



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS**

NOTAS DE CLASE DE LA ASIGNATURA:

PIROMETALURGIA

**Oscar Jaime Restrepo Baena I.M.M. MSc., PhD
M. Oswaldo Bustamante Rúa I.M.M., MSc, PhD
Ana Cecilia Gaviria Cartagena I.Q., MSc**

**INSTITUTO DE MINERALES CIMEX
ESCUELA DE MATERIALES
FACULTAD DE MINAS**

**PROGRAMA CURRICULAR
INGENIERÍA DE MINAS Y METALURGIA**

PRESENTACION

El grupo de profesores del área del conocimiento en Metalurgia Extractiva del Programa Curricular Ingeniería de Minas y Metalurgia, tiene el gusto de presentar a ustedes un pequeño texto que es el resultado de la acumulación de notas de clase a través de los años, en los que han pasado cientos de nuestros queridos alumnos y los cuales han tenido la paciencia de ser nuestro discípulos y que nos han dado la alegría de verlos graduados como profesionales de la minería que a su vez han contribuido al desarrollo de Colombia.

Las notas de clase no serán nuevas para nuestros exalumnos, tal vez leyéndolas recordarán momentos difíciles de su carrera universitaria, instantes llenos de esperanza de alegría y de un sentimiento de formación en ingeniería que en su momento fue un camino doloroso y difícil, pero que ha servido de base para que “Trabajo y Rectitud” los acompañe durante la vida que se inicio en la claustros de la Facultad de Minas.

Este texto no está acabado, cada vez aparecen nuevas tecnologías, nuevas interpretaciones, pero los fundamentos de la separación sólido-sólido siguen vigentes, pues las leyes de la mecánica y la termodinámica que sostienen como grandes pilares la concentración de minerales permanecen como valiosas joyas del conocimiento humano y sustentan las principales hipótesis y teorías de los fenómenos de separación que sigue vigentes en la actualidad

Este texto disertará sobre estos fundamentos y no pretende ir más allá, con la esperanza de que nuestros exalumnos que cultiven en esta línea de trabajo sigan desarrollando y enriqueciendo el conocimiento del área.

El trabajo que se presentara aquí tiene sus raíces en los profesores que han sido los pioneros a través del tiempo de la Metalurgia Extractiva en la Facultad de Minas, son ellos los ingenieros de Minas y Metalurgia Luis Alberto Meza Saucedo, Luis Emilio Sánchez Zapata, José Vicente Rincón Pino y Jairo Gómez (q.e.p.d.), los cuales fueron los forjadores del IM CIMEX y cuyo legado recibimos y humildemente administramos y la ponemos al servicio de la minería en el país.

O. J. Restrepo

Medellín, Junio de 2008

INDICE

		Página
1	Presentación del curso	
1.1	Introducción	
1.2.	Principios fundamentales de la metalurgia extractiva	
1.2.1	Concepto de Metalurgia	
2	Energías de enlace y pozo de potencial	
3	Difusión atómica-Leyes de Fick	
4	Tipos de reactores en procesos pirometalúrgicos	
4.1	Reacciones gas/gas	
4.2	Reacciones gas/líquido	
4.2.1	Sistemas de vacío	
4.2.2	Sistemas de inyección	
4.3	Reacciones líquido/líquido	
4.3.1	Hornos de reverbero	
4.4	Reacciones gas/sólido	
4.4.1	Horno rotatorio	
4.4.2	Reactor instantáneo	
4.4.3	Horno Cuba	
4.4.4	Lecho fluidizado	
5	Estequiometría y balances de masa	
5.1	Unidades=utilización del sistema internacional SI	
5.2	Estequiometría	
5.3	Ejercicios balances de masa	
5.3.1	Problemas de aplicación	
6	Principios de Aglomeración	
6.1	Briquetización	
6.2	Peletización	
6.3	Sinterización	
6.4	Termodinámica de la Aglomeración	
7	Secado	
7.1	¿Por qué se realiza secado?	
7.2	¿Dónde está el agua?	
7.3	¿Qué factores intervienen en la salida del agua?	
7.4	Transferencia de calor	
7.5	Análisis de un secadero: datos a tener en cuenta	
7.6	Factores para escoger secaderos	
8	Calcinación	
8.1	Horno cuba	
	Laboratorio de Secado y Calcinación	

9	Tostación	
10	Termodinámica de la tostación	
10.1	Tostación Metálicos	
10.2	Tostación Diferencial	
10.3	Tostación Clorurante	
10.4	Termodinámica de la tostación (2ª parte)	
10.5	Cinética de la tostación	
10.6	Estudio de la cinética en diferentes tipos de partículas	
10.7	Tecnología de la tostación	
10.7.1	Horno de lecho fluidizado	
	Laboratorio de Tostación	
11	Reducción pirometalúrgica de las materias primas	
11.1	Termodinámica de la reducción	
12	Reducción de óxidos (continuación)	
12.1	Reducción de óxidos	
12.2	Termodinámica de la reducción de gases CO-H ₂ O	
12.3	Extracción de un metal de su óxido	
13	Fusión	
13.1	Fusión: operación básica	
14	Volatilización	
14.1	Volatilización	
14.2	Termodinámica de la volatilización	
14.3	Metalúrgica de las escorias	
15	Combustibles metalúrgicos	
15.1	Reacciones de combustión. Revisión de calores	
16	Problemas ambientales asociados con procesos de alta temperatura	
16.1	Tratamiento de gases	
16.2	Regulación ambiental	

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Rutas alternativas de proceso para el tratamiento de óxidos metálicos
- Figura 2. Rutas alternativas de proceso para el tratamiento de sulfuros metálicos
- Figura 3. Rutas alternativas de proceso para el tratamiento de halúros metálicos
- Figura 4. Sistema de vacío.
- Figura 5. Sistema de Inyección
- Figura 6. Horno Reverbero
- Figura 7. Horno Rotatorio
- Figura 8. Reactor Instantáneo
- Figura 9. Horno Cuba
- Figura 10. Lecho Fluidizado
- Figura 11. Dos partículas esféricas iguales unidas por un lente de agua
- Figura 12. Reactor de parrilla móvil
- Figura 13. Perfil de temperatura y zonas de reacción en un lecho de sinterizado estático tres minutos luego de la ignición. (Ball et al.) (Copyright Heinemann Educational Books)
- Figura 14. Tiempo de secado vs. Contenido de humedad
- Figura 15. Contenido de humedad vs. Velocidad de secado
- Figura 16. Tiempo de Secado vs. Velocidad de secado
- Figura 17. Modelo del núcleo que reacciona desde el tiempo $t=0$ a $t=T$
- Figura 18. Horno cuba
- Figura 19. Tostador de lecho de fluido en el procesamiento de concentrados de sulfuro (Boldt y Queneau) (Copyright Longmans)
- Figura 20. Presiones de vapor en equilibrio de metales puros
- Figura 21. El efecto del exceso de aire en la temperatura de los productos de combustión de gases de hidrocarburo.
- Figura 22. Concentraciones de solutos como función de distancia
- Figura 23. Rango de tamaños de partícula
- Figura 24. Efectos en la salud debidos a varias exposiciones a SO_2 .

1. PRESENTACIÓN DEL CURSO

1.1 Introducción

El proceso de alta temperatura es muy usado en la producción de metales y materiales. Existen varias razones para usarlo:

- La estabilidad relativa de los metales y sus componentes cambian considerablemente con la temperatura haciendo posible que se logren cambios químicos y estructurales en las diferentes fases presentes en el sistema.
- Las velocidades de transporte de masa y reacciones químicas se incrementaron con la energía térmica incrementada permitiendo lograr cambios en menor tiempo.
- El proceso de la fase líquida y gaseosa el cual es posible a altas temperaturas no sólo permite que se realicen reacciones a mayor velocidad sino que también permite que la separación de las fases se logre con relativa facilidad.

No existen límites convencionales para las temperaturas que se utilizan en el proceso de alta temperatura.

En el caso del proceso de los metales y materiales, no obstante, por las razones mencionadas anteriormente, la mayoría de los procesos son efectuados entre 300 y 2000°C de temperatura. El término *proceso pirometalúrgico* es usado con frecuencia para describir los procesos de alta temperatura relacionados con la producción de metales. Sin embargo, los principios básicos que sustentan el uso de altas temperaturas son comunes en el proceso de todos los materiales. Los siguientes ejemplos ilustran el rango de aplicaciones del proceso de alta temperatura en las industrias de metales y materiales.

El ejemplo más sencillo de tratamiento térmico es quizá el *secado*. Las técnicas de proceso físico no pueden eliminar los últimos restos de agua absorbida e incorporada físicamente a partir de materiales finamente divididos y el calor se usa para eliminar el agua restante de la fase gaseosa como vapor. Sin embargo, el calentamiento rápido de componentes cerámicos inacabados causaría una severa deformación y fractura, por consiguiente, el secado debe efectuarse bajo condiciones controladas para evitar pérdidas de producto.

La descomposición térmica de compuestos inorgánicos, por ejemplo, la calcinación de piedra caliza, CaCO_3 , es una práctica muy común. La caliza es un almacenaje de alimentación en varios procesos químicos importantes en la industria y durante el calentamiento se separa en cal, CaO y CO_2 . Hidróxidos de metal, sulfatos y carbonatos, obtenidos por medio de precipitación química a partir de soluciones acuosas, se usan en la producción de materiales cerámicos. A altas temperaturas, estos materiales se separan en sus respectivos óxidos. Los componentes que se forman y sus propiedades físicas pueden ser alteradas controlando la composición de la materia inicial, las temperaturas de tratamiento y la atmósfera, en las cuales el proceso de alta temperatura se efectúa.

Los óxidos de metal, el sulfuro y los haluros son las mayores fuentes de metales y en el proceso pirometalúrgico de alta temperatura está disponible una gran variedad de opciones para el tratamiento de estos materiales.

Otro punto interesante para resaltar, es que con frecuencia se usan combinaciones de alta temperatura, solución orgánica/acuosa y técnicas electroquímicas para obtener los productos esperados. Donde se obtengan nuevos componentes entonces el lector debe remitirse a las alternativas para procesar el nuevo componente, en el caso que se considere un procesamiento adicional, por ejemplo, si el material original es un metal de sulfuro y éste se transforma en un óxido, entonces, las opciones de procesamiento para los óxidos de metal deben examinarse.

1.2 Principios fundamentales de la metalurgia extractiva.

El primer paso en la obtención de un metal es descubrir el lugar donde exista uno de sus minerales en cantidad adecuada, es decir un yacimiento, este es un trabajo de prospección que realizan los geólogos usando distintos métodos: mecánicos, químicos, gravimétricos, magnéticos, eléctricos, aerofotográficos, entre otros.

Una vez ubicado el yacimiento donde exista el mineral o mena metalífera se hace las consideraciones necesarias para determinar su explotación económica.

La explotación de la roca que contiene el mineral es llevada a cabo por el ingeniero de minas que puede hacer una explotación a cielo abierto o con socavones o túneles usando diversas técnicas.

La explotación del yacimiento es una mina de la cual el material es arrancado y entregado al ingeniero metalúrgico extractivo, quien para convertirlo en metal debe seguir tres pasos por lo menos:

Separación del mineral y de la ganga (que es la parte no útil), en una operación conocida como beneficio de minerales o mineralurgia.

Tratamiento químico preliminar que produce un compuesto adecuado para la reducción del metal.

Reducción a metal, posiblemente con un tratamiento posterior de refinación.

Para separar el metal de la ganga usualmente lo primero que se hace es una trituración y una molienda. Sigue la clasificación, que puede ser con cribas o tamices en seco o por otros medios, en que los pedazos grandes se separan de los finos. A veces es necesario volver a aglomerar los finos a un tamaño adecuado, un método para la aglomeración es la sinterización.

La concentración del mineral, para enriquecerlo con vías al transporte o al proceso, se puede hacer gravimétricamente usando corrientes de agua (calones, mesa Wilfley, elutriadores, entre otras) o de aire (ciclones), por separación eléctrica, magnética, por flotación – en la que un tipo de partículas se hace flotar por medio de reactivos mientras que las de otros se sedimentan-, por reacciones químicas o por otros métodos según el tipo de mineral y las necesidades del proceso.

El mineral concentrado se puede tratar con calcinación y tostación –donde el metal sulfuroso, por ejemplo se convierte en óxido- por lixiviación o por otros procesos químicos o electroquímicos.

La reducción del mineral preparados se efectúa en hornos y convertidores de distinto tipo cuando se usa la pirometalurgia o por medios químicos o electroquímicos cuando se usa la vía hidrometalúrgica. Al final del proceso de refinación se tiene un metal o aleación.

1.2.1 Concepto de Metalurgia

La metalurgia extractiva se puede definir como la parte de la metalurgia que estudia los métodos químicos necesarios para tratar una mena mineral o un material que se va a reciclar de tal forma que se pueda obtener, a partir de cualquiera de ellos, el metal, más o menos puro, o alguno de sus componentes.

Antecedentes históricos

El descubrimiento de los metales por el hombre dependió de múltiples factores pero posiblemente los tres más importantes fueron: la facilidad para encontrarlos, la facilidad para reconocer sus minerales y la facilidad para reducirlos a partir de sus minerales.

Los metales conocidos y usados por asirios, griegos y romanos, fueron el cobre, estaño, hierro, mercurio, oro, plata y plomo.

Las principales razones que hicieron que los siete metales nombrados fueran los primeros en ser utilizados por el hombre son:

Que aparecen algunos de ellos en estado nativo en la naturaleza. Por ejemplo, oro, plata, cobre, hierro (a partir de meteoritos) y mercurio.

Los óxidos de cobre, hierro estaño y plomo se reducen fácilmente por debajo de 800 °C; esta temperatura puede alcanzarse fácilmente quemando materiales carbonáceos. Algunos de estos metales tienen bajos puntos de fusión como, por ejemplo, el plomo y el estaño, mientras que el mercurio es ya líquido a temperatura ambiente. Con ello, se recupera y separa, por fusión de las gangas que lo contiene, con extrema facilidad. Por otro lado, ese bien conocido que las impurezas disminuyen apreciablemente la temperatura de fusión de los metales; así, el hierro puro, que funde a 1540 °C, es líquido a 1100 °C cuando está impuro con un 4% de carbono, como ocurre en el arrabio. La arqueología demuestra que la mayoría de los metales que se utilizaron tempranamente por el hombre rara vez eran puros.

Como agente reductor para las operaciones metalúrgicas, se cree que se utilizó inicialmente el carbón vegetal obtenido por la combustión parcial, en defecto del aire, de árboles. Posteriormente, se descubrió el carbón mineral y se utilizó con más éxito.

Relación de la metalurgia con otras ciencias

Metalurgia y Ciencia de materiales

Relación - Estructura - Interacción - Propiedades

Menas: Clasificación

Una mena metálica puede definirse como una asociación de minerales a partir de la cual uno o varios metales pueden ser obtenidos de forma económicamente favorable. Deben considerarse los siguientes factores:

El contenido –llamado ley- del metal o metales potencialmente extraíbles.

El precio del metal.

Los costos de explotación minera.

Los costos de los procesos de extracción.

La presencia de elementos tóxicos o de difícil comercialización.

Desde el punto de vista de la complejidad química y estructural, las menas pueden clasificarse en menas simples y menas complejas.

Menas simples:

son aquellas de las cuales se extrae, fundamentalmente, un solo metal. Contiene uno o varios minerales del metal que se va a extraer. El resto de minerales o ganga carece de valor metalúrgico aunque pueda tener otras aplicaciones.

Las menas simples pueden ser de alta o baja ley. Ejemplos de menas de alta ley son las menas siderurgias y las bauxitas; la mayoría de las menas actuales de los demás metales son menas de baja ley, por ejemplo, Zn 5-20%, Pb 5-10%, Cu 0.5-5%, Ni 0.2-2%, U 0.1-1%, Au 5-10 ppm.

Menas complejas:

Contienen diversos minerales de distintos metales. Las rutas para el tratamiento de una mena compleja depende básicamente de la posibilidad de liberación. Si es posible, se aplican procesos de separación física y los distintos concentrados se introducen en los procesos convencionales de menas simples.

Si la liberación no es posible, ya sea por fino intercrecimiento de los distintos minerales o por la existencia de soluciones sólidas, puede aplicarse rutas hidrometalúrgicas, pirometalúrgicas o sus combinaciones.

Otra clasificación debida a la forma en que se encuentra atrapados los metales en el mineral es la siguiente:

Nativos = oro, plata, platino.

Óxidos = hierro, manganeso, cromo, titanio.

Hidróxidos = hierro, aluminio.

Sulfuros = cobre, níquel, cinc, plomo, mercurio.

Carbonatos = hierro, magnesio

Haluros = sodio, potasio

Sulfatos= $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Silicatos = KAlSi_3O_8 , CaSi_2O_8 , $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Arseniuros
Wolframatos

1.3. Los metales: distribución y clasificación.

Dentro del conjunto de los elementos del sistema periódico la diferencia fundamental entre metales y no metales radica en que los átomos de los primeros tienen muy pocos electrones en sus orbitales exteriores; electrones que se pierden con facilidad, para formar una estructura de orbita externa completa y estable.

Cuadro 1. Distribución de los metales en la corteza terrestre.

Metal	% Corteza	% Concentrados
Cu	100 ppm	25 – 55
Zn	40 ppm	50-60
Pb	20 ppm	60-70
Si	1 ppm	60-70
Al	8.1 %	99.5
Cr	370 ppm	48-50
Fe	4.7 %	70-90

Metales de interés en la industria mundial: Fe, Al, Cu, Zn, Pb, Ni, Mg, Sb, Be, Cr, Co, Mn, Mo, Nb, Ti, W, U, V, Zr.

Aspectos básicos de los materiales: Naturales, Metales, Preciosos, Cerámicos, Poliméricos, Compuestos

Etapas en la obtención de los metales:

1. Preparación (Cominución)
2. Concentración
3. Separación
4. Extracción
5. Afino

1.4. Procedimientos de la metalurgia extractiva.

Las operaciones en metalurgia extractiva caen dentro de uno de dos grupos: operaciones de vía seca y operaciones de vía húmeda. A las primeras se las conoce, de forma general, como operaciones pirometalúrgicas y a las segundas como operaciones

hidrometalúrgicas. Las operaciones de vía seca se realizan a altas temperaturas entre productos en estado sólido, líquido o gaseoso, mientras que la operaciones de vía húmeda se realizan a través de reacciones en fase acuosa y a bajas temperaturas.

Tanto la pirometalurgia como la hidrometalurgia se pueden dividir atendiendo a las posibles operaciones que se pueden realizar. El siguiente cuadro establece esta división.

Cuadro 2. División de la metalurgia extractiva

PIROMETALURGIA	HIDROMETALURGIA
-Calcinación	-Lixiviación
-Tostación	Ácida
Oxidante	Básica
Sulfatante	Neutra
Clorurante	-Purificante y/o concentración
Aglomerante	Métodos químicos convencionales
Otras	Cementación
-Fusión	Resinas de cambio de ion
Reductora	Extracción con disolventes
Ultrareductora	-Precipitación
Neutra	Electrólisis
Oxidante	Cementación
-Volatilización	Métodos químicos
Reductora	
Oxidante	
De haluros	
De carbonilos	
-Electrólisis ígnea	
-Metalotermia	

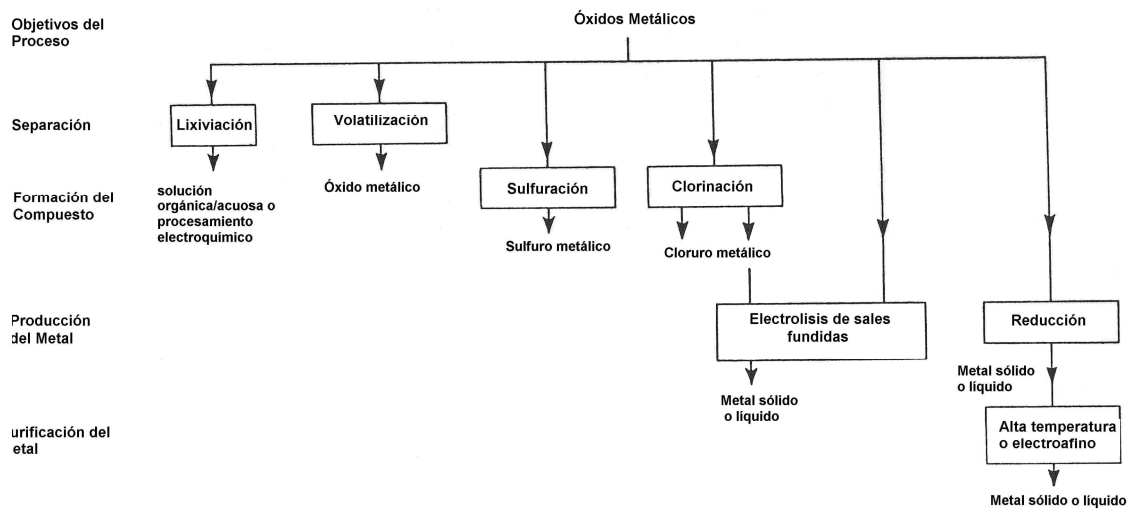


Figura 1. Rutas alternativas de proceso para el tratamiento de óxidos metálicos

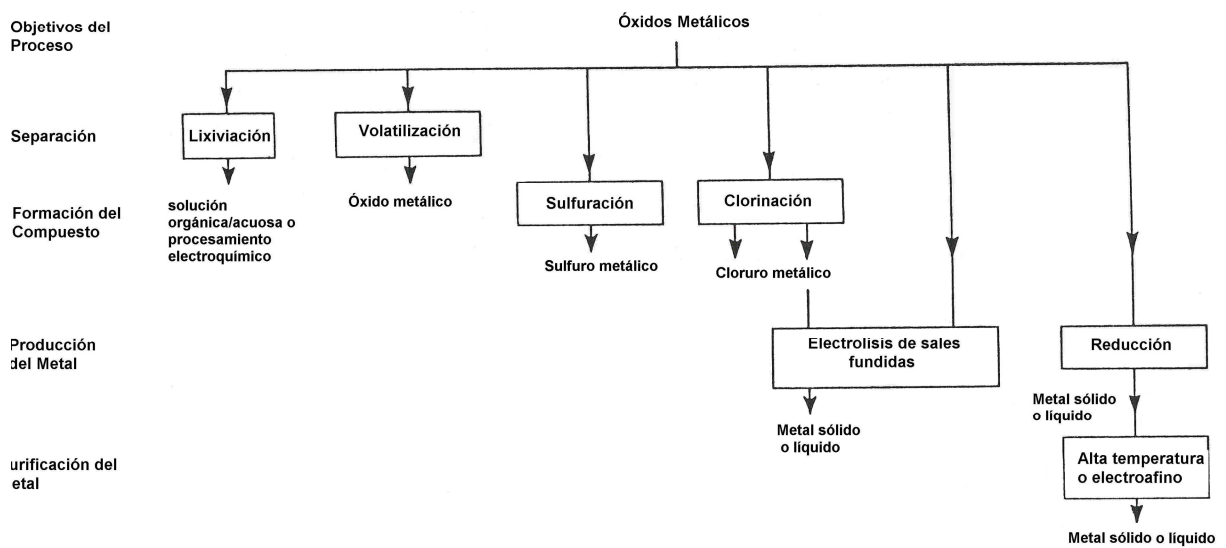


Figura 2. Rutas alternativas de proceso para el tratamiento de sulfuros metálicos

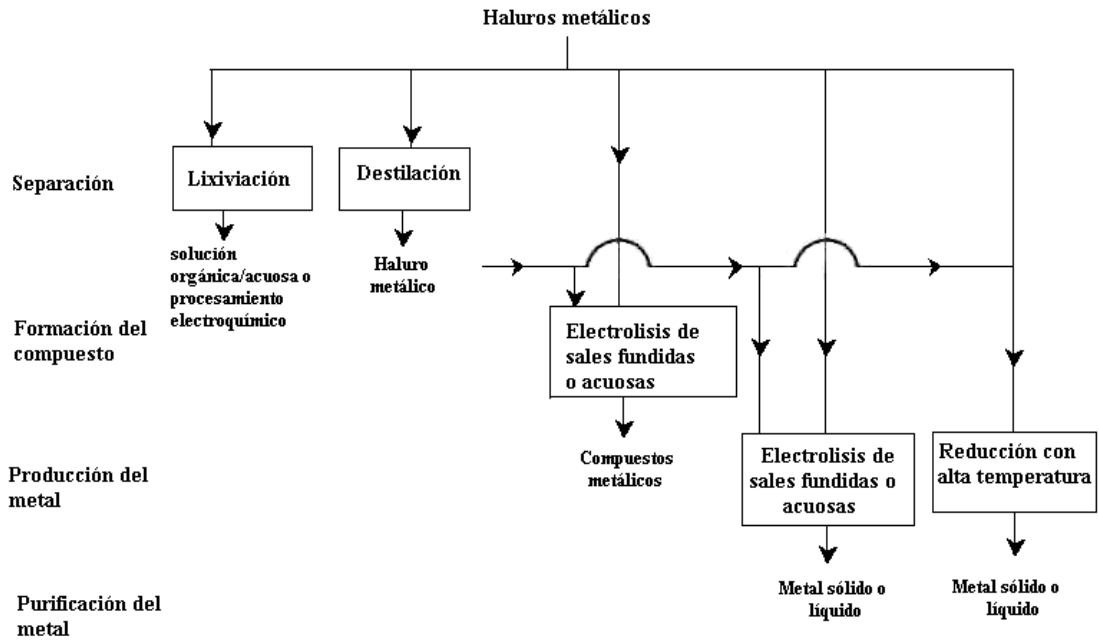


Figura 3. Rutas alternativas de proceso para el tratamiento de haluros metálicos

TAREA 1. Materiales magnéticos, diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, antiferromagnéticos, ferrimagnéticos.

¿Por qué los metales se doblan y las rocas se quiebran?

2. ENERGÍAS DE ENLACE Y POZO DE POTENCIAL

Fuerzas de Tipo: - Atractiva
- Repulsiva

$$F = -\frac{\partial U}{\partial r} \qquad U(r) = -\frac{a}{r^m} + \frac{b}{r^n}$$

Donde m: valor relacionado al tipo de enlace químico
n: valor relacionado a las interacciones mecánico-cuánticas

Tipos de Enlace:

- Iónico. (m = 1-2)
- Covalente. (m = 1)
- Metálico. (m = 3)
- Débil (Hidrógeno, Van der Waals, m = 5-6)

Acomodamiento Cristalino

Defectos Cristalinos

Sistemas Cristalinos:

1. Cúbico
2. Tetragonal
3. Romboédrico
4. Monoclínico
5. Triclínico
6. Trigonal
7. Hexagonal

Tipos de defectos cristalinos:

- | | | |
|----------------------|---|-------------|
| - Lagunas | } | Intrínsecas |
| - Autointersticiales | | |
| - Inserción | } | Extrínsecas |
| - Sustitución | | |

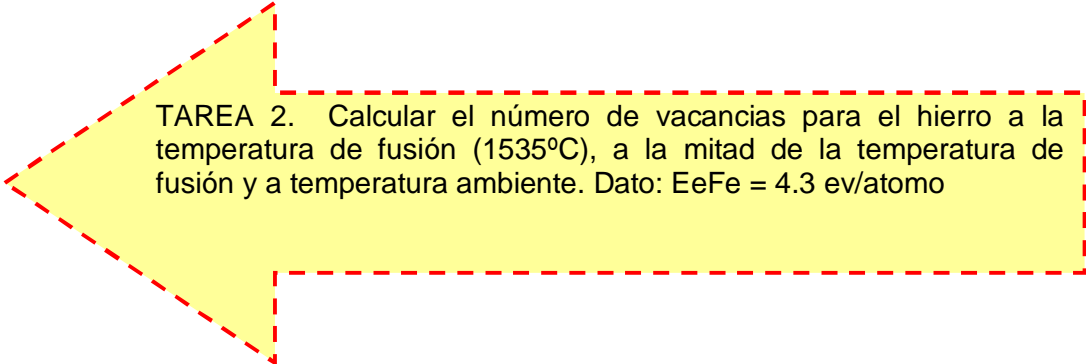
Definiciones Importantes:

- Electronegatividad
- Tamaño similar (<15%)
- Valencia Igual
- Estructura Igual

Número de Vacancias o Lagunas

$$nv = N \exp\left(\frac{-\Delta G_{fv}}{KT}\right)$$

Donde: N: número de Avogadro
 ΔG_{fv} : Energía $\sim 1/3 E_e$
K: Constante de Boltzman
T: Temperatura en Kelvin



TAREA 2. Calcular el número de vacancias para el hierro a la temperatura de fusión (1535°C), a la mitad de la temperatura de fusión y a temperatura ambiente. Dato: $E_{eFe} = 4.3 \text{ eV/atomo}$

3. DIFUSIÓN ATÓMICA – LEYES DE FICK

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial X} \quad \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad D = D_0 \exp\left(\frac{-\Delta E}{KT}\right)$$

Donde:

J: Debito de la sustancia que se difunde por unidad de tiempo en una dirección perpendicular a un plano de sección unitaria usado como referencia. [mol / s cm²].

