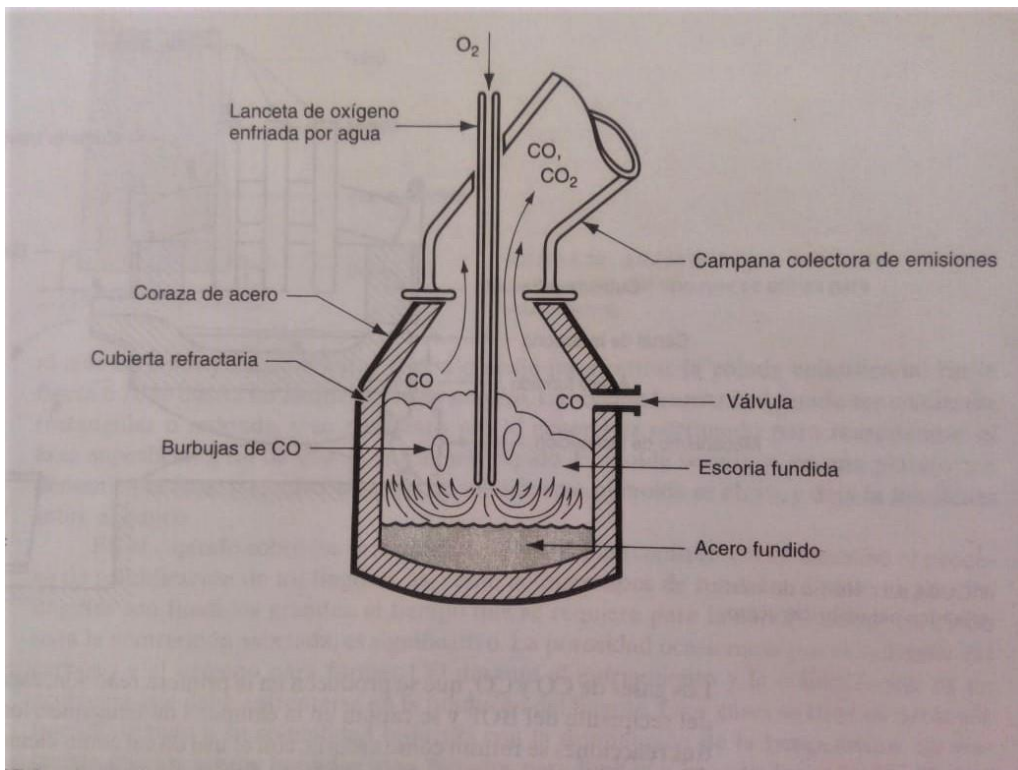


Fig. 10 Esquema del funcionamiento del convertidor LD - BOF

La caña de oxígeno sopla con gran presión el oxígeno sobre la superficie del metal fundido

