

GUIA DE ESTUDIO DE LA MATERIA DE PROCESOS DE FABRICACIÓN DE METALES FERROSOS

ACTIVIDAD PRELIMINAR:

MATERIAS PRIMAS PARA LA PRODUCCIÓN DE HIERRO Y ACERO

OBJETIVO DE APRENDIZAJE: El estudiante analizará las características y las propiedades de las materias primas. Analizará los procedimientos de acondicionamiento a que deben someterse las materias primas para poder ser utilizadas de manera eficiente en los procesos de obtención del hierro y del acero.

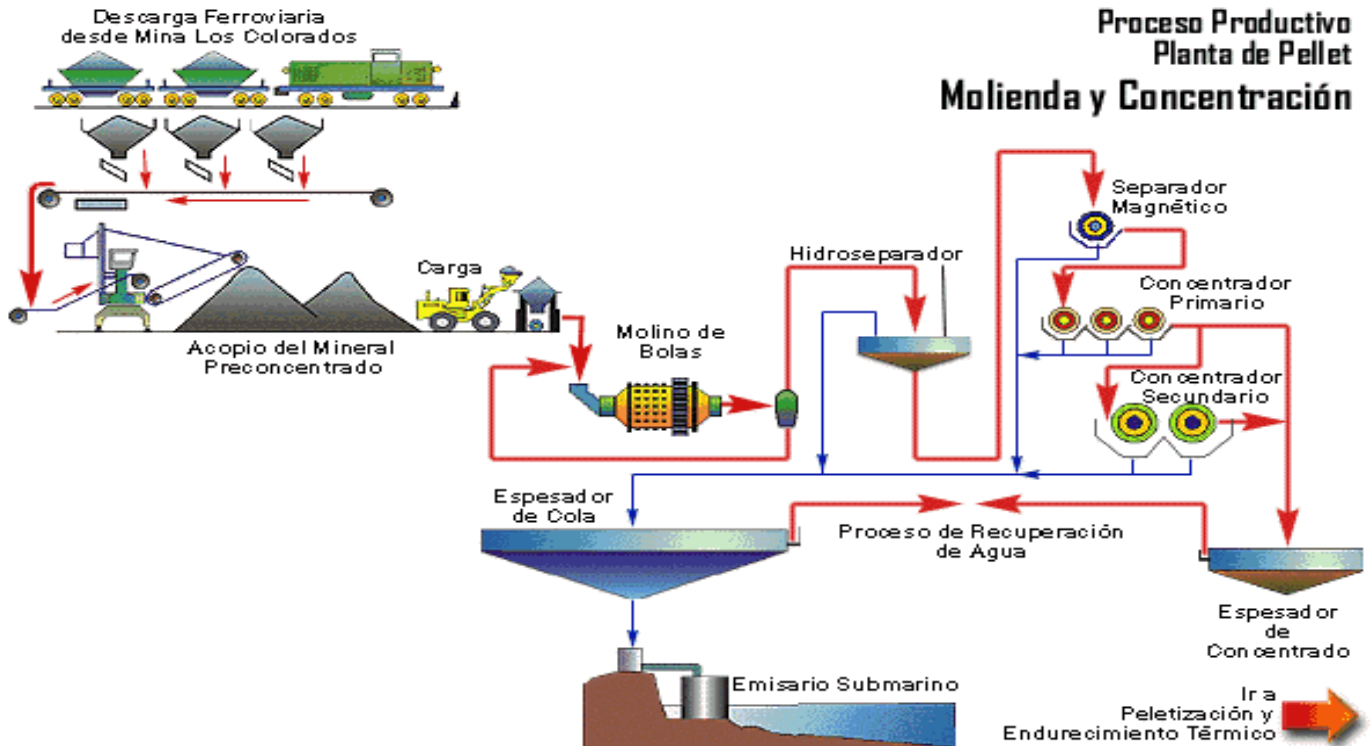


Lámina 1/2

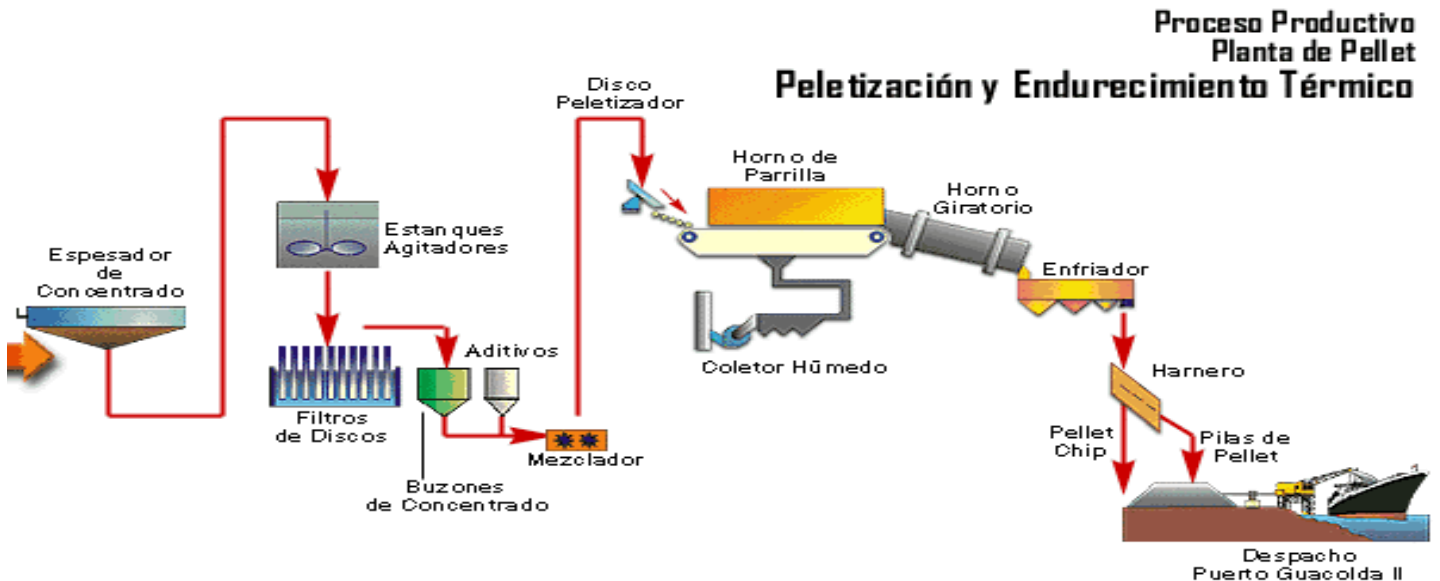


Lámina 2/2

1.1 Minerales de hierro.

El hierro es uno de los metales que más abunda en la naturaleza, donde aparece en forma de óxido, carbonato, sulfato o silicato.

El hierro ocupa el cuarto lugar entre los cuerpos simples que forman la corteza terrestre. El orden de distribución de los principales elementos que se encuentran en la superficie de la tierra es el siguiente:

Oxígeno..... 49.50%
Silicio..... 23.30%
Aluminio..... 7.50%
Hierro..... 5.08%

El hierro se halla presente casi siempre en mayor o menor proporción en la mayoría de las rocas y minerales, no existiendo casi ninguna nación en el mundo que no tenga en su territorio minerales de hierro. Sin embargo, solamente cuatro minerales se pueden utilizar industrialmente en la actualidad: tres óxidos que se conocen generalmente con los nombres de magnetita, hematites y limonitas, y el carbonato.

Tipos de minerales de hierro

En la naturaleza existe una gran variedad de minerales de hierro pero los que mas se suelen utilizar son los siguientes:

- La siderita (FeCO_3) es un carbonato de hierro. Tiene un color pardo-rojizo y su raya es blanca. La ley en hierro es del 48 %.



- El hematites u oligisto (Fe_2O_3) es un óxido de hierro. Es de color rojo anaranjado, a veces plateado, su raya es roja y la ley en hierro es del 70 %.



- La goethita ($\text{FeO}2\text{H}$) es un hidróxido de hierro. Es el principal componente de la limonita, si bien a veces aparece como mineral aislado. Es de color negro y su raya es pardo - amarillenta y posee leyes de hasta un 60 - 70 % en hierro. Cristaliza habitualmente como una masa llena de bultos esferoides, aunque en ocasiones presenta forma de estalactita.



- La magnetita es un mineral de hierro constituido por óxido ferroso-diférrico (Fe_3O_4) que debe su nombre de la ciudad griega de Magnesia. Su fuerte magnetismo a un fenómeno de ferrimagnetismo: los momentos magnéticos de los distintos cationes de hierro del sistema se encuentran fuertemente acoplados, por interacciones antiferromagnéticas, pero de forma que en cada celda unidad resulta un momento magnético no compensado. La suma de estos momentos magnéticos no compensados, fuertemente acoplados entre sí, es la responsable de que la magnetita sea un imán.



- La limonita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) es una mezcla de diversos minerales. Su color es amarillo o pardo negruzco y su raya es parda o amarillenta. Algunos autores la consideran como una roca formada por minerales de hierro hidratados y arcillas.



Desde el punto de vista industrial, pueden considerarse como minerales de hierro, aquellos que por su composición, características químicas y físicas, situación geográfica y por las reservas que hay en la zona donde se encuentran, pueden ser explotados en condiciones económicas satisfactorias.

Los silicatos de hierro, que son muy abundantes y tienen contenidos en hierro variables del 10 al 40%, no se pueden utilizar como minerales, porque todavía no se ha descubierto ningún procedimiento industrial para extraer de los silicatos el hierro que contiene precios realmente aceptables.

DENOMINACION	FORMULA QUIMICA	RIQUEZA TEORICA EN HIERRO	PESO ESPECIFICO	COLOR MAS FRECUENTE
MAGNETITA	Fe ₃ O ₄	72.4	5.0	NEGRO GRIS
HEMATITES ROJA	Fe ₂ O ₃	70.0	4.9	ROJO
LIMONITA HEMATITES PARDA	2 Fe ₂ O ₃ 3 H ₂ O	60.0	4.5	AMARILLO ROJIZO
CARBONATO	FeCO ₃	48.3	3.7	PARDO

Generalmente, se consideran minerales ricos los que contienen más de 55% de hierro. De riqueza media, a los que contienen de 30 a 55% de hierro y minerales pobres, a los de contenido inferior a 30%. Aunque en la actualidad se extraen minerales con contenidos bajos aproximadamente 25% de hierro.

Magnetita (óxido ferroso-férrico, Fe = 72,4%)

Es el mineral más rico en hierro que hay en la naturaleza y, si no fuera acompañado de impurezas, su composición sería de 72.4% de hierro y 27.6% de oxígeno; pero, debido a las materias extrañas que le acompañan, su riqueza suele variar en los buenos yacimientos de 55 a 66% de Fe. En algunas ocasiones debido a la gran proporción de ganga, el mineral de magnetita, a pesar de su elevada ley teórica, se presenta sólo con 25 a 50% de hierro. Su denominación química es óxido ferroso férrico y su fórmula es Fe₃O₄ o FeO·Fe₂O₃. Por su capacidad y por su estado cristalino, es el mineral de hierro que con más dificultad se reduce. Normalmente se prefieren las hematites roja y parda.

Hematites. Óxido férrico anhidro (hematites roja, Fe = 70%)

Es el más abundante de los minerales de hierro y puede considerarse como el más importante de todos ellos, ya que por su riqueza y comportamiento en el horno alto es el más solicitado de todos para la fabricación de arrabio o fundición. Su fórmula es Fe₂O₃ y contiene 70% de hierro y 30% de oxígeno. En la práctica, suele contener de 50 a 68% de Fe, debido a la ganga que le acompaña. Existen diversas variedades de este mineral y las principales son las siguientes:

Limonita. Hematites parda (óxido férrico hidratado, Fe = 60%)

Son óxidos férricos hidratados. Forman una serie ordenada de minerales, cuya fórmula general es n Fe₂O₃ + m H₂O. La denominación de cada uno de ellos se muestra a continuación:

Turguita..... $2 \text{ Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 66.20% de Fe
Goetita..... $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 62.90% de Fe
Limonita..... $2 \text{ Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{ H}_2\text{O}$ 60.00% de Fe
Xanthosiderita..... $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O}$ 57.10% de Fe
Limnita..... $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{ H}_2\text{O}$ 52.30% de Fe

Su variedad más importante es la limonita, que pura contiene aproximadamente 60% de hierro y 40% de oxígeno. En la práctica debido a la ganga e impurezas con que se encuentran mezclados, el porcentaje de hierro varía de 30 a 56%.

Siderita (carbonato de hierro, Fe = 48.2%)

Este mineral cuya fórmula es CO_3Fe , contiene teóricamente 48.2% de hierro y 37.9% de anhídrido carbónico. En la práctica, sin embargo, su porcentaje de hierro suele variar de 30 a 45% por ir acompañado con una cierta cantidad de agua. El carbonato constituye una parte muy pequeña del mineral de hierro explotable, pero en ciertos países como en Canadá, Inglaterra, Australia y Alemania, la explotación de los carbonatos tiene gran importancia.