D: Coeficiente de difusión [cm²/s].

C: Concentración de reactivo [mol].

X: Dimensión o espesor a estudiar.

4. TIPOS DE REACTORES EN PROCESOS PIROMETALÚRGICOS

Gas-Sólido = Tostación, Reducción

Gas-Líquido = Soplado, Destilación

Líquido-Líquido = Reacciones escoria – metal

Sólido-Líquido = Licuefacción, Lixiviación, Precipitación

Reacciones gas/gas. Las reacciones homogéneas en la fase gaseosa (gas/gas) raramente se encuentran en procesos metalúrgicos, ya que pocos metales o compuestos metálicos poseen altas presiones de vapor. En situaciones donde se incluyan reacciones gas/gas usualmente se emplean catalizadores con el fin de beneficiarlas. Es muy baja la posibilidad de que en una reacción homogénea gaseosa compleja, dos moléculas de gas libres colisionen en la orientación y velocidad exacta para la correcta reestructuración o intercambio de átomos. Al proporcionar una superficie sólida o líquida las moléculas reactantes que colisionan con la superficie en todas las direcciones y velocidades pueden absorberse sin esfuerzo. Una vez absorbidas, es decir, unidas física o químicamente a la superficie, las moléculas pueden moverse con facilidad en la superficie para tomar posiciones particulares que favorecen la reacción; entonces los productos se desprenden de la superficie y pasan a la fase gaseosa.

Las superficies catalizadoras no sólo aumentan las velocidades globales de las reacciones sino que también tienden a promover la formación de productos de reacción específicos en lugar de un rango de cambios y compuestos moleculares. Los materiales catalizadores deben poseer un área de superficie alta por unidad de masa ($0,1 - 10^2 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) de material para suministrar una alta velocidad de reacción por unidad de volumen del reactor. Esto nos lleva a la condición para sólidos porosos que tienen poros pequeños. Deben tomarse precauciones para asegurar que los elementos o componentes que contaminan o reducen el efecto catalizador de la superficie no se introduzcan dentro del sistema. (Sleight y Chowdhry).

4.1 Reacciones gas/gas

Alimento: gas

Productos: sólidos, líquidos o gases

Fuente de energía: externa o derivada de reacciones químicas exotérmicas.

Características del proceso: temperatura uniforme, buen control, reacciones homogéneas o heterogéneas, velocidades de producción que dependen de las superficies catalizadoras, continuo.

4.2 Reacciones gas/líquido

Desde la aparición de la fabricación de acero por inyección de oxígeno (Gaines) ha habido un aumento en el interés por los procesos de *inyección* (gas/líquido). La alta agitación del baño creada por la inyección de corrientes gaseosas de alta velocidad en las fusiones conduce a unas muy altas velocidades de reacción globales (véase Capítulo B). En reactores de soplado superior puede introducirse el gas por medio de lanzas de gas o de agua fría. Las reacciones en el baño se controlan por variación de la velocidad de inyección de gas y por la altura de la lanza. Los reactores de soplado inferior dependen de la corriente creciente de burbujas de gas para producir agitación dentro de la fusión. Cada técnica tiene sus ventajas y desventajas en cualquier aplicación particular. Para optimizar el control sobre las reacciones dentro del reactor, actualmente se diseñaron reactores híbridos, los cuales combinan las técnicas de soplado superior (Chatterjee et al., Vogt et al.). Las aplicaciones de estos procesos han aumentado más allá con la capacidad de inyectar mezclas gas/sólido dentro de la fusión y así obtener reacción y agitación simultáneamente. El calor es usualmente suministrado dentro de la carga por las reacciones de combustión que resultan de la interacción del gas inyectado con elementos en la carga o de la introducción de mezclas combustible/aire por la lanza. En la actualidad se han desarrollado aplicaciones de procesos de inyección para cubrir un rango de tecnologías de procesamiento de metal no férreo (Errington et al.).

Las mejoras en el diseño del proceso y en la tecnología de bombas de gas ha traído un aumento en la aplicación de técnicas de *vacío* para la metalurgia extractiva y, en particular, para las reacciones gas/líquido. En la mayoría de las aplicaciones de metalurgia extractiva se requieren velocidades altas de bombeo para proporcionar una rápida eliminación de gases, sin embargo, manteniendo además bajas presiones dentro de la cámara. En cualquier planta de producción a gran escala es inevitable que una cantidad considerable de materia compuesta de finas partículas se forme durante el proceso de ahumado o que penetre desde el ambiente tales como polvo y suciedad. Los sistemas mecánicos de bombeo son particularmente susceptibles a dañarse debido a las partículas y requieren mantenimiento frecuente. Un descubrimiento en la capacidad de bombeo, en lo que se refiere a metalurgia extractiva, surgió con el desarrollo de la bomba de vapor (Geiger y Poirer, Winkler y Bakish). Usando el vacío creado al mezclar gas de la cámara de vacío con un chorro de vapor a alta velocidad los gases se arrastran dentro del chorro de vapor y así se eliminan del sistema. La bomba de vapor no tiene partes móviles y cualquier partícula arrastrada dentro del sistema puede sin esfuerzo ser separada en ciclones y cámaras de separación.

La temperatura del líquido bajo tratamiento en estos procesos de vacío puede ser difícil de mantener ya que los combustibles auxiliares no pueden introducirse dentro del sistema. En el caso de metales fundidos puede utilizarse el calentamiento por inducción. Las pérdidas de calor pueden reducirse con el uso de escudos de radiación los cuales reflejan el calor irradiado hacia la carga o con el mejoramiento del aislamiento térmico de los revestimientos de la cuchara.

4.2.1 Sistemas de vacío

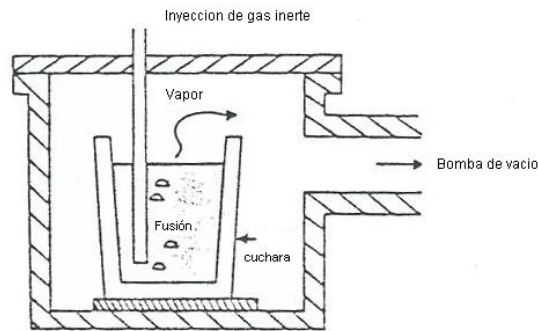


Figura 4. Sistema de vacío.

Alimento: líquido o sólido

Productos: líquido y gas

Fuente de calor: calefacción de resistencia eléctrica para cargas no metálicas calefacción de inducción eléctrica posible con metales.

Características del proceso: agitación por transmisión o agitación de burbujas de gas, costos del proceso por lotes que dependen de la presión y la cinética.

4.2.2 Sistemas de inyección

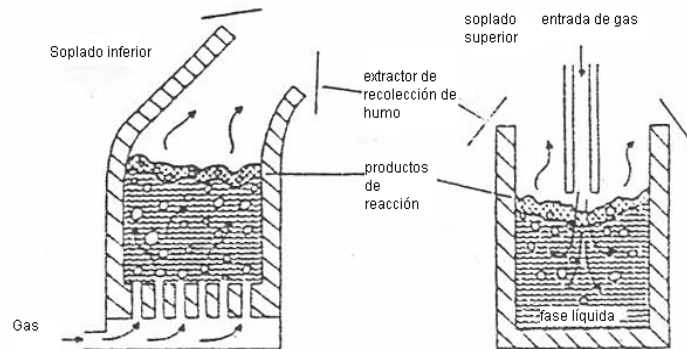


Figura 5. Sistema de Inyección

Alimento: líquido o sólido + líquido

Productos: líquidos y gases

Fuente de calor: mezcla combustible/gas, reacción exotérmica o calor externo.

Características del proceso: posible inyección de reactivos durante la operación.

Soplado inferior: agitación del baño muy alta, altas velocidades de reacción, composición uniforme del baño, buen control, calor eficaz, alto uso refractario en las toberas, por lotes.

Soplado superior: agitación del baño moderada aunque en su mayoría limitada a la superficie superior, por lotes o continuo.

Velocidad de procesamiento determinada: $0,5 - 5 \text{ t m}^{-3} \text{ h}^{-1}$.

4.3 Reacciones líquido/líquido.

En la mayoría de los casos cuando se encuentran reacciones líquido/líquido en procesos pirometalúrgicos el objetivo es la separación por medio de la formación de fases líquidas inmiscibles. Aunque en el procesamiento preliminar de las fusiones, la mezcla de fluido puede ser sometida a agitación o mezcla violenta para aumentar el área de contacto interfacial entre las etapas, de esta manera causando rápida transferencia de elementos menores, para la separación se desea muy baja turbulencia interfacial. Los largos períodos de residencia y la baja turbulencia son característicos de estos tipos de reactores.

El calor puede proporcionarse por combustión directa de combustibles de hidrocarburos sobre la superficie del líquido pero donde sea posible se evita la intrusión directa de la llama en la superficie de la fusión, especialmente cerca de lugares donde los productos sean golpeados. Los hornos de arco eléctrico son también utilizados en algunas aplicaciones para calentar la carga. Aunque normalmente se prefiere la combustión directa de combustibles en hornos para el calentamiento eléctrico, hasta donde se involucre la utilización de energía, la transferencia de calor entre la llama y la carga en este tipo de reactor es poco eficaz. Por medio del uso de calderas de calor residual puede recuperarse un poco de la energía del conducto de gases.

Los sistemas de reverbero poseen una notable flexibilidad con respecto a las cargas alimentadas que pueden usarse, las cuales pueden ser grandes o pequeñas partículas sólidas o líquidos. La velocidad de fusión de largas partículas o placas de material está limitada por la conductividad térmica del material y por su geometría. Sin embargo, la velocidad de calentamiento de las partículas pequeñas se determina por la velocidad de transferencia de calor proveniente de los alrededores.

4.3.1 Hornos de reverbero

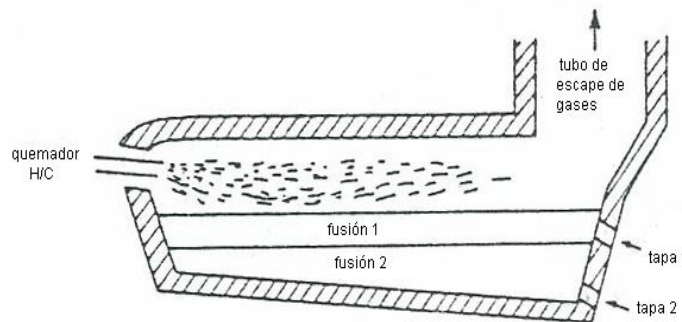


Figura 6. Horno Reverbero

Alimento: sólidos o líquidos.

Productos: líquidos y gases.

Fuente de calor: a) quemadores de hidrocarburo sobre el baño, baja eficiencia en la transferencia de calor, b) arco eléctrico inundado, sin gases, c) plasma de alta temperatura, con gases neutros o reactivos

Características del proceso: buena separación pero baja velocidad específica de fusión, equilibrio líquido/líquido pero no con la fase gaseosa, por lotes o continuo.

Velocidad de procesamiento determinada: $0,05 - 0,1 \text{ t m}^{-3} \text{ h}^{-1}$.

4.4 Reacciones gas/sólido.

Entre los muchos reactores gas/sólido, los hornos de cuba, los hornos rotatorios, los lechos fluidizados y los reactores instantáneos son los más representativos. (Stephenson y Smailer)

El *horno de cuba* es un excelente permutador de calor paralelo y de masa que consta esencialmente de un lecho empaquetado de sólidos a través del cual pasan los gases. Sin embargo, existen importantes restricciones en las características físicas del material alimentado (Biswas). La carga debe componerse de partículas bastante grandes de diámetro 20 – 100 mm para evitar la elutriación de los sólidos, es de decir para impedir que las partículas sean expulsadas del lecho por el gas. Las partículas deben ajustarse a un rango estrecho para proporcionar el máximo porcentaje de vacío y minimizar la resistencia al flujo de gas a través del lecho. La carga debe ser también físicamente fuerte y resistente a la abrasión para resistir el peso de la carga expuesto a temperatura y para evitar la formación de finos excesivos. Para maximizar las velocidades de las reacciones químicas que ocurren, la carga debe poseer un área de superficie alta sobre unidad de masa. Este último requisito va aparentemente en directa contradicción con la restricción en el uso de pequeñas partículas. El problema puede solucionarse creando grandes partículas con alta porosidad. Sin embargo, existe un límite hasta el cual esto puede realizarse puesto que el aumento de la porosidad, además, conduce a una disminución de la fuerza. Las propiedades del alimento final deben ser necesariamente un compromiso entre estas demandas contradictorias.

El *horno rotatorio* es un reactor de forma tubular el cual rota continuamente en el eje del cilindro. El reactor está inclinado para que la carga se mueva bajo la influencia de la gravedad desde el alimentador hasta el final de descarga. Este proceso puede funcionar con corrientes de gas del mismo sentido o contrarias. El calor es proporcionado por la combustión de partículas de combustible en la carga o por quemadores auxiliares que pueden introducirse en diversas posiciones a lo largo del reactor.

La utilización de combustible no es tan eficaz como en el horno de cuba, el horno rotatorio posee eficiencias térmicas que oscilan entre 55 – 75% en oposición a 80 – 95% en los hornos de cuba (Szekely y Themelis). La mayor parte de gas en el horno no está en contacto directo con la carga o con el revestimiento refractario y los hornos están diseñados con altas proporciones de longitud de diámetro para mejorar la eficacia térmica. La rotación del horno proporciona una buena mezcla de la carga y da como resultado un producto altamente uniforme. Sin embargo, la abrasión continua y el desgaste producido por el movimiento de la carga sólida causan un desgaste considerable de los revestimientos.

Existe aún una restricción en el uso de partículas muy finas en los hornos rotatorios pero por otro lado esta es una amplia línea de alimentos que pueden ser utilizados. La falta de restricciones en las características de los alimentos proporciona una alta flexibilidad al proceso. Además, la eliminación del pre-procesamiento de los materiales de la carga reduce considerablemente las necesidades de capital y los gastos de operación.

Los *reactores instantáneos* se componen esencialmente de torres huecas dentro de las cuales se inyectan reactantes gaseosos, generalmente aire u oxígeno y sólidos

compuestos de finas partículas. La reacción entre el oxígeno y los sólidos produce calor. A medida que los sólidos caen a través del gas su temperatura aumenta al igual que la velocidad de la producción de calor durante las reacciones.

Las reacciones no están simplemente destinadas al suministro de calor al sistema. El material que se introduce dentro del reactor es alterado químicamente reaccionando directamente con el material coinyectado por ejemplo, oxígeno; o con las otras especies producidas simultáneamente en el reactor, como por ejemplo, CO que se produce a partir de la combustión de carbono. Las ventajas de tal sistema residen en que puede usarse un material compuesto de finas partículas, producto de los procesos de beneficiación convencionales, los materiales son elevados con eficacia a la temperatura de reacción y el gasto capital que se requiere para tales procesos es bajo en cuanto a rutas alternativas debido a la falta de alimento preparado necesario. Los reactores también pueden funcionar con combustibles relativamente económicos como por ejemplo, carbón de baja calidad o concentrados de sulfuro los cuales están siendo procesados químicamente en el reactor.

Los *lechos fluidizados* funcionan al balancear las fuerzas descendentes del peso de las partículas en la carga con las fuerzas ascendentes creadas por las altas velocidades de gas. La fluidización o suspensión puede efectuarse con una amplia gama de densidades de material y tamaños de partícula. En la práctica, los tamaños de partículas entre 25-0,002 mm han sido tratados con éxito. Sin embargo, para asegurar que un lecho fluido estable mantenga el rango de tamaños de partículas que puede usarse en cualquier reactor debe estar dentro de un orden de magnitud, por ejemplo entre 0,2 – 2,0 mm. Se dispone de varias correlaciones para predecir las condiciones de fluidización mínima (Wen y Yu). Dentro del lecho fluidizado en sí las partículas son altamente móviles y esto da como resultado temperaturas de lecho relativamente uniformes y buen control sobre las reacciones en el lecho. En reactores de lecho de fluido rápido algunas finas partículas dejan el reactor con la corriente de gas, y la separación gas/sólido se usa para recuperar estos sólidos, y si es necesario, reciclarlos en caso de que ocurra una reacción incompleta.

4.4.1 Horno rotatorio

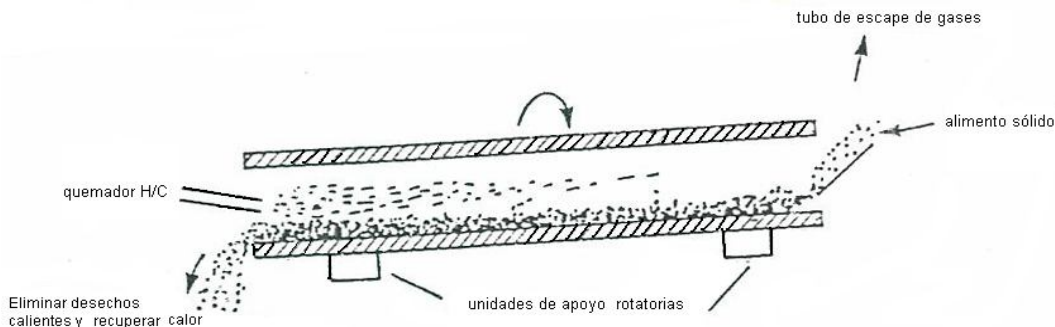


Figura 7. Horno Rotatorio

Alimento: sólidos compuestos de finas o gruesas partículas.

Productos: sólidos o líquidos y gases.

Fuente de calor: quemadores de hidrocarburo sobre la carga, la rotación suministra transferencia de calor desde las paredes hacia la carga.

Características del proceso: no es susceptible al tamaño del alimento, contacto moderado entre el gas y la carga pero se presenta alto uso refractario, continuo, calidad uniforme del producto.

Velocidad de procesamiento determinada: $0,1 - 0,03 \text{ t m}^{-3} \text{ h}^{-1}$.

4.4.2 Reactor instantáneo

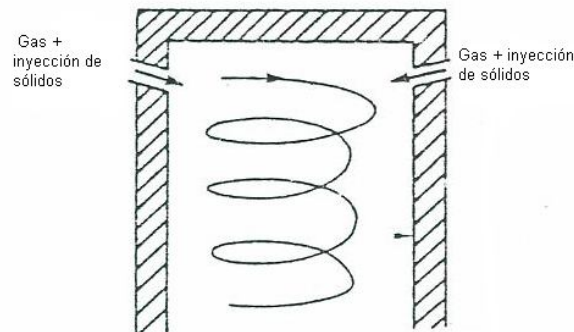


Figura 8. Reactor Instantáneo

Alimento: sólidos compuestos de finas partículas.

Productos: líquidos y gases.

Fuente de calor: combustión de hidrocarburos dentro del reactor, calor a partir de reacciones químicas.

Características del proceso: calor eficaz, no es necesario preparar alimento sólido, continuo.

Velocidad de procesamiento determinada: $0,1 - 0,3 \text{ t m}^{-3} \text{ h}^{-1}$.

reactor, calor a partir de preparar alimento sólido,

4.4.3 Horno Cuba

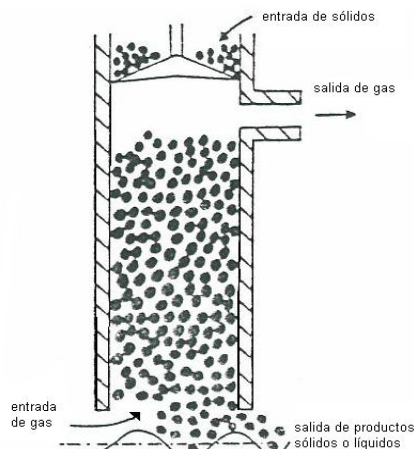


Figura 9. Horno Cuba

Alimento: sólidos compuestos de grandes partículas.

Productos: sólidos o líquidos y gases.

Fuente de calor: a) arco eléctrico, b) transferencia de calor contra-corriente proveniente de gas precalentado, c) combustión dentro del horno + b).

Características del proceso: calor eficaz y transferencia de masa entre gases y sólidos, control detallado del tamaño de los sólidos y es necesario distribuir el tamaño para mantener la porosidad del lecho empaquetado, es necesaria una buena resistencia de los sólidos al calor, continuo.

Velocidad de procesamiento determinada: $0,04 - 0,1 \text{ t m}^{-3} \text{ h}^{-1}$.

4.4.4 Lecho fluidizado

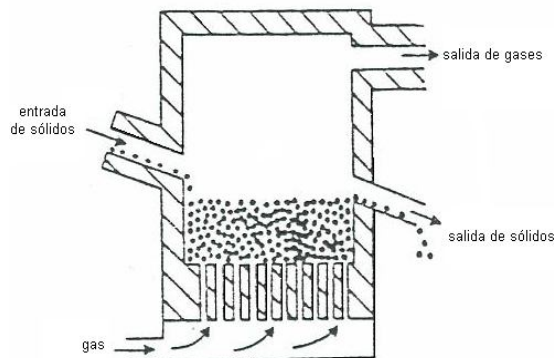


Figura 10. Lecho Fluidizado

Alimento: sólidos compuestos de pequeñas partículas.

Productos: sólidos y gases.

Fuente de calor: a) transferencia de calor proveniente de gases precalentados, b) combustión controlada en el lecho.

Características del proceso: composición y temperatura uniforme en el lecho, buen control, distribución de partículas rígidas (de poca longitud), continuo o por lotes.

Velocidad de procesamiento determinada: $0,1 - 0,3 \text{ t m}^{-3} \text{ h}^{-1}$.

TAREA 3. Consultar ventajas y desventajas de la vía hidrometalúrgica y la vía pirometalúrgica en la obtención de metales. Actualizarse en el Sistema Internacional de Unidades.

5 ESTEQUIOMETRÍA Y BALANCES DE MASA

5.1 Unidades = utilización del sistema internacional SI

Masa: Kg.

Longitud : m

Fuerza : N

Presión : Pascales N / m^2 bar.: 10^5 Pa

Atmósfera: 1 atm: 1.013 bar.

Energía, calor, trabajo: J 1 cal: 4.184 J

Temperatura: K

Constante de gases: $0.082 \text{ at} \cdot \text{lt} / \text{K} \cdot \text{mol}$, $8.314 \text{ J} / \text{K} \cdot \text{mol}$

Gases: $1 \text{ m}^3 = 44.6$ moles de gas

5.2 Estequiometría:

Reactivos y productos.

Cantidades relativas.

Cantidades de productos.

Composición de productos.

Pasos a tener en cuenta:

Base de cálculo.

Determinar el número de moles de la base.

Cálculos de las otras moles presentes.

Hacer las conversiones correctas.

Ejemplo del Metano

Balance de materia : estado = sólido + acumulación

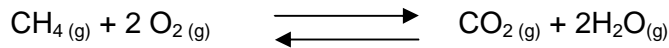
Estado estacionario:

$$\sum_i^n M_i (\% X) = \sum_i^m M_j (\% X) + \Delta M_x$$

Componentes X, Y, Z materias primas A, B, C productos L, M, N

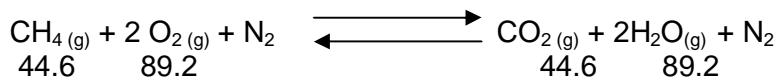
5.3 Ejercicios balances de masa

Ejercicio: Vamos a quemar Metano



Se tiene 1 m³ de Metano. Cuanto aire se necesita para quemar esa cantidad de metano?.
¿Cual es el volumen de los gases de combustión? ¿Cual es la composición en base húmeda y en base seca de los gases de combustión?

Solución:



De los datos del ejercicio se tienen 1 m³ de metano (CH₄), lo cual corresponde a 1000 L y se sabe que en condiciones estándar un mol de un gas ideal ocupa un volumen de 22.4 L, de esta manera se puede calcular con cuantos moles de metano se inicia el proceso.

$$1000 \text{ L} * \frac{1 \text{ n CH}_4}{22.4 \text{ L}} = 44.6 \text{ n CH}_4$$

Además de la estequiometría de la reacción sabemos que para quemar un mol de metano se necesitan dos moles de oxígeno, razón por la cual necesitamos en este caso específico 89.2 moles de O₂. De manera similar se realizó el análisis para cada uno de los compuestos presentes en la reacción.

$$\begin{array}{l} \text{Aire (\% en peso): } \text{N}_2 = 79\% \\ \text{O}_2 = 21\% \end{array}$$

Necesitamos 89.2 moles de O₂, lo cual corresponde a 424.8 moles de aire, veamos:

Conociendo la composición en porcentaje en peso del aire, podemos llegar a saber la cantidad de aire y por consiguiente la cantidad de Nitrógeno que se necesita.

$$\begin{array}{l} (89.2 \text{ n O}_2) / (0.21) = 424.8 \text{ n Aire} \\ \text{N}_2 = 424.8 * 0.79 \\ = 335.6 \text{ n N}_2 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} 424.8 \text{ n Aire} * (22.4 \text{ L}) / (1 \text{ n Aire}) = 9515.5 \text{ L} \\ = 9.5 \text{ m}^3 \end{array}$$

Cálculos en base húmeda (incluye el agua)

Moles de salida: $44.6 + 89.2 + 335.6 = 469.4$

Los gases de combustión ocupan un volumen de $469.4 \cdot 22.4 = 10.5 \cdot 10^3 \text{ L}$

$N_2 = (335.6 / 469.4) \cdot 100$

$H_2O = (89.2 / 469.4) \cdot 100$

$CO_2 = (44.6 / 469.4) \cdot 100$

Cálculos en base seca (no incluye agua)

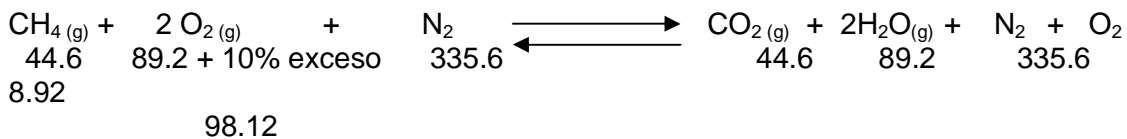
Moles de salida: $44.6 + 335.6 = 380.2$

$N_2 = (335.6 / 380.2) \cdot 100$

$CO_2 = (44.6 / 380.2) \cdot 100$

Esto ocurre si la reacción es perfecta, pero metalúrgicamente se hace con aire u oxígeno en exceso.

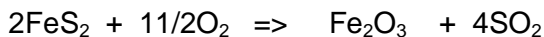
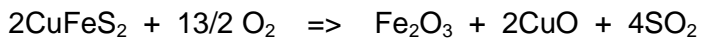
Si hacemos la reacción con un 10% de oxígeno en exceso tenemos:



$(98.12 \text{ n } O_2) / (0.21) = 467.24 \text{ n Aire.}$

5.3.1 Problemas de aplicación

1. Un mineral cuya composición es 55,0% FeCuS₂, 30,0% FeS₂ Y 15,0% de ganga, se trata por tostación a muerte (combustión completa del S), como indican las reacciones siguientes:



Para ello, se emplea un exceso de aire (21% O₂ y 79 % N₂), sobre el teóricamente necesario, del 200%. Calcular, por tonelada de mineral tratado.

- Volumen de SO₂ producido
- Volumen de aire empleado.
- Composición centesimal volumétrica de los gases que se desprenden.
- Composición de material tostado.

