



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA

Extracción de metales por pirometalurgia: Procesamiento de hierro, acero, cobre y aluminio

Apellidos, nombre	Muñoz Portero, María José (mjmunoz@iqn.upv.es)
Departamento	Ingeniería Química y Nuclear
Centro	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales



1 Resumen de las ideas clave

En este artículo vamos a describir y comparar el **procesamiento de distintos materiales metálicos mediante pirometalurgia**, como es el caso del hierro, el acero, el cobre y el aluminio. Todo ello lo veremos a través de ejemplos prácticos para facilitar el aprendizaje de los conceptos básicos descritos en el presente documento.

2 Objetivos

Una vez que el alumno se lea con detenimiento este documento, será capaz de:

- Describir el procesamiento de distintos materiales metálicos mediante pirometalurgia.
- Comparar el procesamiento de distintos materiales metálicos mediante pirometalurgia.

3 Introducción

Los materiales metálicos (metales y aleaciones metálicas) son **sustancias inorgánicas** que están compuestas de uno o más **elementos metálicos**, pudiendo contener también algunos elementos no metálicos. Los materiales metálicos tienen una **estructura cristalina** en la que los átomos están dispuestos de manera ordenada. Tienen un gran número de electrones deslocalizados, que no pertenecen a ningún átomo en concreto, constituyendo el **enlace metálico**. La mayoría de las propiedades de los materiales metálicos se atribuyen a estos electrones, como por ejemplo, la buena conductividad eléctrica y térmica. Ejemplos de materiales metálicos son el acero, la fundición de hierro, el aluminio, el cobre, el cinc, el titanio, el níquel, etc. [1-6].

Aunque algunos metales son importantes como elementos puros (por ejemplo, el oro y la plata) la mayoría de sus aplicaciones en ingeniería requieren la combinación de éstos a través de una aleación, porque se pueden mejorar propiedades como la resistencia, la dureza y algunas otras que llegan a ser superiores al compararlas con las de los metales puros. Una **aleación metálica** es un material metálico compuesto de dos o más elementos, de los cuales por lo menos uno es metálico.

Los materiales metálicos se clasifican en dos grandes grupos: 1) **metales y aleaciones ferrosas**, que contienen un alto porcentaje de hierro, como por ejemplo, el acero y el hierro fundido y 2) **metales y aleaciones no ferrosas**, que no contienen hierro o, si lo contienen, es solo en un porcentaje relativamente pequeño, como por ejemplo, el cobre y el aluminio.

Los metales se encuentran en la naturaleza combinados en forma de **óxidos, carbonatos, sulfuros, silicatos y haluros**, excepto los metales nobles. Estos compuestos no se encuentran con frecuencia puros, sino mezclados con otras materias formando los **minerales**. La extracción de los metales a partir de los minerales puede realizarse de dos formas: 1) **proceso por vía seca o pirometalurgia**



y 2) **proceso por vía húmeda o hidrometalurgia** [7]. En este documento vamos a ver la **extracción de metales por pirometalurgia**.

4 Desarrollo

Ahora vamos a ver como se realiza la extracción de metales mediante pirometalurgia. Para ello vamos a describir el procesamiento de distintos materiales metálicos por pirometalurgia, como es el caso del hierro, el acero, el cobre y el aluminio. Finalmente vamos a realizar una comparación entre el procesamiento por pirometalurgia de los distintos materiales metálicos.

4.1 Extracción de metales por pirometalurgia

La extracción de metales por **pirometalurgia** se lleva a cabo mediante operaciones por **vía seca** que se realizan a altas temperaturas entre productos en estado sólido, líquido o gaseoso.

Debido a que la mayoría de los metales son excelentes reductores, normalmente los metales están en la naturaleza combinados químicamente con otros elementos, formando compuestos de diversas clases, que es preciso tratar convenientemente para poder obtener el metal. Estas combinaciones no se encuentran con frecuencia puras, sino mezcladas con otras materias formando los **minerales**. Por tanto, los minerales estarán formados por dos componentes: la **mena**, que es el mineral propiamente dicho y la **ganga**, que son las materias estériles.