Sulfuros de hierro

Estos minerales, prácticamente no se emplean en siderurgia o se utilizan solo en ocasiones muy especiales. A pesar de su riqueza relativamente elevada, del orden de 45% y sobre todo de la que tienen después de la tostación (60% aprox.), solamente en casos muy excepcionales se emplean los residuos de piritas tostadas para enriquecer en hierro los lechos de fusión. Esto es debido a que es muy difícil eliminar la importante cantidad de azufre que contienen (del orden del 2%) y que para los aceros es muy pernicioso.

1.2 Beneficio de los minerales de hierro.



La extracción de los minerales se realiza de maneras muy diversas según las circunstancias que concurren en cada caso. En general, como el mineral se suele presentar formando grandes masas, siempre suele ser necesario emplear importantes cantidades de explosivos para romperlas y facilitar su extracción. Para arrancar el mineral se emplean potentes máquinas excavadoras y luego se machacan, trituran y criban los trozos de mineral hasta obtener tamaños apropiados para su transporte o utilización. Las explotaciones se hacen a cielo abierto o en galerías subterráneas.

Los minerales después de ser extraídos deben sufrir, según sea su calidad, tratamientos diversos. A veces es necesario lavarlos para eliminar las materias terrosas o arcillas con las que suelen estar mezclados. Otras veces los carbonatos son calcinados para transformarlos en óxidos y también, a veces, se calcinan ciertas magnetitas muy duras y compactas para transformarlas en óxido férrico de más fácil reducción y aumentar su porosidad o para eliminar algo del azufre que contienen.

Los minerales después de ser machacados, triturados y molidos, se clasifican por cribado o por procedimientos magnéticos. Posteriormente, los tamaños finos de riqueza aceptable se suelen aglomerar o sinterizar antes de su carga en los hornos altos. Cuando la humedad que contienen es muy elevada, se secan en hornos rotatorios para reducir el porcentaje de agua que les acompaña.

Machaqueo trituración y molienda.

El machaqueo de los minerales de hierro sirve para reducir el tamaño de los grandes trozos obtenidos en las minas, por voladuras, y conseguir que queden en trozos con dimensiones más pequeñas y más adecuadas para el transporte y para los tratamientos y transformaciones que han de sufrir posteriormente.

Generalmente, se suele separar en las minas los trozos de mineral inferiores a 1,5 m de diámetro, que son los mayores tamaños que suelen pasar a las grandes máquinas machacadoras que las reducen a trozos inferiores a 300 mm. La elección de la maquinaria depende de la naturaleza de los minerales a tratar, de las dimensiones de los trozos que se desea obtener y del destino final del producto.

En las fábricas suelen montarse instalaciones llamadas de trituración primaria, secundaria y terciaria, que, en ocasiones, se instalan también en las minas. En las máquinas primarias, los grandes trozos que llegan a las fábricas se reducen a tamaños o trozos menores de 150 mm y en las secundarias a tamaños inferiores a 50 mm aproximadamente. Finalmente, en la trituración terciaria se llega a tamaños menores de 10 mm.

El molino sirve para disminuir todavía más el tamaño de los minerales. Se cargan, generalmente, trozos de 3 a 8 mm y se obtiene polvo muy fino de 0.05 a 0.5 mm. Antiguamente los minerales relativamente porosos se cargaban en los hornos altos en tamaños variables de 25 a 75 mm. Los minerales compactos y densos como las magnetitas, por ejemplo, se cargaban en tamaños más pequeños, del orden de 25 a 50 mm. En los hornos de poca altura siempre se empleaban trozos más pequeños que en los grandes. (Barreiro)

No son demasiadas las empresas dedicadas a extraer el mineral de hierro en el mundo. No es por ser poco rentable o se necesite un conocimiento complejo, sino porque son pocos los minerales usados comercialmente como fuente de hierro, siendo que es el elemento con mayor distribución en la costra de la Tierra con más del 4% del total. La razón es la cantidad de metal o ley que cada mineral contenga.

De acuerdo a su composición química, los minerales de hierro se clasifican y agrupan en óxidos, carbonatos o compuestos de carbono, sulfuros y silicatos. Por ejemplo, dentro de los óxidos están la magnetita- Fe_3O_4 (como óxido ferroso-férrico), hematita- Fe_2O_3 , Ilmenita- HFeO_2 (como óxido hierrotitanio), y limonita $\text{FeO}(\text{OH})$ (como óxido acuoso de hierro). Entre los carbonatos se encuentra la siderita FeCO_3 (como carbonato de hierro). Los de óxido son la fuente más importante de hierro.

Sin duda que la calidad y composición del mineral depende fuertemente de su región geográfica y también del período o edad geológica en que se formó. Esto último se apoya en estadísticas que indican descubrimientos, ubicaciones y eras geológicas durante los cuales los depósitos han ido almacenándose: Cenozoica, Mesozoica, Paleozoica, Pre-Cambriana. Es decir el ambiente geológico influye fuertemente en el tipo y calidad del mineral extraído.

Los minerales se dan en ambientes ígneos, metamorfosos o de rocas sedimentarias. Los minerales ígneos se dan en los depósitos de mineral de hierro que son producto de la cristalización de materiales de roca líquida, tanto en depósitos tipo capas, producto del asentamiento de minerales pesados que se cristalizan para formar

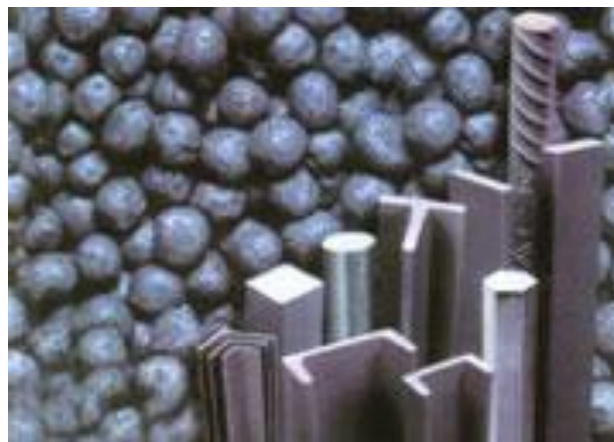
concentraciones ricas en hierro, como en cuerpos que muestran una relación intrusiva con las rocas de los muros. Estos son generalmente ricos en contenido de hierro y generalmente de alto contenido en fósforo y titanio.

Los depósitos formados producto del contacto entre rocas ígneas y sedimentarias están comúnmente compuestos de magnetita y hematita junto con carbonatos y piritas.

Otros están formados de soluciones calientes que alguna vez transportaron hierro y reemplazaron rocas con favorable composición química de hierro formando cuerpos de mineral irregular y son comúnmente almacenados como piedra caliza; se les llama depósitos hidrotérmicos en donde el hierro se da generalmente como siderita u óxidos.

Con el avance en métodos de beneficiamiento como concentración y aglomeración, la variedad de materiales posibles de ser explotados que contienen hierro pudo ser ampliado a los de bajo grado, lo que en tiempos anteriores era imposible. Estos métodos no sólo ayudan a obtener concentrados de mineral de la taconita (plomo y hierro), sino que también son usados para mejorar el hierro de alto grado controlando su tamaño particular y reduciendo el contenido de la ganga en este mismo.

Las formaciones de hierro primario de las cuales la mayor cantidad del hierro comercial circulante proviene, representan reservas de hierro casi ilimitadas. Este hierro es recuperable entre 25 y 35% y se presenta en forma de hematita o magnetita, los que requieren de un proceso de molido muy fino, considerando que son materiales muy duros. Esto ha llevado últimamente a la obtención de pélets y sinter de alta calidad. Es así como los concentrados de sílice del orden del 4% son el estándar que permite obtener un producto final uniforme en propiedades físicas y químicas amalgamando los hierros crudos de diferentes lugares y minas, utilizando sofisticados sistemas de computación que permiten obtener los aglomerados, pélets o sinter anteriormente descritos.



Métodos de procesamiento

Existen diferentes métodos usados en el descubrimiento de minas y yacimientos de mineral de hierro. Están las técnicas geofísicas basadas en la instrumentación, perforación y otros métodos de estudio geológico tales como el mapeo, que se basa en las medidas contrarrestadas entre el mineral y sus rocas circundantes usando propiedades físicas como el magnetismo y densidad de ellas.

También existe el magnetómetro moderno usado para determinar la fuerza del campo magnético de la tierra o su componente vertical en cualquier punto. La forma del campo magnético de la Tierra no es uniforme debido a irregularidades producto de variaciones en la forma y composición de la corteza terrestre y capa superior. Las variaciones detectadas en menor escala son producto de disturbios magnéticos causados por concentración de material magnético cercano a la superficie y es aquí donde se deben buscar nuevos depósitos.

Las investigaciones magnéticas también ayudan y consisten en rastrear aéreamente mediante el magnetómetro los posibles depósitos. Esto se hace mediante el uso de un helicóptero, por ejemplo, y es una técnica que nació en la Segunda Guerra Mundial como método de rastreo de submarinos enemigos. Los datos obtenidos son inscritos como un ploteo y son mapeados con líneas que conectan puntos de igual densidad magnética. Los patrones de estos mapas indican que donde existen anomalías magnéticas producto de variaciones del campo magnético de la tierra, podrían dar indicios a un posible yacimiento, luego de investigaciones más detalladas, mediciones gravitacionales, estudios electromagnéticos y otras técnicas geofísicas.

Por supuesto no se dejan de lado las técnicas de taladro debido específicamente a los mejoramientos recientes en las técnicas de la perforación de núcleo que permiten obtener muestras de calidad. Para lo anterior se emplean taladros de diamante y mezclas de éste según la dureza de la superficie de muestra. También son ayudados por el movimiento rotatorio penetrante y la circulación en reversa, que permiten una rápida penetración con toma de muestras bastante efectiva.

Para utilizar en el alto horno, se requiere procesar el mineral o concentrados de modo que alcancen las especificaciones físicas y químicas necesarias. Hace dos décadas el mineral era clasificado por los productores para cumplir estándares de estos hornos que demandaban composiciones especiales químicas y particulares como también de estructura. Con el avance de técnicas de concentración y peletización esto se ha tornado más fácil. Las empresas comercializadoras de mineral alcanzan estos requerimientos mediante la obtención e intercambio con otros minerales. La uniformidad, por ejemplo, ha obligado al uso de sistemas de mezcla y aleaciones involucrando la formación sistemática de capas en las pilas de almacenamiento o consumo mediante el corte transversal de estas capas. Lo anterior es usado para preparar una alimentación uniforme para la operación de modernas plantas de sinterización.

El término «beneficiamiento» con respecto al mineral de hierro se emplea comúnmente para designar todos aquellos métodos usados para procesar el mineral con objeto de mejorar sus características químicas, físicas o metalúrgicas de modo de desarrollar una mezcla más deseable para alimentar el horno. Algunos de estos métodos son:

Trituración

y

Tamizado

Consiste en darle al mineral un tamaño apropiado para ser cargado en el alto horno, el que, actualmente, requiere de la trituración y tamizado de las granzas de carga directa al horno de un tamaño más fino que 6 mm y con más de 30 mm de grueso bruto. El tamaño se selecciona basado en las características del mineral de modo que asegure una alta permeabilidad en el apilado y permita el tiempo suficiente para la reducción del material bruto. Los finos de menos de 6 mm producidos mediante este método son generalmente aglomerados mediante sinterización e incluso a veces regraneados o reconstituidos y peletizados.

Mezcla

La mezcla sofisticada combinada y algunas facilidades para su carga son ahora muy comunes, lo que ayuda a elaborar insumos que logren y cumplan la calidad requerida y los estándares que la industria necesita. Los sistemas más usados son los de apilamiento, que significan el agrupamiento en capas del mineral, donde cada capa representa mineral que varía en tamaño y composición química de las que le preceden y anteceden. El mineral se retira mediante grúas y excavadoras, cargadores frontales y otros. El retiro del mineral de esta pila resulta en la obtención de material con mezcla uniforme proveniente de todas las capas.

Además existe el «beneficiamiento» de mejorar la calidad del hierro de bajo estándar al despachar y embarcar este mismo. Por ejemplo, la formación natural de las reservas provoca capas de casi puro óxido de hierro mezclados con capas de sílice parcialmente descompuestas. El mineral de las capas de sílice puede ser fácilmente mejorado mediante técnicas simples de lavado donde las partículas finas de sílice pueden ser separadas de las más pesadas, densas y demás.

Lavado

Este método es el proceso más simple de concentración de mineral que aprovecha la alta gravedad específica y tamaño bruto del mineral para separarlo de la ganga silicosa más fina y liviana predominantemente en forma de cuarzo y arcilla. Se prepara el mineral para ser lavado en dos etapas más finas que 50 mm. El mineral es alimentado a lavadores especialmente diseñados que se encargan de agitarlo intensamente mediante sus paletas que en combinación con el flujo contrapuesto del agua, remueve la sílice fina de éste, dejando un producto residual muy rico en hierro.

Agitación

Algo más complejo es el de agitación, usado en el mineral con características más refractarias que requiere de quiebre para remover las capas de sílice. Consisten estos instrumentos de agitación, generalmente, en pantallas horizontales que alojan una cama de 15 a 25 cm de profundidad. Mediante la acción pulsante del agua, acción impartida a través de una bomba oscilante o mediante el movimiento físico hacia arriba y abajo de la propia pantalla, el mineral entrante a ésta es estratificado. Al caer el mineral, el movimiento pulsante permite que las partículas de sílice más livianas suban a la parte alta de la cama mientras que las partículas más ricas en hierro bajen a la base.