P. Atómico: Cu = 63,5; O = 16; S = 32; Fe = 56

P. molecular: FeS₂ = 120; FeCuS₂ = 183,5; Fe₂O₃ = 160; CuO = 79,5

Kmoles						
Compuesto	%	Kmol	O2	CuO	Fe2O3	SO2
FeCuS2	55	3	9,75	3,0	1,50	6,0
FeS2	30	2,5	6,88		1,25	5,0
Ganga	15					
Total			16,63	3,0	2,75	11

Solución:

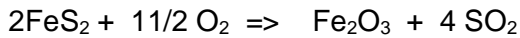
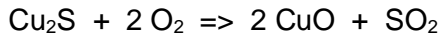
a.- 11 Kmol (SO₂) * 22,4 m³/Kmol = 246,4 m³ de SO₂.

b.- 16,63 Kmol (O₂) * 22,4 m³/Kmol = 372,5m³
 372,5 m³ O₂ * 100 aire/21 O₂ * 3 = 5321 m³ aire.

c.- (5321 m³ (aire) - 372,5 m³ (O₂ gastado)) + 246,4 m³ (SO₂) = 4948,5 + 246,4 = 5194,9 m³ de gases.
 m³ de O₂ que salen por chimenea: 372,5 * 2 = 745
 m³ de N₂ que salen por chimenea: 4948,5 - 745 = 4203,5
 m³ de SO₂ que salen por chimenea: 246,4
 Luego la composición será: 4,8% SO₂, 14,3% O₂ y 80,9% N₂

d.- 2,75 Kmoles de Fe₂O₃ * 160 Kg/Kmol = 440 Kg Fe₂O₃
 3 Kmoles de CuO * 79,5 Kg/Kmol = 238,5 Kg CuO
 550 Kg de ganga,
 Peso total de sólidos a la salida: 828,5 Kg 53,1% Fe₂O₃, 28,8% CuO y 18,1% Ganga.

2. Un mineral de Cobre, está compuesto por Calcosina (Cu₂S) 23,8%, Pirita (FeS₂) 36,0%, Carbonato Cálcico (CaCO₃) 10,0%, Sílice (SiO₂) 26,6% y humedad 3,6%. Se tuesta este mineral a muerte (combustión completa del S), como indican las reacciones siguientes. El aire empleado es el doble del estequiométrico necesario para la oxidación.



Determinese, por Tm de mineral bruto tratado:

- Volumen de aire empleado.
- Volumen de los gases húmedos producidos.
- Composición del material tostado y su ley en Cobre.

P. atómico: Cu = 63,5; O = 16; S = 32; Fe = 56; Ca = 40.

P. molecular: FeS₂ = 120; Cu₂S = 159; SiO₂ = 60; Fe₂O₃ = 160; CuO = 79,5;
 CaO = 56; CaCO₃ = 100.

Kmoles									
Compuesto	Kmol	O2	CuO	Fe2O3	SO2	CO2	CaO	SiO2	H2O
Cu2S	1,50	3,00	3,0		1,5				

FeS ₂	3,00	8,25		1,50	6,0				
CaCO ₃	1,00					1,0	1,0		
SiO ₂	4,43							4,43	
H ₂ O	2,00								2,0
Total		11,25	3,0	1,50	7,5	1,0	1,0	4,43	2,0

Solución.

- a.- $11,25 \text{ Kmol (O}_2) * 22,4 \text{ m}^3/\text{Kmol} = 252 \text{ m}^3 \text{ O}_2$
 $252 \text{ m}^3 \text{ O}_2 * 100 \text{ aire}/21 \text{ O}_2 = 1200 \text{ m}^3 \text{ aire.}$
 Exceso del 100%: $1200 \text{ m}^3 \text{ aire} * 2 = 2400 \text{ m}^3 \text{ aire.}$
- b.- $(2400 \text{ m}^3 \text{ (aire)} - 252 \text{ m}^3 \text{ {O}_2 \text{ gastado}}) + 7.5 \text{ Kmol (SO}_2) * 22.4 \text{ m}^3/\text{Kmol} +$
 $2 \text{ Kmol} * 22.4 \text{ m}^3/\text{Kmol (H}_2\text{O)} + 1 \text{ Kmol} * 22.4 \text{ m}^3/\text{Kmol (CO}_2) = (2400 \text{ m}^3$
 $(\text{aire}) - 252 \text{ m}^3 \text{ (O}_2 \text{ gastado}) + 168 \text{ m}^3 \text{ (SO}_2) + 44,8 \text{ m}^3 \text{ (H}_2\text{O)} + 22,4 \text{ m}^3 \text{ (CO}_2)$
 $= 2383 \text{ m}^3 \text{ de gases húmedos.}$
- c.- $3 \text{ Kmol CuO} * 79,5 \text{ Kg/Kmol CuO} + 1,5 \text{ Kmol Fe}_2\text{O}_3 * 160$
 $\text{Kg/Kmol Fe}_2\text{O}_3 + 1 \text{ Kmol CaO} * 56 \text{ Kg/Kmol CaO} + 266 \text{ Kg}$
 $\text{SiO}_2 = 238,5 \text{ Kg CuO} + 240 \text{ Kg Fe}_2\text{O}_3 + 56 \text{ Kg CaO} + 266 \text{ Kg}$
 $\text{SiO}_2 = 800 \text{ Kg.}$

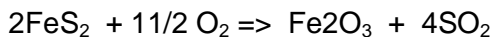
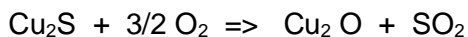
Luego la composición será:

29,8% CuO, 30,0% Fe₂O₃, 7% CaO y 33,2 %SiO₂.

Y su Ley en Cobre:

29,8% CuO * 63.5 g. Cu/79.5 g. CuO = 23,8% Cu.

3. Un horno tuesta directamente, sin ayuda de combustible alguno, 45 Tm/día. de un concentrado de Cobre de la siguiente composición: Calcosina (Cu₂S) 24,0%, Pirita (FeS₂) 48,0%, Sílice (SiO₂) 18,0%, Oxido Cálxico (CaO) 2,8% y humedad 7,2%. El azufre de la Calcosina se quema en un 10% y el de la Pirita en un 90%. En el conjunto de las sucesivas operaciones de carga, rastreo y descarga se pierden 500 g. de Sílice por Tm. De concentrado que se trata. Los gases salen del homo a 250°C. El volumen de aire empleado es 100% en exceso sobre el estequiométrico, para la oxidación,



Determinése, por Tm de mineral bruto tratado:

- Volumen de aire empleado.
- Volumen de los gases húmedos producidos.
- Peso del material tostado por día.
- Contenido en S (% en peso) del producto tostado.

P. atómico: Cu = 63,5 ; O =16 ; S =32 ; Fe = 56

P. molecular: FeS₂ = 120; Cu₂S = 159 ; SiO₂ = 60 ;

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 160; \text{Cu}_2\text{O} = 143; \text{CaO} = 56$$

Kmoles

C	Kmol	Cu ₂ S	FeS ₂	O ₂	Cu ₂ O	Fe ₂ O ₃	SO ₂	CaO	SiO ₂	H ₂ O
Cu ₂ S	1,51(0,15)	1,36		0,225	0,15		0,15			
FeS ₂	4,0(3,6)		0,4	9,9		1,8	7,2			
CaO	0,5							0,5		
SiO ₂	3,0								3,0	
H ₂ O	4,0									4,0
Total		1,36	0,4	10,15	0,15	1,8	7,35	0,5	3,0	4,0

Solución.

a.- $10,125 \text{ Kmol}(\text{O}_2) * 22,4 \text{ m}^3 \text{ mol} = 226,8 \text{ m}^3 \text{ O}_2$ $226,8 \text{ m}^3 \text{ O}_2 * 100 \text{ aire}/21 \text{ O}_2 = 1080 \text{ m}^3$
 aire, $1080 \text{ m}^3 \text{ aire} * 2 = 2160 \text{ m}^3 \text{ aire}$

b.- $(2160 \text{ m}^3 \text{ (aire)} - 226,8 \text{ m}^3 \text{ (O}_2 \text{ gastado)}) + 7,35 * 22,4 \text{ m}^3 \text{ (SO}_2\text{)} + 4 * 22,4 \text{ m}^3 \text{ (H}_2\text{O)}$
 $= 1933,2 \text{ m}^3 \text{ aire} + 164,6 \text{ m}^3 \text{ SO}_2 + 89,6 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O} = 2187 \text{ m}^3 \text{ de gases húmedos.}$

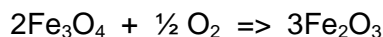
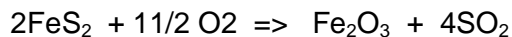
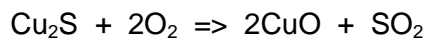
c.- $((1,51 - 0,15) \text{ Kmol} * 159 \text{ Kg/Kmol}(\text{Cu}_2\text{S}) + 0,4 \text{ Kmol} * 120 \text{ Kg/Kmol}(\text{FeS}_2) + 0,15 \text{ Kmol} * 143 \text{ Kg/Kmol}(\text{Cu}_2\text{O}) + 1,8 \text{ Kmol} * 160 \text{ Kg/Kmol}(\text{Fe}_2\text{O}_3) + (180 - 0,5) \text{ Kg} \{ \text{SiO}_2 \} + 28 \text{ Kg} (\text{CaO})) = 216,2 \text{ Kg Cu}_2\text{S} + 48 \text{ Kg FeS}_2 + 21,4 \text{ Kg Cu}_2\text{O} + 288 \text{ Kg Fe}_2\text{O}_3 + 179,5 \text{ Kg SiO}_2 + 28 \text{ Kg CaO} = 781 \text{ Kg por Tm}$
 $781 \text{ Kg/Tm} * 45 \text{ Tm} = 35145 \text{ Kg.}$

d.- Peso de azufre en mena tostada:

En Cu₂S: $216,2 \text{ Kg Cu}_2\text{S} : 216,2 \text{ Kg} * 32 \text{ Kg S}/159 \text{ Kg Cu}_2\text{S} = 43,5 \text{ Kg S}$

En FeS₂: $48 \text{ Kg FeS}_2 : 48 \text{ Kg} * 64 \text{ Kg S}/ 120 \text{ Kg FeS}_2 = 25,6 \text{ KgS}$

4. En un horno de soleras múltiples con rastreo mecánico, sin combustible exterior, se tuesta directamente un concentrado de Cobre que tiene la siguiente composición: Cu₂S: 29,4%, FeS₂: 24,0%, Fe₃O₄: 23,2%, SiO₂: 18,0% y humedad 5,4%. El contenido en azufre en el producto tostado es el 5%. El volumen del aire empleado tiene un exceso del 150% sobre el teóricamente necesario para las reacciones:



Se pide, por Tm. de concentrado:

- a. Peso del producto tostado y sus leyes en Cobre y en hierro.
- b. El volumen de aire realmente empleado.

- c. El peso del fundente (caliza pura) que será necesario emplear si en una subsiguiente fusión se escorifica todo el hierro y la sílice, formándose un subsilicato férrico-cálcico.
- d. Peso de la escoria, y
- e. Volumen total de los gases desprendidos a lo largo de todo el proceso (tostación y fusión escorificante), los cuales son recogidos a una temperatura superior a 175°C.

P. atómico: Ca: 40; O: 16; Fe: 56; C: 12; Cu: 63,5.

P. molecular: CaCO₃: 100; CO₂: 44 ; Fe₃O₄: 232; Cu₂S:159; FeS₂: 120; SO₂: 64; CuO: 79,5; Fe₂O₃: 160; SiO₂: 60

Kmoles

Compuesto	Kmol	Reac.	O ₂	Cu ₂ S	CuO	Fe ₂ O ₃	SO ₂	SiO ₂	H ₂ O
Cu ₂ S	1,85	0,49	0,98	1,36	0,98		0,49		
FeS ₂	2,0		5,5			1,0	4,0		
Fe ₃ O ₄	1,0		0,25			1,5			
SiO ₂	3,0							3,0	
H ₂ O	3,0								3,0
Total			6,73	1,36	0,98	2,5	4,49	3,0	3,0

Solución.

a.- Producto tostado.

Si llamamos M a los Kmoles de Cu₂S que permanecen sin transformar, la masa de material tostado será:

$$3 \text{ Kmol de SiO}_2 * 60 \text{ Kg/Kmol} = 180 \text{ Kg de SiO}_2$$

$$2,5 \text{ Kmol de Fe}_2\text{O}_3 * 160 \text{ Kg/Kmol} = 400 \text{ Kg de Fe}_2\text{O}_3$$

$$M \text{ Kmol de Cu}_2\text{S} * 159 \text{ Kg/Kmol} = 159 * M \text{ Kg de Cu}_2\text{S}$$

$$2 * (1,85 - M) \text{ Kmol de CuO} * 79,5 \text{ Kg/Kmol} = 294 - 159 * M \text{ Kg de CuO}$$

$$180 \text{ Kg de SiO}_2 + 400 \text{ Kg de Fe}_2\text{O}_3 + 159 * M + 294 - 159 * M = 874 \text{ Kg de material tostado.}$$

Puesto que el contenido en azufre en el material tostado es el 5%:

$$874 \text{ Kg de material tostado} * 0,05 = 43,7 \text{ Kg de S.}$$

$$43,7 \text{ Kg de S} * 159 \text{ Kg. Cu}_2\text{S}/32 \text{ Kg. S} = 217 \text{ Kg de Cu}_2\text{S.}$$

$$217 \text{ Kg de Cu}_2\text{S}/159 \text{ Kg/Kmol} = 1,36 \text{ Kmol de Cu}_2\text{S}$$

Luego, si en el material tostado encontramos 1,36 Kmol de Cu₂S, intervienen en la reacción:

$$1,85 - 1,36 = 0,49 \text{ Kmol de Cu}_2\text{S}$$

Ley de Cu:

$$0,98 \text{ Kmol} * 79,5 \text{ Kg/Kmol CuO} = 78 \text{ Kg de CuO}$$

$$78 \text{ Kg CuO} * 63,5 \text{ Kg S}/79,5 \text{ Kg CuO} = 62 \text{ Kg Cu}$$

$$217 \text{ Kg Cu}_2\text{S} * 2 * 63,5 \text{ Kg S}/159 \text{ Kg Cu}_2\text{S} = 173 \text{ Kg Cu}$$

$$62 + 173 = 235 \text{ Kg Cu} \Rightarrow 27 \% \text{ de Cu.}$$

Ley de Fe:

$$400 \text{ Kg Fe}_2\text{O}_3 * 2 * 56 \text{ g Fe}/160 \text{ g Fe}_2\text{O}_3 = 280 \text{ Kg Fe}$$

$$32 \% \text{ Fe.}$$

b.- Volumen de aire,

$$6,73 \text{ mol O}_2 * 22,4 \text{ m}^3/\text{Kmol} = 151 \text{ m}^3 \text{ O}_2$$

$151 \text{ m}^3 \text{ O}_2 * 100 \text{ m}^3 \text{ aire}/21 \text{ m}^3 \text{ O}_2 = 719 \text{ m}^3 \text{ aire estequiométrico}$. Como se utiliza un exceso del 150%:

$$719 \text{ m}^3 \text{ aire} * 2,5 = 1798 \text{ m}^3 \text{ aire}.$$

c.- Peso del fundente. Al formar la escoria un subsilicato, el índice es 1/2, por lo que tenemos:



$$1/2 = 3 * 2 / (2,5 * 3 + X * 1) = 6 / (7,5 + X)$$

$$X = 4,5 \text{ Kmol de CaO}$$



$$4,5 \text{ Kmol de CaCO}_3 * 100 \text{ Kg CaCO}_3/\text{Kmol CaCO}_3 = 450 \text{ Kg CaCO}_3$$

d.- Peso de la escoria;

$$3 \text{ Kmol de Si}_2 * 60 \text{ Kg/Kmol} = 180 \text{ Kg de SiO}_2$$

$$2,5 \text{ Kmol de Fe}_2\text{O}_3 * 160 \text{ Kg/Kmol} = 436 \text{ Kg de Fe}_2\text{O}_3$$

$$3,825 \text{ Kg de CaO} * 56 \text{ Kg/Kmol} = 400 \text{ Kg CaO}$$

Peso total de la escoria:

$$180 \text{ Kg de SiO}_2 + 400 \text{ Kg de Fe}_2\text{O}_3 + 252 \text{ Kg CaO} = 832 \text{ Kg}.$$

e.- Volumen de los gases desprendidos.

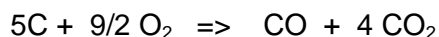
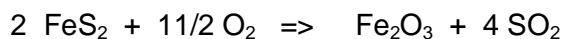
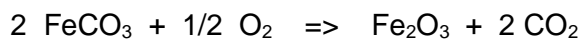
$$1798 \text{ m}^3 \text{ aire} - 151 \text{ m}^3 \text{ O}_2 \text{ que se consume} + 4,49 \text{ Kmol SO}_2$$

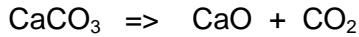
$$* 22,4 \text{ m}^3/\text{Kmol} + 3 \text{ Kmol H}_2\text{O} * 22,4 \text{ m}^3/\text{Kmol} = 1798 \text{ m}^3$$

$$\text{aire} - 151 \text{ m}^3 \text{ O}_2 + 100,6 \text{ m}^3 \text{ SO}_2 + 67,2 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O} = 1815 \text{ m}^3 \text{ de gases húmedos}.$$

5. Se sinteriza una mezcla de distintos minerales de hierro, cuya composición media es la siguiente: 69,6 % FeCO₃, 6% FeS₂, 5,8% Fe₃O₄, 15% CaCO₃ y 3,6% H₂O. Se mezcla con coque en la proporción: 50 Kg de éste por tonelada de mineral bruto, y la composición de aquél es: 87% C, 6% SiO₂, 2% Al₂O₃ y 5% CaO, el cual se quema incompletamente, dando un volumen de CO₂ cuádruple del de CO.

La operación se realiza según las reacciones siguientes:





Empleando un volumen de aire con un exceso del 50% sobre el teóricamente necesario, y su composición el 30% O₂ y 70% N₂.

Determinése, por Tm. de mineral tratado:

a.- Peso del mineral sinterizado, y su ley en hierro,

b.- Volumen de aire empleado.

c.- Volumen total de los gases húmedos desprendidos en el curso del proceso.

P. atómico: Ca: 40; O: 16; S: 32, Fe: 56; C: 12; Si: 28, Al: 27.

P. molecular: CaCO₃: 100; CO₂: 44; Fe₃O₄: 232; FeS₂: 120; Fe₂O₃: 160;

SiO₂: 60; FeCO₃: 116; CaO: 56; Al₂O₃: 102; CO: 28.

Kmoles

C	Kmol	O2	Fe2O3	CaO	CO2	SO2	CO	H2O	Al2O3	SiO2
FeCO3	6	1,5	3		6					
FeS2	0,5	1,375	0,25			1,0				
Fe3O4	0,25	0,063	0,375							
CaCO3	1,5			1,5	1,5					
H2O	2							2		
C	3,625	3,263			2,9		0,725			
Al2O3	0,01								0,01	
CaO	0,045			0,045						
SiO2	0,05									0,05
total		6,2	3,625	1,545	10,4	1,0	0,725	2	0,01	0,05

Solución.

a.- 3,625 Kmole Fe₂O₃ * 160 Kg/Kmole = 580 Kg Fe₂O₃

1,545 Kmole CaO * 56 Kg/Kmole = 86,5 Kg CaO

1 Kg Al₂O₃

3 Kg SiO₂

670 SOLIDO

580 Kg Fe₂O₃ * 2 * 56/160 = 406 Kg Fe

406 Kg Fe * 100 /670 Kg Total = 60,6 % Fe

b.- 6,2 Kmole O₂ * 22,4 m³/Kmole O₂ = 139 m³ O₂.

139 m³ O₂ * 100 aire/30 O₂ = 463 m³ Aire esteq.

463 m³ Aire estequiométrico * 1,5 = 695 m³ Aire Real

c.- 695 m³ Aire - 139 m³ O₂ = 556 m³

10,4 Kmole CO₂ * 22,4 m³/Kmole CO₂ = 233 m³ CO₂

1 Kmole SO₂ * 22,4 m³/Kmole SO₂ = 22,4 m³ SO₂

0,725 Kmole CO * 22,4 m³/Kmole CO = 16,2 m³ CO

2 Kmole H₂O * 22,4 m³/Kmole H₂O = 44,8 m³ H₂O

872 m³ G.H.

6. Se realiza la siguiente mezcla de minerales de Cu y Fe: 20 Kg FeS_2 , 70 Kg Fe_2O_3 , 15 Kg CuFeS_2 y 90 Kg CuO .

Calcular:

- a.- Ley en Hierro.
- b.- Ley en Cobre.
- c.- El contenido en Azufre.
- d.- El contenido en Oxígeno.

P. atómicos; O: 16; S: 32; Fe: 56; Cu: 63,5.

Solución

- a.- 32,3% Fe
- b.- 39,5% Cu
- c.- 8,2% S
- d.- 20,0% Oxígeno

7. Se somete a calcinación una carga de 1200 Kg de mineral que contiene 90% CaCO_3 , 5% MgCO_3 , 3% de materia inerte y 2% H_2O , obteniéndose un rendimiento en el proceso del 92%. Calcular:

- a.- Peso y composición del sólido final.
- b.- Volumen de los gases húmedos que se desprenden, y la composición de los mismos.

P. atómico: Ca = 40; Mg: 24,3; C: 12

P. molecular: $\text{CaCO}_3 = 100$; $\text{MgCO}_3 = 84,3$; $\text{CaO} = 56$; $\text{MgO} = 40,3$

Solución.

- a.- 710 Kg Sólido. 78,4% CaO ; 12,1% CaCO_3 ; 3,7% MgO ; 0,7% MgCO_3 ; 5,1% material inerte.
- b.- 267 m³ G. H. 88,8% CO_2 y 11,2% H_2O .

8. Se calcinan 8000 Kg de un mineral que contiene 87% CaCO_3 , 8% MgCO_3 , 3% de materia inerte y 2% H_2O , obteniéndose un rendimiento en el proceso del 95%. Calcular:

- a.- Peso y composición del sólido al final de la calcinación.
- b.- Volumen de los gases húmedos que se desprenden, y su composición.

P. atómicos: C: 12; Mg: 24,3; Ca: 40

P. moleculares: $\text{CaO} = 56$; $\text{MgO} = 40,3$; $\text{CaCO}_3 = 100$; $\text{MgCO}_3 = 84,3$.

$\text{CaCO}_3 \Rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

$\text{MgCO}_3 \Rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2$

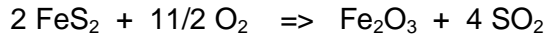
Solución.

- a.- 4614 Kg Sólido.

80,3% CaO, 6,3% MgO, 7,5% CaCO₃, 0,7% MgCO₃, 5,2% M.I.

b.- 1842 m³ G. H., 89% CO₂, 11% G. H.

9. Un mineral cuya composición es 53,9% FeCuS₂, 35,2% FeS₂ y 10,9% de ganga, se trata por tostación a muerte, como indican las reacciones siguientes:



Para ello, se emplea un exceso de aire, sobre el teóricamente necesario, del 200%. Calcular, por tonelada de mineral tratado:

- a.- Volumen de SO₂ producido.
- b.- Volumen de aire empleado.
- c.- Composición centesimal volumétrica de los gases que se desprenden.
- d.- Composición del material tostado.

P. atómico: Cu = 63,5; O = 16; S = 32; Fe = 56.

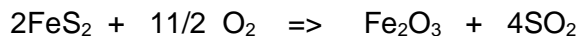
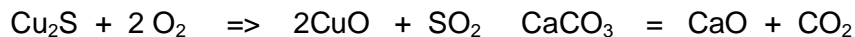
P. molecular: FeS₂ = 120; FeCuS₂ = 183,5; Fe₂O₃ = 160; CuO = 79,5

Solución.

- a.- 263 m³ de SO₂.
- b.- 5640 m³ aire.
- c.- 4,8% SO₂, 14,3% O₂ y 80,9% N₂
- d.- 813 Kg. 57,9% Fe₂O₃, 28,7% CuO y 13,4% Ganga.

10. Un mineral de Cobre, está compuesto por 19,2% Cu₂S, 36,0% FeS₂, 8,2% CaCO₃, 33% SiO₂ y 3,6% de humedad.

Se tuesta este mineral a muerte, como indican las reacciones siguientes. El aire empleado es el doble del estequiométrico necesario para la oxidación.



Determinese, por Tm de mineral bruto tratado:

- a.- Volumen de aire empleado.
- b.- Volumen de los gases húmedos producidos.
- c.- Composición del material tostado y su ley en Cobre.

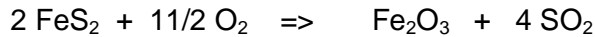
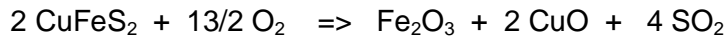
P. atómico: Cu = 63,5; O = 16; S = 32; Fe = 56; Ca = 40.

P. molecular: FeS₂ = 120; Cu₂S = 159; SiO₂ = 60; Fe₂O₃ = 160; CuO = 79,5;
CaO = 56; CaCO₃ = 100.

Solución.

- a.- 2272 m³ aire.
- b.- 2258 m³ G. H.
- c.- 23,6% CuO, 29,7% Fe₂O₃, 5,7% CaO y 41,0% SiO₂. 18,9% Cu.

11. Un mineral, cuya composición es 50,7% FeCuS₂, 38,4% FeS₂ y el resto Ganga, se trata por tostación a muerte, según las reacciones:



Empleando un exceso de aire (21% O₂, 79% N₂) del 100% sobre el teóricamente necesario. Calcular, por tonelada de mineral que se tuesta:

- a.- Volumen de SO₂ desprendido.
- b.- Volumen de aire empleado.
- c.- Composición de los gases que se desprenden en todo el proceso.
- d.- Peso y composición del material sólido que se recoge al final.

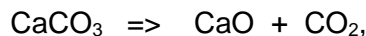
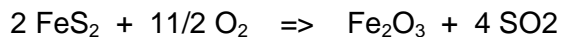
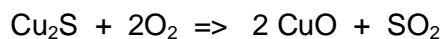
P. at. O: 16; S: 32; Fe: 56; Cu: 63,5

P. mol. FeS₂: 120; FeCuS₂: 183,5; Fe₂O₃: 160; CuO: 79,5

Solución.

- a.- 267 m³ SO₂
- b.- 3790 m³ Aire empleado
- c.- 10,9% O₂; 81,8% N₂; 7,3% SO₂.
- d.- 805 Kg Sólidos, 59,3% Fe₂O₃, 27,2% CuO; 13,5% M, I.,

12. Un mineral, seco, que está compuesto por 26,0% de Cu₂S, 45,0 % de FeS₂, 13,0% CaCO₃ y 16,0% SiO₂, se tuesta a muerte según las reacciones siguientes:



Si se emplea aire con un exceso del 150%, determínese, por Tm de mineral tratado:

- a.- Volumen de aire empleado.
- b.- Volumen de los gases que salen del horno.
- c.- Peso, composición del material tostado y su Ley en Cobre,

P. at. O: 16; S: 32; Fe: 56; Cu: 63,5; Ca: 40

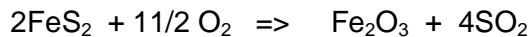
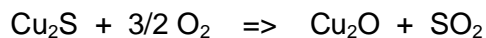
P. mol. FeS₂: 120; Cu₂S: 159; Fe₂O₃: 160; CuO: 79,5; SiO₂: 60; CaO: 56; CaCO₃: 100

Solución.

- a.- 3620 m³ Aire empleado.
- b.- 3550 m³ Gas
- c.- 793 Kg. Sólido.
32,8% CuO, 37,8% Fe₂O₃, 9,2% CaO, 20,2% SiO₂.
26,2% Cu.

13. Un horno tuesta directamente, sin ayuda de combustible alguno, 50 Tm/día de un concentrado de Cobre de la siguiente composición: 27,0% Cu₂S, 44,4% FeS₂, 15,0% SiO₂, 4,6% CaO y 8,0 % de humedad.

El azufre del Cu₂S se quema en un 8% y el de la Pirita en un 95%. En el conjunto de las sucesivas operaciones de carga, rastreo y descarga se pierden 1Kg de Sílice por Tm, de concentrado que se trata. El volumen de aire empleado es 150% en exceso sobre el estequiométrico, para la oxidación.



Determinése, por Tm de mineral bruto tratado:

- a.- Volumen de aire empleado.
- b.- Volumen de los gases húmedos que salen del horno.
- c.- Peso del material tostado por día.
- d.- Contenido en S (% en peso) del sólido final.

