



FUNDICIÓN
"Recién salido del horno"

Índice temático

Objetivo	3
Hoy en día el proceso de fundición once etapas	3
Etapas del Proceso.....	4
Recepción y manejo de materias primas e insumos	4
Secado de concentrados	5
Tostación parcial de concentrados	5
Alimentación de concentrados al horno de fusión	5
Fusión de concentrados.....	6
Limpieza de escorias	8
Granallado de eje de alta ley y escorias	8
Preparación y manejo de eje de alta ley	8
Conversión de eje de alta ley.....	9
Refinación y moldeo de ánodos	10
Plantas de limpieza de gases	11

DEFINICIÓN

Para incrementar progresivamente la ley o contenido de cobre del material sometido a Fundición, proceso pirometalúrgico que -a su vez- considera las fases consecutivas de Fusión, Conversión y Refinación. Este recorrido logra que la pureza inicial de 30% a 40% contenida en el concentrado de cobre, se incremente progresivamente hasta 99,5% en el ánodo.

De las fases consecutivas, la fusión y la conversión son las más importantes por lo determinantes que resultan en el proceso general.

- La fusión tiene por objetivo concentrar el metal a recuperar, mediante una separación de fases de alta temperatura: una sulfurada rica en el metal y otra oxidada o pobre en él.
- La conversión elimina el azufre y el hierro presentes en la fase sulfurada, mediante oxidaciones del baño fundido para obtener un cobre final relativamente puro.

HOY EN DÍA EL PROCESO DE FUNDICIÓN ONCE ETAPAS:

1. Recepción y manejo de materias primas e insumos.
2. Secado de concentrados.
3. Tostación parcial de concentrados.
4. Alimentación de concentrados al horno de fusión.
5. Fusión de concentrados.
6. Limpieza de escorias.
7. Granallado de eje alta ley y escorias.
8. Preparación y manejo de eje de alta ley.
9. Conversión de eje de alta ley.
10. Refinación y moldeo de ánodos.
11. Plantas de limpieza de gases.



En la figura de una secuencia clásica de etapas pirometalúrgicas se muestra el rango aproximado de temperaturas involucradas. En su forma clásica, hay una secuencia alternada de etapas endo y exotérmicas, siendo las más relevantes por su tamaño las correspondientes a la fusión y la conversión. Secuencialmente, también hay un aumento paulatino de la temperatura del sistema fundido.



ETAPAS DEL PROCESO

RECEPCIÓN Y MANEJO DE MATERIAS PRIMAS E INSUMOS

El proceso se inicia con la recepción y almacenamiento de los fundentes y otros insumos en áreas especiales para el concentrado. Estos materiales, que son transportados por vía marítima o terrestre, tienen un contenido de humedad que varía entre un 6% a 8% y proviene de distintas fuentes de abastecimiento. Se descargan mediante correas transportadoras tubulares o similares para evitar derrames y daños al medio ambiente.



Un equipo extrae el concentrado desde las camas de almacenamiento hacia el domo de mezcla. La operación normal permite que mientras una de las camas se está llenando, la otra se encuentre descargando a la planta. El domo de mezcla, cuya geometría es una semiesfera metálica cerrada, debe tener capacidad suficiente para algunos días de operación y estar ubicado en las inmediaciones del área de secado. El domo prepara mediante una correa circular interna una mezcla homogénea de concentrado, para dar la estabilidad operacional requerida por el proceso de fusión.

SECADO DE CONCENTRADOS

El concentrado húmedo proveniente del domo de mezcla, es almacenado en tolvas desde donde ingresa a las líneas de secado de cada equipo de fusión que cuenta con secadores calefaccionados con vapor de agua. En esta etapa la humedad original del concentrado (entre 6% y 8%) se reduce a niveles que oscilan entre 0,2% y 0,3%.