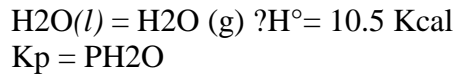
Existen también otros medios de beneficiamiento como el de Separación de Medios Pesados, el Espiral, la Separación Magnética Húmeda de Alta Intensidad y el Cono Reichert.



1.3 Principios teóricos del secado y equipo industrial.

En la concentración de minerales se obtienen, en ocasiones, fangos con partículas muy finas que contienen una gran cantidad de agua, que interesa eliminar. El secado es una operación que consiste en calentar los minerales y concentrados a una temperatura que permita eliminar el agua que acompaña a los materiales en forma de humedad o sea el agua atrapada entre las partículas por efecto de capilaridad o por absorción.

Considerando el secado teóricamente se analiza la reacción.



Para esta reacción se puede calcular, a una temperatura determinada, el valor de su constante de equilibrio K_p , y de esta manera obtenemos la presión de vapor de equilibrio del agua, $P_{\text{H}_2\text{O}}$ sobre el material. Se debe tomar en cuenta que la atmósfera del horno tiene su humedad expresada con $P'_{\text{H}_2\text{O}}$. Para que el proceso de secado se lleve a cabo es necesario que exista la relación $P_{\text{H}_2\text{O}} > P'_{\text{H}_2\text{O}}$.

El exceso de humedad contenida por los materiales puede eliminarse por métodos mecánicos (sedimentación, filtración, centrifugación). Sin embargo, la eliminación más completa de la humedad se obtiene por evaporación y eliminación de los vapores formados, es decir, mediante el secado térmico, ya sea empleando una corriente gaseosa o sin la ayuda del gas para extraer el vapor.

Esta operación se utiliza ampliamente en la tecnología química y es muy común que sea la última operación en la producción precedente a la salida del producto resultante. Es evidente que la eliminación de agua o en general de líquidos existentes en sólidos es más económica por acción mecánica que por acción térmica. La dificultad de los medios mecánicos surge cuando los productos finales y gran número de productos intermedios deben cumplir especificaciones rigurosas en cuanto a la humedad final. Habitualmente una centrífuga trabajando con grandes cargas de sólido húmedo dejará humedades en torno al 10-20 %, aunque en casos excepcionales como la sal común o cloruro sódico se puede alcanzar el 1 %.

La operación de secado es una operación de transferencia de masa de contacto gas- sólido, donde la humedad contenida en el sólido se transfiere por evaporación hacia la fase gaseosa, en base a la diferencia entre la presión de vapor ejercida por el sólido húmedo y la presión parcial de vapor de la corriente gaseosa. Cuando estas dos presiones se igualan, se dice que el sólido y el gas están en equilibrio y el proceso de secado cesa.

- Formas de enlace de la humedad con el material.

El mecanismo del proceso de secado depende considerablemente de la forma de enlace de la humedad con el material: cuanto más sólido es dicho enlace, tanto más difícil transcurre el secado. Durante el secado el enlace de la humedad con el material se altera.

Las formas de enlace de la humedad con el material se clasifican en: químico, físico-químico y físico-mecánico.

La humedad ligada químicamente es la que se une con mayor solidez al material en determinadas proporciones (estequiométricas) y puede eliminarse sólo calentando el material hasta altas temperaturas o como resultado de una reacción química. Esta humedad no puede ser eliminada del material por secado.

Durante el secado se elimina, como regla, sólo la humedad enlazada con el material en forma físico-química y mecánica. La más fácil de eliminar resulta la enlazada mecánicamente que a su vez se subdivide en: humedad de los macrocapilares y microcapilares (capilares con el radio medio mayor y menor de 10-5 cm).

Los macrocapilares se llenan de humedad durante el contacto directo de ésta con el material, mientras que en los microcapilares la humedad penetra tanto por contacto directo, como mediante la adsorción de la misma en el medio ambiente. La humedad de los macrocapilares se elimina con facilidad no sólo por secado, sino que también empleando métodos mecánicos. El enlace físico-químico une dos tipos de humedad que difieren por la solidez del enlace con el material: la humedad ligada osmóticamente y por adsorción.

La primera llamada también humedad de hinchamiento, se encuentra dentro de las células del material y se retiene por las fuerzas osmóticas. La segunda se retiene sólidamente sobre la superficie y en los poros del material. La humedad de adsorción requiere para su eliminación un gas con una energía considerablemente mayor que la utilizada para eliminar la humedad de hinchamiento. La existencia de estos tipos de humedad especialmente se manifiesta en materiales coloidales y poliméricos

- Definiciones fundamentales.

Contenido de humedad, base seca: x

$$\frac{\text{kg humedad}}{\text{kg sólido seco}}$$

Contenido de humedad, base húmeda:

$$\frac{\text{kg humedad}}{\text{kg sólido húmedo}} = \frac{\text{kg humedad}}{\text{kg humedad} + \text{kg sólido seco}}$$

- Clasificación de la operación de secado.

De modo general se pueden clasificar las operaciones de secado en continuas y discontinuas. En las operaciones continuas pasan continuamente a través del equipo tanto la sustancia a secar como el gas. La operación discontinua en la práctica se refiere generalmente a un proceso semicontinuo, en el que se expone una cierta cantidad de sustancia a secar a una corriente de gas que fluye continuamente en la que se evapora la humedad.

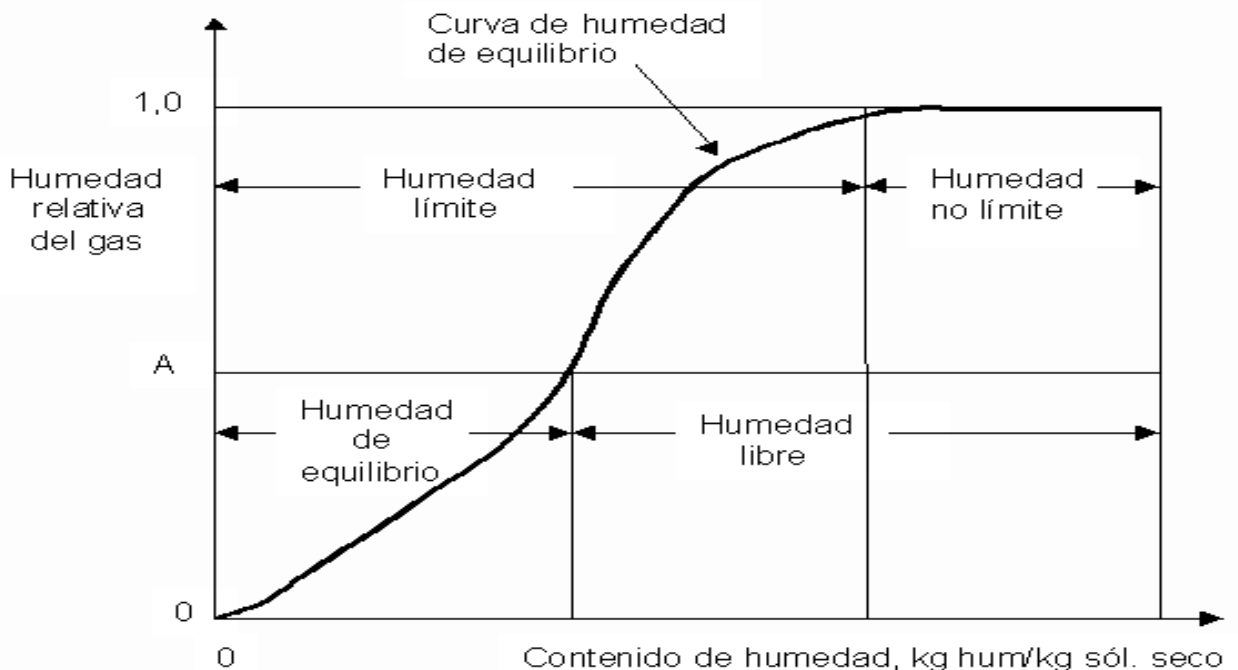


Figura 1. Tipos de humedades

Los equipos utilizados para secar se pueden clasificar también de acuerdo a cualquiera de estas categorías:

I. Métodos de operación: Continuos ó Discontinuos.

II. Métodos de propiciar el calor necesario para la evaporación de la humedad: En secaderos directos e indirectos

III. Naturaleza de la sustancia a secar: Puede ser la sustancia un sólido rígido como la madera, un material flexible como el papel o la tela, un sólido granular tal como la masa de cristales, una pasta espesa o delgada o una solución. Es probable que la forma física de la sustancia y los distintos métodos de manipulación empleados, ejerzan la influencia más grande en el tipo de secadero a utilizar.

-Tipos de secaderos.

De acuerdo a la clasificación de la operación de secado encontramos los siguientes tipos de equipos

Secaderos de calentamiento directo.

a) Equipos discontinuos

- Secaderos de bandejas con corriente de aire.
- Secaderos de cama fluidizada.
- Secaderos con circulación a través del lecho sólido.

b) Equipos continuos

- Secaderos de túnel.
- Secaderos neumáticos.
- Secaderos ciclónicos.
- Secaderos de cama chorreada.
- Secaderos de cama vibratoria.
- Secadero de cama fluidizada.
- Secaderos sprays.
- Secaderos de tipo turbina.
- Secaderos rotatorios.

Secaderos de calentamiento indirecto:

a) Equipos discontinuos.

- Secaderos de bandejas a vacío.
- Secaderos de bandejas a presión atmosférica.
- Secaderos por congelación.

b) Equipos continuos.

- Secaderos de tambor.
- Secaderos con circulación a través del lecho.

- Mecanismos y cinética de secado. Transferencia de masa y calor.

Un elemento fundamental en el proceso de secado es el estudio de la intensidad de la transferencia de masa en el mismo. Para esto es necesario conocer los elementos más útiles de la transferencia de calor y masa que funcionen en los secaderos de contacto directo.

Según Madariaga (1995), esta depende de una serie de factores que van desde condiciones internas a externas.

Las condiciones externas están definidas por la resistencia a la transferencia de calor y de masa de la capa límite del gas, y en el caso que predominen, el secado no dependerá de las características del sólido sino de las condiciones del gas, y estará controlado por la transferencia de masa y calor entre el gas y la superficie del sólido, empleándose en la evaporación todo el calor que se recibe del gas, la cual se comporta como una superficie libre de agua.

Las condiciones internas están definidas, por la transferencia de calor y de masa a través del sólido. En el caso que predominen, es decir, que la resistencia a la transferencia de masa a través del material sea muy superior a la de la capa límite del gas, la difusión interna controlará el proceso y lo más importante será las propiedades del sólido.

Cuando se seca un sólido se producen dos procesos fundamentales y simultáneos:

- Transmisión del calor para evaporar el líquido.
- Transferencia de masa en humedad interna y líquido evaporado.

Independientemente del mecanismo de transmisión de calor el cual puede ser por conducción, convección, radiación o una combinación de cualquiera de estos, el calor tiene que pasar primero a la superficie exterior y desde esta al interior del sólido. Excepto el secado por electricidad de alta frecuencia, que genera el calor intercambiante, esto conduce a la circulación de calor desde el interior hasta la superficie exterior. También se ha reportado otro tipo de secado llamado secado por sublimación.

En el secado por convección el calor necesario para la evaporación del líquido se transmite por un agente gaseoso o un vapor que pasa por encima del sólido o lo atraviesa.

En el secado por conducción el producto que debe secarse se encuentra en recipientes calentado o se desplaza por encima de estos. El calor también se difunde en el sólido a través de la conductividad del propio sólido

En el secado por radiación el calor se transmite por las superficies radiantes próximas.

En el secado dieléctrico la energía es generada en el interior del propio material mediante un campo electromagnético de alta frecuencia en la zona de microondas.

También se reporta en la literatura el secado por sublimación, denominando así al secado en estado de congelación al vacío profundo. Según el método de transmisión del calor este procedimiento es análogo al secado por conducción pero debido a sus peculiaridades el secado por sublimación se destaca como un grupo especial

- Movimiento de la humedad dentro del sólido.

Cuando se produce la evaporación superficial, debe haber un movimiento de humedad desde las profundidades del sólido hacia la superficie. La naturaleza del movimiento influye en el secado en los períodos de

1. Difusión líquida:
2. Movimiento capilar:
3. Difusión de vapor:
4. Presión:

- Curvas fundamentales de secado.

La cinética de secado de un material no es mas que la dependencia de la humedad del material y de la intensidad de evaporación con el tiempo o variables relacionadas con este, como la propia humedad o las dimensiones del equipo.