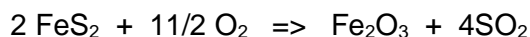
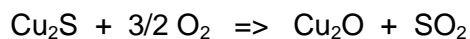
P. atómico: Cu = 63,5; O = 16; S = 32; Fe = 56.

P. moicuiar: FeS₂ = 120; Cu₂S = 159; SiO₂ = 60; Fe₂O₃ = 160; Cu₂O = 143; CaO = 56

Solución.

- a.- 2631 m³ aire
- b.- 2670 m³ G. H.
- c.- 38300 Kg.
- d.- 8,0% S.

14. Un horno tuesta 60 Tm/día de un concentrado de Cobre de la siguiente composición: 31% Cu₂S, 51% FeS₂, 18 % inertes. El azufre del Cu₂S se transforma en un 4%, y el del FeS₂ en un 94%. En el conjunto de las sucesivas operaciones de carga, rastreo y descarga, se pierden 4 Kg de inertes por tonelada de concentrado. Si el volumen de aire empleado es del 125% en exceso sobre el estequiométrico para las reacciones;



Determinése:

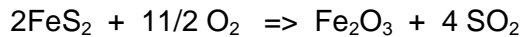
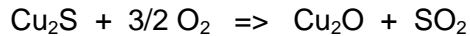
- a.- Volumen de aire empleado, por Tm de mineral tratado.
- b. Volumen de los gases que se desprenden del horno, por Tm de mineral tratado.
- c.- Peso del sólido que se retira del horno al final del día.
- d.- Contenido en azufre del producto tostado: % en peso.

P. at. O: 16; S: 32; Fe: 56; Cu: 63,5
P. mol. FeS₂: 120; Cu₂S: 159; Fe₂O₃: 160; Cu₂O: 143

Solución.

- a.- 2668 m³ Aire empleado.
- b.- 2600 m³ Gas
- c.- 50,1Tm/día
- d.- 9,1%S

15. Un horno tuesta 50 Tm/día de un concentrado de Cobre de la siguiente composición: 27% Cu₂S, 44,4% FeS₂, 15 % SiO₂, 4,6% CaO y 8% H₂O. El azufre del Cu₂S se transforma en un 8%, y el del FeS₂ en un 95%. En el conjunto de las sucesivas operaciones de carga, rastreo y descarga, se pierden 1 Kg de SiO₂ por tonelada de concentrado. Si el volumen de aire empleado es del 150% en exceso sobre el estequiométrico para las reacciones:



Determinése:

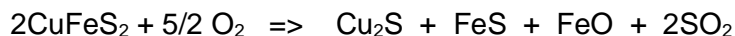
- a.- Volumen de aire empleado.
- b.- Volumen de los gases que se desprenden del horno.
- c.- Peso del sólido que se retira del horno al final del día.
- d.- Contenido en azufre del producto tostado (% en peso).

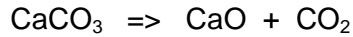
P. at. O: 16; S: 32; Fe: 56; Cu: 63,5
P. mol. FeS₂: 120; Cu₂S: 159; Fe₂O₃: 160; Cu₂O: 143

Solución.

- a.- 2631 m³ Aire empleado.
- b.- 2670 m³ Gas
- c.- 38350 Kg/día
- d.-8.1%S

16. Se dispone de un concentrado procedente de una mena sulfurada de Cobre de la siguiente composición: 77,0% CuFeS₂, 21% SiO₂ y 2,0% CaO. Se somete este concentrado a un proceso de fusión para matas, con objeto de obtener una MATA compuesta por una mezcla equimolecular de sulfuros de Cu¹⁺ y Fe²⁺ y, simultáneamente, una ESCORIA constituída exclusivamente por Bisilicato (i=2/1) de Fe²⁺ y Ca, a base del óxido de Fe²⁺ procedente de la oxidación parcial del hierro contenido en CuFeS₂, de la ganga y de la piedra caliza pura empleada como fundente:





Se pide, por Tm. de concentrado:

- a.- Peso de la Mata obtenida y su ley en Cobre.
- b.- Peso de la escoria producida y de la piedra caliza empleada como fundente,
- c.- Volumen total de los gases desprendidos a lo largo de todo el proceso y su composición.

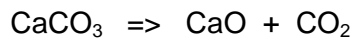
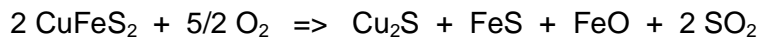
P. atómico: Ca: 40; O: 16; Fe: 56; C: 12; Cu: 63,5.

P. molecular; CuFeS₂: 183,5; SiO₂: 60; CaO: 56; Cu₂S: 159, FeS: 88; FeO: 72;
CaCO₃: 100.

Solución.

- a.- 518,7 Kg. de MATA. 51,4 % Cu.
- b.- 440 Kg. de Escoria. 104 Kg. de piedra caliza.
- c.- 560 m³ de gases. 79% N₂, 16,8% SO₂ y 4,2% CO₂

17. Se dispone de un concentrado procedente de una mena sulfurada de Cobre de la siguiente composición: 73,4% CuFeS₂, 18% SiO₂ y 8,6% CaO. Se somete este concentrado a un proceso de fusión para matas, con objeto de obtener una MATA compuesta por una mezcla equimolecular de sulfuros de Cu¹⁺ y Fe²⁺ y, simultáneamente, una ESCORIA constituida exclusivamente por Subsulfato (i=1/2) de Fe²⁺ y Ca, procedente de la oxidación parcial del hierro contenido en CuFeS₂, de la ganga y de la piedra caliza pura empleada como fundente.



Calcular, por Tm de concentrado:

- a.- Peso de la MATA obtenida y su Ley en Cobre.
- b.- Peso de la ESCORIA y de la Piedra Caliza empleada como fundente.
- c.- Volumen total de los gases desprendidos en el curso de todo el proceso, y su composición.

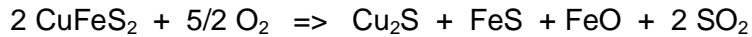
P. at. O: 16; S: 32; Fe: 56; Cu: 63,5; C: 12; Ca: 40

P, mol. CuFeS₂: 183,5; Cu₂S: 159; SiO₂: 60; CaO: 56; FeS: 88; FeO: 72; CaCO₃: 100

Solución

- a.- 494 Kg MATA. 51,4% Cu
- b.- 884 Kg ESCORIA. 846 Kg CaCO₃
- c.- 700 m³ Gases. 60,2% N₂; 12,8% SO₂ 27,0% CO₂.

18. Se dispone de un concentrado procedente de una mena sulfurada de Cobre de la siguiente composición: 77,0% CuFeS_2 , 21,0% SiO_2 y 2,0% CaO , Se somete este concentrado a un proceso de fusión para matas, con objeto de obtener una MATA compuesta por una mezcla equimolecular de sulfuros de Cu^{1+} y Fe^{2+} y, simultáneamente, una ESCORIA constituida exclusivamente por Bisilicato ($i=2/1$) de Fe^{2+} y Ca , procedente de la oxidación parcial del hierro ' contenido en CuFeS_2 , de la ganga y de la piedra caliza pura empleada como fundente.



Calcular, por Tm de concentrado:

- Peso de la MATA obtenida y su Ley en Cobre.
- Peso de la ESCORIA y de la piedra caliza empleada como fundente.
- Volumen total de los gases desprendidos en el curso de todo el proceso, y su composición.

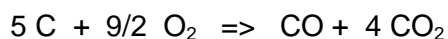
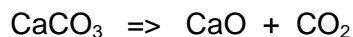
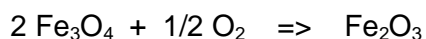
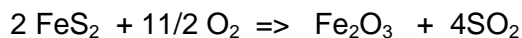
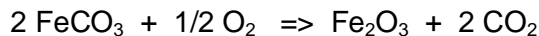
P. at. O: 16; S: 32; Fe: 56; Cu: 63,5; C: 12; Ca: 40

P. mol. CuFeS_2 : 183,5; Cu_2S : 159; SiO_2 : 60; CaO : 56; FeS : 88; FeO : 72; CaCO_3 : 100

Solución

- 519 Kg MATA. 51,4% Cu
- 439 Kg ESCORIA. 104 Kg CaCO_3
- 561 m³ Gases. 79,1% N_2 ; 16,8% SO_2 ; 4,1% CO_2 .

19. Se sinteriza un mineral de hierro con la composición media siguiente: 75,4% Siderita, 6% Pirita, 4,6 Magnetita, 10,4% Calcita y 3,6% Humedad. El mineral se mezcla con coque en la proporción de 75 Kg de coque por tonelada de mineral bruto. La composición del coque es: 84% Carbono, 6% Cal, 5% Alúmina y 5% Sílice, y quema de forma incompleta, dando un volumen de dióxido de carbono cuádruple del de monóxido de carbono. Las reacciones que se producen son las siguientes:



La operación se realiza empleando un volumen de aire con un exceso del 75% sobre el teóricamente necesario, y su composición es 25% de oxígeno y el resto nitrógeno. Determínese, por Tm de mineral bruto tratado:

- a.- Peso del mineral sinterizado y su Ley en hierro.
- b.- Volumen de aire empleado,
- c.- Volumen total de los gases que se desprenden durante el proceso (en condiciones normales), teniendo en cuenta que se recogen a 200°C.

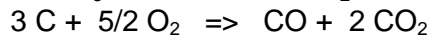
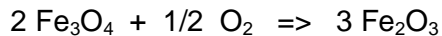
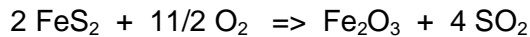
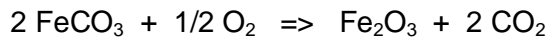
P. at. Fe: 56; C: 12.

P. mol. FeS₂: 120; FeCO₃: 116; Fe₂O₃: 160; Fe₃O₄: 232; CaCO₃: 100; SiO₂: 60; CaO: 56; H₂O: 18; Al₂O₃: 102

Solución

- a.- 679 Kg sólido. 62,7% Fe
- b.- 1218 m³ Aire empleado.
- c.- 1398 m³ G. H.

20. Se sinteriza un mineral de hierro con la composición media siguiente: 81,2% Siderita, 4,8% Pirita, 4,6 Magnetita, 7,6% -Calcita y 1,8% Humedad. El mineral se mezcla con coque en la proporción de 80 Kg de coque por tonelada de mineral bruto. La composición del coque es: 85,5% Carbono, 7% Cal, 2,5% Alúmina y 5% Sílice, y quema de forma incompleta, dando un volumen de dióxido de carbono doble del de monóxido de carbono. Las reacciones que se producen son las siguientes:



La operación se realiza empleando un volumen de aire con un exceso del 60% sobre el teóricamente necesario.

Determinése, por Tm de mineral bruto tratado:

- a.- Peso del mineral sinterizado y su Ley en hierro.
- b.- Volumen de aire empleado.
- c.- Volumen total de los gases húmedos que se desprenden durante el proceso (en condiciones normales).

P. at. Fe: 56; C: 12.

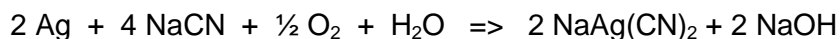
P. mol. FeS₂: 120; FeCO₃: 116; Fe₂O₃: 160; Fe₃O₄: 232; CaCO₃: 100; SiO₂: 60; CaO: 56; H₂O: 18; Al₂O₃: 102.

Solución

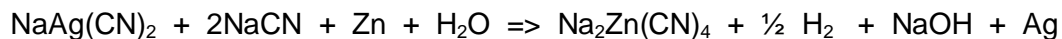
- a.- 694 Kg sólido. 64,5% Fe
- b.- 1302 m³ Aire empleado.

c.- 1473 m³ G. H.

21. Se trata un mineral de plata, que contiene 550 g. de plata por Tm, con solución cianurada, dejando sin extraer 50g, según la reacción;



La Ag se precipita con Zn según:



Calcular:

a.- Rendimiento en la extracción de Ag.

b.- Cantidad teórica de NaCN utilizada en la extracción, y de Zn en la precipitación de la plata.

c.- Cantidades reales, sabiendo que las anteriores son el 35% y el 30%, respectivamente, de las empleadas.

P. atómicos: Ag: 108; Na: 23; C: 12; N: 14; Zn: 65,4

P. moleculares: NaCN: 49.

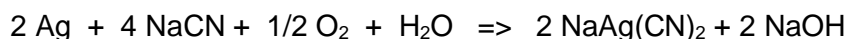
Solución.

a.- 91%.

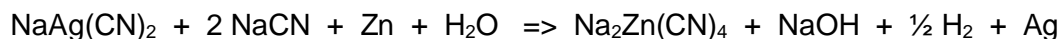
b.- 454 g NaCN y 303 g Zn.

c.- 1297 g. NaCN y 1010 g Zn.

22. Se tratan 150 Tm de un mineral de Ag, que contiene 450 g Ag por Tm, con solución cianurada, según la reacción siguiente:



dejando sin extraer 40 g/Tm. Posteriormente, la Ag se precipita con Zn, según:



Calcular;

a.- Rendimiento en la extracción de Ag.

b.- Cantidad teórica de NaCN utilizada en la extracción de Ag (1a reacción), y de Zn en la precipitación de la Ag (2a reacción).

c.- Cantidades reales, sabiendo que las anteriores son el 30% y el 25%, respectivamente de las realmente empleadas.

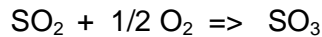
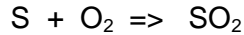
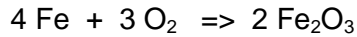
P. atómicos, Ag: 108; Na: 23; C: 12; N: 14; Zn: 65,4

P. molecular. NaCN: 49.

Solución.

- a.- 91%.
- b.- 55,8 Kg NaCN y 37,2 Kg Zn.
- c.- 186 Kg. NaCN y 149 Kg Zn.

23. Un mineral de hierro, que contiene 47,5 % Fe y 48% S, se calcina en un horno con un exceso de aire del 50% sobre el teóricamente necesario. Los gases que salen del horno, pasan a un convertidor con una eficacia del 96%.



Calcular:

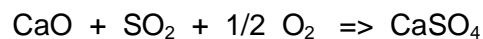
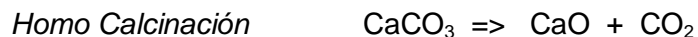
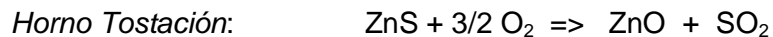
- a. El volumen y la composición de los gases que salen del horno.
- b. El volumen y la composición de los gases que salen del convertidor.

P. atómicos: Fe: 55,85; S: 32

Solución.

- a.- 238m³ GASES. 10,1% O₂; 75,7% N₂; 14,1% SO₂.
- b.- 221,5 m³ GASES.
3,53% O₂; 81,31% N₂; 14,55% SO₃; 0,61% SO₂.

24. Un mineral de Zn contiene 77,9% Blenda (ZnS) y 22,1% de material inerte, y se tuesta en un horno con aire seco, con un exceso del 75% Los gases que salen del horno, se pasan por un lecho catalítico de V₂O₅ en el que un 95% de SO₂ se transforma en SO₃. Los gases que salen de este convertidor, se pasan por una torre de absorción, en la que el 91% del SO₃ se transforma en H₂SO₄ del 98%, pulverizando agua por la parte superior de la torre de absorción.



Se desea producir 40 Ton/hora de H₂SO₄ del 98%. Calcular:

- a. El análisis de los gases que salen del horno de tostación.
- b. El análisis de los gases que se desprenden del convertidor.

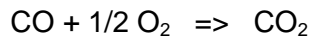
- c. Cantidad de H₂SO₄ y de H₂O que se forman a partir de 100 Kg de mineral.
- d. Mineral que se tuesta por hora.
- e. Volumen de aire que entra en el horno por hora.
- f. Cantidad de piedra caliza pura necesaria para captar los óxidos de azufre que se desprende al final del día, y peso del CaSO₄ formado.

P. mol.: ZnS: 97,4; H₂SO₄: 98; H₂O: 18; CaCO₃: 100; CaO: 56;
CaSO₄:136,

Solución.

- a.- 9,2% O₂; 82,5% N₂; 8,3% SO₂.
- b.- 5,4% O₂; 86,0% N₂; 8,2% SO₃; 0,4% SO₂.
- c.- 69 Kg H₂SO₄ 98%. 13,8 Kg H₂O.
- d.- 57971 Kg mineral/h.
- e.- 131014 m³ Aire/hora.
- f.- 153 Tm CaCO₃/día. 209 Tm CaSO₄/día.

25. La composición en peso de un combustible gaseoso es la siguiente: 34% CO, 4% CO₂, 1% O₂ y 61% N₂. Un depósito de 750 Kg de gas, utiliza un 25% de exceso de aire.



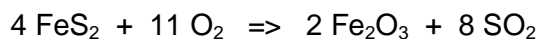
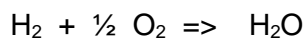
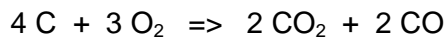
Calcular:

- a. Volumen de aire necesario.
 - b; Volumen de los gases que se desprenden, y su composición.
- P. at. O: 16; N: 14; C: 12
P. mol. CO: 28; CO₂: 44; N₂: 28; O₂: 32.

Solución.

- a.- 541 m³ Aire empleado.
- b.- 1030 m³ Gases. 2,2 % O₂; 76,5 % N₂; 21,3 % CO₂.

26. Se somete a un proceso de combustión, un carbón con la composición, en peso, siguiente: 81,6% C, 7,9% H₂, 6% FeS₂, 2,7% SiO₂ y 1,8% H₂O, según las reacciones;



Calcular, por Tm de carbón:

- a. Volumen de aire necesario para que se realice la combustión.
- b. Peso de las cenizas producidas.

c. Volumen de gases húmedos, supuesto que el aire realmente suministrado sea 175% en exceso del teórico.

Pesos atómicos: H: 1, C: 12, O: 16, S: 32, Fe: 56

Pesos moleculares: FeS₂: 120, SiO₂: 60, H₂O: 18, Fe₂O₃: 160.

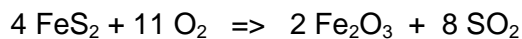
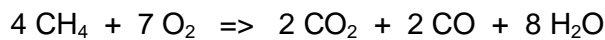
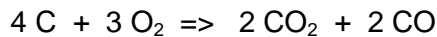
Solución.

a.- 9505 m³ Aire

b.- 67 Kg CENIZAS

c.- 26596m³ G. H.

27. Un carbón, cuya composición en peso es: 69% C, 5,6% CH₄, 3,6% FeS₂, 3,1% SiO₂, 6% Al₂O₃, 1,4% N₂, 3,2% O₂ y 8,1% H₂O, se somete a un proceso de combustión en el que el carbono (incluido el que forma parte del metano) quema de forma incompleta, dando un volumen de CO₂ igual al de CO, según las reacciones:



El exceso de aire empleado, sobre el teóricamente necesario, es del 40% y presenta una humedad (todo el aire) del 3%. Se pide, por Tm de carbón:

a. Volumen teórico de aire seco inyectado.

b. Volumen real de aire utilizado.

c. Peso de las cenizas.

d. Volumen total de los gases desprendidos, si son recogidos a una temperatura superior a 200°C.

P. at.: H: 1, C: 12, O: 16, N: 14, S: 32, Fe: 56

P. mol.: CH₄: 16, FeS₂: 120, SiO₂: 60, Al₂O₃:102, N₂:28, O₂:32,

H₂O: 18, Fe₂O₃: 160.

Solución.

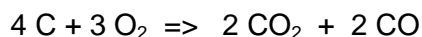
a.- 5,233 m³ Aire.

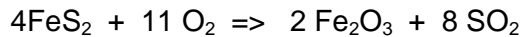
b.- 7,553 m³ Aire

c.- 115 Kg Cenizas

d.- 8.103 m³ G. H.

28. Un carbón, cuya composición en peso es; 69% C, 5,6% CH₄, 3,6% FeS₂, 3,1% SiO₂, 6% Al₂O₃, 1,4% N₂, 3,2% O₂ y 8,1% H₂O, se somete a un proceso de combustión en el que el carbono (incluido el que forma parte del metano) quema de forma incompleta, dando un volumen de CO₂ igual a! de CO, según las reacciones;





El exceso de aire empleado, sobre el teóricamente necesario, es del 40% y presenta una humedad (todo el aire) del 3%. Se pide, por Tm de carbón:

- a.- Volumen teórico de aire seco inyectado.
- b.- Volumen real de aire utilizado.
- c.- Peso de las cenizas.
- d.- Volumen total de los gases húmedos desprendidos.

P. atómico: H: 1, C: 12, O: 16, N: 14, S: 32, Fe: 56

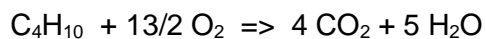
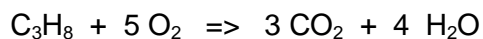
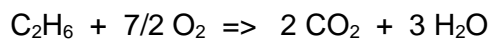
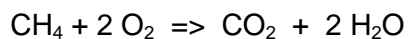
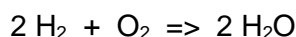
P. molecular: CH₄: 16, FeS₂:120, SiO₂: 60, Al₂O₃: 102, N₂:28, O₂:32, H₂O: 18, Fe₂O₃: 160.

Solución.

- a.- 5.233 m³ de aire teórico seco.
- b.- 7.553 m³ de aire real húmedo
- c.- 115 Kg de cenizas.
- d.- 8.103 m³ de gases húmedos.

29. Un m³ de un combustible gaseoso, cuya composición es 18,5% H₂, 21,5% CH₄, 15,7% C₂H₆, 25,3% C₃H₈ y el resto C₄H₁₀, sufre una combustión completa en los mecheros de un horno empleado para el tratamiento térmico de piezas metálicas. Teniendo en cuenta que el aire inyectado ha sido el teóricamente necesario, se pide:

- a.- Volumen de aire inyectado.
- b.- Volumen total de gases húmedos desprendidos y su composición.
- c.- Poder calorífico del combustible.

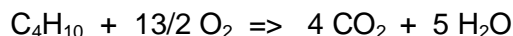
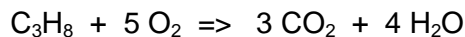
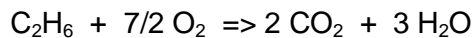
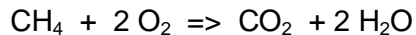
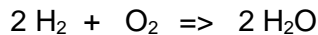


P. calorífico (Kcal/mol): H₂: 68,32; CH₄: 212,8; C₂H₆: 372,8; C₃H₈: 530,6; C₄H₁₀: 687,98,

Solución.

- a.- 17009 litros de aire.
- b.- 18.533 litros G.H. 11,0% CO₂, 16,5% H₂O y 72,5% N₂.
- c.- 17.041 Kcal.

30. Un m³ de un combustible gaseoso, cuya composición volumétrica es la siguiente: 20,3% Hidrógeno, 22,4% Metano, 15,0% Etano, 22,0% Propano y 20,3% Butano, sufre una combustión completa en los mecheros de un horno empleado para el tratamiento térmico de piezas metálicas, según las reacciones siguientes:



Teniendo en cuenta que el aire inyectado ha sido el teóricamente necesario, calcular:

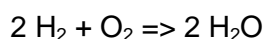
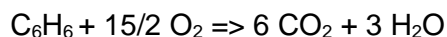
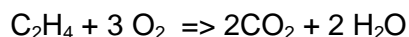
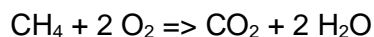
- Volumen de aire inyectado.
- Volumen total de los gases que salen del horno, y su composición.
- Poder calorífico del combustible.

Poder calorífico (Kcal/mol): H₂: 68,32; CH₄: 212,8; C₂H₆: 372,8; C₃H₈: 530,6; C₄H₁₀: 687,98.

Solución.

- 16638 litros de aire.
- 18136 litros de G. H. 72,5 % N₂; 16,5 % H₂O; 11,0 % CO₂.
- 16688 Kcal./m³ combustible

31. La composición de un gas natural de la siguiente composición: 82,9% Metano, 4,5% Etileno, 2,8% Benceno, 5,6% Hidrógeno y 4,2% Nitrógeno, sufre una combustión completa en los mecheros de un horno empleado para la fabricación de materiales refractarios, según las reacciones:



Teniendo en cuenta que la combustión se realiza con un exceso de aire del 25%, y que todo el aire contiene una humedad del 2,5%, calcular, por metro cúbico de combustible:

- Volumen teórico de aire seco inyectado.
- Volumen de aire real utilizado.

- c. Volumen de gases húmedos desprendidos en el proceso.
- d. Poder calorífico del combustible.

P. cal. (Kcal/mol): CH₄: 212,8; C₂H₄: 337,23; C₆H₆: 789,08; H₂: 68,32.

Solución.

- a. 10671 litros de Aire
- b. 13681 litros A. R.
- c. 14457 litros de G. H.
- d. 9705 Kcal/m³ combustible

6 PRINCIPIOS DE AGLOMERACIÓN

Las partículas finas pueden ser *aglomeradas* o unidas para formar material apropiado para otros procesos al aumentar el tamaño de las mismas, su conductividad térmica, ductibilidad; además de su densidad en muchos casos.

Las técnicas de aglomeración (sólido/sólido) más ampliamente usadas son briquetización, sinterización, nodulización y peletización.

6.1 Briquetización

Es la compresión de mezclas de finas partículas con varias formas de aglutinante para producir grandes partículas compuestas, proceso que ocurre sin reacción química. El aglutinante puede ser un material inorgánico, cal, cemento, arcilla u orgánico, alquitrán o brea. En algunos casos, las briquetas son después calentadas para producir fuerza adicional. Debido al fuerte desgaste en la compresión de briquetas se ha encontrado que este proceso es relativamente costoso.

6.2 Peletización

Este proceso consiste en hacer rodar los polvos finos en un barril o disco con agua y algunas veces con un aglutinante de arcilla inorgánica. El agua moja las finas partículas y las fuerzas capilares en los poros entre las partículas las unen. El proceso es parecido a hacer rodar bolas de nieve y pueden fabricarse con mucha facilidad grandes pelets porosos de 10 – 30 mm de diámetro. Estos pelets antes de entrar al horno o sin calentar pueden manipularse sin que se degraden pero para lograr resistencia en temperatura estos deben ser calentados para formar enlaces en el estado sólido entre las partículas.

Los enlaces han sido estudiados por Fisher y Rumpf. Las fuerzas actúan en dos esferas iguales a través de una gota de líquido en su punto de contacto (ver figura), esto es debido a:

(a) Tensión superficial y (b) debido a la deficiencia de la presión hidrostática dentro de la gota, bajo presión atmosférica. Esto puede ser mostrado así:

(a) $2\pi b\sigma$

(b) $\pi b^2\sigma\left(\frac{1}{c} - \frac{1}{b}\right)$

Donde:

σ Es la tensión superficial del líquido.

c : radio de la unión (se asume que ésta unión es circular).

b : es el radio del lente y del "cuello" (ver figura)

El término $\left(\frac{1}{c} - \frac{1}{b}\right)$ es una estimación de la curvatura de la superficie del líquido (Fisher).

La fuerza que participa entre las dos esferas es entonces:

$$F = 2\pi b\sigma + \pi b^2\sigma\left(\frac{1}{c} - \frac{1}{b}\right)$$

$$F = \pi b\sigma \frac{(b+c)}{c}$$

Esta es la mejor evaluación en términos del ángulo mostrado como θ , el cual incrementa con el contenido de humedad. Asumiendo que el líquido moja las partículas perfectamente (ángulo de contacto cero) b y c pueden ser expresadas en términos del diámetro de la partícula d y θ de esta manera:

$$b = \frac{1}{2}d(1 + \tan\theta - \sec\theta),$$

$$c = \frac{1}{2}d(\sec\theta - 1)$$

Al sumar las ecuaciones se obtiene:

$$b + c = \frac{1}{2}d \tan\theta$$

De donde se obtiene:

$$F = \frac{\pi d\sigma}{\left(1 + \tan\frac{\theta}{2}\right)}$$

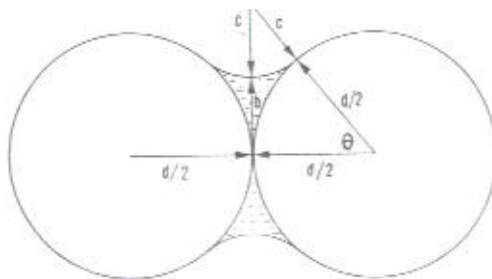


Figura 11. Dos partículas esféricas iguales unidas por un lente de agua.