El concentrado va reduciendo sus niveles de humedad a medida que avanza dentro un tambor metálico. En el interior circula vapor a temperatura de 180°C, por un serpentín que permite la transferencia de calor por radiación y convección. El calor requerido para el secado es suministrado por vapor saturado, a una presión de 20 bares, proveniente desde calderas de recuperación de calor de los gases generados en el proceso de fundición y que se encuentran asociadas a los respectivos hornos de fusión y conversión.

Los vahos producidos por el proceso de secado, compuestos por aire de purga (vapor de agua desprendido del concentrado y polvo arrastrado), pasan a un filtro de mangas donde se recuperan las partículas en suspensión, para ser dirigidas a las tolvas de almacenamiento de concentrado seco. Los vahos limpios son descargados a la atmósfera. El vapor condensado producto del proceso es conducido por cañerías a un estanque recuperador de condensados para su reutilización.

Debido a que la temperatura de operación del secador es de 180 °C, no se generará emisión de SO₂ al ambiente, ya que el azufre solo reacciona con el oxígeno a una temperatura superior a los 300 °C. En algunos casos puntuales,

el grado de humedad del concentrado a tratar se convierte en un parámetro importante, como en la alimentación a los procesos de fusión flash, en los que el concentrado es transportado suspendido en aire enriquecido o en oxígeno.

Así, los procedimientos Outokumpu e INCO consideran una etapa de secado de concentrado en un secador rotatorio previo a su tratamiento. Outokumpu y Convertidor Teniente en particular, necesitan grados de humedad inferiores al 0,2%.

**TOSTACIÓN
PARCIAL DE
CONCENTRADOS**

La tostación consiste en la oxidación parcial de los sulfuros del concentrado y en la eliminación parcial del azufre de éste como SO₂ y ocurre según reacciones sólido-gaseosas, a temperaturas de 500 a 800 °C, dependiendo de los productos que se desea obtener.

La fase gaseosa contiene normalmente O₂ y SO₂ en la alimentación y productos y cantidades menores de gases SO₃ y SO₂, dependiendo de las reacciones de oxidación.



**TOSTACIÓN
PARCIAL DE
CONCENTRADOS**

La tostación consiste en la oxidación parcial de los sulfuros del concentrado y en la eliminación parcial del azufre de éste como SO₂ y ocurre según reacciones sólido-gaseosas, a temperaturas de 500 a 800 °C, dependiendo de los productos que se desea obtener.

La fase gaseosa contiene normalmente O₂ y SO₂ en la alimentación y productos y cantidades menores de gases SO₃ y SO₂, dependiendo de las reacciones de oxidación.

**ALIMENTACIÓN
DE
CONCENTRADOS
AL HORNO DE
FUSIÓN**

Una vez alcanzado el nivel de humedad requerido, el concentrado es descargado por gravedad desde los secadores y transportado en forma neumática a tolvas intermedias. En ellas se encuentran, simultáneamente, los polvos recuperados de diferentes partes del proceso de fusión y el concentrado seco proveniente de los secadores. Junto a cada tolva intermedia hay una tolva de almacenamiento de cuarzo fino; el cuarzo es requerido como fundente para la formación de escoria producida por las unidades de conversión del eje alta ley (FCF) y, en menor cantidad, escoria proveniente de la refinación anódica y materiales recuperados de limpieza de canales, ductos y otros.

El concentrado seco, en conjunto con el cuarzo y en la dosificación adecuada, se extrae por un círculo neumático operado en fase densa que lo conduce por una cañería hasta el quemador del Horno Flash o de fusión inmediata, de tecnología Outokumpu.

**FUSIÓN DE
CONCENTRADOS**

El objetivo de esta etapa es formar una fase de sulfuros líquidos, compuesta principalmente por calcosina (Cu₂S), covelina (CuS), calcopirita (CuFeS₂), pirita (FeS₂) y bornita (Cu₅FeS₄). En lo posible, debe contener todo el cobre alimentado, y otra fase oxidada líquida adherida a la anterior, llamada escoria, ojalá exenta de cobre, compuesta principalmente de silicatos de hierro. Los silicatos de hierro y los fundentes forman la escoria. La mata de cobre contiene sulfuros de cobre y hierro, algunos metales preciosos y otros elementos a nivel de trazas. La escoria, pobre en el metal, es caracterizada y descartada directamente o sometida a una etapa adicional de recuperación del metal, si su contenido es alto. La mata, en cambio, pasa a una etapa posterior de conversión por oxidación.