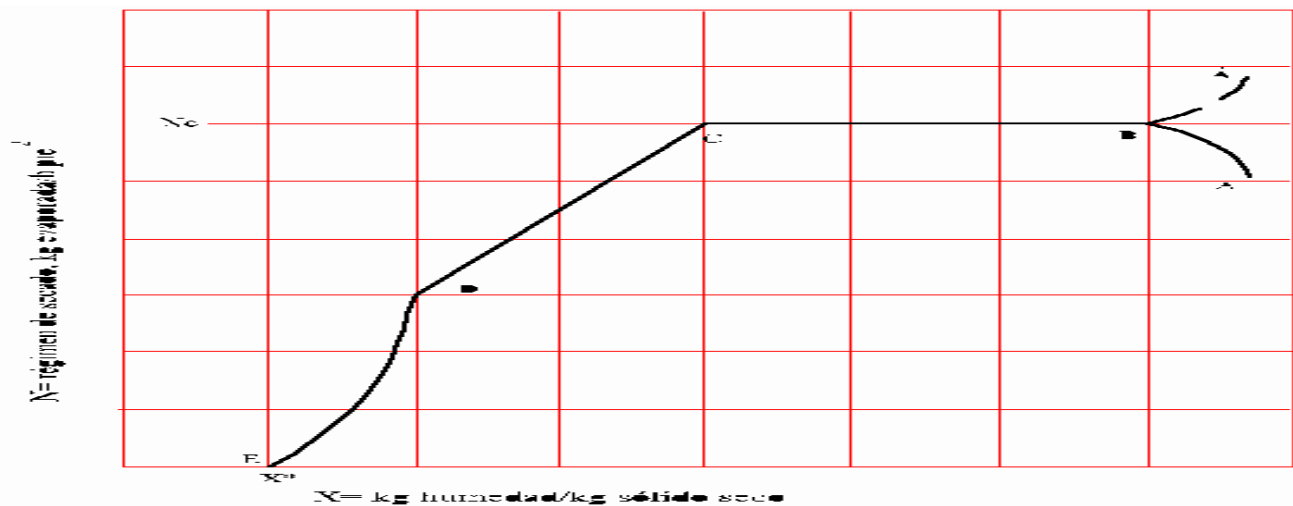


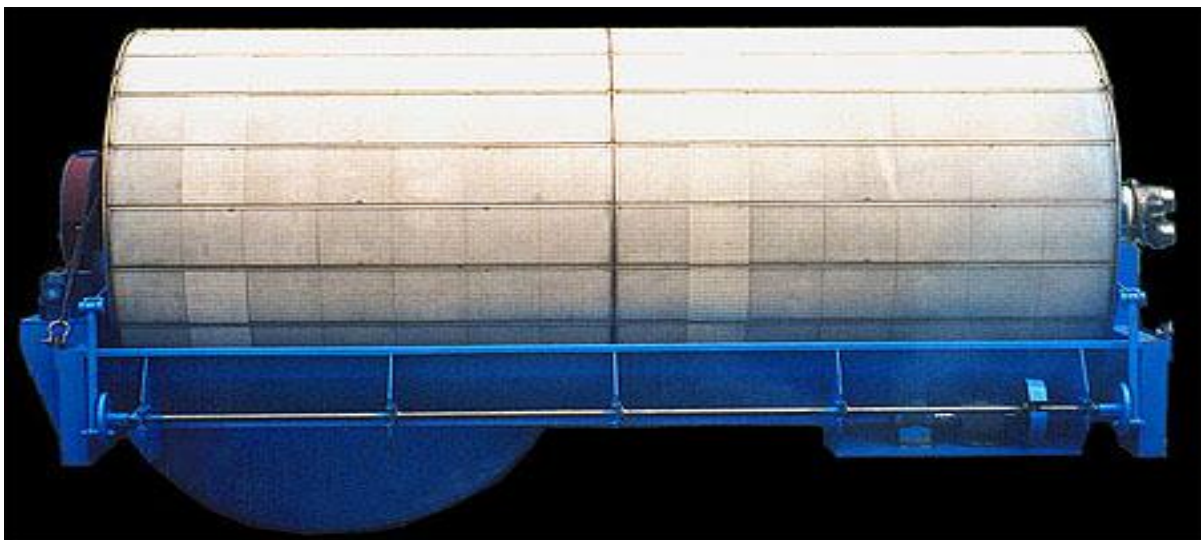
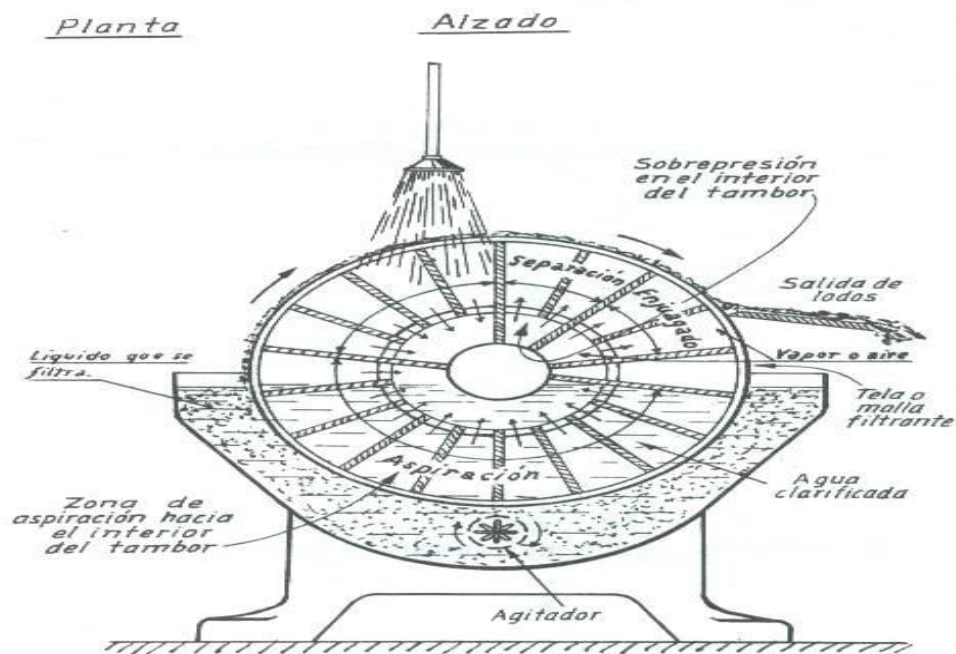
Figura 3. Curva de velocidad de secado vs humedad.

Etapa A-B: Es una etapa de calentamiento (o enfriamiento) inicial del sólido normalmente de poca duración en la cual la evaporación no es significativa por su intensidad ni por su cantidad. En esta etapa el sólido se calienta desde la temperatura ambiente hasta que se alcance el equilibrio entre el enfriamiento por evaporación y la absorción de calor de los gases.

Etapa B-C: Es el llamado primer período de secado o período de velocidad de secado constante; donde se evapora la humedad libre o no ligada del material y predominan las condiciones externas. En este período el sólido tiene un comportamiento higroscópico. La velocidad de secado se mantiene constante si el gas tiene un estado estacionario y en general depende solo de las propiedades y velocidad del mismo. Si durante el proceso, el gas se enfría, la velocidad de secado decrece pero sigue en esta zona dependiendo de factores externos al sólido.

Etapa C-E: Es el segundo período de secado o período de velocidad de secado decreciente; donde se evapora la humedad ligada del material y predominan las condiciones internas o las características internas y externas simultáneamente. En estas condiciones el sólido tiene un comportamiento higroscópico. Durante el período, la temperatura del material sobrepasa la de bulbo húmedo debido a que el descenso de la velocidad de secado rompe el equilibrio térmico que mantiene estable la temperatura y una parte considerable del calor se emplea en un calentamiento del sólido. Ahora la humedad deberá ser extraída del interior del material con el consiguiente incremento de la resistencia a la evaporación.

Otro sistema muy utilizado para eliminar el agua es la filtración continua por el vacío. Los filtros usados en metalurgia se componen de un tambor filtrante, dividido en varias células independientes, que gira en un gran depósito a donde se envía el líquido con las partículas a secar. Una parte de la superficie cilíndrica exterior metálica de este tambor esta perforada muy finamente y recubierta de una tela que deja pasar a través de ella el agua y no al mineral. En una parte al interior del tambor se hace una fuerte aspiración que arrastra al agua hacia la zona central.



Durante la operación, el tambor gira y en cada célula queda adheridas a la tela solo las partículas sólidas. Luego en su giro al salir del líquido llegan los concentrados en forma del fango adheridos a la tela a una zona donde son rociados con agua y se separan ciertas sustancias arcillosas, que se separan sin dificultad.

En la última parte del giro el material depositado sobre la tela deja los sectores donde actúa el vacío y entra en otro sector donde, en el interior del tambor, se produce una ligera presión de aire que desprende las materias minerales que hay sobre la tela, que se depositan desprovistas ya de gran parte de su humedad en una cinta transportadora.

Secadores Rotatorios

Son cilindros huecos que giran sobre su eje, por lo general con una ligera inclinación hacia la salida. Los sólidos granulares húmedos se alimentan por la parte superior y se mueven por el cilindro a medida que este gira.

El calentamiento se lleva a cabo por contacto directo con gases calientes con flujo de contracorriente. En algunos casos, el calentamiento es por contacto indirecto a través de la pared calentada del cilindro. Las partículas granulares se mueven hacia delante con lentitud y a contracorriente con los gases calientes.

Los secadores rotatorios, son los secadores más utilizados en la industria, esto se debe principalmente a que muchos materiales pueden ser secados a través de ellos. Estos requieren de poca labor por parte de sus operadores y si se mantienen de manera apropiada, esencialmente con una buena lubricación, pueden operar continuamente bajo control automático por largos períodos de tiempo y con supervisión ocasional.

Un secador rotatorio operado bajo presión atmosférica consiste de una carcasa cilíndrica que gira sobre cojinetes apropiados y, por lo común tiene una leve inclinación hacia la salida en relación con la horizontal. La longitud de la carcasa cilíndrica varía entre cuatro y diez veces su diámetro. El diámetro se encuentra entre 30 cm hasta más de 3 m.

Los sólidos húmedos que se introducen por un extremo del cilindro se desplazan a lo largo de él, debido a la rotación, el efecto de la carga y la pendiente del cilindro. Los gases que circulan por el cilindro pueden reducir o aumentar la velocidad de movimiento de los sólidos, según que la circulación del gas sea en contracorriente o siga una corriente paralela con la circulación de los sólidos.

Los secadores rotatorios se clasifican como directos, indirectos-directos, indirectos y tipos especiales. Estos nombres se refieren a los métodos de transmisión de calor, de esta manera lo explica señalando que:

Los secadores rotatorios son directo cuando el calor se aplica o se elimina de los sólidos por intercambio directos entre éstos y el gas circulante, e indirecto cuando el medio de calentamiento no tiene contacto con los sólidos y se separa de ellos por medio de un tubo o una pared metálica

Es imposible cubrir la gran cantidad de variaciones posibles entre ambas clases, además, el secador rotatorio objeto de estudio del presente trabajo es del tipo completamente directo de corriente paralela. En la figura 1, se puede observar un secador rotatorio de tipo directo y corriente paralela usado para secar mineral de hierro.

En un secador rotatorio, la alimentación húmeda de material se introduce en un extremo de la carcasa cilíndrica giratoria, y es levantada por una serie de aspás de elevación internas, estas aspás tienen la función de levantar y dejar caer los sólidos a través de la corriente de gas a su paso. Este contacto cerrado entre el aire seco y el sólido proporciona alta capacidad y desempeño térmico único.

Los secadores rotatorios de flujo de corriente paralela son utilizados ampliamente para el secado de materiales de alta humedad y sensibles al calor. Desde que el material mojado se expone a los gases de alta temperatura, la tasa de transferencia inicial de calor es muy alta, rápidamente evapora la humedad de la superficie.

La inmediata y dramática caída en la temperatura del gas impide un aumento súbito en la temperatura del material y de la carcasa. El producto final está en contacto con los gases de baja temperatura permitiendo que el contenido de humedad sea fácilmente controlado, evitando así el secado excesivo.



Fig. 1.- Horno rotativo de secado.

1.4 Proceso de coquización

Coquización es un proceso de destilación seca destructiva de carbón para convertirlo de un material denso y frágil a uno fuerte y poroso; los subproductos valiosos se recuperan en el proceso.

No todas las clases de carbón son útiles para fabricar coque. Entre los que no son útiles se encuentran los porosos pero con baja resistencia a la compresión o con residuos de polvo. Fuera de las tres clases de carbón reconocidas en la industria alta, media o baja volatilidad, solo una subclase entre los de alta volatilidad y algunos pero no todos los de media volatilidad son producidos para el alto horno. Por lo tanto la mezcla es de mayor importancia. Grandes cantidades de carbón de alta volatilidad son mezcladas con carbón de media o baja volatilidad. Otra razón para mezclarlos es su química no la estructura del carbón. Muchos carbones contienen grandes cantidades de cenizas de: arena de sílice, arcillas aluminosas, sulfuros de hierro y otros. Por lo tanto casi todos los carbones son lavados.

Como ya se menciona anteriormente la coquización es un proceso de destilación destructiva usando calor externo. El coque es ampliamente clasificado de acuerdo a su temperatura final del proceso de coquización – coque de alta, media y baja temperatura. Solo el último terminado entre 1700 y 2000° F (930 y 1100° C) se usa para el alto horno. Aunque algunos de los de bajas temperaturas se utilizan para mezclarlos.