En la práctica las partículas no son esféricas, no tienen una distribución de tamaño y forma uniforme por lo que se pueden encontrar más unidos, obviamente esto reduce el radio hidráulico efectivo (*el radio d de la ecuación*), e incrementa la resistencia del pelet. Un contenido de humedad suficiente para llenar completamente las uniones de los pelets, generaría una resistencia más grande en el material dado, pero un exceso en ésta podría darles movilidad y reducir rápidamente la resistencia; un bajo contenido agua llenando los poros es deseable. La proporción de agua usada en los pelets depende del espacio de los poros disponible dentro de la partícula y por tanto es determinado por su forma, tamaño, distribución y naturaleza física. La formación de los pelets involucra nucleación y crecimiento.

6.3 Sinterización

La sinterización envuelve sólo difusión, no fusión. Es aplicada en la consolidación de polvos compactos metálicos y cerámicos que han sido calentados a temperaturas aprovechando sus puntos de fusión para permitir que la difusión tenga lugar en los puntos de contacto de partículas contiguas, así crecen juntas para producir una entidad. El proceso puede ser imaginado como una red de migración de vacancias dentro del sólido sumamente curvado, con alta energía en la superficie de puntos cercanos de contacto, y baja energía en las áreas fuera de los puntos de contacto. La red de migración de átomos está en la dirección opuesta a través del cual éste disminuye la liberación de energía del sistema completo, por la disminución de la curvatura en los puntos de contacto., entonces el puente del sólido es construido para cada uno de esos puntos.

El proceso conocido como sinterización en una mena, es conducido por el punto de fusión de ésta. El proceso envuelve importantes reacciones químicas en la formación de nuevas recristalizaciones, éstas se proveen de un poderoso mecanismo de formación de puentes entre las partículas. Por ejemplo, si dos partículas de sulfuro son convertidas en óxido hay una alta probabilidad de que un grano de óxido o cristal crezca y se incorpore al metal de cada uno de los granos originales, formando un puente entre ellos. O bien, si las partículas de Fe_2O_3 son reducidas a FeO y re-oxidadas a Fe_2O_3 los nuevos cristales crecerían probablemente a través del punto original de contacto, uniendo las partículas originales como si fueran una.

Usualmente la sinterización tiene un propósito, tanto físico como químico llamado tostación. Cuando es usada para aglomerar sulfuros son convertidos en óxidos al mismo tiempo.

Existen dos tipos de máquinas para sinterización:

1. Greenawalt para pequeña escala y procesos en bache
2. La máquina de Dwight-Lloyd

En la máquina de Dwight - Lloyd, se alcanzan temperaturas de $1200 - 1300^\circ\text{C}$, para el hierro, $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$. La carga, compuesta por partículas aglomeradas de $5 - 30$ mm de diámetro, se carga en una parrilla a una profundidad de $300 - 450$ mm. Como en el caso de la sinterización de óxidos de hierro, si la reacción es endotérmica se adiciona más combustible en forma de coque a la carga. El coque es usado en lugar del carbón debido a la necesidad de controlar la velocidad de combustión y los problemas que ocasionan los alquitranes y otros volátiles. Para reacciones exotérmicas, por ejemplo, oxidación de sulfuros, no son necesarias fuentes de combustible adicional. De hecho, en

este último caso, deben tomarse medidas para reducir el total de calor liberado durante las reacciones por medio del reciclaje de productos de sinter y la adición de agua a la carga.

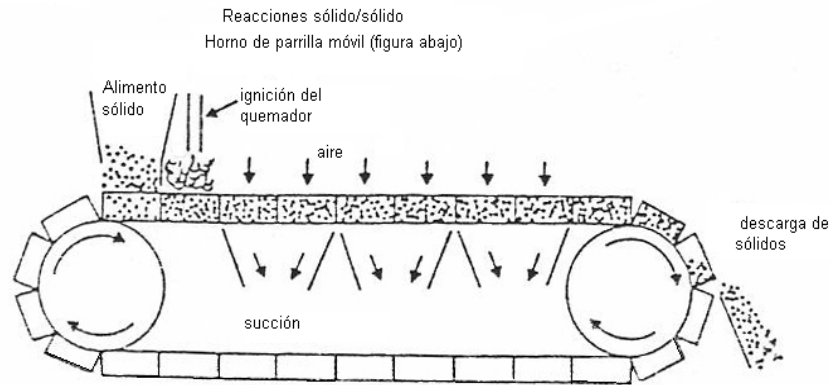


Figura 12. Reactor de parrilla móvil.

Durante el calentamiento, parte de la carga puede también fundirse y durante el enfriamiento se forman enlaces en el estado sólido entre las partículas. De esta manera, luego que la sinterización concluye, el producto es fuerte físicamente y altamente poroso. Este es entonces fragmentado en los rangos de tamaño requeridos y el material fino es reciclado. Las reacciones altamente exotérmicas que ocurren durante la sinterización de sulfuros restringen la proporción de material nuevo que puede adicionarse a la carga por esto debe reciclarse una proporción significativa.

Las desventajas de la sinterización con parrilla móvil residen en las dificultades en el tratamiento de corrientes de gas de alta temperatura que contienen finas partículas de polvo que emanan de tales procesos. Además, la carga recirculante dentro del proceso, la cual puede variar entre un 20 – 60% impone costos adicionales al proceso. Por estas razones, se han hecho esfuerzos considerables en el desarrollo de rutas alternativas que no involucren procesos de sinterización.

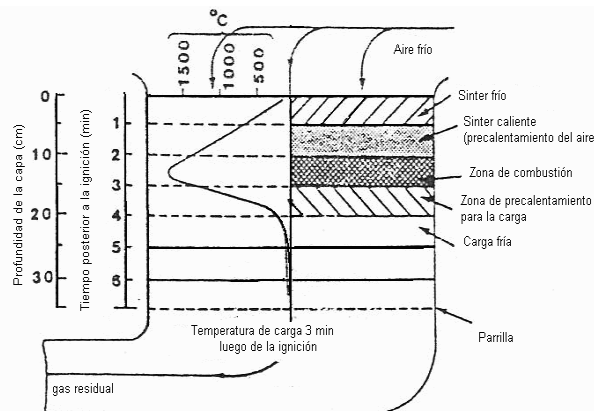
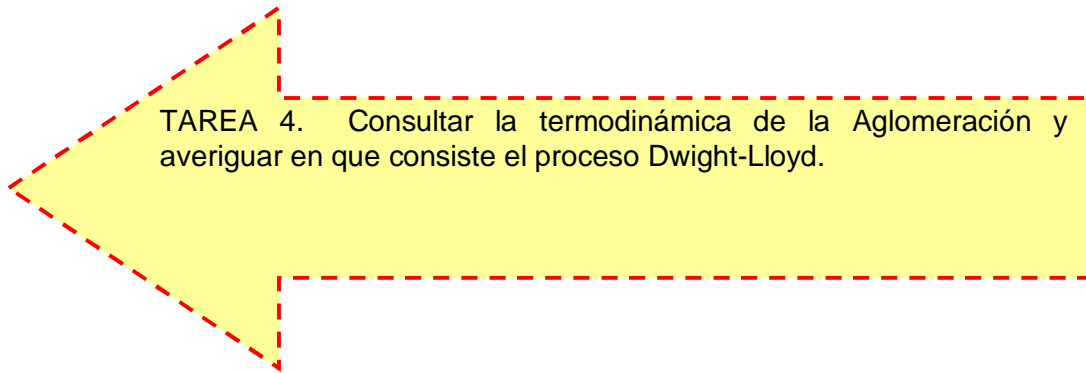


Figura 13. Perfil de temperatura y zonas de reacción en un lecho de sinterizado estático tres minutos luego de la ignición. (Ball et al.) (Copyright Heinemann Educational Books)

Finalmente, la *nodulización* es muy parecida a la peletización, pero se realiza a altas temperaturas.

Cualidades generales del material aglomerado:

- ✓ Uniformidad de tamaño.
- ✓ Resistencia y dureza.
- ✓ Reductibilidad.
- ✓ Contenido de metal.
- ✓ Composición química.



6.4 Termodinámica de la aglomeración

Fuerza impulsora: aumento del área superficial.

Aumenta la energía libre por unidad de área γ .

$$\Delta G_{TP} = -W \quad \delta W = \gamma \delta A \quad \gamma = \text{erg.} / \text{cm}^2$$

Algunos valores de γ para determinados metales son:

- Cu = 1600
- Fe = 1900
- Mg = 1100
- Al₂O₃ = 900

El tamaño disminuye y la fuerza aumenta

Si el área aumenta $W/\Delta A$ O $\Delta G (+)$ no ocurre

En caso contrario $W/\Delta A$ O ΔG (-) proceso espontáneo

$$F = 2 \pi b \sigma + \pi b^2 \sigma (1/c - 1/b) = \pi b \sigma (b + c) / c$$

Ti : resistencia a tensión

$$Ti: 2\pi \sigma / d (1 + \tan \theta / 2)$$

$$b = 1/2 d (1 + \tan \theta - \sec \theta) \quad c = 1/2 d (\sec \theta - 1)$$

$$b + c = 1/2 d \tan \theta \quad F = \pi d \sigma / (1 + \tan \theta / 2)$$

Grafica-----

Resumen de las propiedades termodinámicas: calor y trabajo.

7 SECADO

En la eliminación de agua de menas o coque por evaporización $P_v \geq P_{P_{H_2O}}$ óptimo
 $P_v \geq P_{atm\ total}$

Se puede realizar a P_{atm} a $T \geq T_{ebll.}$

Compuestos orgánicos

Se realiza haciendo pasar gases calientes o por microondas

Proceso endotérmico $H_2O_{(L)} \leftrightarrow H_2O_{(G)}$ $H : 43.9\ KJ$

7.1 ¿Por que se realiza el secado?

Para permitir la utilización satisfactoria del producto final.

Conservar el producto durante el almacenamiento y transporte.

Facilitar la manipulación en el tratamiento posterior.

Reducir los costos de transporte.

Aumentar la capacidad de otros aparatos o instalaciones en el proceso.

Aumentar el valor de los desperdicios y subproductos.

7.2 ¿Donde esta el agua?

Se encuentra libre o ligada químicamente, agua de contracción, agua de poros, agua de red cristalina. (Agua ganada por humedad del ambiente: hidrosopicidad)

7.3 ¿Que factores intervienen en la salida del agua?

Tamaño y forma de las partículas.

Contenido de humedad.

Orientación preferencial.

Temperatura de la pieza.

Características de la roca – material.

Presión de vapor de la roca – material.

Tamaño de los espacios libres entre partículas.

Presión de vapor de la atmósfera.

Temperatura del aire.

Humedad relativa del aire.

Velocidad del aire.

Necesidades del material.

✓ Periodos de secado:

Velocidad de secado (w)

Contenido de humedad (x)

Tiempo de secado (t)

El secado no es un proceso parejo y no lo controla un solo mecanismo.

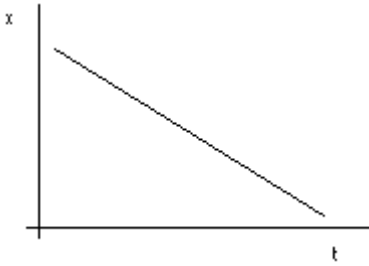


Figura 14. Tiempo de secado vs. Contenido de humedad.

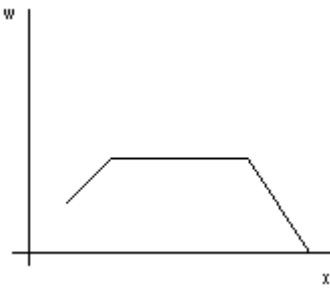


Figura 15. Contenido de humedad vs. Velocidad de secado.

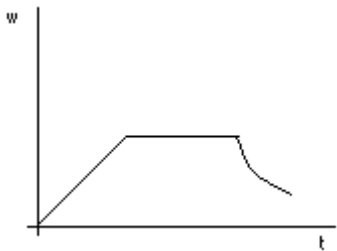


Figura 16. Tiempo de Secado vs. Velocidad de secado

- AB : Inestabilidad superficie
- BC : w constante
- CD : w decreciente
- C : Contenido critico de humedad.

7.4 Transferencia de calor:

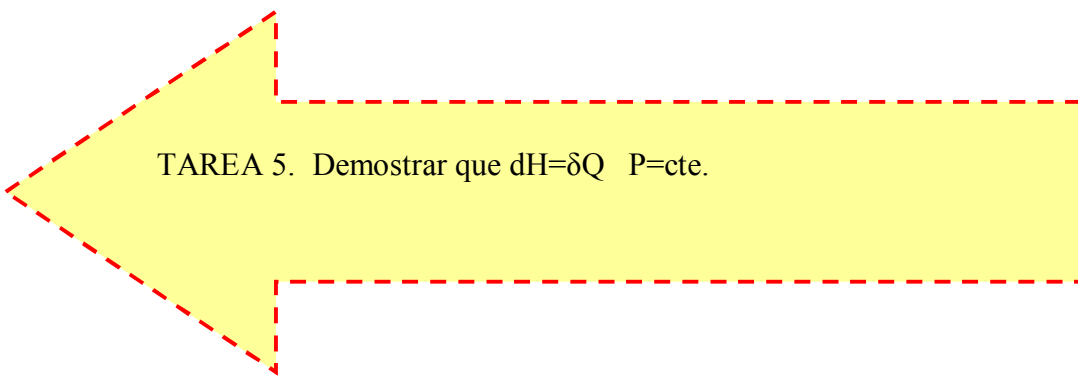
- Conducción
- Convección
- Radiación

7.5 Análisis de un secadero: datos a tener en cuenta.

Contenido de humedad a la entrada y salida
Velocidad de alimentación
Temperatura de la atmósfera, gas combustible (entrada y salida)
Temperatura del material
Temperatura intrínsecos del material
Tiempo de residencia
Consumo combustible

7.6 Factores para escoger secaderos:

Transferencia de calor del medio caliente al agua
Conductividad térmica
Calor latente
Calor de hidratación
Grado de salvación
Tensión superficial
Área y porosidad
Solubilidad
Efecto de electrolitos presentes
P y T
Composición de la atmósfera



TAREA 5. Demostrar que $dH = \delta Q$ $P = \text{cte.}$

8 CALCINACIÓN



En este proceso se da la eliminación de agua, CO₂ y otros gases: Procesos endotérmicos que rompen enlaces y destruyen la estructura cristalina.

Aspectos termodinámicos.

En el proceso es necesario conocer:

Fundamentos termodinámicos

Posibilidad de reacción

Cinética : velocidad de reacción

Mecanismos de reacción

Etapas de la redistribución de los enlaces

Aspectos fundamentales



$$G = G^\circ + RT \ln K_p$$

$$K_p = P_{\text{CO}_2} \cdot a_{\text{meo}} / a_{\text{me.CO}_3}$$

$$a_{\text{meo}} = a_{\text{me.CO}_3} = 1 \quad \text{y} \quad K_p = P_{\text{CO}_2}$$

En el equilibrio $G = 0$

$$G^\circ = - RT \ln K_p$$

$$G^\circ = - RT \ln P_{\text{CO}_2}$$

$$G^\circ = - 4.575 T \log P_{\text{CO}_2}$$

La ecuación de Gibbs se expresa también como:

$$G^\circ = A + BT$$

Entonces

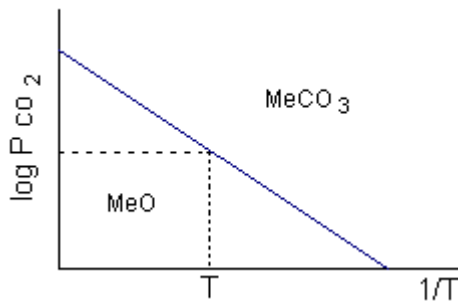
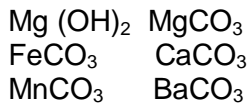
$$A + BT = - 4.575 T \log P_{\text{CO}_2}$$

$$\log P_{\text{CO}_2} = (A + BT) / - 4.575 T$$

$$\log P_{\text{CO}_2} = - A / 4.575 T - B / 4.575$$

$$\text{Graficando } \log P_{\text{CO}_2} \text{ vs } 1 / T$$

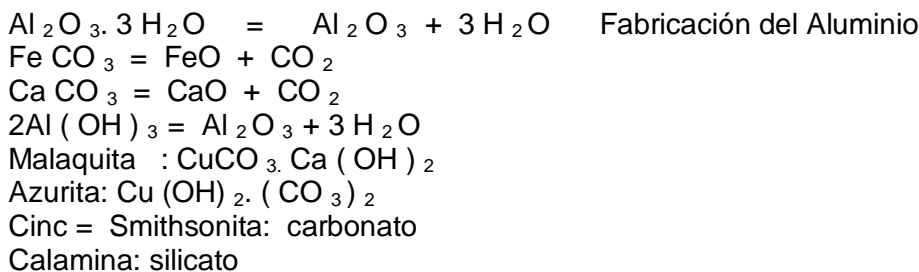
Se obtiene una línea recta



Donde la línea azul representa la reacción:



Diferentes minerales susceptibles de calcinar



Aplicando la regla de las fases $F + L = C + 2$

Fases: 3 = 2 fases sólidas + 1 fase gaseosa

Componentes: 3 metal, C, O

L libertades: $L = 2 + 3 - 3$ $L = 2$

La presión de descomposición P_{CO_2} por lo tanto $L = 1$ y solo se puede varias temperaturas.

Cinética de las reacciones heterogéneas: da coque toda la termodinámica

Reacción de tipo $\text{Si} = \text{S}_2^+$

Mecanismos del núcleo sin reaccionar: sucesivas fuentes de reacción similares a la fuente inicial así para una $T = 0$ la superficie esférica presenta un radio r_0 , en el instante T , la superficie tendrá radio r_T .

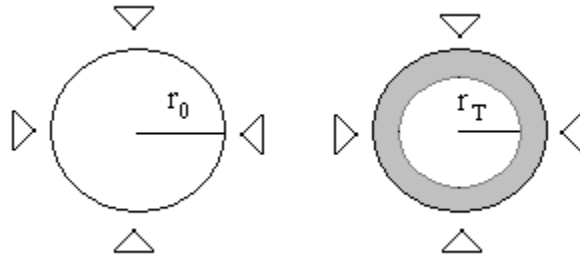


Figura 17. Modelo del núcleo que reacciona desde el tiempo $t=0$ a $t=T$

Los factores que afectan la velocidad de descomposición de la partícula de carbonato son:

El aporte de colas al frente de reacción para sostener la reacción endotérmica (interactúa $\text{meo} / \text{meo}_{\text{CO}_3}$).

La velocidad con la que se elimina el CO_2 del frente de reacción (transporte de materia).

Velocidad de la propia reacción química

Otros factores importantes son:

La partícula es porosa pueden presentarse varios frentes de reacción simultáneos.

La aparición de roturas o sinterización

El estudio cinético determina la velocidad de transformación, es función de:

Factores propios de la partícula: química, mineralogía, estructura, pureza.

La temperatura, velocidad de reacción y la difusión.

Factores propios de los gases: presión parcial, concentración.

La velocidad a la cual se aporta calor al frente de reacción viene dado por

$$Q^\circ = dQ / dt = 4K (T_o - T) / (1/r - 1/r_o)$$

K = conductividad térmica de la particular

La velocidad de formación del gas se determino por: $-du / dt = Q^\circ / H$

Según la cinética de la reacción: $-du / dt = K4r^2 (p^* - p)$.

K = constante de velocidad de reacción p^* = presión parcial de equilibrio del CO_2

Según el transporte de materia a través de la capa calcinada

$$du / dt = 4D (p - p_o) / (1/r - 1/r_o)$$

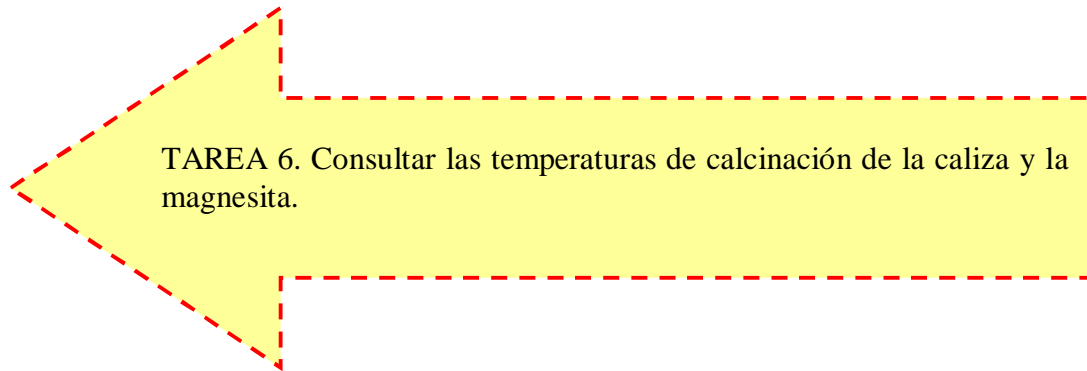
D = coeficiente de difusión

La etapa que controla la cinética puede cambiar según las condiciones de reacción y pueden ser varias simultáneamente

La misma Velocidad controla el proceso y le da nombre al mismo.

Vr : régimen químico

Vd. : régimen difusional



Tipos de hornos para realizar la calcinación

Horno rotativo $t = 2.28 L / N \cdot D \cdot S$

N: rpm D: diámetro S: ángulo L: longitud

Formación de anillos

Calculo por medio de ábaco

Grafica-----

Tipos de hornos más comunes: Horno cuba, horno rotatorio, lecho fluidizado.

Combustibles: gas, petróleo, coque.

8.1 Horno cuba

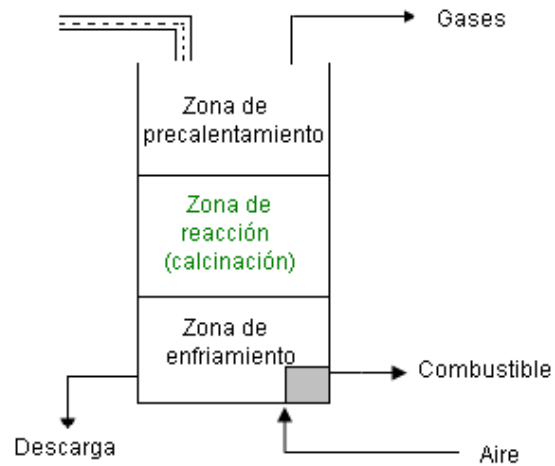


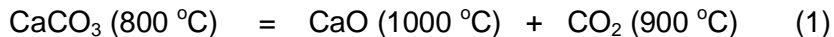
Figura 18. Horno cuba

1. Precalentamiento hasta 800° C. Gases en anticorriente, ni combustión del coque.
2. se quema el coque y se descompone la caliza a una temperatura aprox. de 1000° C, gases a temperaturas de 900° C.
3. Enfriamiento por aire en contracorriente, la cal sale hasta 100° C, combustión completa del aire: aire en exceso del 25 %, caliza 100 % CaCO₃, coque 100 % C, no hay pérdidas de calor por las paredes del horno.

¿Cuanto coque se requiere para quemar un kilogramo de caliza?

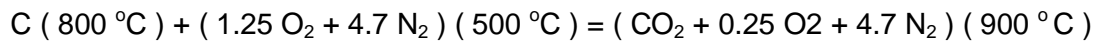
1. Requerimientos caloríficos para 1 mol CaCO₃
2. calor disponible de combustión de 1 mol de C

Reacción



Requerimientos de calor

Calor disponible por mol de carbón (2)



Aire precalentado a 500 °C

Del calor disponible en la reacción (2) y de la deficiencia de calor en la reacción (1), se tiene que se necesitan 0.56 moles de carbón por mol de CaCO₃

Para 1 Kg de CaCO₃ (10 moles) se tienen:

Zona de Pre calentamiento

Entradas

10 CaCO₃ 25 °C
5.6 C
10 CO₂ + 5.6 CO₂ 900 °C
1.4 O₂
26.3 N₂

Salidas

15.6 CO₂ 340 °C
1.4 O₂
26.3 N₂
10 CaCO₃ 800 °C
5.6 C

Zona de Reacción

Entradas

10 CaCO₃
5.6 C
7 O₂
26.3 N₂
10 CO₂ (C + O₂ = CO₂)

Salidas

10CaO 1000 °C
15.6 CO₂ 900 °C
1.4 O₂
26.3 N₂
10 (CaCO₃ = CaO + CO₂)

Zona de Enfriamiento

Entradas

10 CaO 1000 °C
7 O₂ 25 °C
26.3 N₂

Salidas

10 CaO 100 °C
7 O₂ 500 °C
26.3 N₂

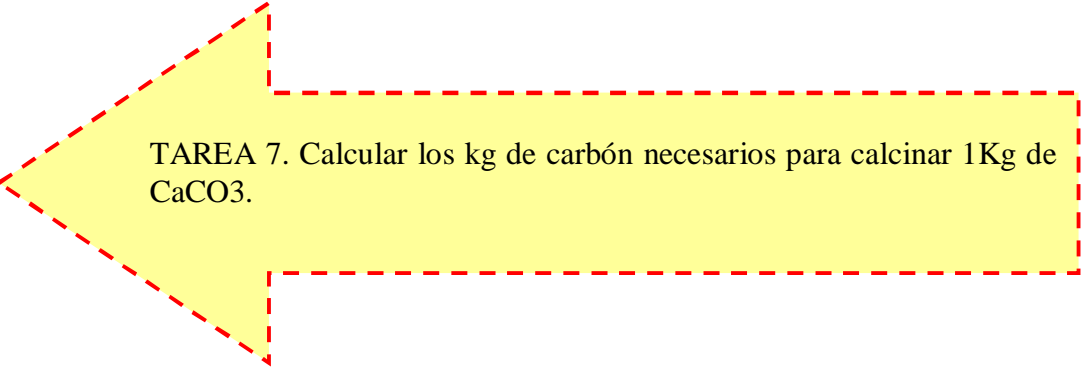
Se requiere más calor para asumir las perdidas en las paredes del horno. Consecuencias de jugar con las dimensiones del horno

Otros hornos de calcinación:

Horno de cuba calentado con petróleo
Horno rotatorio: petróleo, gas, carbón pulverizado
Horno de lecho fluidizado
Horno de anillos

Otras funciones de la calcinación:

Descomposición térmica de los carbonatos e hidratos
Obtención de crecimiento de grano: óxidos químicamente resistentes, ejemplo de MgO y dolomitas en refractarios
Producción de cemento Pórtland



TAREA 7. Calcular los kg de carbón necesarios para calcinar 1Kg de CaCO_3 .

LABORATORIO DE SECADO Y CALCINACIÓN

Procedimiento

Secado

Se pesan 100 g de caolín y 100 g de arcilla y a ambas muestras se les determina el porcentaje de humedad.

Calcinación

Se pesan muestras de 50 g de caliza de dos granulometrías diferentes. Se toman dos muestras de cada material y se llevan a una temperatura de 600°C, luego se toman otras dos muestras de cada material y se llevan a una temperatura de 900°C.

Las muestras se dejan a cada temperatura por un tiempo de ½ y 2 horas. Una vez frías se pesan.

Se debe determinar el porcentaje de pérdidas por calcinación.

Finalmente se toman las muestras de la granulometría mayor y mediante un martillo se parten a la mitad y se observa como fue evolucionando el frente de reacción con el tiempo.

De manera adicional se calcina caolín y arcilla y se determinan las pérdidas por calcinación.

Muestra	Peso crisol	Peso crisol y muestra inicial	Peso crisol y muestra final	Peso muestra final	Pérdida de peso	Temperatura °C	Tiempo

Cuestionario

1. Cuántas y cuáles son las variables termodinámicas involucradas
2. Calcular la factibilidad termodinámica de descomposición por calcinación de la magnesita
3. Discutir el posible uso de catalizadores. ¿Cómo puede promover la calcinación la impregnación de los materiales (caliza, magnesita) con una sal?