La secuencia del procesamiento de los materiales metálicos por pirometalurgia incluye las siguientes etapas [7], tal como puedes ver en la Figura 1:

- 1) **Preparación de los minerales**. Las principales operaciones de preparación de los minerales son:
 - **Trituración y molienda**: tienen por objeto reducir el tamaño de los minerales, siendo más pequeño el tamaño de las partículas obtenidas tras la operación de molienda. La trituración se realiza con materiales secos, mientras que la molienda puede hacerse con materiales secos o húmedos.
 - **Clasificación**: tiene por objeto clasificar las partículas de los minerales por tamaño tras la trituración o molienda. La clasificación puede realizarse con materiales secos (clasificadores mecánicos) o húmedos (clasificadores hidrodinámicos).
 - **Concentración**: tiene por objeto separar de un mineral la mayor parte de la ganga, de forma que el mineral quedará enriquecido o concentrado. Algunas de las operaciones de concentración más empleadas son la flotación y la separación magnética.

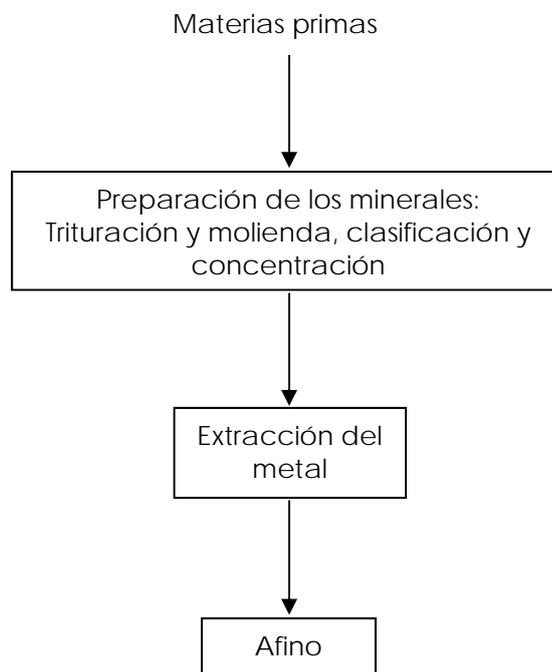


Figura 1. Diagrama de flujo del procesamiento de los materiales metálicos por pirometalurgia.

- 2) **Extracción del metal.** Los procedimientos de extracción del metal se dividen básicamente en tres grupos: 1) métodos de reducción óxidos metálicos, 2) métodos de reducción de haluros metálicos y 3) métodos reducción de sulfuros metálicos.

A continuación, vamos a ver las principales operaciones que se utilizan en el proceso de extracción del metal por pirometalurgia. Un metal se puede extraer por pirometalurgia sin necesidad de utilizar todas y cada una de estas operaciones:

- **Calcinación:** tiene por objeto descomponer un compuesto (carbonato, sulfato, hidróxido, etc.) en sus óxidos formadores haciendo uso del calor.
- **Tostación:** operación mediante la cual un sulfuro, al reaccionar con el oxígeno del aire, se transforma en un óxido. Por ejemplo, la tostación de los minerales sulfurados de cobre para producir óxido de cobre o la tostación de los minerales sulfurados de cinc para producir óxido de cinc. Normalmente es una operación previa a la de fusión.
- **Fusión:** operación en la que se obtienen, en un horno adecuado, varias fases fundidas: metal, escoria o mata. Es una de las operaciones más utilizadas en metalurgia extractiva. Por ejemplo, se usa para extraer el hierro (fusión reductora) o como paso previo en la obtención del cobre (fusión neutra: fusión a mata). La escoria se forma al reaccionar la ganga contenida en el mineral con un fundente (ácido o básico).