Las producciones de carbón por tonelada son:

De 65 a 73% de coque y de 5 a 10 % de residuos, para una producción de coque del 75%. Puesto que cerca del 75% de sulfuro contenido en el carbón, permanece en el coque, lo cual es que el contenido de sulfuro es alrededor de la misma cantidad carbón en el coque, a menos que se empleen las técnicas adecuadas para remover los sulfuros.

Baterías de coque



El carbón se convierte en coque calentándolo para la eliminar las materias volátiles en unos hornos especiales, fuera del contacto del aire, a temperaturas superiores a los 1.000 °C. que se agrupan en baterías.

Se cargan estos hornos por la parte superior y el carbón tarda en coquizarse una 16 horas.

Después se descargan mediante una máquinas deshornadoras y el coque cae a unos vagones-tolva que lo conducen a la torre de enfriamiento, efectuándose éste con agua.

Los productos volátiles desprendidos se aprovechan como gases combustible y para la obtención de productos químicos

La misión del coque en el horno alto es:

- Producir, por combustión, el calor necesario para la reacciones de reducción
- Soportar las cargas en el horno alto
- Producir el gas reductor (CO) que transforma los óxidos en arrabio (hierro)
- Dar permeabilidad a la carga del horno alto y facilitar el paso del gas

El coque ha sustituido, como combustible siderúrgico, al carbón vegetal utilizado hasta el siglo XIX en las instalaciones de producción de arrabio.

El coque metalúrgico



El coque metalúrgico el residuo sólido que se obtiene a partir de la destilación destructiva, o pirólisis, de determinados carbones minerales, como la hullas (o carbones bituminosos) que poseen propiedades coquizantes; es decir capacidad de transformarse en coque después de haber pasado por una fase plástica. En la practica, para la fabricación del coque metalúrgico se utilizan mezclas complejas que pueden incluir más de 10 tipos diferentes de carbones minerales en distintas proporciones.

Coque metalúrgico

El proceso de pirólisis mediante el cual se obtiene el coque se denomina coquización y consiste en un calentamiento (entre 1000 y 1200 °C) en ausencia de oxígeno hasta eliminar la practica totalidad de la materia volátil del carbón, o mezcla de carbones, que se coquizan. La mayoría del coque metalúrgico se usa en los altos hornos de la industria siderúrgica para la producción del acero (coque siderúrgico). Dada el gran consumo de coque que es necesario para el funcionamiento de los altos hornos , los hornos de coquización suelen ser una instalación anexa a las industrias siderúrgicas. El coque metalúrgico también se utiliza en la industria de la fundición del hierro (coque de fundición). En general, el coque de función suele ser de un tamaño mayor que el siderúrgico.

Coquización

Se conoce con el nombre de **carbonización** al proceso de destilación destructiva de sustancias orgánicas en ausencia de aire para dar un producto sólido rico en carbono, además de productos líquidos y gaseosos. La carbonización de madera y otros materiales vegetales produce carbón vegetal. La carbonización de cierto tipo de carbones minerales (carbones coquizables, i.e. carbones bituminosos o hulla), o mezclas de estos carbones, producen el coque. En este caso el proceso de carbonización es denominado coquización.

La **coquización** se diferencia de la **carbonización** en que durante el proceso de calentamiento en atmósfera inerte de los carbones coquizables o cualquier otra sustancia que de lugar a un coque, como por ejemplo la brea u otros materiales termoplásticos, se pasa por un estado fluido transitorio durante un determinado intervalo de temperaturas que varía según el material que se esté coquizando (en el caso de los carbones coquizables este intervalo puede oscilar entre los 350 y 500 °C).

Pasado el intervalo fluido (también denominado etapa plástica) se forma el **semicoque**. Al seguir aumentando la temperatura sigue el desprendimiento de gases hasta que finalmente se forma el **coque**. Durante la etapa fluida, o plástica, se produce una total reorganización en la micro estructura del material. Así, mientras que los carbonizados presentan una microestructura desordenada y, salvo raras excepciones, no pueden ser grafitizados (i.e. carbones no grafitizables); los coques presentan una microestructura más ordenada y pueden ser grafitizados si se someten a un proceso de grafitización (i.e. carbones grafitizables).

El primer uso de coque en el horno alto se debió a Abraham Darby en 1709, en Coalbrookdale (Inglaterra). Ésta es una fecha histórica, puesto que la aplicación con éxito del coque en el horno alto fue responsable del desarrollo posterior de la industria del hierro y del acero, y del comienzo de la Revolución Industrial.

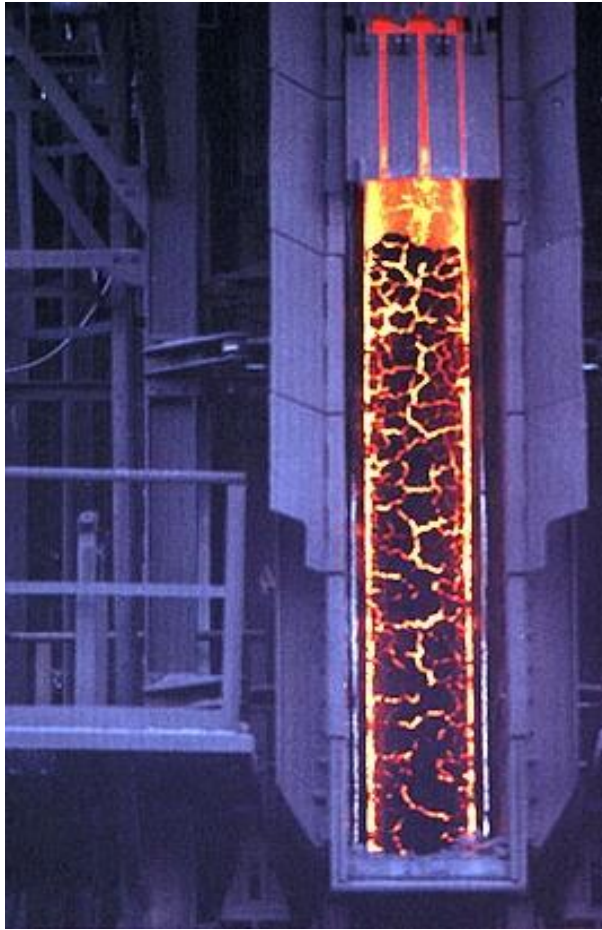
El proceso primitivo de calentar el carbón en pilas para producir coque permaneció como el más importante durante aproximadamente un siglo. No obstante, un horno con forma de colmena fue desarrollado en 1759 en Newcastle (U.K.), siendo este tipo de hornos usado todavía en algunas partes del mundo. Sin embargo, el rápido incremento de la demanda de coque en el siglo XIX dio lugar a la introducción de los hornos de cámara rectangular, capaces de ser descargados utilizando máquinas. Estos hornos, al principio de tipo no recuperativo, pero desde 1882 capaces de recuperar subproductos (gases, breas y otros compuestos químicos), son los antecesores de los hornos actuales de gran capacidad. En todos ellos se observan las características básicas de los hornos modernos:



Batería de hornos de coque

retornando una parte del mismo a los hornos para su calentamiento.

- (i) Están contruidos en baterías.
- (ii) Poseen cámaras rectangulares separadas por paredes huecas que contienen los canales de calentamiento, en los cuales el gas se quema para calentar el horno.
- (iii) Son cargados por una máquina y descargados por una deshornadora mecánica, después de la retirada de las puertas de ambos lados.
- (iv) El gas sale del horno por el tubo montante y se lleva a la planta de subproductos,

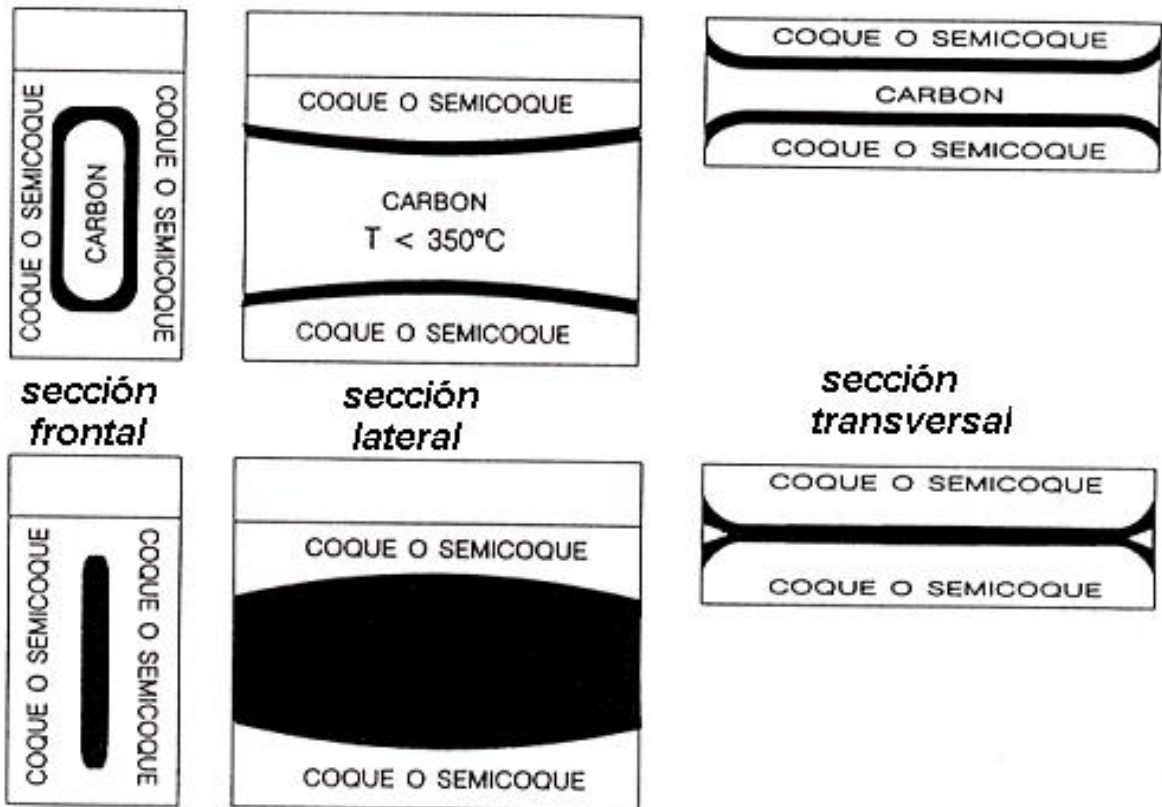


Horno de coque a punto de ser deshornado

Las baterías modernas únicamente difieren de éstas en la escala y la sofisticación de los detalles. Una batería moderna puede estar formada por unos 70 hornos de coque. Cada horno tiene del orden de 6 m de altura, 450 mm de anchura y 16 m de longitud o fondo. Esto significa unos 37 m³ de volumen y unas 30 t de carbón por horno. El aumento de la anchura de los hornos, junto con una velocidad de coquización más baja, al utilizar cámaras más anchas, dio lugar a resultados inesperados en cuando a la ampliación de la gama de carbones que podían ser coquizados.

El empuje

Es conocido que al calentar los carbones coquizables en atmósfera inerte, pasan por un estado plástico en un intervalo de temperaturas que oscila entre 350 °C y 500 °C, dependiendo del tipo de carbón. Dentro del horno existirán, por lo tanto, dos zonas plásticas que tienden a desplazarse perpendicularmente a la dirección de calentamiento y hacia el centro del horno a medida que progresa la coquización. Además, dado que tanto la solera como la bóveda del horno son también superficies calientes, aparecerán otras dos zonas plásticas secundarias, que se desplazan en dirección vertical.