El informe de laboratorio debe contener como aspectos de interés

Objetivos

Procedimiento

Resultados y su análisis (tablas y gráficas)

Causas de error

Conclusiones

Bibliografía

9 TOSTACION

El calentamiento de minerales de sulfuro en la presencia de gas oxígeno (tostación) es un tratamiento comúnmente usado en metalurgia extractiva (Sohn y Goel). La tostación es un proceso para pasar de sulfuro metálico a óxido de sulfato o cloruro, no por descomposición, sino por reacción con la atmósfera del horno y sin fundir.

Menas: Cu Cu₂S CuS FeCuS₂ calcocita – covelina
Pb PbS Zn ZnS

N NS Fe NS (Fe, Ni)₉S₈ millerita, pectolita, petlandita

Tipos: Autógena, por insuflado, instantánea, volatilizante, según el proceso

Según operación: suspensión, fluidización

Objetivos:

1. Tostación oxidante:
$$\text{MeS (s)} + 3/2 \text{O}_2 \text{(g)} = \text{MeO (s)} + \text{SO}_2 \text{(g)}$$
2. Magnetizante:
Fe₂O₃ Fe₃O₄
3. Sulfatante: Mn – U
4. Clorurante
5. Carbonizante
6. Mo₂CO₃ : para sacar refractarios como Cr
7. Segregante o clorometalización: elementos metálicos en superficies reductoras, B, Sb, Co, Pb, Au, Pd, Ag, Si.
8. Volatilizante: As₂O₃ Sb₂O₃ ZnO
9. Reductora : óxidos a metales en matriz compleja
10. Sinterización o con soplado: características físicas

En el caso de los minerales de sulfuro de cobre-hierro pueden usarse dos tratamientos térmicos diferentes para lograr dos resultados significativamente diferentes. El objetivo de estos tratamientos es remover del material el hierro y el azufre no deseado. Aunque en teoría esto puede lograrse por ataque químico directo por medio del uso de soluciones de ácido acuosas, en la práctica existen varias dificultades con este tipo de tratamiento. Por consiguiente, deben buscarse rutas de procesamiento alternativas.

Una característica importante de la oxidación de sulfuros es que las reacciones son exotérmicas, como por ejemplo: desprendimiento de calor. Siendo este el caso, es posible

diseñar reactores que no requieran fuentes de calor externas. Las reacciones de tostación son normalmente efectuadas en lechos de fluido o reactores instantáneos

10 TERMODINÁMICA DE LA TOSTACIÓN

10.1 Tostacion Metalicos:

El tipo de tostación lo determina la termodinámica de las reacciones de formación del sistema Me – O – S. Por lo cual se tienen 3 componentes.

$F + L = C + 2$ si se trabaja a T : constante $F + L = C + 1$

El máximo equilibrio que se puede tener es 5 fases, 4 condensadas y 1 gaseosa.

MeS, MeO, MeSO₄, MeO.MeSO₄

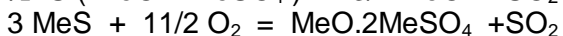
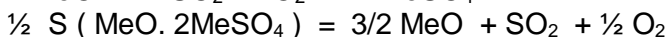
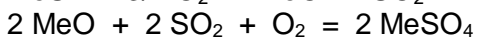
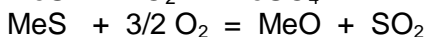
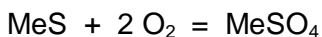
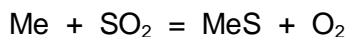
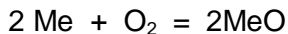
Fase gaseosa: SO₂, SO₃, O₂, S₂.

Diagramas tridimensionales T, P_{SO2}, P_{O2} (log) – *dibujar*

A temperatura : constante equilibrio 1 sólido 1 gas bivariente

Diagramas de **Kellog** (*dibujar*) o de áreas de predominio

Determinar los equilibrios: regla de las fases bivariantes univariantes, invariable, equilibrio de interés



Se determinan las K de equilibrio

$$K_e = P_{\text{SO}_2} / (P_{\text{O}_2})^{3/2}$$

$$\text{ Log } K_e = \text{ log } P_{\text{SO}_2} - 3/2 P_{\text{O}_2}$$

$$\text{ Log } P_{\text{SO}_2} = \text{ log } K_e + 3/2 P_{\text{O}_2}$$

$$G^\circ = - RT \text{ Ln } K_e \quad K_e = - G^\circ / RT \quad \text{línea recta o valor constante}$$

$$- \text{ Log } P_{\text{O}_2} = - \text{ log } K3$$

$$- \text{ Log } P_{\text{SO}_2} = \text{ log } P_{\text{O}_2} - \text{ log } K4$$

$$- \text{ Log } P_{\text{O}_2} = -1/2 \text{ log } K5$$

$$- \text{ Log } P_{\text{SO}_2} = - 1/2 \text{ log } P_{\text{O}_2} - 1/2 \text{ log } K7$$

$$- \text{ Log } P_{\text{SO}_2} = \text{ log } K8 - 1/2 \text{ log } \text{ O}_2$$

Valores de la pendiente en el diagrama de Kellog

Diagrama de Kellog: área de predominancia

Explicación personal sobre la forma del diagrama y la correspondencia entre las curvas: estequiometría de la reacción.

$P_{SO_2} + P_{O_2} = 0.25$ presión total
Sulfuro - oxido – sulfato – oxido

$$G = G^{\circ} + RT \ln K \quad \log K = m \log P_{SO_2} + n \log P_{O_2}$$

$$G = G^{\circ} + 4.575T \log K$$

$$G^{\circ} = A + BT \log T + CT$$

$$G = A + BT \log T + CT + 4.575T \log (m \log P_{SO_2} + n \log P_{O_2})$$

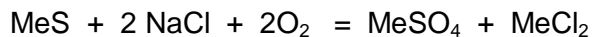
10.2 Tostación Diferencial:

Presenta condiciones óptimas de trabajo. Tiene como objetivo:
Dar compuestos solubles, coque (sulfato).
Dar compuesto insoluble (oxido o sulfuro).
Explicar el diagrama Fe – Cu.

10.3 Tostación Clorurante:

Es de 2 tipos

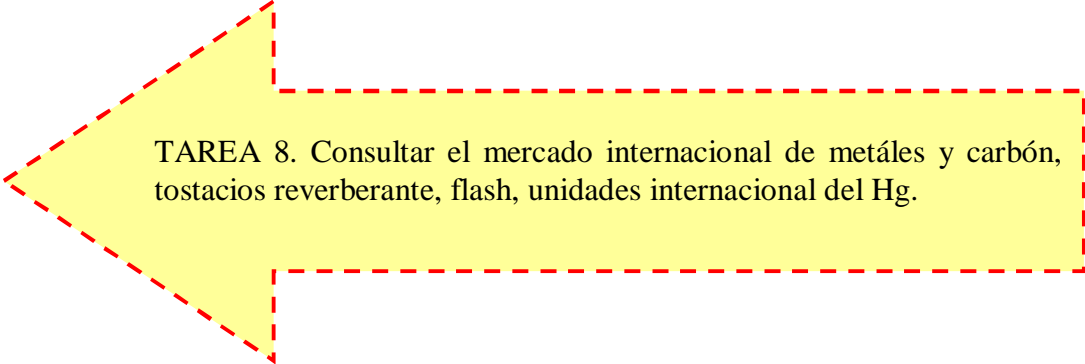
1. Ceniza de pirita + NaCl



Se forma HCl, Cl₂, SO₂ se busca solubilidad del agua

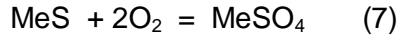
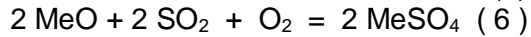
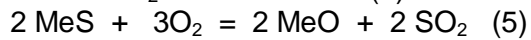
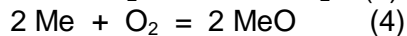
2. Metales no féreos, en cloruros volátiles se realiza a alta temperatura y tiene dos formas

- a. $MeO + CaCl_2 = MeCl_2 (g) + CaO$
 $MeS + CaCl_2 + 3/2 O_2 = MeCl_2 (g) + CaO + SO_2$
- b. $MeO + Cl_2 = MeCl_2 (g) + 1/2 O_2$
 $MeS + Cl_2 + O_2 = MeCl_2 (g) + SO_2$



TAREA 8. Consultar el mercado internacional de metales y carbón, tostación reverberante, flash, unidades internacionales del Hg.

10.4 Termodinámica de la tostación (2ª parte)



(4) (7) función de P_{SO_2} excepto

Pendientes de la curva: entalpía de las reacciones, según el metal.

Coexistencia MeS – MeO – reacción

Cu, Pb, nobles $T < 1000^\circ \text{C}$

Ni, Fe, Zn $T > 1000^\circ \text{C}$

MeS = M tostación, reacción principios de la fusión y conversión en las menas

MeS = MeO = Me tostación, reducción

MeSO₄ T P Pb – Zn T

Cu – Ni T

FeO = FeSO₄ T < 600

Trayectorias de tostación

a. S – O T

b. S – SO₄ T

Tostación de menas complejas: se presentan otras reacciones

Sulfuros: forman soluciones sólidas y sulfuros complejos

Óxidos: óxidos complejos figuras

Log P_{O_2} vs $1/T$ 1 atm SO₂

El sistema Calcio – Azufre – Oxígeno

Dibujar grafico

Se utiliza para: desulfuración de metales y sulfuros metálicos

Fijación de S de los gases de combustión y tostación

Utilización de yeso y anhidrita

Estabilidad de CaO, CaS, CaSO₄ P_{O_2} I (t) $P_{\text{SO}_2} = 1 \text{ atm}$

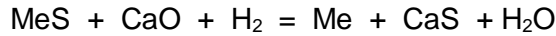
Para $Q < 1$ $P_{\text{SO}_2} < 1$ CaO = CaSO₄ aumenta P_{O_2}
CaO = CaS disminuye P_{O_2}

El equilibrio CaSO₄.CaS es independiente

Condiciones reductoras CaO + S

- a. sulfuro
- b. oxidantes : sulfato
- c. eliminación de azufre en metales y sulfuros metálicos

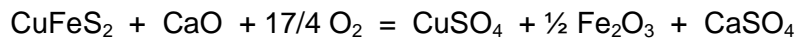
Reducción de metales reduciendo con hidrogeno



En estos metales es muy difícil, pero con la Cal ayuda. No sirve ni el CO, ni el C.

Temperatura de trabajo

Formación de SO_4Ca para eliminación SO_2 en calderas de vapor. En lugar de producir H_2SO_4 Absorción según la reacción

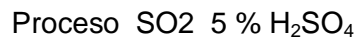


También vale la reacción opuesta



Descomposición de CaSO_4 endotérmica: otro combustible, hoy no es económico.

Otro tratamiento a los gases de combustión



Se puede eliminar frecuentemente con caliza pero forma CaSO_4

Reacción de absorción con dimetil anilina – citrato de sodio

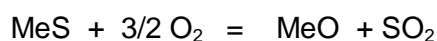
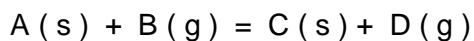
Se absorbe SO_2 a T y se desaloja a T y se concentra SO_2 se puede utilizar para varios fines.

10.5 Cinética de la tostación

Tostación: proceso exotérmico por lo cual, la cinética no la controla ni la transferencia de calor ni la difusión térmica. Oxidación desde el exterior, núcleo sin reaccionar

Reacción en la interfase

1. Difusión del oxígeno
2. Reacción química
3. Difusión del SO_2



Esferas de superficie S: $4R^2$ flujo R_i y R

Ley de Fick

$$V_d = -SD \, dC / dR$$

$$V_d = -4R^2 D \, dC / dR$$

Integrando para R: $R_i - R_o$

$$C : C_i - C_o$$

$$V_d = 4 R_o - R_i D (C_o - C_i) / R_o - R_i$$

Por definición $V_r = BS (C_i - C)$

C: concentración de equilibrio

$$Vol = V_r$$

$$B 4R_i^2 (C_i - C^*) = 4R_o R_i D (C_o - C_i) / R_o - R_i$$

F = Función de la penetración relativa: fracción transformada del radio de la esfera.

$$F = R_o - R_i / R_o \quad B (C_i - C^*) = D (C_o - C_i) / F$$

$$C_i - C^* / C_o - C_i = 1 / F/D \cdot B \quad C_i - C^* / C_o - C_i = 1 / 1 + R_o B F (1 - F) / D$$

$$V_{\text{global}} = -q \, dV / dT$$

moles / unidad de volumen

V: volumen total

$$dF / dT = -1 / R_o \cdot dR_i / dt = 1 / R_o S_i \cdot dV_i / dt = V_{\text{global}} q R_o S_i$$

$$V_r = V_d = V$$

$$q R_o \, dF / dt = V_{\text{global}} / S_i = B (C_i - C) \quad \text{sustituyendo}$$

$$q R_o \, dF / dt = B (C_i - C^*) / 1 + R_o B F (1 - F) / D$$

$$q R_o \, dF / dt + q R_o^2 B F (1 - F) / D \cdot dF / dt = B (C_i - C^*)$$

$$1 / B \cdot dF / dt + R_o F (1 - F) / D \cdot dF / dt = (C_i - C^*) / q R_o$$

Integrando $t = 0, t \quad F = 0, F$

$$F / B + R_o F^2 (3 - 2F) / D = C_o - C^* t / q R_o$$

$$B (1 - F) (C_i - C^*) = D (C_o - C_i) / R_o F$$

$$B (1 - F) (C_i - C^*) = D (C_o - C^* + C^* - C_i) / R_o F$$

$$[D / R_o F + B (1 - F)] (C_i - C^*) = D / R_o F (C_o - C^*)$$

$$C_i - C^* / C_o - C^* = D / R_o F / D / R_o F + B (1 - F)$$

$$C_i - C^* / C_o - C^* = 1 / 1 + B R_o F (1 - F) / D$$

Régimen químico $R_o / D \lll 1 / B$

$$F / B = t C_o - C^* / q R_o$$

$$F = B t C_o - C^* / q R_o = t / t_{\text{quim}}$$

$$t_{\text{quim}} = q R_o / B (C_i - C^*)$$

tiempo total de transformación química

Régimen difusional $F / B \lll R_o / D$ la difusión es muy lenta

$$F^2(3 - 2F) = D (C_o - C^*) t / qRo^2 = t / t_{dif}$$

$$t_{dif} = q Ro^2 / D (C_o - C^*) \text{ tiempo total de transformación difusional}$$

10.6 Estudio de la cinetica en diferentes tipos de particulas

Mecanismos de difusión del O₂ vs SO₂

El O₂ generalmente no encuentra obstáculos

Etapas que dan en la interfase de reacción

1. O₂ se absorbe en la superficie del sulfato
2. cede electrones
3. intercambio iónico del ión sulfuro se pega a otra estructura
4. se forma una molécula de SO₂
5. continua el proceso con un nuevo ión, penetrado en la capa

Se pierde azufre se modifica la porosidad y la densidad.

Partículas – planos – régimen difusional

$$d_{nA} / dt = - D S C / L_o - L$$

Fracción de reactivo transformado: $- L / L_o$

$$t_d = \frac{L_o^2}{2 M_A D_A C}$$

Régimen químico: $1/S n/dt = KC$ $tq = \frac{L_o}{M_A k C}$

Partícula esférica: régimen difusional, el gradiente de concertación no es constante

$$1/S dn_A / dt = - D_A dc / dR$$

$$t_{dif} = \frac{R_o^2}{6 D_A M_A C}$$

Régimen químico $V_r = B Si (C_i - C^j)$ reacciones de primer orden

$$V_r = - dn / Sdt = KC$$

Partícula que se forma es muy porosa

Velocidad por unidad de superficie $V_r = - dn / Sdt = KC$

$$t_{quim} = R_o / K \cdot CM.$$

Regimen mixto: $t_{mix} = t_{dif} + t_{quim}$

Variables que influyen en el proceso:

- ✓ Temperatura $K = A \exp(E / RT)$ coeficiente de difusión
- ✓ Concentración
- ✓ Tamaño de partícula $t_{quim} = (R)$ $t_{dif} = (R)$

10.7 Tecnología de la tostación

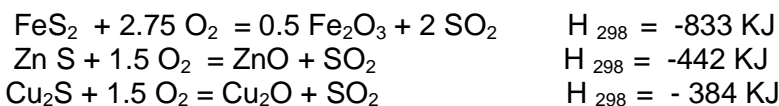
Si el concentrado es calentado en una atmósfera de oxidación a 650 – 700°C, por encima del rango de presiones parciales de oxígeno y azufre que se encuentran en reactores industriales, se producen $p_{O_2} = 0,01 - 0,2 \text{ atm}$, $p_{SO_2} = 0,01 - 1 \text{ atm}$, $CuSO_4(s)$ y $Fe_2O_3(s)$ (Biswas y Davenport). El cobre puede entonces separarse del óxido de hierro y de los minerales ganga por la disolución selectiva de la fase de sulfato de cobre en agua o ácido diluido.

Alternativamente, si la oxidación se lleva a cabo a 500 – 550°C, únicamente ocurre una oxidación limitada del hierro a $Fe_2(SO_4)_3$ y asimismo se forma $CuSO_4$. Si estos productos de reacción se funden luego con la adición de sílice se logra, por medio de la separación líquido/líquido, una separación posterior de los óxidos de hierro y de los sulfuros de hierro/cobre.. Por consiguiente, el pretratamiento térmico que involucra la oxidación del material se usa para aumentar la concentración de cobre de la fase fundida del sulfuro.

Tipos de hornos, usados históricamente

- ✓ Montajes estacionarios
- ✓ Improvisados agitados a mano
- ✓ Hornos de hogar múltiple = agitado mecánicamente
- ✓ Tostación centellante
- ✓ Lecho fluidizado

Se trata de un proceso altamente exotérmico



Colas de reacción + colas de combustión en el horno del carbón, Capacidad calorífica de los productos de reacción. Se obtienen temperaturas cercanas a los 1700 ° C. Muy cercano a los puntos de fusión.

Se presentan otras pérdidas de calor y colas disponibles (rapidez de la tostación) (Equipo y del tipo de tostación)

- ✓ Tostación autógena: formación de sulfatos
- ✓ Lecho fluidizado : alta velocidad, pérdidas pequeñas, se requiere enfriar, puede ser con agua
- ✓ Tostación para ustedes sintetizado o fundido

10.7.1 Horno de lecho fluidizado

En la figura 20 se muestra un diseño típico de tostador de lecho de fluido en el procesamiento de concentrados de sulfuro. El concentrado de sulfuro húmedo se introduce directamente dentro del reactor. El material alimentado es inicialmente

calentado a través de mecanismos de transferencia de calor conductivos, convectivos y por radiación. El agua es rápidamente evaporada en forma de vapor y a medida que la temperatura de las partículas incrementa del mismo modo lo hace la velocidad de reacción con los gases. Las reacciones químicas también producen calor y con el tiempo se auto alimentan, desprendiendo más calor que el perdido en los alrededores. La temperatura de reacción entonces se controla con la adición de materiales de flujo inertes que requieren calcinación o precalentamiento para la siguiente etapa del procesamiento, o a través de nuevas adiciones de agua.

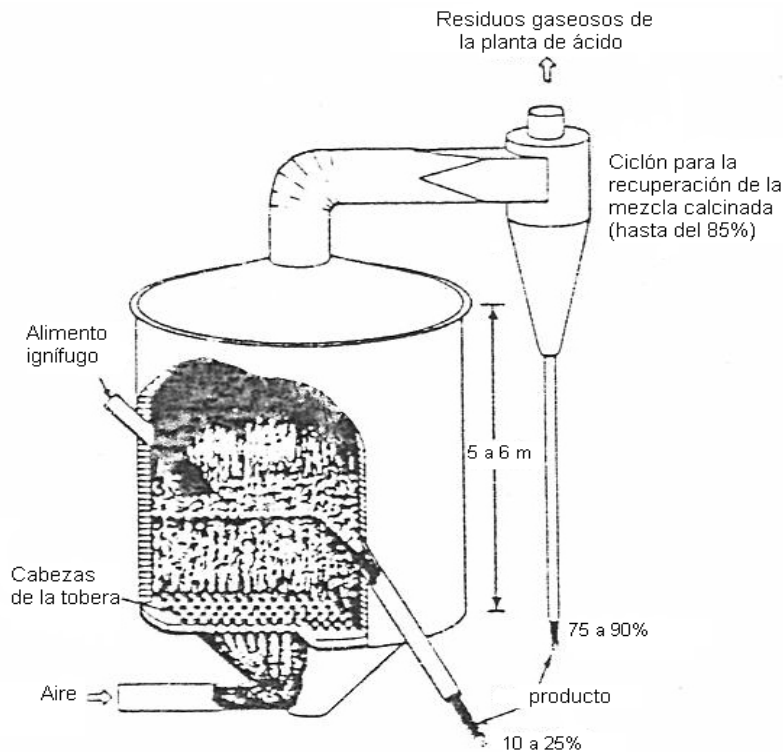


Figura 19. Tostador de lecho de fluido en el procesamiento de concentrados de sulfuro (Boldt y Queneau) (Copyright Longmans)

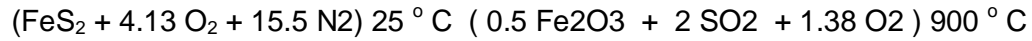
En el alimentador se elutrian partículas finas, es decir, se transportan con los gases producidos fuera del reactor, luego de cortos períodos de residencia. Las finas partículas se recuperan de esta corriente de proceso por el uso de ciclones de gas y otros dispositivos para la limpieza de gas y se regresan a la corriente de productos. Las partículas más grandes forman el lecho fluidizado en el reactor. Un balance de masa sencillo en el reactor muestra cuál sería el tiempo mínimo de residencia, \bar{t} de estas partículas más grandes,

$$\bar{t} = \frac{M_{SB}}{F_B} \quad (5.2.19)$$

Donde M_{SB} es la masa total del lecho estable, F_B es la velocidad de alimentación de las partículas que no salieron en la corriente de gas. Por tanto, la magnitud de las reacciones

en el reactor puede ser controlada por la proporción del alimento concentrado y la relación gas/concentrado.

Balance calorífico para la tostación de la pirita



<i>Entrada</i>	<i>KJ</i>	<i>Producción</i>	<i>KJ</i>
FeS ₂ =	0	0.5 Fe ₂ O ₃ =	65
4.13 O ₂ + 15.5 N ₂ =	0	2 SO ₂ =	86
Fe + 0.75 O ₂ =	- 411	15.5 N ₂ =	499
0.5 Fe ₂ O ₃		1.38 O ₂	39
2S + 2 O ₂ = 2 SO ₂	-594	FeS ₂ = Fe + 2S	172
		Excedente de calor	214
<i>Total</i>	1005		

LABORATORIO DE TOSTACIÓN

PROCEDIMIENTO

Se toma un concentrado de sulfuros y se tuesta en un horno a dos temperaturas diferentes, para ello se pesan 20 gramos de material. Una de las muestras se introduce en el horno a baja temperatura y la otra a alta temperatura durante aproximadamente una hora. Transcurrido ese tiempo se extraen del horno y se dejan enfriar a temperatura ambiente.

El mismo procedimiento se realiza con muestras de hematita, magnetita y gohetita.

Una vez frías, se pesan las muestras y luego se lixivian con agua, recogiendo y observando el filtrado (a excepción de las muestras de hematita, magnetita y gohetita) .

CUESTIONARIO

1. Discutir y comentar los resultados del experimento
2. Cuál es el número máximo de fases que pueden coexistir en un punto en los diagramas tridimensionales T - $\log P_{SO_2}$ - $\log P_{O_2}$?
3. Dado el punto A de la figura 1 razonar termodinámicamente por qué en ese punto predomina el MeS y no el MeO
4. Construir el diagrama de Kellog a 800K para el sistema Zn-S-O utilizando las reacciones presentadas en la hoja anexa
5. Dados los diagramas de Kellog a 685C de los sistemas ternarios Cu-S-O y Fe-S-O de la figura 2 y sabiendo que se trabaja a presión atmosférica y que el gas de tostación tiene un 10% de O_2 . Entre cuáles valores puede variar el % de SO_2 para obtener el Cu en forma de sulfato y el hierro en forma de óxido? Cómo se denomina este tipo de tostación?

El informe de laboratorio debe contener como aspectos de interés:

Objetivos

Procedimiento

Resultados y su análisis (tablas y gráficas)

Causas de error

Conclusiones

Bibliografía

11 REDUCCION PIROMETALURGICA DE LAS MATERIAS PRIMAS

Metales en la naturaleza

Importancia de los óxidos

Reacciones sólido – gas, sólido – sólido

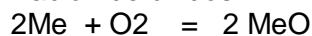
Cinética: como limite difusional. Reactividad

Reducción pirometalurgia, C, H₂, otros

11.1 Termodinámica de la reducción

Papel del G papel de la K

Formación de óxidos



$$G = G^\circ + RT \ln K = Q_{\text{meo}} / Q_{\text{me PO}_2}$$

$$K = 1 / P_{\text{O}_2}$$

$$G = G^\circ + RT \ln (1 / P_{\text{O}_2})$$

$$G = H - TS \quad P: 1 \text{ atm.} \quad \text{Estado estándar (más estable)}$$

Concepto de afinidad

Diagramas de Ellingham (para óxidos)

Diagramas de energías libres estándar vs. temperatura: importancia

Construcción

$$\begin{aligned} H_T &= H + \\ S_T &= S + \quad S = dQ / dT \end{aligned}$$

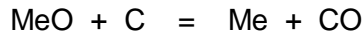
Reemplazas – integrales

Volver a 298° de H y S sin cambios de fase

Se estudia para la reacción de un mol de O₂

Reductores adecuados:

- ✓ Posibilidad termodinámica
- ✓ Formación de carburos



Clasificación de óxidos:

- ✓ Fácilmente reducibles $0 < G^\circ < \text{Kcal/mol}$
- ✓ Óxidos estables $-100 < G^\circ < \text{Kcal/mol}$
- ✓ Óxidos refractarios -225 Kcal/mol

Información estudiada

- ✓ Temperatura de inversión
- ✓ Descomposición
- ✓ Tipos de reductores utilizados
- ✓ Poder reductor de los elementos utilizados

Reducción relativa entre metales

Reducción con CO_2 : disponibilidad termodinámica, posibilidad de formar carburos

Datos y parámetros calculables según los diagramas

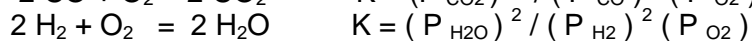
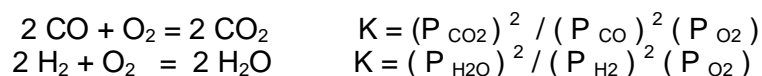
- ✓ Temperatura de inversión o descomposición
- ✓ Poder reductor de un metal con respecto a otro
- ✓ Temperatura a la cual se produce el cambio de poder reductor

Escalas anexas al diagrama

- ✓ Escala monográfica del O_2 : lectura de la composición de cualquier T
- ✓ El corte de dos líneas G° es igual
- ✓ $G^\circ = -RT \ln 1/P_{\text{O}_2} = 4.575 T \log P_{\text{O}_2}$

T a la cual se produce la reacción. Estabilidad del metal o del óxido

- ✓ Escala CO / CO_2 $\text{CO}, \text{H}_2, \text{mezclas } \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$



En el equilibrio $G^\circ = 0$ $\text{CO} / \text{CO}_2 = 1$

✓ Escala de H₂: H₂ más común y menos importante por el CO-C?