Etapas de funcionamiento de un convertidor

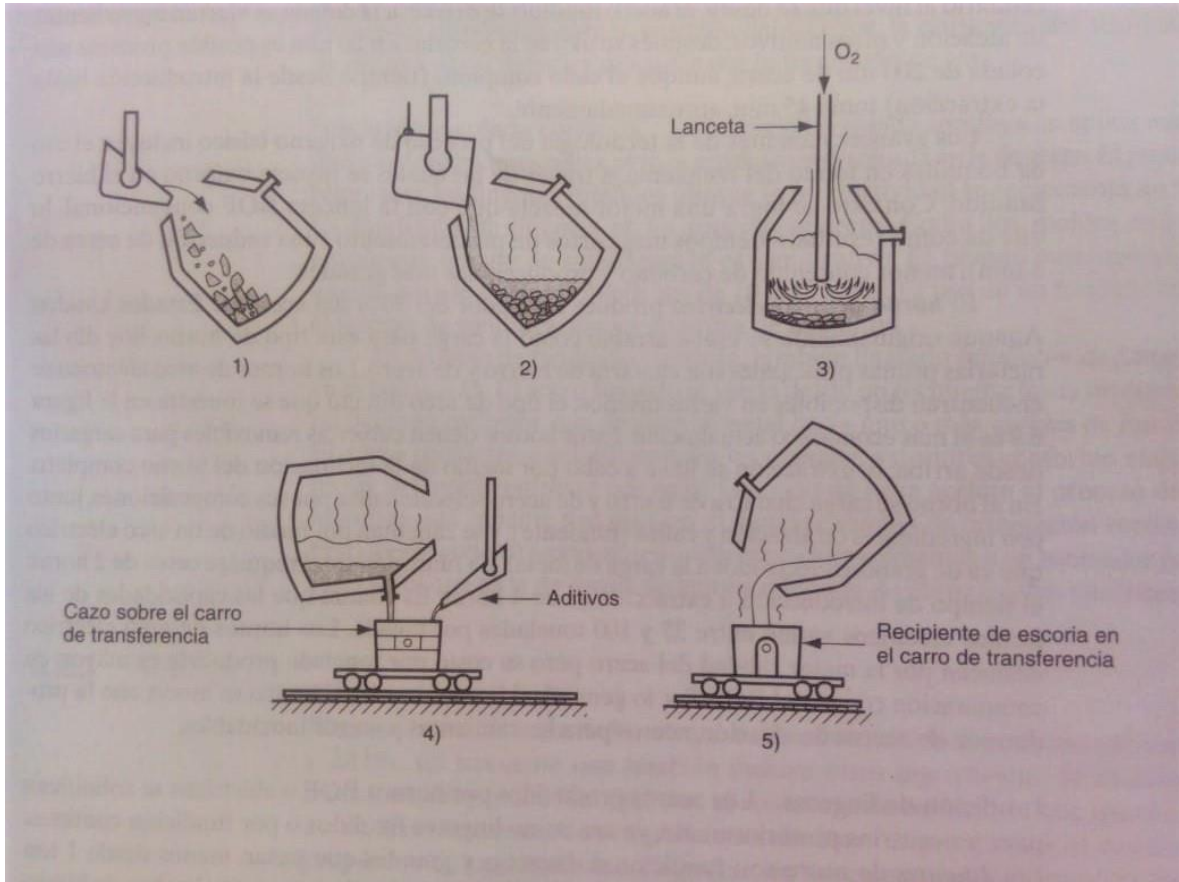


Fig. 11 etapas generales del proceso de afinado en convertidor LD-BOF

Etapa 1, se carga el convertidor con trozos de chatarra seleccionada, con el objeto de formar una capa protectora del refractario.

Etapa 2, se carga el convertidor con arrabio fundido proveniente del alto horno y fundentes (especialmente cal)

Etapa 3, se introduce la lanza y se procede a soplar el oxígeno a gran velocidad desde unos 1,5m de altura sobre la superficie de metal fundido, luego se agregan las ferroaleaciones, para la escorificación de impurezas, se recarburan al nivel deseado.

Etapa 4, se transfiere el acero por la válvula de descarga

Etapa 5, se descarga la escoria

EL HORNO ELECTRICO

Como adelantamos al principio del tema , del afino, además del convertidor BOF, es muy utilizado además el HORNO ELECTRICO , EAF (Electric Arc Furnace) , principalmente cuando obtenemos acero a partir de hierro esponja, cuando el horno eléctrico es de tipo de refractario básico, permite además extraer impurezas, por otro lado los hornos eléctricos son muy simples, no requieren instalaciones para acopio de combustibles, lo cual disminuye sensiblemente el tamaño de la instalación y se logran temperaturas muy elevadas, lo cual permite eliminar con mayor facilidad el S.

COMO SE UTILIZA EL HORNO ELECTRICO

Carga de materias primas: son fundamentalmente Hierro esponja y Chatarra. Se carga en el Horno de arco eléctrico (EAF - Electric Arc Furnace) chatarra seleccionada, la cual se funde y se mezcla en forma automática con hierro esponja proveniente de la planta de Reducción Directa.

Operaciones que se realizan en el Horno de Arco Eléctrico - EAF

En el EAF, se realizan unas pocas funciones básicas como:

- Carga
- Fusión
- Oxidación
- Desfosforación
- Descarburación
- Ajuste de temperaturas para colar.

COMO ESTÁ CONSTITUIDO EL EAF

Los Hornos eléctricos de arco están formados por una cuba de chapa de acero revestida de material refractario básico, provista de electrodos de grafito.

El arco eléctrico salta entre los electrodos por medio del baño (similar a una soldadura eléctrica).

El horno está cerrado por una bóveda atravesada por los electrodos a través de orificios ajustados por camisas refrigeradas por agua que aseguran la perfecta estanqueidad de la cámara del horno.

Esta cubierta está revestida de ladrillos refractarios refrigerados con agua. Los hornos se cargan por la parte superior girando la cubierta después de levantarla.