- **Volatilización:** operación que conduce a un metal (reductora), un compuesto (oxidante), un haluro (de haluros) o un carbonilo metálico (de carbonilos) en forma gaseosa. Por ejemplo, en la metalurgia del cinc por vía seca, el metal se obtiene como un gas por reducción del óxido.
 - **Electrólisis de sales fundidas:** tiene por objeto la obtención de un metal a partir de uno de sus compuestos disuelto en un electrólito fundido y utilizando la corriente eléctrica como agente reductor. Por ejemplo, se usa en la obtención del aluminio por electrólisis de la alúmina disuelta en un baño de criolita fundida.
 - **Metalotermia:** operación en la que un metal desplaza a otro de sus compuestos al ser más reactivo. Por ejemplo, en la obtención del titanio se utiliza magnesio para reducir el tetracloruro de titanio.
- 3) **Afino.** Tiene por objeto la separación del metal principal de otros elementos, considerados como impurezas, que pueden o no aprovecharse. Las principales operaciones de purificación o afinado del metal son: 1) electrólisis en disolución acuosa, 2) descomposición térmica y 3) fusión por zonas.

A continuación vamos a ver tres ejemplos de procesamiento de materiales metálicos por pirometalurgia. El primer ejemplo corresponde al procesamiento del hierro y el acero, el segundo ejemplo corresponde al procesamiento del cobre y el tercer ejemplo corresponde al procesamiento del aluminio [7].

4.2 Procesamiento de hierro y acero por pirometalurgia

4.2.1 Materias primas

Las materias primas utilizadas en el procesamiento del hierro y el acero son:

- **Menas de hierro:** minerales naturales de los que se extrae el hierro mediante un proceso de reducción. Las menas de hierro son óxidos de hierro que contienen de un 50 a un 70 % de hierro, dependiendo de su concentración. La **mena principal** es la **hematita (Fe_2O_3)**, que contiene casi 70 % de hierro. Otras menas son la magnetita (Fe_3O_4), la siderita (FeCO_3) y la limonita ($\text{FeO}(\text{OH})\cdot x\text{H}_2\text{O}$), donde x vale alrededor de 1,5.
- **Coque:** combustible de alto carbono, producido por calentamiento de carbón bituminoso (hulla) en una atmósfera con bajo contenido de oxígeno durante varias horas, seguido de una aspersión de agua en torres especiales de enfriamiento. **Funciones en el proceso de reducción:** 1) combustible que proporciona calor para la reacción química y 2) produce monóxido de carbono (CO) para reducir las menas de hierro.
- **Piedra caliza:** roca que contiene altas proporciones de carbonato de calcio (CaCO_3). **Funciones en el proceso de reducción:** **fundente** que reacciona con las impurezas presentes y las elimina del hierro fundido como **escoria**.

4.2.2 Extracción del hierro

La mayoría del hierro se extrae de los minerales de hierro en altos hornos de gran tamaño mediante **fusión reductora**, obteniéndose dos fases fundidas: metal y escoria. El proceso de extracción del hierro consta de dos etapas:



- **Proceso de reducción:** en el alto horno, el **monóxido de carbono (CO)** obtenido a partir del coque (carbón) actúa como **agente reductor** para reducir los óxidos de hierro (principalmente Fe_2O_3) y producir **hierro fundido (arrabio bruto líquido)**, que contiene aproximadamente un 4 % de carbono junto con algunas impurezas.
- **Formación de escorias:** la piedra caliza, agregada para ayudar a eliminar impurezas, se funde produciendo **escoria líquida** que flota encima del hierro. En este caso la piedra caliza actúa como **fundente básico** que reacciona con las impurezas de carácter ácido, como por ejemplo, SiO_2 .

4.2.3 Afino del hierro fundido: obtención del acero

La mayoría del acero se obtiene mediante **oxidación del carbono y otras impurezas del arrabio** hasta que el contenido de carbono del hierro se reduce al nivel requerido (hasta un 2,11 % en peso como máximo): proceso de **refinado del arrabio**. El proceso obtención de acero puede realizarse de dos formas:

- **Horno básico de oxígeno, HBO (BOF, Basic Oxigen Furnace):** el proceso más utilizado habitualmente para convertir el **arrabio** en acero es el **soplado con oxígeno puro en medio básico** en un convertidor para quemar las impurezas y eliminar el carbono excedente.
- **Horno eléctrico:** el acero se produce a partir de **chatarra de hierro y acero** en un **horno de arco eléctrico**, en el cual el calor la funde.