Los concentrados sulfurados de cobre son básicamente combinaciones, en proporciones variables, de sulfuros de hierro y cobre mezclados con ganga silícea ácido o básica. Las reacciones que tienen lugar en el Horno de Fusión (HF) transcurren entre estos constituyentes del concentrado y los fundentes, y corresponden principalmente a la reducción de los óxidos de cobre por el sulfuro cuproso y a la sulfuración de los óxidos de cobre por el sulfuro ferroso. Todo el sulfuro de cobre se descompone de acuerdo con las siguientes reacciones:



La tecnología HF corresponde a un proceso de fusión-conversión continua de concentrados, desarrollado por Outokumpu, que aprovecha el calor generado en las reacciones del oxígeno presente en el aire del proceso, con los sulfuros de hierro contenidos en el concentrado alimentado al reactor. Dependiendo principalmente de las características mineralógicas o químicas del concentrado, de los flujos y enriquecimientos en oxígeno del aire soplado, se generarán importantes cantidades de calor en el reactor, suficientes para tener un proceso totalmente autógeno, donde se funden además, materiales fríos de recirculación con cobre o carga fría, generada en el proceso productivo y utilizada para regular la temperatura en el horno.

Los productos generados en este proceso son una fase rica en cobre, conocida como eje de alta ley, con un 62%-70% de cobre, una escoria con un 1%-2% de cobre y 8%-12% de Fe₃O₄, y una corriente continua de gases con un 30%-35% de SO₂ en la salida del horno. Concentración que dependerá principalmente del enriquecimiento en oxígeno del aire de proceso.

La escoria generada en el HF es evacuada por un pasaje de sangría ubicado en el extremo opuesto al punto de extracción del metal blanco, transferida por gravedad a través de una canaleta inclinada, cerrada, refrigerada y recubierta por material refractario, a un Horno Eléctrico de Limpieza de Escoria (en adelante HELE) para recuperar su contenido de cobre. Ambas canaletas, tanto la que conduce la

escoria al HELE, como la que conduce el metal blanco a la etapa de granallado, se encuentran totalmente confinadas de tal forma que los gases y vahos emanados por la extracción o sangrado de los productos (metal blanco y escoria), sean captados y conducidos mediante ventilación a un sistema de limpieza de gases secundarios, donde un filtro de mangas recupera las partículas en suspensión (las que luego son recirculadas como carga fría al HF). Luego, los gases y vahos son neutralizados y emitidos a la atmósfera.

Respecto de los gases metalúrgicos primarios producidos en el proceso (ricos en SO_2), éstos salen del HF por una torre refrigerada y pasan a una caldera donde se enfrían hasta alcanzar una temperatura de $350\text{ }^\circ\text{C}$. Transfieren su calor por radiación y convección a los tubos de la caldera para producir vapor saturado de 60 bar de presión, que se utiliza en múltiples aplicaciones como un medio calefactor en procesos de intercambio de calor. Los gases primarios, limpios en partículas y ricos en SO_2 , son forzados por un ventilador de tiro inducido y conducido a la Planta de Limpieza de Gases y el dióxido de azufre es utilizado en la producción de ácido sulfúrico. El accionar de este ventilador permite inducir el flujo de gases a través del horno y asegurar que no existirán fugas de gases con contenido de SO_2 al entorno.

El proceso de fusión ocurre a temperatura de $1.200\text{ }^\circ\text{C}$, en un sistema fundido, con suspensión de partículas sólidas en el baño, correspondiente a compuestos de alto punto de fusión (léase sílice, magnetita, entre otros).