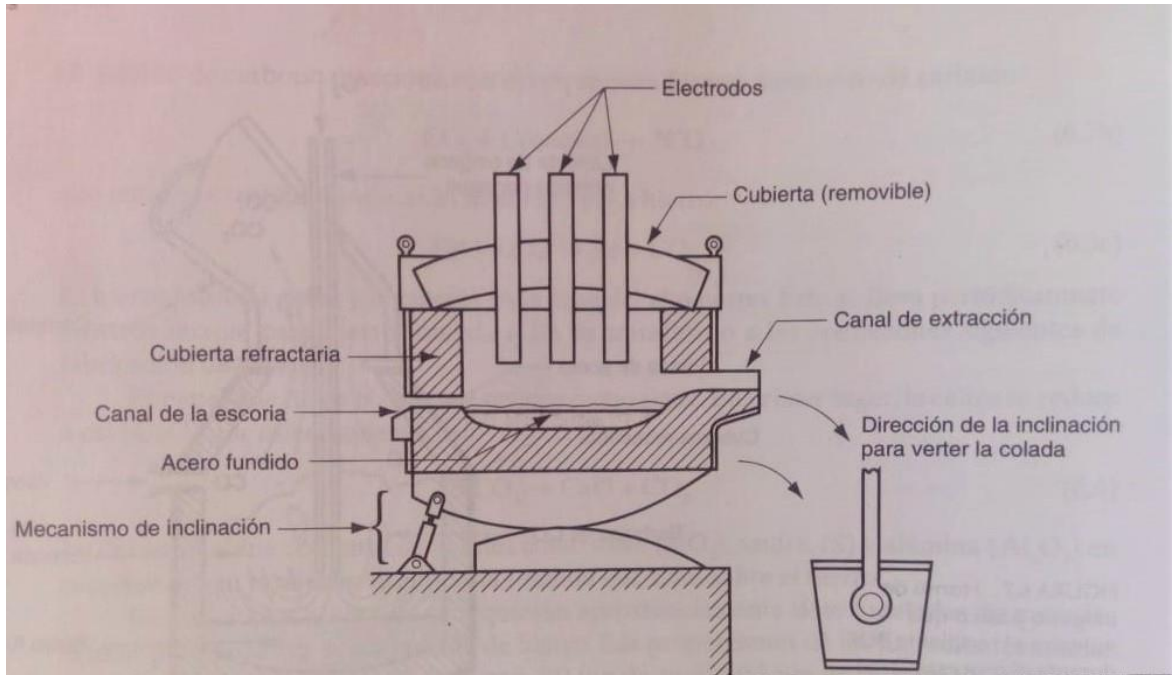


Fig.12 Esquema de partes del EAF

Una vez terminadas las operaciones en el EAF, se vierte la colada de acero a la cuchara, la cuchara es un RECIPIENTE-HORNO de gran tamaño, que se acopla a otro equipo denominado BOVEDA O TAPA DE LA CUCHARA, que es una tapa que contiene electrodos, de forma tal que al colocar la tapa a la cuchara se transforma en un horno de cuchara o LF (Ladle Furnace) en el cual se termina el afino.

La operación de transferencia del acero a la cuchara, se conoce como: sangrado en cuchara

Sangrado en cuchara

El sangrado consiste en el traspaso del acero del horno de arco eléctrico a la cuchara. La mayor parte de las ferroaleaciones y desoxidantes deben ser agregados a la cuchara durante el sangrado para sacar ventaja del efecto de mezclado y agitación generado por la corriente de colada.

Una vez finalizado el sangrado, la cuchara es transportada y se le coloca la tapa-bóveda con electrodos, conformándose el Horno Cuchara.

Horno cuchara (LF - Ladle Furnace)

En el horno cuchara se realizan las operaciones complementarias para terminar el proceso de afino, como: ajuste de análisis químico, desoxidación, desulfuración y calentamiento a la temperatura deseada.

Se busca a su vez en esta operación el mínimo consumo de energía, electrodos y refractarios, apareciendo dos beneficios: el ahorro de ferroaleaciones y la posibilidad de una sincronización óptima con colada continua que es el siguiente proceso que analizaremos, ya que el contenido del LF, se lleva a la punta del tren de colada continua y se vierte desde él el acero sobre “la cacerola” o “artesa” que distribuye el acero en el tren de colada.

D) COLADA, COLADA CONTINUA, LAMINADO Y OTROS PROCESOS PARA OBTENCION DE PRODUCTOS DE ACERO

En muchas plantas siderúrgicas, el acero se cuela desde la cuchara a moldes de gran tamaño, en los cuales el acero se enfría durante varias horas, para permanecer en espera hasta que sean enviados a laminado para darle forma de diversos productos tales como perfiles de diversas formas, barras, tubos, y láminas o chapas, este proceso de colada es discreto o en batch.

Pero en las grandes plantas integradas, el acero se cuela desde la cuchara en lo que se conoce como “COLADA CONTINUA”, en la cual el acero se vierte desde la cuchara a un recipiente temporal llamado cacerola o artesa, que dosifica el metal hacia uno o más moldes de fundición continua.