Reacciones de H₂ menos exotérmicas y por lo tanto se requiere una temperatura mayor. A bajas T funciona mejor el CO

CO + H₂O = CO₂ + H₂ temperaturas bajas

Para óxidos estables se requiere altas relaciones CO / CO₂ - H₂ / H₂O

Gases fácilmente de obtener y relativamente baratos

Limitaciones de los diagramas

1. Se trabaja para estados normales
2. Se requiere compuestos de composición definida
3. No se tiene en cuenta reacciones intermedias – soluciones sólidas
4. No se contempla la formación de compuestos intermetálicos
5. Solo da información termodinámica no cinética
6. Es difícil de manejar para líneas muy cercanas

Diagramas para otros compuestos

- ✓ Sulfuros Me + S = MeS
- ✓ Cloruros 2 Me + Cl₂ = 2 MeCl
- ✓ Carburos Me + C = MeC elementos refractarios
- ✓ Nitruros Me + N₂ = 2 MeN elementos refractarios

Carburos: reductor carburante

Líneas horizontales - método excepción

Mezclas reductoras C + 2 H₂ = CH₄

No afines: Ni, Cu, nobles

Estables: Ti, V, Cr, Ca, Si

En metales líquidos SiC, Ca₂C, Al₄C₃

Fe, Ni, Mg

Zn, Ti, Ta

Cr

Cr

Azufre: Similar a los óxidos Cu, Ni, Fe, Co, Zn, Al, Mn, medios alcalinos térreos

Cloro: Volatilidad TiCl₄, Cu₂Cl₂, FeCl₂

El carbón No es el adecuado como reductor

Los alcalinos son los más estables

MeO + Cl₂ = MeCl₂ + ½ O₂ calentamiento con Cl (g)

Óxidos estables se pueden cloros en presencia de C

Nitrógeno: o H en los procesos metalúrgicos que involucran aire

Ti, Zn muy afines Co, V, Al, B media Cr, Mo nulo: Fe

12. REDUCCION DE OXIDOS Continuación

Convecciones correspondientes a una variación de presión
 La escala P_{O_2} , permite hacer correcciones para valores $P_{O_2} = 1 \text{ atm}$

$$G = G^\circ + RT \ln K \quad G - G^\circ = - RT \ln P_{O_2}$$

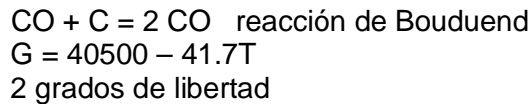
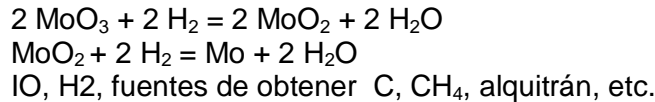
$$G = G^\circ + RT \ln (1 / P_{O_2}) \quad \text{variación lineal con T}$$

$$G = G^\circ - RT \ln P_{O_2}$$

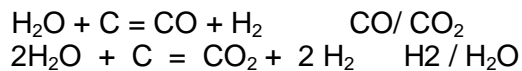
12.1 Reducción de óxidos

Gas reductor, C, metal, electrolisis en un medio fundido o en solución acuosa
 Gas reductor: H_2 , CO, mezcla de ambos

$CH_x = H_2 + CO$ mediante craking para evitar concentración
 H_2 : electrolisis de agua muy caro, casos muy especiales



Representación $CO / CO + CO_2$ vs. T curva de Bouduend En presencia de C
 Reemplazando CO_2 por H_2O En presencia de carbono



Curvas de Chavelion

- ✓ Reacción endotérmica
Curvas descendientes
- ✓ Reacción exotérmica
Curvas ascendientes

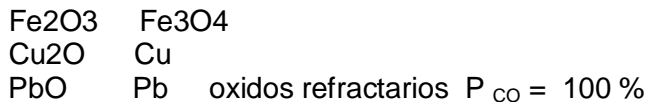
12.2 Termodinámica de la reducción de gases CO – H₂O

$$\begin{aligned} \text{Grados de libertad} &= 2 & F + L &= C + 2 \\ & & \text{Me} + \text{O}_2 &= \text{MO} \\ & & 2\text{CO} + \text{O}_2 &= 2 \text{CO}_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Se fijan } T \text{ y } P_{\text{total}} & & F &= 3 & C &= 3 & L &= 2 \\ \text{Quedan listos } P_{\text{CO}}, P_{\text{CO}_2} & & & & & & & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 + \text{C} &= 2 \text{CO} & H &= -41.25 \text{ Kcal / mol} \\ \text{MeO} + \text{CO} &= \text{Me} + \text{CO}_2 & P_{\text{CO}} + P_{\text{CO}_2} &= 1 \text{ atm} \\ K &= P_{\text{CO}_2} / P_{\text{CO}} \end{aligned}$$

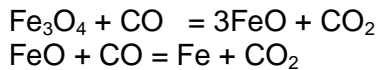
Las curvas bajas se confunden con el eje, se reducen muy fácilmente y requieren poco gas



Cruce de curvas de la T teórica para $P_{\text{CO}} + P_{\text{CO}_2} = 1 \text{ atm}$

Fijando una P_{parcial} se determina el área de validez de una fase

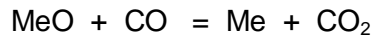
Reducción de Fe_3O_4 Fe sin pasar por FeO $T < 570^\circ \text{C}$
 $\text{FeO}_4 + 4 \text{CO} = 3\text{Fe} + 4\text{CO}_2$ $T > 570^\circ \text{C}$ incluye FeO



Se requiere conocer la H° , para determinar la actividad C (s)
Luego se complica el proceso se requiere varias etapas

- ✓ Los materiales volátiles arrojan un grado de libertad y puede fijarse una presión más
- ✓ Se debe evitar la formación de carburos
- ✓ CO / CO₂ reduce bien a $T < 820^\circ \text{C}$
- ✓ H₂ / H₂O reduce bien a $T < 820^\circ \text{C}$
- ✓ A temperatura de 820°C $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2 + 9.85 \text{ Kcal}$

12.3 Extracción de un metal de su óxido



Si el óxido de metal está puro $a_{\text{MeO}} (\text{óxido}) = 1$

Si el óxido está en disolución $a_{\text{MeO}} < 1$

$$K = \frac{P_{\text{CO}_2}}{a_{\text{MeO}} P_{\text{CO}}} \quad P_{\text{CO}_2} / P_{\text{CO}} = a_{\text{MeO}} K = a_{\text{MeO}} P_{\text{CO}_2} / P_{\text{CO}}$$

- ✓ $a_{\text{MeO}} < 1$ gas rico en CO, reacciones más reductoras en el equilibrio, se mueven las curvas hacia arriba y se dificulta la reducción. Difícil mejorar las escorias
- ✓ $a_{\text{MeO}} > 1$ metal disuelto en otro metal. Se facilita el proceso

13 FUSIÓN

13.1 Fusión: operación básica

- ✓ Metalurgia de sales fundidas
- ✓ Metalurgia de las escorias
- ✓ Metalurgia de mezclas de sulfuros metálicos
- ✓ En general sales fundidas como medio de transmisión del calor o para evitar la oxidación
- ✓ En general los metales se concentran en sales fundidas y las impurezas se recogen en forma de sólido
- ✓ Procesos de exveccion? , Afino, fenómeno de corrosión, según propiedades termodinámica (G, H, S, V).

Termodinámica de la fusión (sí un componente puro)

Fusión: proceso endotérmico
 Ecuación de Gibbs – Helmholtz
 $G = G^{\circ} - TS$
 para $T = 0^{\circ}K$ $G = H$

Para un sistema cerrado $W = \text{volumen}$

$$dG = VdP - SdT \quad \text{si } P = \text{constante} \quad \mu = -S^{\circ} \text{ pendiente de la curva } \text{Me}(s) = \text{Me}(l)$$

$$\text{a } T = T_{\text{final}} \quad G = 0 \quad G_{(s)} = G_{(l)}$$

$$H_{\text{final}} = TS_{\text{final}} \quad S_{\text{final}} = H_{\text{final}} / T \quad S^{\circ}_{\text{final}} = 2.5 \text{ cal / mol}$$

Calor latente de fusión: salto no linealidad = Cp?
 Luego en el punto de fusión:

$$H^{\circ}_f = 2.5 T_f$$

Compuesto ionico $S_f = 2.54 \text{ cal / mol}$ fusion
 Compuesto Covalente $S_f = 5.9 \text{ cal / mol}$ congruente

Ecuación de Clausius – Claperyun

En equilibrio $dG_A = dG_B$ $dG_A = V_A dP - S_A dT_A$, $T_A = T_B = T_{\text{final}}$

$$dP (V_A - V_B) = -dT (S_A - S_B)$$

$$= - (S_A - S_B) / (V_A - V_B) = H / T (V_B - V_A)$$

$$= \text{calor latente de cambio de estado} / T V \quad \text{a } T = T_{\text{final}}$$

$$\text{Para } T_{\text{final}} = d(G_{\text{final}} / T) / d(1 / T) = H_{\text{final}}$$

$$G_{T_{\text{final}}} = H_{\text{final}} (T_{\text{final}} - T) / T_{\text{final}} \quad H_{\text{final}} / T_{\text{final}} = S_{\text{final}}$$

$G_{\text{final}} = S_{\text{final}} (T_{\text{final}} - T)$ Expresión válida para cualquier transformación o cambio de fase.

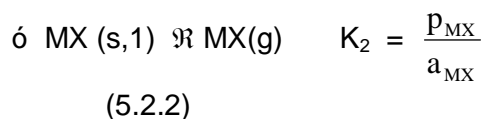
14 VOLATILIZACIÓN

14.1 Volatilización

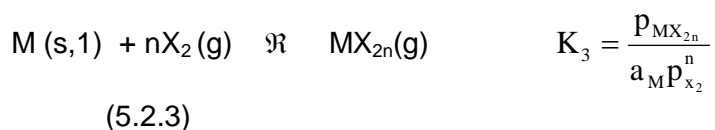
Un ejemplo no metalúrgico común de separación por medio de la fase de vapor es la destilación de alcohol. El alcohol posee una presión de vapor más alta que el agua a cualquier temperatura. Al calentar mezclas agua/alcohol con bajo contenido de alcohol, debajo del punto de ebullición el alcohol preferiblemente se remueve de la cámara de calentamiento en la fase de vapor y se recondensa en una cámara de refrigeración. El contenido de alcohol del condensado es mayor que en la solución original, y por tanto, el contenido de alcohol del líquido sobrante en la cámara de calentamiento se reduce progresivamente.

Pueden utilizarse técnicas similares para separar metales y compuestos metálicos de materiales no deseados por medio del uso de reacciones que involucren la formación de,

i) especies de vapor de metales o compuestos que ya existan en el sistema, por ejemplo,



ó ii) nuevas especies de vapor, creadas por la interacción con una mezcla de gas reactivo, por ejemplo,



Los siguientes puntos deben examinarse en detalle, al considerar el uso de un proceso de separación en la fase de vapor:

Características de los materiales - especies de productos deseadas,

- las presiones de vapor en equilibrio de la especie,

la sensibilidad de las presiones de vapor a la temperatura de reacción y a los cambios de presión

Características del reactor - mecanismo de remoción de especies de vapor,

suministro de especies reactantes,

área de superficie de la fase sólida o líquida,

presión total dentro del reactor,

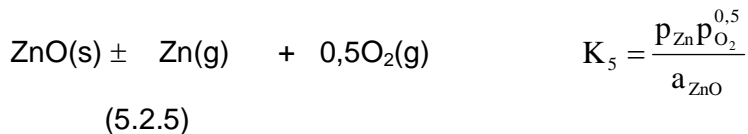
temperatura de reacción

Presiones de vapor en equilibrio. Para llevar a cabo una separación en la fase de vapor exitosa del tipo mostrado en las ecuaciones 5.2.1 y 5.2.2 es indispensable que las especies que han de removerse posean altas presiones de vapor en equilibrio. En el caso de elementos metálicos, muy pocos alcanzan esta condición incluso a temperaturas bastante altas (Alcock), (figura 5.2.1). Debe tenerse en cuenta que estas presiones de vapor representan el equilibrio entre el metal puro y el vapor. Para las aleaciones las presiones de vapor son menos valiosas y dependen directamente de las actividades de los componentes en la solución sólida o líquida.

En muchos casos, los compuestos metálicos poseen presiones de vapor más altas que los metales puros y por tanto, amplían considerablemente el rango de alternativas para esta técnica de separación (figura 5.2.2a-d). Las presiones de vapor en equilibrio para cualquier sistema en particular pueden deducirse a partir de los datos termodinámicos, siempre y cuando todas las posibles especies de vapor puedan identificarse. En el caso de equilibrio en un compuesto metálico, las especies de vapor pueden ser átomos o moléculas de metal puro, especies poliméricas del compuesto o especies complejas que involucren más de un metal (Kellogg).

EJEMPLO: Especies de vapor en el sistema Zn-O

En el sistema Zn-O deben considerarse los siguientes equilibrios que involucran especies de vapor,



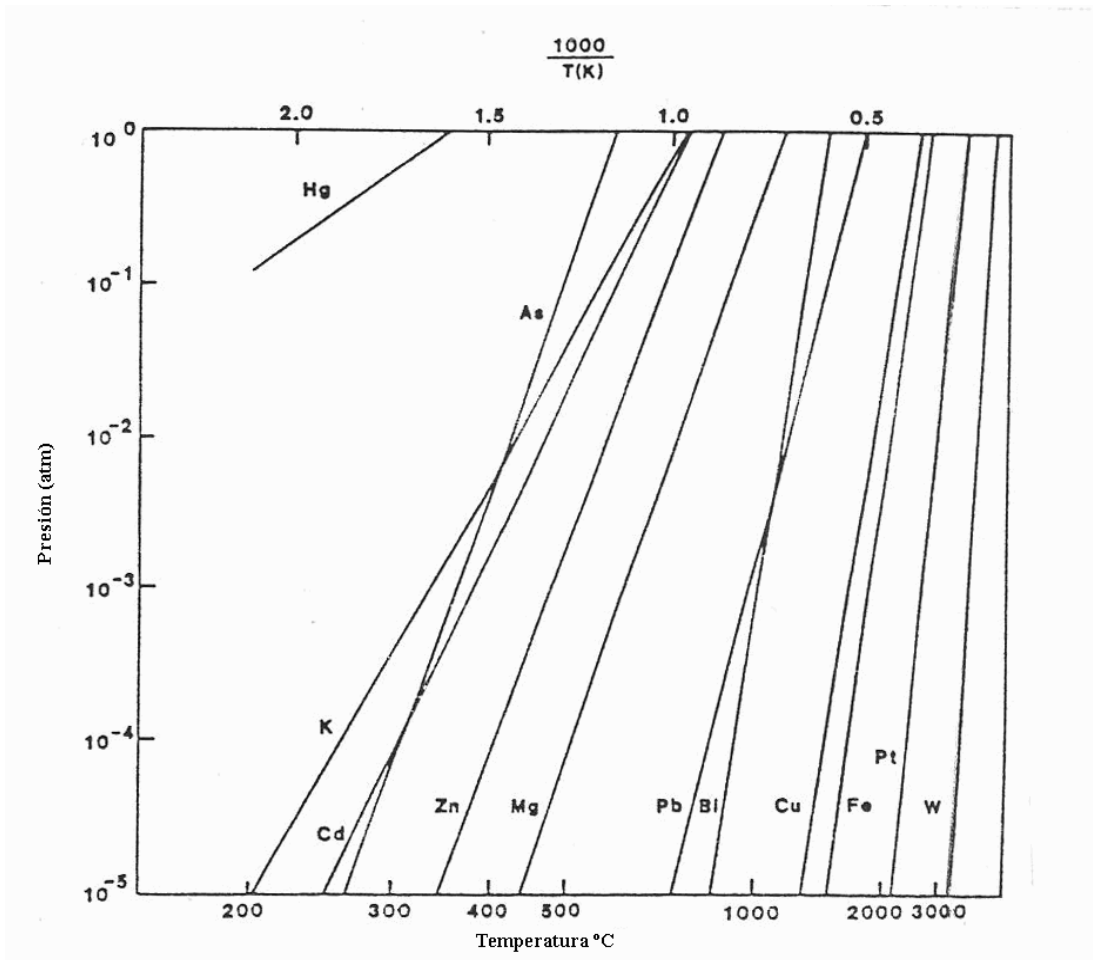


Figura 20. Presiones de vapor en equilibrio de metales puros

La constante de equilibrio K , para cualquier reacción está directamente relacionada con la función universal de Gibb ΔG° , para la reacción, es decir,

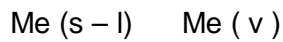
$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_{eq} \quad (5.2.7)$$

De esta manera, las presiones de vapor de las especies $Zn(g)$ y $ZnO(g)$ y por consiguiente, la presión de vapor total del Zinc en el sistema pueden calcularse al conocer las actividades del $Zn(l)$ y $ZnO(s)$ a la temperatura de reacción (figura 5.2.3). Por encima del rango de presiones parciales de oxígeno, que aquí se tiene en cuenta, P_{ZnO} es insignificante comparado con P_{Zn} . A bajas presiones parciales de oxígeno, bajo condiciones donde $Zn(l)$ es estable, la presión parcial del zinc, P_{Zn} , es alta e independiente de la presión del oxígeno en el sistema. A altas presiones parciales de oxígeno cualquier líquido de zinc se oxidará en $ZnO(s)$. Como lo indica la ecuación 5.2.5 bajo estas condiciones la presión parcial del zinc en el gas será inversamente

proporcional a la presión de oxígeno en el sistema. Estas observaciones indican que las condiciones más favorables para la separación en la fase de vapor de zinc del sistema se presentan a altas temperaturas y a bajas presiones parciales de oxígeno.

14.2 Termodinámica de la volatilización

Separación de metales en fase gaseosa a partir de fase líquida $P = atm$, $P_{p_{Me}}$ Muy baja por lo tanto la fase gaseosa se comporta idealmente excepciones Zn, Hg P_v metal es muy elevado y el metal se obtiene como gas



$$G_v = H_v - T S_v = -RT \ln (P^\circ Me (v) / Me (s - l))$$

$$\ln P_{Me(v)} = -A/T + B$$

La temperatura de volatilización $T = constante$ $G = 0$

$$T_v = \frac{S_v}{H_v} = 220.25 \text{ cal / K}$$

Régla de Trouton

$$H_v = 22 T_v$$

Metales volátiles	T_v, H_v	Hg, Cd, Zn
Metales refractarios	T_v, H_v	W, Mo, Cr, Zr

- (1) $Me (s - l) \rightleftharpoons Me (v)$
- (2) $2Me (s - l) \rightleftharpoons Me_2 (v)$ disociación
- (3) $Me_2 (v) \rightleftharpoons 2 Me (v)$

$$(4) = 2 (1) - (2) \quad H_3 = 2 H_1 - H_2$$

$$\ln P_{Me_1}^1 = - \frac{H_1}{RT} + \frac{S_1}{R}$$

$$\ln P_{Me_2}^2 = - \frac{H_2}{RT} + \frac{S_2}{R}$$

$$\ln (P_{Me}^1)^2 / P_{Me_2}^2 = - \frac{H_3}{RT} + \frac{S_3}{R}$$

Ecuación de Clausius – Claperyon

Cambio de estado I – v : calor latente vaporización

$$W = -dT$$

$$\ln (P_2 / P_1) = - (1/T_2 - 1/T_1)$$

Presión de vapor a cualquier temperatura

$$\log P = + B$$

A, B constantes, pero no es totalmente independiente de T, y por lo tanto se debe agregar un término C log T

14.3 Metalurgia de las escorias

Introducción: proceso metalúrgico de obtención y afino, desecho, bajas colas, sustancias no deseables, óxidos, silicatos, sulfuros, halógenos, inmiscibles, baja densidad, componentes y composición.

Fines de la escoria

- ✓ Capturar impurezas
- ✓ Proteger el baño metálico
- ✓ Favorecer iones de intercambio
- ✓ Controlar afino

Propiedades

- ✓ Baja refractariedad
- ✓ Buena fluidez
- ✓ Inmiscibilidad
- ✓ Baja densidad
- ✓ Baja tensión superficial
- ✓ Bajo costo
- ✓ Puede oxidante o reductor

Estructuras de las escorias

- ✓ Tetraedros : en tres dimensiones
- ✓ Destrucción de estructura en fase sólida
- ✓ Enlaces fuertes, baja alteración
- ✓ Estructura de vértices rotos relación de sí al aumentar la T desaparece la estructura de los silicatos.

Otras propiedades

- ✓ Conductividad eléctrica y térmica, capacidad básica : óxidos ácidos, básicos.

✓ Índice de basicidad :

$$Ib = \frac{CaO + 2/3 MgO}{SiO_2 + P_2O_5}$$

$$Ib = \frac{CaO - 3 (P_2O_5 + Al_2O_3)}{2SiO_2}$$

$$Ib = \frac{CaO}{SiO_2}$$

- ✓ Viscosidad $v = f (T, \text{composición})$ $n = A^{\exp(EQ/RT)}$
- ✓ Poder oxidante – reductor
- ✓ Densidad: valores típicos
- ✓ Tensión superficial
- ✓ Fundentes

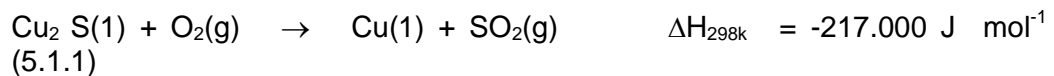
15 COMBUSTIBLES METALURGICOS

En el diseño o en la elección de un reactor para un proceso de alta temperatura es importante considerar la fuente de energía a usar para calentar los reactantes y la manera en que la energía se introduce dentro del reactor. Las fuentes de energía pueden ubicarse de forma adecuada en cuatro categorías:

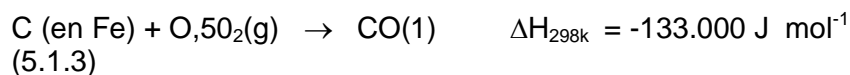
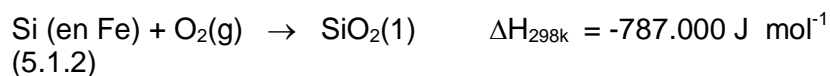
- i) energía química
- ii) combustión de combustibles de hidrocarburo,
- iii) energía eléctrica, y
- iv) energía conservada, o calor sensible

Asociado con cualquier cambio de estado en un material, por ejemplo, fusión, vaporización o una reacción química, está un cambio en el contenido de calor del sistema (véanse Capítulos A y C). Las reacciones que absorben calor son conocidas como reacciones endotérmicas y aquellas que consumen calor son reacciones exotérmicas. En el caso de las reacciones endotérmicas este calor adicional debe ser introducido en el sistema antes que la temperatura se eleve nuevamente. Al utilizar el calor que proporciona una reacción exotérmica en la carga, la energía que otras fuentes deben proporcionar puede reducirse o incluso eliminarse completamente. Otra ventaja del uso de energía generada en una reacción química es que nos se presenta problema en la transferencia de calor puesto que el calor es proporcionado dentro del material mismo. Dos ejemplos del uso de energía química en operaciones comerciales son:

- a) la oxidación de sulfuros metálicos sólidos o líquidos, por ejemplo,

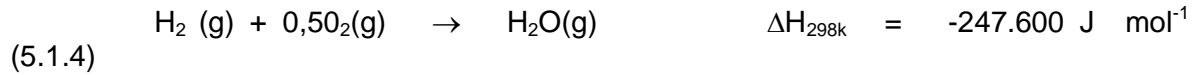


- b) la oxidación de silicón y carbono disuelto en hierro fundido,



Los combustibles de hidrocarburo pueden ser de formas sólidas, líquidas o gaseosas, como por ejemplo, carbón, coque, petróleo o gas. En la mayoría de los casos la

combustión con oxígeno se lleva a cabo dentro del reactor mismo para minimizar las pérdidas al transferir el calor a la carga. La proporción atómica de hidrógeno a carbono en estos combustibles varía desde 0,05 para coque (C) aproximadamente hasta cuatro en gas metano (CH₄). Durante la combustión de hidrógeno o carbono por medio de las reacciones,



se desprenden cantidades considerables de calor. Con el uso de datos de entalpía (ΔH) (Capítulo C) y los calores de reacción es posible lograr la temperatura máxima de la llama que producirían estas reacciones. La temperatura máxima se obtiene cuando todo el hidrógeno es quemado en H₂O y todo el carbono en CO₂. La cantidad de oxígeno requerida para alcanzar exactamente esta condición es denominada requisito de oxígeno estequiométrico. Si no se dispone del oxígeno suficiente para la combustión completa, la reacción no libera el calor máximo, por consiguiente, la temperatura de la llama se reduce. De la misma manera, si se introduce un exceso de oxígeno con el combustible, el gas adicional ahora presente, debe ser del mismo modo calentado y nuevamente se reduce la temperatura de la llama (Fig. 5.1.5). Las proporciones de las diversas especies de gas presentes en el gas resultante posterior a la combustión de C_nH_{n+2} en el aire se ilustran en la figura 5.1.6 para las condiciones tanto ricas (deficiencia de aire) como deficientes (exceso de aire) en combustible.

El uso de energía eléctrica en las aplicaciones de alta temperatura se efectúa a través del calentamiento por resistencia, arco, plasmas e inducción (Robiette). La ventaja de esta fuente de energía es la no-contaminación de la carga por el combustible. En el calentamiento por resistencia, la corriente eléctrica se pasa a través de una resistencia, la cual puede ser un elemento de calor externo o la carga misma, y la energía calórica producida es dada por la relación,

$$(5.1.7) \quad \text{Energía} = V.I.t \quad (\text{J}) \text{ o } (\text{W s}^{-1})$$

donde V es el voltaje suministrado a través de la resistencia,
I es el flujo de corriente en amperios,
t es el tiempo (s).

No existe un equivalente para la temperatura teórica de la llama en el calentamiento por resistencia, por el contrario la temperatura es limitada por los materiales del reactor y las pérdidas de calor del sistema. La velocidad a la cual se pierde calor por el sistema aumenta a medida que la diferencia de temperatura entre el interior del reactor y los alrededores aumenta.

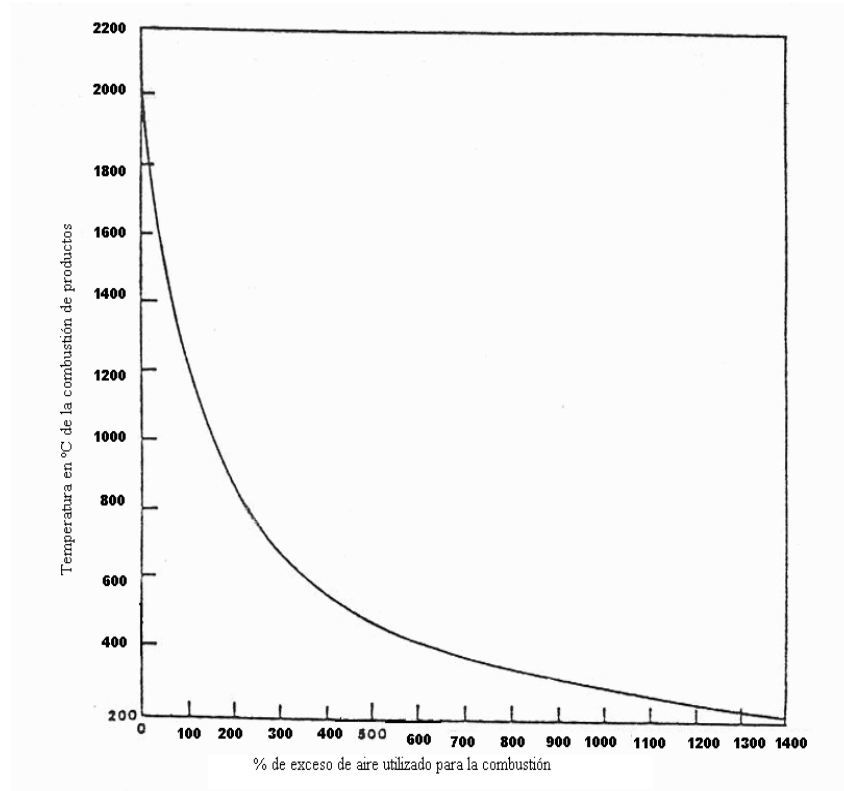


Figura 21. El efecto del exceso de aire en la temperatura de los productos de combustión de gases de hidrocarburo.

Energía:

- ✓ Requerida para operaciones de fusión, evaporización, endotérmicas
- ✓ Procesos de reducción: óxidos, sulfuros
- ✓ Procesos de manipulación de minerales
- ✓ Procesos especiales como la producción de Cl, H₂
- ✓ Extracción de coque en el proceso siderúrgico
- ✓ Se obtiene principalmente de combustibles fósiles: carbón, fuel, gas, existen otras fuentes que suplen el suministro como la generación hidroeléctrica, nuclear, natural (madera). Se puede generar energía a partir de reacciones exotérmicas, oxidación de sulfuros, ejemplo la pirita.