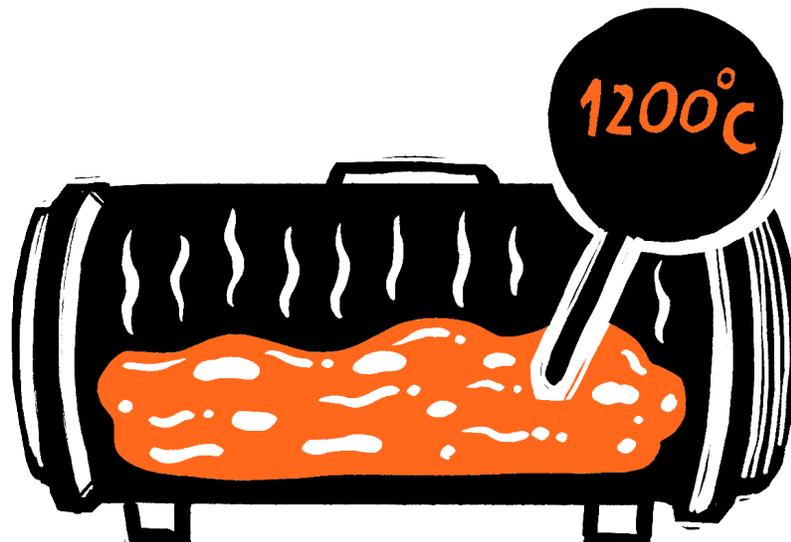
La reacción de producción de mata y escoria podemos representarla por:
Concentrado + Fundentes + Energía -----> Mata + Escoria + Gas (5)

Donde:

Mata: Cu_2S , FeS , fundamentalmente.

Escoria: FeO , Fe_3O_4 , SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , Cu_2O , otros

Gas: O_2 , SO_2 , N_2 , CO , CO_2 , H_2 , H_2O , otros.



LIMPIEZA DE ESCORIAS

La escoria fundida producida por el HF es alimentada al HELE por la gravedad a través de una canaleta cerrada y ventilada. La reducción del contenido de Fe₃O₄ permite mejorar las propiedades fisicoquímicas de la escoria optimizándose la separación y, en consecuencia, la sedimentación de las partículas de cobre. Así se logra la separación de las dos fases fundidas presentes: metal blanco con un contenido de cobre de 70% y escoria descartable con un contenido de cobre de alrededor de 0.70%. Los gases generados en el HELE son captados y conducidos a un incinerador que permite asegurar la quema total del carbón remanente no utilizado. Posteriormente, son mezclados con aire del sistema de ventilación del horno y con los gases secundarios de proceso. Esta mezcla es enfriada y conducida a un sistema de limpieza que permite la recuperación de material particulado. Los gases además de limpiados son neutralizados previo a su emisión a la atmósfera.

GRANALLADO DE EJE DE ALTA LEY Y ESCORIAS

En las operaciones modernas de fundición no se considera el transporte de materiales fundidos entre las etapas de fusión y conversión, lo que reduce al mínimo las emisiones fugitivas. Esto se consigue con la inclusión de etapas de granallado y molienda que permitan transportar materiales en estado sólido.

El proceso realizado en las plantas de granallado consiste en la granulación del material fundido, ingresa por la parte superior del pit o módulo de granulación y cae gravitacionalmente al fondo de éste. Durante esta caída el material fundido entra en contacto con agua pulverizada por un sistema de boquillas, con lo que el material se solidifica en pequeños gránulos, que caen en el fondo del pit de granulación junto con el agua inyectada. El material es recogido por un elevador de capachos perforados y luego pasa por un harnero vibratorio, donde se separa el sobretamaño una alta tasa de escurrimiento del agua. Las aguas utilizadas en el proceso de granallado (agua industrial) son condensadas y recirculadas en su totalidad dentro del mismo proceso, lo que genera una mínima emisión de vapor de agua.