4.3 Procesamiento de cobre por pirometalurgia

4.3.1 Materias primas

Las materias primas utilizadas en el procesamiento del cobre por pirometalurgia son **minerales sulfurados**. Frecuentemente son mezclas de sulfuros de cobre y hierro, combinados con compuestos de otros diferentes elementos. Las menas de cobre contienen de 0,5-2 % de cobre. Los principales minerales sulfurados son la **calcopirita (CuFeS_2)**, la **bornita (Cu_5FeS_4)**, la **enargita (Cu_3AsS_4)** y la **tetraedrita ($(\text{Cu,Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$)**.

4.3.2 Preparación de los minerales

Los minerales sulfurados una vez extraídos se someten a operaciones de **trituration y molienda** para reducir el tamaño de partícula. Posteriormente se someten a una operación de concentración mediante **flotación**. La flotación es un proceso físico-químico de tensión superficial que separa los minerales sulfurados del metal de otros minerales y especies que componen la mayor parte de la roca original. Para ello se inyecta **aire a presión** en celdas de flotación que contienen el mineral en suspensión (pulpa), de forma que unas partículas se adhieren a las burbujas de aire y después flotan, mientras que otras partículas quedan en el seno de la disolución. Los **concentrados** obtenidos tras la operación de flotación contienen de 20-30 % de cobre.



4.3.3 Extracción del cobre

El cobre se extrae de los minerales de cobre mediante **fundición**. El proceso de fundición consta de varias etapas consecutivas:

- **Fusión:** tiene por objeto concentrar el metal a recuperar, mediante una **separación de fases** de alta temperatura: una fase inferior **sulfurada rica en el metal (mata de cobre)** y otra fase superior **oxidada o pobre en el metal (escoria)**. La fase rica en cobre contiene de 62-70 % de cobre.
- **Conversión:** tiene por objeto **eliminar el azufre y el hierro presentes en la fase sulfurada**, mediante oxidaciones del baño fundido para obtener un cobre final relativamente puro (99 % de pureza).
- **Refino:** tiene por objeto **eliminar impurezas y materiales valiosos** como plata, oro, arsénico, antimonio, bismuto y hierro, mediante refinado en **hornos anódicos**, obteniéndose un cobre anódico con un contenido del 99,6 % de cobre.

4.3.4 Afino del cobre: electrorefino del cobre

El **electrorefino** del cobre tiene dos objetivos: 1) eliminar las impurezas que dañan las propiedades eléctricas y mecánicas del cobre y 2) separar las impurezas valiosas del cobre, las cuales pueden ser recuperadas después como subproductos metálicos. Para ello los **ánodos de cobre impuros** se someten a electrólisis en una disolución de sulfato de cobre ácida, de forma que el cobre puro se deposita en los cátodos, obteniéndose una pureza del 99,99 % de cobre. Las impurezas caen al fondo de la celda de electrólisis formando los **barros anódicos**.

4.4 Procesamiento de aluminio por pirometalurgia

El procesamiento del aluminio por pirometalurgia consta de dos fases: 1) obtención de **alúmina** a partir de bauxita (**proceso Bayer**) y 2) obtención de **aluminio** a partir de alúmina mediante electrólisis (**proceso Hall-Herault**).

4.4.1 Materias primas

La **bauxita, óxido de aluminio hidratado, $Al_2O_3 \cdot 2 H_2O$** , es el único mineral del que resulta económico la extracción de la alúmina mediante el proceso Bayer. Se utiliza **bauxita roja**, rica en óxidos de hierro (25 %), con menos de un 5 % de sílice.

4.4.2 Preparación de los minerales

La bauxita extraída se somete a una serie de etapas para obtener la **alúmina (proceso Bayer)**:

- **Trituración y molienda:** para reducir el tamaño de partícula del mineral.
- **Digestión:** la bauxita se disuelve en **hidróxido sódico muy concentrado** formando **aluminato sódico soluble**. El resto de óxidos presentes en la bauxita (Fe_2O_3 , SiO_2 , TiO_2), indiferentes a la acción de la sosa, podrán ser separados posteriormente por filtración.