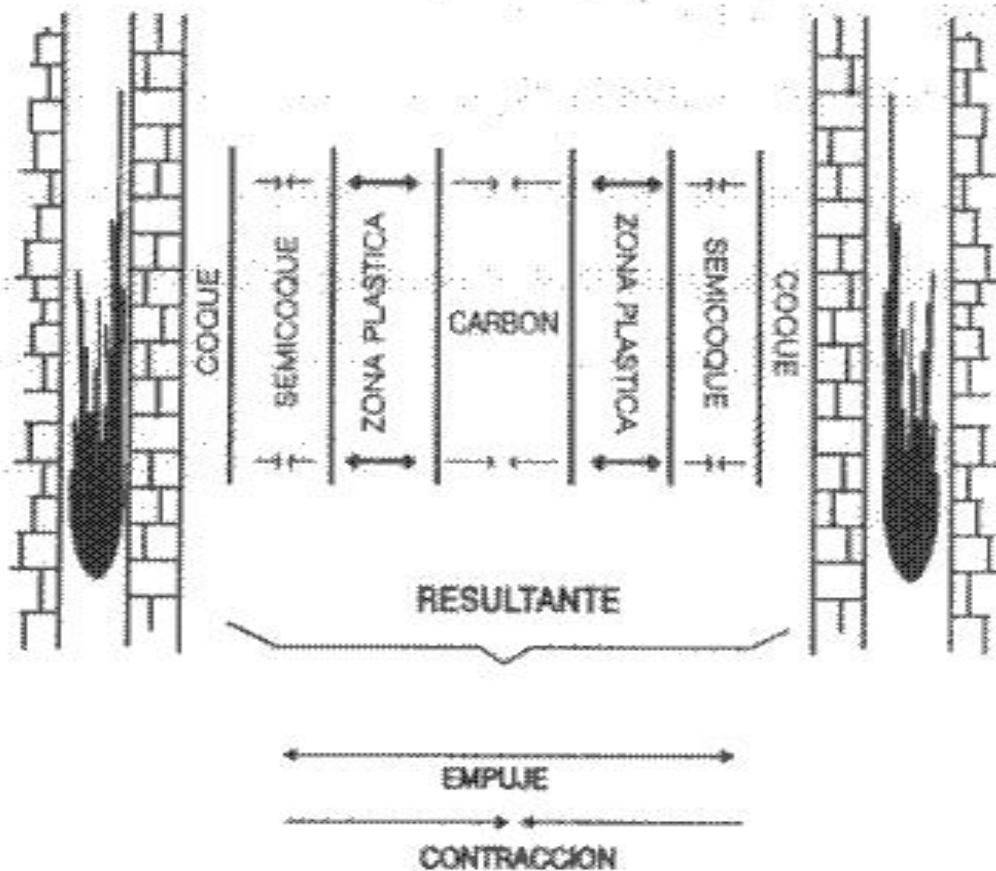


Evolución de la zona plástica durante la coquización en un horno de coque

El proceso durante el cual se desarrolla el fenómeno denominado "empuje" se puede dividir en dos etapas: antes del encuentro de las dos zonas plásticas, y en el momento en que se realiza este encuentro (temperatura en el centro inferior o superior a 350 °C, respectivamente). En la primera etapa, la presión existente en el carbón que está dentro de la envoltura plástica, es del orden de 20 a 40 mbar en el centro de la carga. Por el contrario, la presión en el seno de las capas plásticas, es muy elevada y al transmitirse a los pies derechos por intermedio del semicoque y coque origina el empuje.

A lo largo de la primera etapa existe un crecimiento del empuje y de la presión interna en las zonas plásticas. Ello es debido, por una parte, a la disminución del gradiente térmico a medida que nos aproximamos al centro del horno, lo que hace que los gases tengan que atravesar un mayor espesor de la zona plástica. Por otra parte, los vapores de aceites y alquitranes que se desprenden de las zonas plásticas se van condensando en las zonas menos calientes, con lo que resulta que el carbón estará más impregnado de aceites y alquitranes cuanto más nos aproximamos al centro y por tanto aumentará el desprendimiento gaseoso y en consecuencia la presión. Cuando se encuentran en el centro las dos capas plásticas forman una única capa plástica de anchura doble, produciéndose una subida brusca de la presión de los gases, que ahora tienen una gran dificultad para escapar. En este momento se produce la presión y el empuje máximos.

El hinchamiento o expansión de la zona plástica se corresponde con una contracción del semicoque y con la posibilidad de compresión del carbón que aún no ha entrado en la zona plástica. Se producen así dos fenómenos contrapuestos, uno de expansión o empuje hacia las paredes del horno de la fase plástica y otro de contracción del semicoque y el carbón. La resultante de estos dos fenómenos puede dar lugar a que el empuje sobre las paredes del horno alcance valores peligrosos para la integridad del propio horno, si predomina la expansión (carbones peligrosos). Por contra, si predomina la contracción los carbones serán no peligrosos y perfectamente coquizables.



Fuerzas que se desarrollan durante la coquización

El coque metalúrgico en el horno alto

El coque metalúrgico es utilizado como combustible y reductor en distintas industrias, pero su principal empleo es en el horno alto (coque siderúrgico).

El coque cumple tres papeles principales en el horno alto:

(i) Como combustible, proporcionando calor para los requerimientos endotérmicos de las reacciones químicas, y para la fusión de la escoria y del metal. Este papel ha perdido cierta importancia debido a las adiciones de fuel y gas por las toberas y, recientemente, por la inyección de carbón.

(ii) Como reductor que produce y regenera los gases para la reducción de los óxidos de hierro.

(iii) Como soporte de la carga y responsable de la permeabilidad de la misma. Este papel es cada vez más importante, a medida que aumenta el tamaño de los hornos altos.

Calidad del coque metalúrgico

La calidad del coque está en función del uso específico a que esté destinado. Así, por ejemplo, el coque de horno alto va a tener que soportar una gran carga, debido al material que existe encima de él, y que aumentará a medida que va descendiendo en el horno alto hasta llegar a la zona de reacción. Para soportar esa presión sin desmoronarse antes de llegar a reaccionar, ha de poseer una buena resistencia mecánica. Por otro lado, los trozos de coque, a medida que descienden en el horno alto, se van a ver sometidos a una acción continua de los gases oxidantes que se desprenden en la zona de reacción y que ascienden por el horno hasta salir por su parte superior. En estas circunstancias, el coque necesita presentar una reactividad moderada frente a los gases desprendidos para poder llegar, lo más íntegramente posible, a la zona de reacción con el mineral de hierro. Para conseguir esto, se requiere un coque con una textura porosa adecuada, que hagan que su reactividad sea lo más idónea posible.



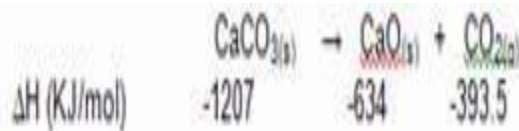
1.5 Calcinación.

El concepto calcinación es la eliminación de agua y gases atrapados químicamente en el concentrado, de los cuales se pueden considerar los hidróxidos, carbonato, sulfatos y compuestos hidratados.

1.5.1 Termodinámica de la calcinación.

Un estudio termodinámico de la calcinación nos va a mostrar el sentido hacia donde se desplaza la reacción en las condiciones estándar (25° C y 1 atm de presión) ya sea hacia los productos o reactivos y el tipo de la reacción a desarrollar, si es exotérmica o endotérmica.

Analizando la calcinación de un carbonato: $\text{CaCO}_{3(s)} \rightarrow \text{CaO}_{(s)} + \text{CO}_{2(g)}$ como queremos la descomposición del carbonato el sentido de la reacción ya se ha definido y es de izquierda a derecha, pero es necesario saber si la reacción genera o absorbe calor para desplazarse en el sentido deseado; y es necesario calcular el cambio de entalpia, obteniendo los valores de entalpia a 298 °K para productos y reactivos, de las tablas termodinámicas.



Cambio de entalpía.

$$\Delta H(\text{Rxn}) = \sum \Delta H(\text{productos}) - \sum \Delta H(\text{reactivos}) = [\Delta H(\text{CaO}) + \Delta H(\text{CO}_2)] - [\Delta H(\text{CaCO}_3)]$$

Sustituyendo los valores obtenidos queda:

$$\Delta H(\text{Rxn}) = \left\{ \left(-634 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \right) (1 \text{ mol}) + \left(-393.5 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \right) (1 \text{ mol}) \right\} - \left\{ \left(-1207 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \right) (1 \text{ mol}) \right\} = 179.5 \text{ KJ}$$

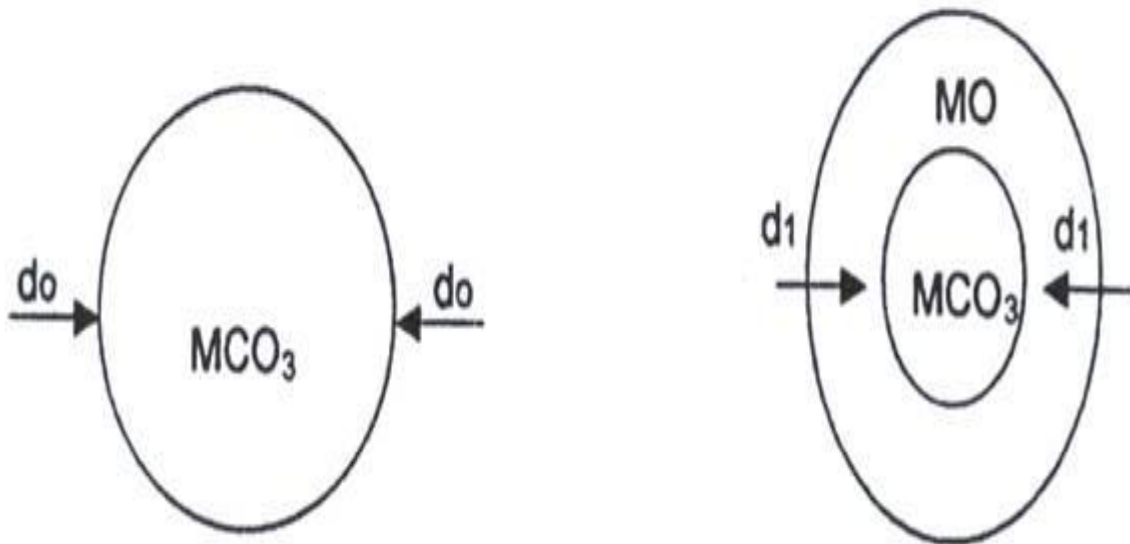
El resultado positivo nos indica que la reacción es endotérmica y que requiere calor para desplazarse de izquierda a derecha.

1.5.2 Cinética de la calcinación.

El sueco, Jacobus Herlcus Van't Hoff, (1852 – 1911) sentó las bases para el estudio de la cinética química, al mostrar la influencia de la concentración y la temperatura en el equilibrio fisicoquímico de las reacciones.

La cinética pretende determinar la rapidez con que se desarrolla una reacción, y a su vez, poder acelerarla o retardarla, mediante la modificación de los parámetros originales como son: La temperatura, radiación de luz que absorben los átomos, y los catalizadores en la reacción.

La cinética se basa en el modelo del núcleo sin reaccionar que se encoge, en el cual considera a una partícula esférica con un diámetro (d0), que reacciona bajo la acción del calor.



Pasado un tiempo "t" en que se dio la reacción de calcinación, se corta la partícula esférica por la mitad, para observar el avance de dicha reacción, apreciándose lo siguiente:

a.- La reacción de la calcinación $MCO_3 = MO + CO_2$ se presentó en la superficie donde la temperatura es igual a la de calcinación.

b.- La reacción continua hacia el centro de la partícula, pero la temperatura en esta zona no fue suficiente para la calcinación.

c.- Un núcleo de reactivo de diámetro "d1" menor al diámetro original "d0" ($d_1 < d_0$), queda sin reaccionar, disminuyendo de esta manera, la eficiencia de la reacción.

El mecanismo sugerido por la cinética (para que reaccione dicho núcleo de diámetro "d1"), es el siguiente:

1.- Como la reacción de calcinación es endotérmica, es necesario difundir la temperatura de calcinación al frente de reacción "interface" (limite de contacto entre d_1 y d_0).

2.- Con el valor de T_d (temperatura adecuada para la calcinación), la reacción $MCO_3 = MO + CO_2$ es rápida en sí misma.

3.- La reacción de calcinación genera dióxido de carbono como producto, es necesario difundirlo hacia el exterior de la partícula a través de la capa producto, porque al aumentar la concentración frenaría la reacción hasta alcanzar el equilibrio.

La cinética identifica que el paso más lento que controla una reacción, es la difusión del calor, hacia la interface o núcleo sin reaccionar, y para activar la reacción y aumentar la eficiencia de la misma, es necesario conocer los parámetros que afectan la difusión térmica o transferencia de calor; dichos factores son: tamaño de partícula, conductividad térmica de la capa producto (naturaleza del material) y el gradiente de temperatura existente.

1.6 Principios de los procesos de aglomeración.

Son los procesos en los cuales el mineral o concentrado fino, se transforma en terrones o partículas de mayor tamaño, con el propósito de evitar los embanques y el arrastre de polvos metálicos.

El producto final de la aglomeración debe cumplir con:

- Resistencia a la compresión.
- Resistencia a la abrasión.
- Porosidad ó reactividad.
- Tamaño adecuado de partícula.

1.6.1- Sinterización.

Es un proceso de aglomeración para partículas con un diámetro mayor o igual a 200 mallas, su objetivo es permitir la unión entre partículas en las zonas de contacto para formar cuellos en dichas aras de contacto,, utilizando un calentamiento a temperaturas menores al punto de fusión del mineral. Al calentar las partículas se ablandan en la superficie ya que se producen pequeñas fases fundidas y al estar en contacto unas con otras se unen a través de un crecimiento de cristales o por medio de una difusión en estado sólido.

La capacidad de sinterización depende de la velocidad de succión del aire a través de la carga a sinterizar, y depende del vacío aplicado generalmente 0.1 a 0.2 atmósferas, de la permeabilidad de la carga, de tamaños de partículas mayores a 100 mallas, de la humedad 10% máximo, y del tipo de coque empleado.

Mecanismos de sinterización.

En la sinterización se permite la difusión de la materia en estado sólido presentándose los siguientes pasos:

- Difusión de átomos de la superficie hacia el cuello o área de contacto entre dos o más partículas.
- Difusión atómica del interior de las partículas hacia el cuello de contacto.
- Vaporización y condensación de la materia en la región del cuello de contacto.
- Recristalización de la materia cuando fueron sometidas a deformaciones ya que se libera de esfuerzos e incrementa la región de contacto.

Procesamiento general para sinterizar una carga oxidada.