PREPARACIÓN Y MANEJO DE EJE DE ALTA LEY

El eje de alta ley granallado proveniente del HF se acumula en el domo de almacenamiento. Una correa circular instalada al interior del domo permite la homogeneización requerida por el proceso de conversión. Desde el domo, el eje de alta ley es transferido mediante un equipo dosificador y una correa alimentadora móvil, a una etapa de molienda y secado constituida por líneas en serie con una unidad de conversión.

Adyacente a la tolva de eje de alta ley se encuentra una tolva de cal fina, material requerido como fundente para la formación y licuación de la escoria producida en el proceso de conversión. La alimentación del eje de alta ley al quemador se efectúa por medio de un sistema de pesaje gravimétrico (loss-in-weight feeder). Las tolvas de cal y polvos poseen su propio sistema de pesaje (loss-in-weight feeder). Un sistema neumático, (air slide) transporta la mezcla dosificada y pesada al quemador del horno de conversión.

CONVERSIÓN DE EJE DE ALTA LEY

En la etapa de conversión, el sulfuro ferroso se oxida formando dióxido de azufre, mientras que el óxido ferroso se une con la sílice y cal para formar escoria, esencialmente ferrítica. El calor de formación de esta escoria, junto con el producido en la oxidación del azufre y el hierro, es suficiente para mantener los diferentes materiales en estado fundido. Cuando se ha oxidado todo el azufre asociado con el hierro, el eje de alta ley (sulfuro cuproso) también se oxida y, tan pronto como se ha formado una cantidad apreciable de óxido cuproso, éste reacciona con el sulfuro cuproso para formar cobre blíster y dióxido de azufre, según las siguientes reacciones que ocurren hasta que se consume prácticamente todo el azufre:



Respecto de las impurezas presentes en el eje de alta ley, una parte importante del arsénico, antimonio, plomo y zinc se volatiliza en forma de óxidos, mientras que la plata y el oro permanecen en el cobre blíster.

La tecnología de conversión considerada en esta descripción de una fundición moderna, corresponde a Hornos Flash u Hornos de Conversión Inmediata Outokumpu / Kennecott (FCF).

Los principales insumos requeridos en el proceso de conversión son: cal fina (95% CaO promedio), oxígeno técnico (95% O₂, en promedio) y aire de distribución. El enriquecimiento del aire en proceso es 70% de oxígeno promedio.

En la torre de reacción se encuentra el quemador donde se alimenta la carga. Una lanza central, con aire enriquecido, facilita su distribución con la consecuente reacción el sulfuro contenido, lo que genera el calor de fusión requerido para el correcto funcionamiento del proceso.

El material se funde de manera instantánea (flash) produciendo cobre blíster, escoria y gases metalúrgicos con altos contenidos de SO₂ (35%-45%). La temperatura de la reacción exotérmica alcanza hasta los 1.450 °C y el calor generado es transferido a los productos fundidos, gases metalúrgicos y al sistema de refrigeración de la torre constituido por elementos de cobre refrigerados por agua, insertos en el revestimiento refractario de la misma.

El calor retirado desde el horno por las chaquetas de cobre refrigeradas por agua, con circuito cerrado de agua tratada e intercambiadores de calor, es eliminado mediante un sistema secundario que no considera torres de enfriamiento, sino una solución radiativa conectiva mediante el uso de refrigeradores aleteados y ventiladores de aire forzado.

Los materiales fundidos son depositados en el decantador (settler) del FCF, que corresponde a una estructura metálica rectangular revestida interiormente de refractarios y elementos de enfriamiento similares a los de la torre de reacción,

pero con geometría distinta. Estos materiales son evacuados desde settler, una vez que la separación de fases (blíster y escoria) esté claramente definida debido a su diferencia de densidades y pesos específicos.

El decantador del horno posee placas de sangría para blíster y placas de escoria. Estas canaletas que tienen una plancha metálica de acero refrigerada y recubierta con ladrillo refractario, son selladas y ventiladas para evitar el escape de gases y mantener la temperatura adecuada para el sangrado.