El acero comienza a solidificarse en las regiones exteriores conforme viaja hacia abajo a través del molde enfriado por agua. Un rocío de agua acelera el proceso de enfriamiento. Mientras está caliente y es plástico, el metal cambia de dirección de vertical a horizontal, entonces se corta en secciones formando tochos, o se alimenta en forma continua a un laminador continuo, en el que se le da forma de lámina o bloque de acero u otras secciones transversales.



Fig.13 esquema de un sistema de colada continua

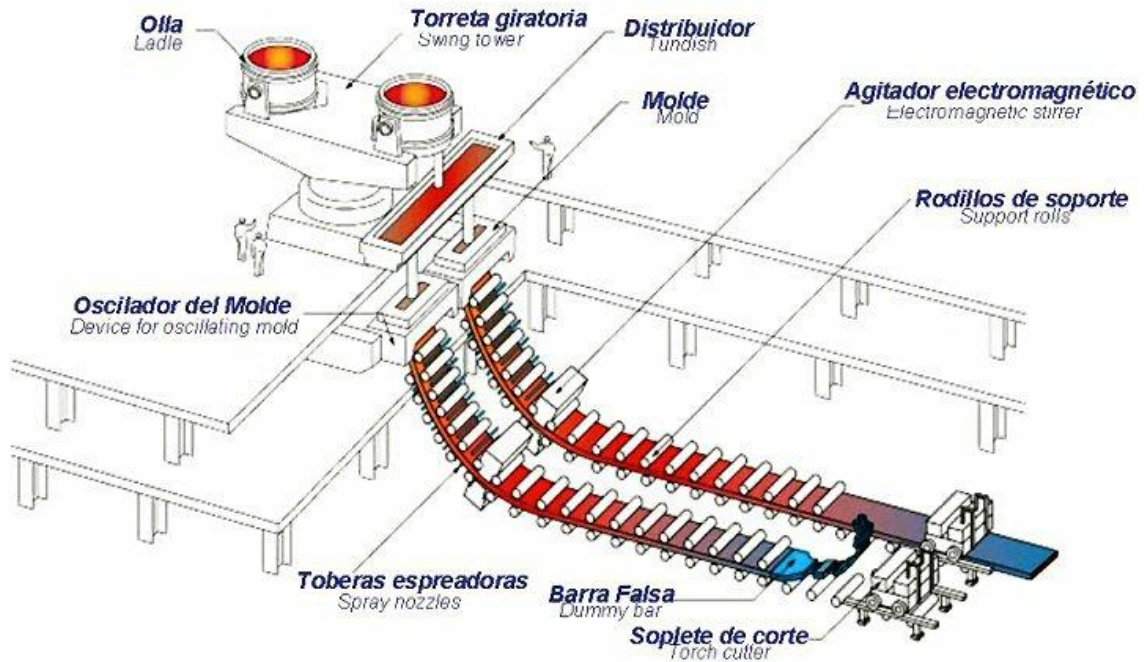


Fig. 14 diagrama de colada continua

El proceso de laminado, estará constituido por diversas operaciones que dependerán del tipo de producto a fabricar, habrá operaciones tales como: de desbaste, de calibración de espesores, de corte, de terminación y acabado, de control de calidad, tratamientos térmicos diversos, mecanizados, etc. en el caso de fabricación de tubos, por ejemplo habrá operaciones de perforado, calibrado y estirado, en otros tipos de perfiles, por ejemplo habrá operaciones de trefilado.

La industria siderúrgica en Argentina

La producción de materias primas siderúrgicas y fabricación de productos de acero constituye una industria base para el desarrollo de un país y es de una complejidad muy grande, con diversidad de problemas a resolver, y con mucha tecnología aplicada, las inversiones son muy importantes y de muy largo plazo, la calificación de los recursos humanos es muy importante también. Se deben crear condiciones adecuadas macroeconómicas para que este tipo de industria madre se desarrolle.

En la República Argentina, tenemos una buena cantidad de plantas, unas pocas son del tipo Grandes Plantas Integradas, y hay varias de mediana complejidad, sin integración total del proceso.

Entre las plantas con un gran índice de integración podemos citar:

Siderar

Acindar

Siderca

Altos hornos Zapla

A su vez cada gran compañía, posee otras plantas diversificadas, donde se producen productos como: alambres, barras para la construcción, clavos, chapas para techos pre pintadas, galvanizadas, chapas para la industria automotriz, perfiles y planchuelas, rieles de ferrocarril, etc..