- Se tienen 4 tolvas de almacenaje con diferentes contenidos en cada una, como es mineral, coque, fundente y material de retorta; de las cuales a través de bandas dosificadoras de velocidad variable se extrae la cantidad necesaria de cada una, para formar un composito y enviarlo a los patios de homogenización.
- Carga homogénea previamente sinterizada llamada sinter de retorno, se carga en el fondo del equipo para absorber calor y evitar la fusión de la parrilla y encima se carga una altura de 300 a 40 cm, del composito mineral a sinterizar.

- Se enciende la mufla y alcanza los 1700°K que es la temperatura de ignición para calentar los gases existentes en la parte superior de la carga a sinterizar.
- Se hace succión en forma descendente de los gases calientes para encender la carga e iniciar la sinterización.
- Si la carga a sinterizar contiene un 9% de pirita o un 5% de azufre se puede ahorrar el consumo de combustible.



1.6.2- Peletización.

Es una operación de aglomeración para concentrados o minerales de tamaños de 200 mallas (0.1 mm) que no es posible sinterizar, con el propósito de aumentar el tamaño de partícula y obtenerlas en forma esférica o de pelotillas, particularmente se usa para menas de hierro.

Rolado o boleado del mineral formación del pelet.- Se basa en el principio de la bola de nieve en la pendiente de un cerro, como aglutinante se utiliza en esta etapa la humedad, aunque puede ser bentonita, CaCl_2 , NaCl , FeSO_4 , CuSO_4 , CaSO_4 , cuyas funciones son regular la basicidad, hacer las partículas esféricas, aumentar la tensión superficial, la resistencia a los choques térmicos y evitar la fragilidad del pelet.

Otros factores que aumentan la aglomeración son las fuerzas de atracción (magnéticas y electrostáticas) entre las partículas y las propiedades físicas (humectabilidad, capilaridad o porosidad del material, superficie de la partícula, forma, aspereza) y la estructura cristalina.

El equipo puede ser un tambor rotatorio o un disco con cierta inclinación como se muestra en la figura:



El tamaño de partícula a obtener varía de 10 a 30mm, aunque se pueden fabricar de 3mm. Estas son llamadas micropelotitas, dicho tamaño depende de:

- 1- El ángulo de inclinación del equipo: Mayor inclinación menor tamaño de partícula.
- 2- La velocidad de rotación del equipo: Mayor velocidad menor tamaño de partícula.
- 3- Humedad varía de 5 a 10% dependiendo de los huecos entre las partículas, el exceso de humedad produce una mezcla pastosa que no permite la formación del pelet.

Cocimiento o endurecimiento. Esta operación se realiza con el propósito de eliminar la humedad y algunas sustancias volátiles a una temperatura de operación entre los 1200 y 1300°C, al evaporarse el agua los pelets, se volverían polvo nuevamente ya que la tensión superficial del agua mantenía unidas las partículas, pero por la adición del aglutinante permanece su forma aún después de la cocción.

Las características generales del pelet deben ser resistencia a la abrasión para soportar los medios de transporte que los conduce hacia la cocción, a la compresión para soportar el peso de la carga sobre ellos en la cocción y en los hornos para obtener el metal, la porosidad ya que aumenta la permeabilidad y la transferencia de calor hacia el núcleo, el tamaño y forma homogéneos para permitir un mayor flujo de gases entre las partículas y hacia el núcleo del pelet, y la composición química homogénea para aumentar la capacidad de reducción del mineral.



1.7- Chatarra y su preparación.

Una materia prima muy importante para la fabricación de metales ferrosos es la chatarra; esta representa cerca del 50% de carga en el alto horno, 30% en el proceso básico de oxígeno, y usualmente el 100% de la carga en la fabricación de acero en el horno de arco eléctrico.

La chatarra debe de ser limpia, no tener contaminación por no metales que tienen que ser removidos en las operaciones tales como pedazos de concreto adheridos a la chatarra estructural, caucho y plástico presentes en la chatarra de automóviles.

El término "limpia" también incluye elementos no deseados como sulfuros de la acerería, y zinc el cual se volatiliza y se oxida de nuevo con la deposición subsecuente en los conductos del gas que dañan gravemente sus materiales refractarios. El plomo se filtra a trabes del fondo del alto horno y dañándolo de esta manera. El estaño afecta de forma marcada incluso en pequeñas cantidades. El cobre actúa de forma similar, pero es menos dañino.

La anterior consideración hace dos clases diferentes muy importantes de chatarra no deseada en los molinos de acero. Chatarra del incinerador de la ciudad y cuerpos automotrices. La chatarra de la incineración de la ciudad es muy rica en estaño de las latas. Completas cargas de acero han tenido que ser desechadas cuando la cantidad de estaño se muestra por encima del 0.06%. A de mas esta chatarra usualmente trae muchos sulfuros, generalmente por aceites usados en la incineración y a menos que este bien preparado por la separación magnética, también tendrá mucha ceniza inútil.

Las carrocerías de los cuerpos automotrices traen generalmente mucho cableado de cobre, zinc para la impermeabilización del moho. Plomo y estaño de la soldadura y sulfuros de los plásticos.

Unas típicas instalaciones consisten en:

Retiro manual y fácil de piezas de chatarra, recuperables y rentables. (Cobre y plomo)

Un martillo pesado u otro molino empleado para desintegrar los cuerpos.

Destripador o desfibradora.

Tamiz vibrador: Este remueve muchos no metales, pues soportan el impacto de las operaciones precedentes.

Horno de ignición: Este remueve la mayoría de los no metales que resisten el impacto.

Separador magnético: Los valores no ferrosos se pueden recuperar de la fracción no metálica por la costosa clasificación manual en las correas. (Peters, 1982)

MATERIAS PRIMAS PARA LA PRODUCCIÓN DE HIERRO

La forma esferoidal del grafito que caracteriza al hierro dúctil es producida usualmente con un contenido de magnesio de aproximadamente de 0.04 a 0.06 %.

El magnesio es un elemento altamente reactivo a la temperatura del hierro fundido, combinándose fácilmente con oxígeno y azufre.

Para economizar magnesio y por la limpieza del metal, el contenido de azufre del hierro a ser tratado debe ser bajo (preferiblemente $< 0.02\%$), esto se logra fácilmente en un horno eléctrico por fundición de cargas basadas en chatarra de acero a hierro en lingotes de calidad especial para la producción del hierro dúctil, junto con chatarra de hierro dúctil.

El bajo contenido de azufre puede obtenerse también por fundición en una cúpula básica, ya que el ácido del hierro fundido de la cúpula tiene un alto contenido de azufre y normalmente necesita ser desulfurado antes del tratamiento por desulfurización continua o en serie en un cucharón o recipiente especial.

El tratamiento en cúpula ácida del hierro fundido sin la desulfurización previa no es recomendable, porque el hierro consume más magnesio y produce excesiva escoria de sulfuro de magnesio, que es difícil de remover por completo.

Para producir hierro dúctil con la mejor combinación de resistencia, alta ductilidad y dureza, las materias primas que deben elegirse serán aquellas con bajo contenido de elementos indeseables, particularmente aquellos que promueven una matriz de estructura perlítica.

Un bajo contenido de magnesio es también necesario para conseguir ductilidad del material colado y para facilitar el éxito de los tratamientos térmicos para producir una estructura ferrítica. Para este propósito es necesario usar chatarra de acero de calidad especial o hierro en lingotes, también de calidades especiales.

Las calidades de alta resistencia de hierro dúctil pueden ser hechas de chatarra de acero estructural, hierro en lingotes y retornos de fundición, pero determinados elementos, tales como, plomo, antimonio y titanio, son mantenidos siempre lo más bajo posible para lograr una buena estructura de grafito.

Esos efectos indeseables, sin embargo, ser compensados con la adición de una pequeña cantidad de cerio que da un contenido residual de cerio de 0.003 a 0.01%. Un importante control de las materias primas implica la exclusión del aluminio que puede promover fragilizaciones y defectos superficiales en el siguiente cuadro se muestran los contenidos típicos de los elementos menores de tres materias primas usadas en la manufactura de hierro dúctil.

CONTROL DE LA COMPOSICIÓN.

Carbono. En la práctica de la fundición en hornos eléctricos, el carbono deriva del hierro en lingotes, carburizantes y chatarra de hierro fundido.

La carburización de cargas de chatarra de acero se logra agregando grafito de bajo azufre o coque grafitizado, la proporción de solución y la recuperación del carbono aumenta con la pureza de la fuente de carbono usada. En cúpula de fundido, el carbono también deriva del coque cargado.

El rango óptimo para este elemento es de 3.4 a 3.85%, dependiendo del contenido de silicio. Por encima de este rango, hay peligro de flotación de grafito, (especialmente en secciones pesadas) y de un aumento en la expansión durante la solidificación, que conlleva a fragilizaciones, particularmente en moldes de arena blanda. Por debajo de este rango, las fragilidades pueden también ocurrir por la falta de carbono. Silicio.

El silicio entra al hierro dúctil desde las materias primas, incluyendo chatarra de hierro fundido, hierro en lingotes y ferroaleaciones, y en pequeña parte desde el contenido de silicio de las aleaciones agregadas durante la inoculación. El rango preferente es de alrededor de 2 a 2.8%. Más bajos niveles de silicio conducen a una alta ductilidad en hierros tratados térmicamente, pero a peligros de carburos en las secciones delgadas, mientras que un alto contenido de silicio acelera el recocido y ayuda a evitar carburos en las secciones delgadas.

Así como crece el contenido de silicio, la temperatura de transición dúctil-frágil en hierro ferrítico aumenta. La dureza y la resistencia a la tracción también aumentan. Carbono equivalente (CE). Los contenidos de carbono, silicio y fósforo pueden ser considerados juntos como un valor de CE, que puede ser una guía muy útil para analizar el comportamiento de las fundiciones y algunas propiedades. Hay varias formulas de CE, y son muy usadas para calcular las propiedades de la fundición y la estructura solidificada del hierro.

Cuando el carbono equivalente: $CE = \frac{C\%}{1} + \frac{1}{3}(Si\% + P\%)$ Es igual a 4.3%, el hierro será de composición y estructura completamente eutéctica, y la desviación del valor de CE desde este valor es una medida de la cantidad relativa de eutéctico. Si CE es menor que 4.3%, habrá una porción de dendritas; si CE es mayor que 4.3%, habrá nódulos de grafito primario en la estructura.

El grado de saturación Sc, es a veces usado, para expresar la proximidad a la composición eutéctica. El valor de Sc puede determinarse por la siguiente ecuación:

$$Sc = \frac{\%C}{4.23} - 0.3(\%Si + \%P)$$

Cuando Sc es menor que 1, el hierro es hipoeutéctico y contendrá dendritas primarias. Si Sc es mayor que 1, habrá grafito primario en la estructura. El carbono equivalente líquido (CEL) es una medida de la temperatura de líquidus, la cual tiene un mínimo valor en la composición eutéctica; que es $CEL = \%C + \%Si / 4 + \%P / 2$. la máxima fluidez ocurre cuando es alcanzado este valor.

El CEL solo puede ser medido convenientemente para hierros no tratados previamente con magnesio. Es usual pretender valores cercanos a 4.4 – 4.5, valores muy superiores a estos se restringen para evitar la flotación del grafito.

Manganeso. La principal fuente de manganeso es la chatarra de acero usada en la carga. Este elemento debe ser evitado para obtener la máxima ductilidad. En hierros ferríticos este debe ser de 0.2% o menos. En hierros para ser usados en la condición perlítica, este puede estar en 1%.

El manganeso esta sujeto a una microsegregacion indeseable, esto es así especialmente en secciones pesadas, en las que el manganeso fomenta la aparición de carburos en los bordes de grano, lo cual promueve a una baja ductilidad, baja tenacidad y perlita persistente. Magnesio.

El contenido de magnesio requerido para producir grafito esferoidal, varia entre 0.04 y 0.06%. Si el contenido de azufre inicial es mas bajo que 0.015%, un contenido de magnesio mas bajo (0.035 a 0.04%) pude ser satisfactorio. Si el contenido de magnesio es demasiado bajo pueden obtenerse estructuras de grafito compacto con propiedades inferiores, mientras que un contenido demasiado alto puede promover a defectos superficiales. Azufre.

El azufre deriva del cargado de materias primas metálicas. En cúpulas de fundido, este también es absorbido por el coque. Antes del tratamiento con magnesio, el contenido de azufre debe ser lo más bajo posible, preferiblemente por debajo de 0.02%.

El contenido final de azufre del hierro dúctil está generalmente por debajo del 0.015%, pero si el cerio está presente, éste puede ser más alto por la presencia de sulfuro de cerio en el hierro. Contenidos finales excesivos de azufre son asociados con escorias de sulfuro de magnesio.

Cuando se usa cúpula de hierro fundido, es común desulfurizar el metal – generalmente con cal o carbura de calcio, continuamente o en series, antes del tratamiento de magnesio- a niveles de 0.02% o menores.

Cerio. Puede ser agregado para neutralizar partículas indeseables de elementos que interfieren en la formación del grafito esferoidal y para ayudar a la inoculación, en % que pueden variar entre 0.003 y 0.01%. En fundiciones de muy bajo contenido de elementos menores, el cerio puede ser indeseable y puede promover formaciones de grafito no esferoidal, especialmente en secciones gruesas.