La producción de cobre blíster alcanzará un contenido promedio de cobre de 99.0%. La secuencia de sangría del blíster fundido está configurada de acuerdo a la disponibilidad operacional de los hornos de ánodos.

La escoria producida en el FCF es evacuada mediante canaletas selladas, de características similares a las utilizadas para el blíster, hacia una etapa de granallado. Dado el contenido metálico de la escoria granulada (17.6% de cobre), es transferida por camiones al área de almacenamiento de concentrados para su reprocesamiento como carga fría al HF.

REFINACIÓN Y MOLDEO DE ÁNODOS

El cobre blíster obtenido de la etapa de conversión aún contiene impurezas y materiales valiosos tales como plata, oro, arsénico, antimonio, bismuto y hierro, por lo que debe ser refinado en los hornos anódicos. La operación de los hornos de refinación es cíclica (batch) y está constituida por las siguientes etapas: Llenado, Oxidación, Escoriado, Reducción y Vaciado.

Cada horno opera de forma secuencial, de acuerdo con las cinco etapas mencionadas. Completada la carga del horno, se inicia la etapa de oxidación, que permite remover el sulfuro contenido en el blíster hasta un nivel de 50 ppm. Para tal efecto se inyecta al baño fundido aire enriquecido con oxígeno. Adicionalmente se renuevan otras impurezas contenidas en el cobre blíster, inyectándose vía toberas, si es necesario, pequeñas cantidades de cal, que permiten la formación de una escoria que se descarta por sangrado y posteriormente es recirculado.

Una vez limpio el cobre, se inicia la etapa de reducción del nivel de oxígeno presente en el baño fundido, mediante la inyección de gas natural fraccionado con vapor de aire. Así se obtiene cobre anódico con un contenido de cobre de un 99,6%.

El cobre anódico se extrae del horno de ánodos por una canaleta cubierta, a la rueda de moldeo que va girando, produciéndose la solidificación del ánodo fundido por contacto con el aire ambiente.

Un equipo especialmente diseñado, toma automáticamente los ánodos solidificándolos y los deposita en estanques longitudinales de enfriamiento con agua. Desde los estanques, los ánodos son sacados por un montacargas y depositados en un área dedicada.

PLANTAS DE LIMPIEZA DE GASES

El objetivo de estas plantas de limpieza es acondicionar los gases metalúrgicos primarios para su utilización como insumo en la producción de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Los gases emitidos por el HF están compuestos principalmente por SO_2 , humo, vapores metálicos y partículas de cobre arrastradas. Los gases provenientes del FCF, están compuestos fundamentalmente de SO_2 y material particulado. Ambos gases primarios, luego de pasar por los respectivos precipitadores electrostáticos, se juntan en una cámara de mezcla común desde donde son conducidos a las plantas de limpieza de gases.

El proceso de producción de ácido sulfúrico se lleva a cabo en tres fases: purificación de gases, oxidación catalítica de SO_2/SO_3 y absorción.

La etapa de purificación o limpieza de gases tiene por objetivo acondicionar el gas, retirando todos aquellos compuestos cuya presencia pueda significar una merma en la eficiencia de producción de ácido sulfúrico o un daño al catalizador. Para ello, se contará con una torre de lavado que permitirá el enfriamiento y limpieza de sólidos y humos metálicos arrastrados; una sección de precipitadores de neblina húmeda y una torre de secado, donde son mezclados con aire de dilución hasta alcanzar un contenido medio de 14% de SO_2 , apto par ser enviado a la sección de contacto u oxidación.

El proceso de limpieza de gases genera un residuo líquido, que contendrá la totalidad del arsénico y trazas de otros elementos metálicos volatilizados en la fundición y presente en los gases sometidos a tratamiento. Este ril será conducido a la Planta de Tratamiento Integral de Efluentes Industriales.