Combustibles fósiles

Sólidos:

- ✓ Utilización de carbón. Consideraciones sobre su durabilidad: Se coquiza, el gas se utiliza para producir electricidad, materias volátiles 22 – 33 %. Carbón coquizable. No todos aunque es posible conseguir sustitutos con procesos adecuados
- ✓ Bajo azufre y cenizas: características. Si se va en el metal y debe escorificarse, recomendable no tener mas del 1 % S. Cenizas que se descargan en la escoria máximo 10 %. Los de bajo punto de fusión forman clinkes y es peligroso
- ✓ Poder calorífico: C, H, cenizas: depende el precio. Bajos carbonos: termoeléctricas
- ✓ Se requiere para el coke sea poco reactivo y para inhibir las reacciones con el CO₂. Se requiere producirlo y no CO

Líquidos:

- ✓ Petróleos y breas de coquización. Se utilizan de manera similar a las anteriores
- ✓ Se almacenan en tanques para su utilización
- ✓ Destilación fraccionada del petróleo crudo. conocimiento y utilización de subproductos. Determinación del punto de ignición. Se requiere bajo azufre < 2 % de aquí el precio. Poder calorífico 42000 KJ ~ 10000 Kcal / Kg ~ 18 BTU / lb

Gases:

- ✓ Gas natural (metano)
- ✓ Gas de coke (metano, hidrogeno, CO)
- ✓ Gas de alto horno (CO, CO₂, N₂)
- ✓ En el futuro gasificación del carbón
- ✓ Ganan importancia: propano, butano, gases refinados
- ✓ Altos poderes caloríficos
- ✓ Fácilmente almacenables y transportables
- ✓ El poder calorífico varía ampliamente y después del tipo de gas. C₄H₁₀ tendrá 4 veces mas que el CH₄ (expresado en J / m³)
- ✓ Cada gas requiere un quemador específico. Algunos requieren precalentamiento
- ✓ Las reacciones gas – aire depende de las fracciones molares presentes
- ✓ La utilización de gas depende de su disponibilidad
- ✓ Es importante manejar con cuidado las emisiones de gases pues en algunos casos son tóxicos

Sulfuros como combustibles

- ✓ Reacciones muy exotérmicas, en algunos casos pueden conseguirse procesos autógenos, sin requerir la adición de otros combustibles, incluso se puede quedar fuera de control (metalurgia del Pb)
- ✓ En algunos casos se agrega piritita para mejorar la cantidad de calor.
- ✓ Deben controlarse las emisiones de SO₂, la formación de Fe₂O₃ y utilizar un proceso conveniente (lecho fluidizado)

Energía eléctrica:

- ✓ Generación
- ✓ Metalurgia del Aluminio
- ✓ Manejo correcto de los factores de potencia
- ✓ Energía de formación de Gibbs: explicación del diagrama
- ✓ Análisis al carbón: porosidad, humedad, materia volátil, carbono fijo, cenizas
- ✓ Análisis elemental: C, H, O, S, N, otros
- ✓ Colas de combustión :

- ✓ P.N. – C : $338 C + 1423 (H - O/8) + 92S - 24.4 (9H + m)$

Coquización: Calentamiento en ausencia de aire para desalojar volátiles

- ✓ Baja temperatura: hasta 500 C
- ✓ Alta temperatura. consumo a los 1000 C
- ✓ Gas de coque: CO, CO₂, H₂O, C₂H₆, H₂S, NH₃

Reacciones entre el C y el O₂

- ✓ a Baja Temperatura
- ✓ a Altas Temperaturas y poco O₂
- ✓ Ecuación de Boudouard
- ✓ En Gas y Petróleo
- ✓ Para muy altas T
- ✓ Otras reacciones a altas temperaturas
- ✓ A bajas temperaturas: Reacción de desplazamiento Que genera el H₂ para la fabricación de Amoniaco

Análisis realizados al carbón

Próximo: Humedad, materia volátil, cenizas, carbono fijo, poder calorífico

Ultimo: C, H, N, S, O. con esto se hacen tablas características

Propiedades físicas: Conductividad térmica, calor específico, porosidad, índice de hinchamiento, densidad DTP, humedad.

Líquidos:

- ✓ Se utilizan de manera similar
- ✓ Destilación fraccionada, punto de ignición
- ✓ Bajos contenidos de azufre
- ✓ Poder Calorífico: 42000 KJ/Kg Aproximadamente:10000 Kcal/Kg ~ 18000 BTU/lb

Gases:

- ✓ Altos poderes caloríficos
- ✓ Fácilmente almacenables y transportables
- ✓ Alcanzan altas temperaturas
- ✓ Requieren quemadores específicos según tipo de gas
- ✓ Diferentes relaciones aire/combustible, según composición
- ✓ Control cuidadoso

Sulfuros como combustibles:

- ✓ Reacciones muy exotérmicas
- ✓ Procesos autógenos (Metalurgia Pb)
- ✓ La adición de Pirita puede mejorar las reacciones

Energía Eléctrica:

- ✓ Metalurgia de Aluminio. Manejo correcto de los FP
- ✓ Metalurgia del Hierro

15.1 Reacciones de combustión. Revisión de calores

Reacciones en siderurgia

Reducción directa (cok)
(gas)

Convertidor

Metalurgia selectiva

Metalurgia del aluminio

- ✓ Abundancia en la corteza terrestre
- ✓ Características que lo hacen atractivo
- ✓ Aspectos históricos relacionados. Proceso Bayer, Hall-Heroult
- ✓ Aspectos de mercado, Graficas y consumos
- ✓ Temas relacionados que han disparado el consumo
- ✓ Usos generales del aluminio
- ✓ Menas de aluminio: alteración hidrotermal, magmáticos, metamórficos, detríticos
- ✓ PROCESO BAYER

Digestión:

Precipitación:

Calcinación:

- ✓ Trituración – molienda – calentamiento – desilicificación – digestión.
- ✓ Impurezas: Titanio, carbonatos, componentes orgánicos, azufre, fósforo, vanadio.
- ✓ Consumo energético: 250Kwh/ton Al_2O_3 , $15500 \times 10^3 J/ton Al_2O_3$
- ✓ PROCESO HALL-HEROULT: Electrolítico, electrolisis ígnea o de sales fundidas–criolita.
- ✓ Lodos convencionales
- ✓ Reacciones:

- ✓ Tecnología: horno cuba de electrolisis
- ✓ Tensiones de 300 a 400 KV
- ✓ Materias primas: Antracita, coque de petróleo, coque crudo – verde, coque de brea, brea metalúrgica, fundición, tratamientos térmicos.

Metalurgia del Cobre

Resumen general del cobre como metal, reseña histórica, características del metal, técnicas de extracción.

- ✓ Minerales, menas, yacimientos: Calcopirita, Colosina, Cuprita.
- ✓ Usos del cobre: Apricultura,
- ✓ Aspectos generales de oferta y demanda: US\$ 2.3/Kg
- ✓ Metalurgia: Concentración, Tostación (a muerte), fusión, escoria
- ✓ Reacciones:
- ✓ Tipos de hornos: Reverbero, cuba, eléctrico, flash
- ✓ Conversión: Tratamiento con aire, cobre blister

- ✓ Horno Pierce-Schmith: TBRC-KALDO

- ✓ Obtención directa: Noranda, Workra, Q-S, Outokumpu, Mitsubishi
- ✓ Recuperación Hidrometalúrgica: Lixiviación
- ✓ Afino pirometalúrgico: Electrolisis.

16 PROBLEMAS AMBIENTALES ASOCIADOS CON PROCESOS DE ALTA TEMPERATURA

16.1 TRATAMIENTO DE GASES

Los mayores problemas ambientales relacionados con los procesos de alta temperatura provienen de los gases y de las partículas sólidas. Las reacciones que requieren gases juegan un mayor papel en procesos pirometalúrgicos y una consecuencia inevitable de tales métodos es la producción de vapores nocivos y partículas suspendidas en la atmósfera. El polvo y el humo, que son partículas sólidas, se distinguen de la niebla, compuesta de gotas líquidas formadas por condensación o reacción química. La figura 5.6.1 indica el rango de tamaños de partículas producidas en diferentes procesos y posibles técnicas de limpieza de gas. La eficiencia de limpiar las corrientes de gas varía considerablemente con los tamaños de las partículas, siendo las partículas más pequeñas las más difíciles de remover.

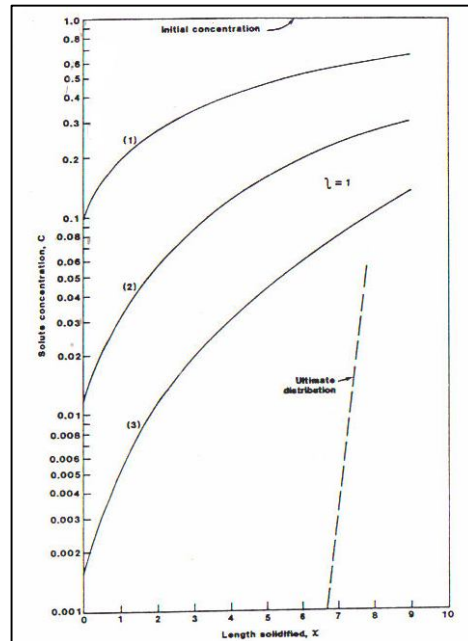


Figura 22 Las concentraciones de solutos como función de distancia después de pasos sucesivos en la zona de refinamiento de una barra sólida impura (Pfann)

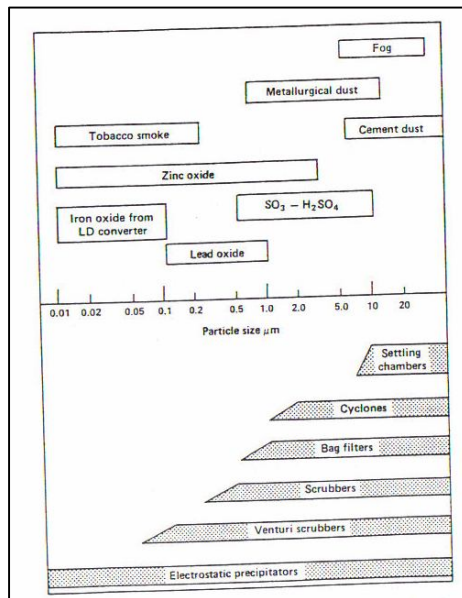


Figura 23 Rango de tamaños de partícula por medio de distintos proceso metalúrgicos y rangos de trabajo para varios tipos de equipos de limpieza de gas (Rosenqvist)

En una cámara impelente gravitacional las velocidades de gas reducidos permiten que las partículas se alojen. Ya que la velocidad de decantación es proporcional al diámetro de la partícula, únicamente partículas pequeñas, mayores a 100 μm, se puede recoger esta técnica. El colector de gas ciclón utiliza la fuerza centrífuga impuesta por un remolino para incrementar la velocidad de sedimentación. La aceleración centrífuga puede ser muchas veces también gravitacional con incrementos correspondientes en velocidad de decantación y eficiencia.

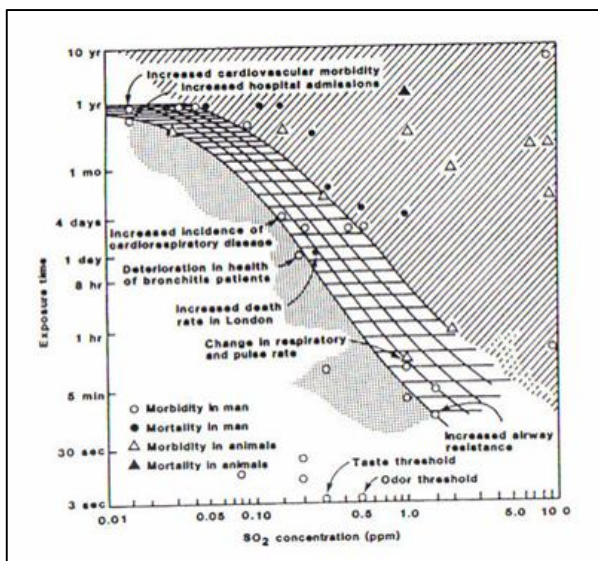


Figura 24 Efectos en la salud debidos a varias exposiciones a SO₂. El área sombreada representa el rango de exposiciones donde se han reportado muertes excesivas. El área cuadrículada representa el rango en la que se ha reportado un incremento de mortandad. El área punteada representa el rango de exposiciones donde los efectos de salud son sospechosos (Williamson)

Los lavadores con agua se basan en un contra flujo de pieza colada simple de mezclas líquidas y gaseosas. En todos los lavadores, los pigmentos de gotas líquidas y la captura de partículas sirven para limpiar el gas.

La operación de sistema de filtros es auto evidente, el material finamente tejido actuando como una barrera física para el movimiento de partículas más grandes. La selección de fibra para el material del filtro se hace importante para corrientes de gas de alta temperatura, ya que los tejidos más comúnmente usados son inflamables. Se puede hacer necesario el enfriamiento de gases de los procesos antes de llegar a la cámara de filtros.

La manera más eficiente de remover partículas no conductoras menores a $1\ \mu\text{m}$ es por la precipitación electrostática. Un altísimo voltaje DC (40-60 kV) se aplica entre los cables de descarga y placas colectoras. Las primeras moléculas de gas iónico y las cargas producidas de esta manera, se recogen en las partículas, atrayéndolas a las placas colectoras. Sobre 1100K la ionización térmica comienza a producir suficiente gas de alta conductividad como para que el voltaje de descarga resulte difícil. Esto acarrea un límite mayor sobre el rango de temperatura para la colección electrostática eficiente. La eficiencia de la colección depende del área de placas colectoras, y en algunos casos en la composición de corriente de gas. Para mantener la eficiencia en cualquier desalquitrador se necesita sacudir el electrodo de descarga regularmente para remover el polvo recogido.

Debe anotarse que la eficiencia de todo el equipo de limpieza de gas se reduce con la reducción del tamaño de las partículas. De esta manera, los límites mostrados en la Figura 23 indican los límites aproximados a los que el equipo funciona con eficiencia razonable. La remoción total de polvo se alcanzará para tamaños de partículas muy por encima de estos valores mínimos. Sin embargo, podría decirse que al usar estas técnicas parece no haber razón por la que las emisiones de partículas no puedan reducirse a 95-99% en los niveles de control.

Las mayores emisiones gaseosas de los procesos pirometalúrgicos y que han recibido más atención hasta la fecha, debido a sus efectos nocivos sobre el ambiente, son el óxido de sulfuro y los fluoruros. Muchos minerales con sulfuro son tratados por oxidación para producir SO_2 . En el tratamiento de calcopirita, por ejemplo, CuFeS_2 , los gases se producen por para cada tonelada de cobre extraído. En muchas partes del mundo se han impuesto estándares ambientales estrictos en los hornos de tostación que usan estos procesos. La toxicidad del compuesto puede juzgarse por sus efectos medidos en la salud humana y animal, como lo ilustra la figura 24. (Williamson) El SO_2 es también responsable del daño pulmonar considerable en los seres humanos a través de la formación de ácido sulfúrico, H_2SO_4 , y de la "lluvia ácida". En grandes regiones de los Estados Unidos, se han reportado lluvias con un pH entre 2-5, ante lo cual se ha dicho que su causa se debe a la formación de soluciones $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. (Moore y Moore).

Para las corrientes que contienen altas concentraciones de SO_2 es posible producir 1) sulfuro elemental o ii) sulfuro ácido, como productos derivados del proceso. La manufactura del sulfuro ácido ha probado ser la más popular de dichas alternativas debido a los bajos costos de la producción y al mercado potencial para el ácido sulfúrico, utilizado como un reactivo químico. La necesidad de la protección ambiental ha tenido un

efecto significativo en el diseño de los procesos que requieren de los sulfuros. En particular, el interés se ha inclinado hacia el uso de oxígeno enriquecido o atmósferas de combustión de oxígeno puro y en técnicas de fusión "rápida" continua. El producto de este tipo de reactor consta de concentraciones SO mayores a velocidades constantes, lo que lo hace más apetecido para el tratamiento directo en una planta acida. De esta manera, todo el 99.5% del sulfuro generado debe removerse de la corriente de aire.

Existen muchos tipo de tratamiento de desecho que son técnicamente posibles, aunque su introducción dependa mucho de factores políticos y económicos. Durante muchos años un número de productores de cobre afirmaron que no era pues posible alcanzar los estándares establecidos con respecto de la cualidad del aire. Ahora que esto ha confirmado lo contrario, se ha invalidado claramente.

Muchas técnicas también son válidas para el tratamiento de SO₂ en corrientes de gas diluido que pueden resultar de la quema de hidrocarburos. (Seinfeld. Intl. * Symp.) Por ejemplo, las corrientes de gas puede ser productos directos de plantas piro metalúrgicas, pero también deberán considerarse las fuentes indirectas tales como estaciones de poder termal que generan electricidad para el uso de tales procesos.

16.2 REGULACIÓN AMBIENTAL

La mayoría de los desperdicios del suelo que resultan de los procesos piro metalúrgicos lo hacen en forma de escoria, que contienen compuestos indeseables de los materiales de la ganga. Los procedimientos y regulaciones que cubren la eliminación de desechos sólidos se discuten en el Código de Regulaciones Federales, Título 40 (Protección del Ambiente). Capítulo 1, partes 260-271 (ver apéndice V). En algunos casos los materiales de desecho pueden resultar ser provechosos; por ejemplo, las escorias de la producción de acero deben utilizarse como vertedero de basuras, algunas escorias de alto horno son tratadas para producir agregado o agregado ligero para el uso en concreto (Lee).

Las regulaciones encargadas de las emisiones gaseosas de fuentes fijas han de encontrarse en el código de Regulaciones Federales, Título 40 (Protección del Ambiente); Capítulo 1, subcapítulo C, parte 60.

BIBLIOGRAFÍA

- Ayala J. Y García M. Fundamentos de metalurgia extractiva. Universidad de Oviedo, 1995.
- Bray, J. L. Metalurgia extractiva de los metales no féreos. John Willey, 1961.
- Cátedra de metalurgia Universidad de Oviedo. Prácticas de metalurgia, refractarios y hornos. Universidad de Oviedo, 1989.
- C. Twigge-Molecey, T. Price (Editor). Materials Handling in Pyrometallurgy: Proceedings
- Colin D. Brown (Author). Dictionary of Metallurgy
- Colin Bodsworth. The Extraction and Refining of Metals
- Daniel A. Brandt, J. C. Warner. Metallurgy Fundamentals
- Thomas J. Bertone, John E. Neely. Practical Metallurgy and Materials of Industry (5th Edition)
- Daniel A. Brandt, J. C. Warner. Metallurgy Fundamentals
- David R. Gaskell. Introduction to metallurgical thermodynamics
- Gilchrist, J.D. Extraction metallurgy. Pergamonn Press, 1980.
- Gill Charles B. Metalurgia extractiva no ferrosa. Ed. Limusa, 1989.
- Gómez, J. Metalurgia extractiva. Universidad nacional Facultad de Minas, 1976.
- Habashi, Fathi (Editor) Handbook of Extractive Metallurgy
- Hae-Geon Lee, Hae Geon-Lee Chemical Thermodynamics for Metals and Materials
- Hayes Peter. Process Principles in Minerals & Materials production
- Nobuo Sano (Editor), Wei-Kao Lu (Editor), Paul V. Riboud (Editor), Masafumi Maeda (Editor), Wei-Kno Lu (Editor). Advanced Physical Chemistry for Process Metallurgy
- John Louis Feirer, John D. Lindbeck, Fierer. Metal Technology and Processes
- Newton, J. Extractive metallurgy. John Willey, 1989.
- P. Villars (Editor), Alan Prince (Editor), Hiroaki Okamoto (Editor). Handbook of Ternary Alloy Phase Diagrams
- Pehlke, R.D. Unit process of extractive metallurgy. American Elsevier Publishers, 1975.
- Rosenquist, T. Principies of extractive metallurgy. Mc graw Hill Co. , 1987.
- S. S. Flett (Editor). Extraction Metallurgy
- Sancho M. Jose P. La metalurgia del aluminio. Aluminium Verlag, 1995 .

ANEXO

PROGRAMA OFICIAL DE LA ASIGNATURA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – SEDE MEDELLIN									
FACULTAD DE MINAS			DEPTO. MINERALES				RECURSOS		
PROGRAMA OFICIAL DE ASIGNATURAS									
CODIGO					N3120				
NOMBRE: PIROMETALURGIA									
Aprobado por consejo de facultad. Acta No. 1893 Año 1998 Mes 03 Día 10									

MODALIDAD			HAB	VAL	INTENSIDAD/SEMANA				PRACTICA EXTRAM.	
T	TP	P			DP	TD	TA	EP		
	X		Si	Si	04	0	04	04	Si	

PROGRAMA	NIVEL	TIPO	PRE-REQUISITOS	CO-REQUISITOS
INGENIERÍA MINAS METALURGIA	DE Y 9	N	K1110	

OBJETIVOS

- ✓ Estudiar y analizar los principios teóricos fundamentales relacionados con la extracción y refinación de metales a altas temperaturas.
- ✓ Aplicar los principios de balances de masa y energía a la extracción de metales.
- ✓ Conocer la aplicación de los principios de la pirometalurgia a la obtención de metales ferrosos y no ferrosos.
- ✓ Conocer las bases tecnológicas de obtención de los metales básicos.

- ✓ Aplicar los conocimientos obtenidos en otras asignaturas referentes al procesamiento de minerales.
- ✓ Introducir al estudiante al control de los procesos unitarios en metalurgia de alta temperatura.
- ✓ Familiarizar al estudiante con el estado de la industria minero-metalurgica nacional mediante el desarrollo de visitas de campo.

PROGRAMA DETALLADO

DP

1.	Principios fundamentales de la metalurgia extractiva	12 horas
1.1	Concepto de metalurgia	
1.2	Menas: clasificación	
1.3	Los metales: distribución y clasificación	
1.4	Procedimientos de la metalurgia extractiva	
1.5	Diagramas de flujo	
1.6	Estequiometría y balances metalúrgicos	
2.	Principios de Aglomeración	4 horas
2.1	Briquetización	
2.2	Sinterización	
2.3	Nodulización	
2.4	Peletización	
2.5	Termodinámica de la aglomeración	
3.	Secado	4 horas
3.1	Principios de secado	
3.2	Tipos de aguas	
3.3	Equipos de secado	
4.	Calcinación	6 horas
4.1	Termodinámica de la calcinación	
3.2	Cinética de las reacciones heterogéneas	
3.2.1	Fenómenos que intervienen en la cinética heterogénea	
3.2.2	Reacciones sólido-gas	
3.2.3	Funciones que caracterizan el avance de la transformación	
3.2.4	Modelo cinético del núcleo sin reaccionar	
4.4	Tipos de hornos	
4.4.1	Horno de cuba	
4.4.2	Horno rotativo	
4.4.3	Horno eléctrico	
4.4.4	Horno de lecho fluidizado	

5. Tostación	8 horas
5.1 Introducción	
5.2 Tipos de tostaciones	
5.3 Termodinámica de la tostación	
5.4 Tostación diferencial	
5.5 Tostación clorurante	
5.6 Cinética de las reacciones sólido-líquido	
5.7 Variables que influyen en el proceso	
5.8 Hornos de tostación	
6. Reducción pirometalúrgica de las materias primas	8 horas
6.1 Introducción	
6.2 Termodinámica del proceso de reducción	
6.3 Diagramas de Ellingham para óxidos: construcción e interpretación	
6.4 Clasificación de los óxidos según el diagrama de Ellingham	
6.5 Datos y parámetros calculables según los diagramas de Ellingham	
6.6 Limitaciones de los diagramas de Ellingham	
6.7 Diagramas de Ellingham para otros compuestos	
6.8 Reducción de óxidos	
7. Fusión y volatilización. Metalurgia de las escorias	4 horas
8. Procesos de Afino metalúrgico	2 horas
9. Combustión y combustibles metalúrgicos	2 horas
9.1 Fundamentos de combustión	
9.2 Combustibles sólidos	
9.3 Combustibles líquidos	
9.4 Combustibles gaseosos	
10. Fundamentos en la elaboración del hierro, el acero y ferroaleaciones.	2 horas
11. Procesos de fabricación de otros metales: Obtención de oro y plata (procesos de fundición y ensayos al fuego), aluminio, cobre cinc, plomo, níquel, magnesio, estaño.	6 horas
12. Materiales Refractarios: aspectos fundamentales	2 horas

METODOLOGÍA:

El estudiante debe leer con anticipación el tema correspondiente a ser cubierto en clase.

Exposiciones magistrales combinadas con discusiones en el salón de clase sobre lectura previa recomendada.

Los temas a estudiar serán complementados con talleres (solución de problemas y preguntas en clase) y visitas a laboratorios, museo e industria.

EVALUACIÓN

Problemas, consultas en Internet sobre temas específicos e informes de visitas a laboratorios 40%

Trabajo de consulta por grupo (3 o 4 estudiantes como máximo) a realizar durante todo el semestre y presentación de informes de avance y exposición final. 30%

Examen parcial 1 15%

Examen parcial 2 15%

PROGRAMA CALENDARIO (TEMARIO POR CLASES)

Clase 1: Presentación y fundamentos de la Metalurgia extractiva de alta temperatura.

Clase 2: Fundamentos de metalurgia extractiva

Clase 3: Estudio de metales

Clase 4: Fundamentos de Ciencia de los Materiales. Defectos, enlaces, difusión.

Clase 5: Balances de masa

Clase 6: Balances de masa

Clase 7: Fundamentos de aglomeración

Clase 8: Fundamentos de aglomeración. Principios de secado

Clase 9: Principios de secado

Clase 10: Evaluación I: (Val. 15%. Se evalúa lo visto hasta la clase 9)

Clase 11: Principios de Calcinación

Clase 12: Principios de Calcinación

Clase 13: Principios de Calcinación. Laboratorio

Clase 14: Principios de tostación

Clase 15: Principios de tostación

Clase 16: Principios de tostación

Clase 17: Principios de tostación. Laboratorio

Clase 18: Reducción. Fundamentos

Clase 19: Reducción. Fundamentos

Clase 20: Reducción. Fundamentos

Clase 21: Escorias metalúrgicas

Clase 22: Procesos de fusión.

Clase 23: Procesos de Volatilización. Afino metalúrgico

Clase 24: Combustibles metalúrgicos

Clase 25: Evaluación II (Valor 15%. Se evalúa lo visto hasta la clase 24)

Clase 26: Siderurgia

Clase 27: Ensayes al fuego

Clase 28: Extracción de metales Aluminio

Clase 29: Extracción de metales Cobre

Clase 30: Materiales refractarios

PLAN DE PRÁCTICAS

Secado.

Calcinación.

Tostación.

Salida de campo a la industria nacional con el objeto de conocer los fundamentos en la elaboración del hierro, el acero y ferroaleaciones y los procesos de fabricación de otros metales y la utilización de materiales refractarios. Esta práctica se realizará en la semana quince del semestre y se requiere contar con transporte y viáticos para los estudiantes y el profesor. Cada semestre se definirá el lugar de práctica, según las condiciones de la industria nacional y del país en general.

BIBLIOGRAFÍA

- Ayala J. Y García M. Fundamentos de metalurgia extractiva. Universidad de Oviedo, 1995
- Bray, J. L. Metalurgia extractiva de los metales no féreos. John Willey, 1961
- Gilchrist, J.D. Extraction metallurgy. Pergamonn Press, 1980
- Gill Charles B. Metalurgia extractiva no ferrosa. Ed. Limusa, 1989
- Gómez, J. Metalurgia extractiva. Universidad nacional Facultad de Minas, 1976
- Newton, J. Extractive metallurgy. John Willey, 1989
- Pehlke, R.D. Unit process of extractive metallurgy. American Elsevier Publishers, 1975
- Rosenquist, T. Principies of extractive metallurgy. Mc graw Hill Co. , 1987
- Sancho M. Jose P. La metalurgia del aluminio. Aluminium Verlag, 1995
- Cátedra de metalurgia Universidad de Oviedo Prácticas de metalurgia, refractarios y hornos. Universidad de Oviedo, 1989

OBSERVACIONES

Se espera poder ofrecer al estudiante prácticas de laboratorio y de industria, sin embargo, si por algún motivo no puede realizarse alguna de ellas se implementa otra práctica que involucre algún otro tipo de pretratamiento hidro o pirometalúrgico.

PROGRAMA ELABORADO POR:

Oscar Jaime Restrepo Baena
Profesor Asociado
Departamento de Recursos Minerales
Facultad de Minas