El cerio es agregado como un constituyente menor en aleaciones de adición de magnesio e inoculantes para mejorar la estructura del grafito. Elementos menores que promueven el grafito no esferoidal. Plomo, antimonio, bismuto y titanio son elementos indeseables que pueden incorporarse en pequeñas partes con las materias primas en la carga, pero sus efectos pueden ser neutralizados con la adición de cerio.

Elementos menores que promueven la perlita. Níquel, cobre, manganeso, estaño, arsénico y antimonio, todos promueven la perlita y son listados en orden creciente de influencia. Pueden ingresar en el hierro como partículas constituyentes de la materia prima.

El cobre hasta un 0.3% y el estaño hasta un 0.1% son usados deliberadamente cuando se requieren estructuras completamente perlíticas. Una carga de alta pureza es esencial para lograr estructuras completamente ferríticas o con recocido mínimo. Aluminio. La presencia de finísimas cantidades uniformes de aluminio en el hierro dúctil promueve la porosidad subsuperficial y superficial, por lo tanto debe ser evitado. La mayoría de las fuentes comunes de aluminio son contaminantes en aceros y en chatarra de hierro fundido (como ejemplo tenemos, los pistones de aluminio provenientes de las chatarras de motores de aluminio).

Otra fuente es el aluminio contenido en los inoculantes. Un porcentaje de aluminio tan bajo como 0.01% puede ser suficiente como para causar cavidades en el hierro dúctil conteniendo magnesio. Fósforo. Es normalmente mantenido por debajo del 0.05%, porque promueve fragilidades y reducciones en la ductilidad. Elementos menores que promueven carburos. Cromo, vanadio y boro son todos promotores de carburos. El magnesio puede también acentuar los efectos estabilizantes de carburos de estos elementos, especialmente en secciones pesadas donde la segregación provoca la formación de carburos en los bordes de grano. Son controlados por una cuidadosa selección de las materias primas metálicas para fundición.

Elementos aleantes que promueven el endurecimiento.

El níquel hasta un 2% y el molibdeno hasta un 0.75% son los elementos que se agregan generalmente para promover el endurecimiento cuando se vayan a aplicar tratamientos térmicos. Pequeñas cantidades de manganeso y cobre promueven también el endurecimiento, pero son normalmente usados en combinación con otros elementos. El cobre tiene una solubilidad limitada y debe ser mantenido por debajo del 1.5%.

Elementos aleantes para lograr propiedades especiales.

Las estructuras de matriz austenítica son logradas por adición de 20% o más cuando se requiere resistencia al calor, a la corrosión o a la oxidación, y hasta un 5% de cromo puede también agregarse para tales fines. Los contenidos de níquel hasta un 36% producen hierros de propiedades controladas de baja expansión. Hasta un 10% de manganeso en los hierros austeníticos conduce a una baja permeabilidad magnética, y se acepta un bajo contenido de níquel para lograr una austenita estable. Un contenido de silicio de hasta un 6% produce estructuras de matriz ferríticas con reducido crecimiento, distorsión térmica y rotura a elevadas temperaturas. La adición de hasta un 2% de molibdeno a los hierros perlíticos, ferríticos y austeníticos confieren mejoras en el creep y resistencia a temperaturas elevadas.



Impacto ambiental en la Fabricación de hierro y acero

La fabricación de hierro y acero implica una serie de procesos complejos, mediante los cuales, el mineral de hierro se extrae para producir productos de acero, empleando coque y piedra caliza. Los procesos de conversión siguen los siguientes pasos:

- (a) producción de coque del carbón, y recuperación de los subproductos,
- (b) preparación del mineral (p.ej., sintetizar y formar pelotillas),
- (c) producción de hierro,
- (d) producción de acero
- (e) fundición, laminación y acabado.

Se pueden realizar estos pasos en una sola instalación, o en varios lugares completamente separados. En muchos países en desarrollo, es fabricado el acero de chatarra, en un horno de arco eléctrico. Por eso, los pasos (a) a (c), posiblemente no siempre sean aplicables a todos los proyectos de fabricación de acero. Una forma alternativa para producir el acero es la de la reducción directa, utilizando gas natural e hidrógeno. El producto de este proceso, hierro esponjoso, se convierte en acero en un horno de arco eléctrico; luego se funden los lingotes, y para esto se producen los productos no planos con una o dos laminadoras.

Impactos ambientales potenciales

Durante la fabricación de hierro y acero se producen grandes cantidades de aguas servidas y emisiones atmosféricas. Si no es manejada adecuadamente, puede causar mucha degradación de la tierra, del agua y del aire. En los siguientes párrafos, se presenta una descripción breve de los desperdicios generados por los procesos de fabricación de hierro y acero.

Producción de coque y recuperación de subproductos

El coque es producido por el calentamiento de carbón bituminoso, que expulsa los componentes volátiles. El coque es empleado como agente de reducción, en los hornos altos que producen hierro, para extraer el metal del mineral; durante este proceso, cierta cantidad de carbón se disuelve en el hierro líquido.

El proceso de formación del coque o coquificación, despiden grandes cantidades de gas conteniendo monóxido de carbono; esto facilita la producción de toda una serie de químicos: alquitrán mineral, aceites livianos crudos (conteniendo benceno, tolueno, xileno), amoníaco, naftaleno, y cantidades importantes de vapor.

La mayoría de estas sustancias pueden ser recuperadas y refinadas como productos químicos; el resto del gas del horno de "coquificación" se emplea internamente en los diferentes procesos y hornos para calefacción, y su excedente de gas puede ser utilizado para generar energía eléctrica, o como materia prima para la producción de químicos.

La producción de coque produce grandes cantidades de aguas servidas que contienen amoníaco y otros componentes liberados durante el proceso de coquificación. Esta agua contiene concentraciones potencialmente tóxicas de fenoles, cianuro, tiocianato, amoníaco; sulfuro y cloruro. La producción de coque emite humo visible, polvo de coque, y la mayoría de las sustancias volátiles mencionadas anteriormente.

Preparación del mineral

Los minerales que contienen hierro (hematita, magnetita) se trituran, se clasifican y se aglomeran, mediante sinterización, para formar pelotillas, nódulos o briquetas, a fin de tener el mineral concentrado y preacondicionado para alimentarlo a los hornos altos. La preparación del mineral puede generar grandes cantidades de desechos producir emisiones de polvo y dióxido de azufre.

Producción de hierro

El hierro es producido en el alto horno mediante la conversión de los minerales en hierro líquido, a través de su reducción con coque; se separan con piedra caliza, los componentes indeseables, como fósforo, azufre, y manganeso. Los gases de los altos hornos son fuentes importantes de partículas y contienen monóxido de carbono. La escoria del alto horno es formada al reaccionar la piedra caliza con los otros componentes y los silicatos que contienen los minerales. Se enfría la escoria en agua, y esto puede producir monóxido de carbono y sulfuro de hidrógeno.

Los desechos líquidos de la producción de hierro, se originan en el lavado de gases de escape y enfriamiento de la escoria. A menudo, estas aguas servidas poseen altas concentraciones de sólidos suspendidos y pueden contener una amplia gama de compuestos orgánicos (fenoles y cresoles), amoníaco, compuestos de arsénico y sulfuros.

Producción de acero

El hierro producido en los altos hornos es refinado mediante el proceso de fabricación de acero, en el que es eliminada la mayor parte del carbón que se disolvió en el hierro líquido. En las plantas antiguas, el proceso de fabricación de acero todavía emplea el hogar abierto, pero en las plantas nuevas el método favorito es el del horno básico de oxígeno; se emplea oxígeno para quemar el carbón que está disuelto en el hierro. En ambos procesos, se producen grandes cantidades de gases que contienen monóxido de carbono y polvo. Estos gases pueden ser reciclados luego de eliminar el polvo.

Fundición, laminación y acabado

El paso final de la producción de acero convierte los lingotes de acero en los productos finales deseados. Los lingotes se laminan y forman placas, alambres, planchas, barras, tubos y varillas. Durante la laminación, se emplean grandes cantidades de aceite hidráulico y lubricante.

Además, los bajos químicos (para eliminar los óxidos) y la limpieza del producto final para remover el aceite y grasa, pueden generar volúmenes significativos de desechos líquidos ácidos, alcalinos y de solventes. En las plantas modernas, se omite, a menudo, el paso de la fundición de lingotes y se utiliza hierro líquido, directamente, en un proceso de fundición y laminación continua.

Reducción directa: Mini fábricas de acero

La mini fábrica está formada por un horno de reducción directa y un horno de arco eléctrico y fundición continua de lingotes. Es aquí donde se reduce el mineral de hierro utilizando gas natural (o productos de petróleo), el mismo que se convierte, en un horno de reformación, en un gas que contiene hidrógeno. El hierro esponjoso que se produce en el proceso de reducción, se alimenta al horno de arco eléctrico, a fin de convertirlo en acero. A menudo se emplean grandes cantidades de chatarra en este horno, además del hierro esponjoso. Al omitir el proceso de coquificación y utilizar minerales de alta calidad, hace que este proceso alternativo produzca menos contaminación que el proceso convencional de alto horno; sin embargo, pueden haber emisiones significativas de polvo y monóxido de carbono.

Desechos sólidos

Las fábricas de hierro y acero producen grandes cantidades de desechos sólidos, como escoria de horno alto, que puede ser utilizada para producir ciertos tipos de cemento, si se granula correctamente. La escoria básica, otro desecho sólido, se emplea como fertilizante, y se produce al utilizar los minerales de hierro que poseen un alto contenido de fósforo. La recolección de polvo en las plantas de coque, sintetización y en el alto horno, produce desechos que, en teoría, pueden ser parcialmente reciclados. El diseño debe aprovechar al máximo el reciclaje de los desechos sólidos recolectados en los espesadores, tanques de asentamiento, ciclones de polvo, precipitadores electrostáticos y áreas de almacenamiento de las materias primas. Hay que identificar en el plan del proyecto, las medidas apropiadas de eliminación definitiva de desechos sólidos, y éstas deben ser evaluadas completamente durante los estudios de factibilidad del proyecto. Se debe investigar la facilidad con que se puede lixiviar estos desechos; los depósitos de desperdicios sólidos deben ser forrados y monitoreados continuamente, a fin de prevenir la contaminación de las aguas freáticas. (Ver el capítulo: "Manejo de peligros industriales")

Desechos líquidos

Los solventes y ácidos que se utilizan para limpiar el acero son, potencialmente, peligrosos, y deben ser manejados, almacenados y eliminados como tal. Algunos de los subproductos que se recuperan son peligrosos o carcinogénicos, y se debe tomar las medidas adecuadas para recolectar, almacenar y despachar estos productos. Es necesario monitorear las fugas de líquidos y gases.

Reducción de los desechos

Si no se toman las medidas apropiadas, la contaminación atmosférica puede convertirse en un problema muy serio. Será necesario, durante la etapa de diseño, estudiar formas de reducir la contaminación atmosférica, mediante el uso de equipos especiales que eliminarán el polvo seco, para separar los gases y recuperar los químicos valiosos, y remover los contaminantes tóxicos y recolectar los gases que contienen monóxido de carbono e hidrógeno, a fin de utilizarlos como combustibles secundarios en la planta, o para producir otros químicos (p.ej., metanol y amoníaco). Estas medidas pueden reducir la contaminación atmosférica y aumentar la eficiencia energética. Los químicos que causan contaminación atmosférica son: dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, benceno, tolueno, xileno, naftaleno, fenoles, benzopirina, cianuro, sulfuro de hidrógeno, y los compuestos de plomo y cinc. Se emplean grandes cantidades de agua en la fabricación de hierro y acero. Es necesario contar con sistemas de tratamiento de aguas servidas para todos los procesos de fabricación de hierro y acero, y se debe estudiar la forma de reciclar el agua servida y tratada. Debido al alto contenido de sólidos de las aguas negras que se emplean para lavar los gases, es necesario incluir amplias instalaciones de coagulación y asentamiento.

Si bien existen muchas alternativas para la planificación e implementación de los proyectos, generalmente, el proceso de fabricación de hierro y acero que se utiliza depende de las materias primas que están disponibles, y sus propiedades minerales, químicas y físicas pueden variar grandemente; de las materias primas utilizadas para el proceso de reducción en el horno alto (p.ej., coque con la inyección adicional de gas natural, aceite, o polvo de carbón); y de los combustibles utilizados en los hornos, calderas y centrales térmicas. La naturaleza de los productos finales también afecta el diseño de la planta. Una mini fábrica de acero que hace reducción directa del mineral y emplea un horno eléctrico basado en gas natural y electricidad, causará un impacto ambiental mucho menor. Los diseños recientes de plantas integradas de hierro y acero demuestran una tendencia hacia los procesos continuos que utilizan menos enfriamiento y calentamiento en las interfaces algo que es importante para ahorrar energía y causan menos contaminación atmosférica e hídrica. Existe una amplia selección de procesos y equipos para controlar la contaminación. El mejor método de control y el equipo idóneo, dependerán del volumen y composición de los contaminantes que deben ser recuperados o descargados al medio ambiente.