- **Decantación y filtración:** después de varias decantaciones, el licor se filtra bajo presión para eliminar las últimas trazas de **lodo rojo (impurezas)**.
- **Precipitación:** la disolución de aluminato es diluida y, después de añadir alúmina pura, precipita la **alúmina trihidratada**, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, gracias al efecto de hidrólisis, que bajará el pH.
- **Decantación y filtración:** se separa la **alúmina trihidratada** de la disolución de sosa que concentrada por evaporación, se recicla.
- **Calcinación:** el **óxido de aluminio puro, alúmina**, se obtiene por calentamiento. La alúmina obtenida contiene menos del 1% de impurezas.

4.4.3 Extracción del aluminio

El **aluminio** se obtiene mediante **electrólisis fundida de la alúmina** utilizando criolita (Na_3AlF_6) como fundente (**proceso Hall-Herault**). El aluminio fundido es más denso que el electrolito y se deposita en el fondo de la cuba, construida de **grafito**, que actúa de **cátodo**. El **ánodo** es de **grafito**. Se obtiene un aluminio de buena calidad llamado de **primera electrólisis**, con menos de un 0,5 % de impurezas.

4.4.4 Afino del aluminio

El refinado del aluminio se realiza por **vía electrolítica**. La celda electrolítica está formada por tres capas de naturaleza y densidades diferentes: 1) la **capa inferior**, formada por una **aleación de aluminio-cobre**, es la fuente de **metal a refinar** y el **ánodo** de la celda, 2) la **capa intermedia** está constituida por el **electrolito** y 3) la **capa superior**, constituida por el **aluminio refinado**, está en contacto con los bloques de grafito que distribuyen la corriente eléctrica y sirve de **cátodo** de la celda electrolítica. La **segunda electrólisis** permite purificar el aluminio de primera electrólisis y obtener un producto muy puro con un contenido en peso del 99,999 % de aluminio.

4.5 Comparación del procesamiento por pirometalurgia de hierro y acero, cobre y aluminio

En la Tabla 1 puedes ver una comparación del procesamiento por pirometalurgia del hierro y el acero, el cobre y el aluminio.

Respecto a los minerales metálicos, para la obtención del hierro y el acero y el aluminio se parte de minerales en forma de **óxidos del metal**, mientras que en el caso del cobre se parte de **minerales sulfurados**.

Respecto a la preparación de los minerales, en los tres casos se realiza una primera etapa de **trituration y molienda** para la reducción del tamaño de partícula. Para el procesamiento del hierro y el acero, como las menas de hierro tienen un contenido bastante alto de hierro (50-70 %), solo se requiere posteriormente una etapa de **clasificación** por tamaño de partícula. En el caso del procesamiento del cobre, como las menas de cobre tienen un porcentaje bajo de cobre (0,5-2 %), se necesita una etapa posterior de **concentración** de la mena por flotación. De esa forma se obtienen concentrados con un 20-30 % de cobre. Finalmente, en el caso del procesamiento del aluminio, el mineral sometido a trituración y molienda se somete a una serie de etapas (**digestión, decantación y filtración, precipitación,**



decantación y filtración y calcinación) para obtener un compuesto puro del metal, que en este caso es la alúmina.

Respecto a la extracción del metal, en el caso del procesamiento del hierro y el acero se realiza mediante **fusión reductora** (proceso de reducción y formación de escorias) obteniendo hierro fundido (arrabio). En el caso del procesamiento del cobre, la extracción del metal se realiza mediante **fundición** (fusión, conversión y refinado). Finalmente, en el caso del procesamiento del aluminio, la extracción del metal se realiza mediante **electrólisis de alúmina fundida**.

Etapas	Hierro y acero	Cobre	Aluminio
Minerales metálicos	Óxidos de hierro: - Hematita (Fe_2O_3). - Magnetita (Fe_3O_4). - Siderita (FeCO_3). - Limonita ($\text{FeO}(\text{OH})\cdot x\text{H}_2\text{O}$), donde x vale alrededor de 1,5.	Minerales sulfurados: - Calcopirita (CuFeS_2). - Bornita (Cu_5FeS_4). - Enargita (Cu_3AsS_4). - Tetraedrita ($(\text{Cu,Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$).	Bauxita, óxido de aluminio hidratado, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$.
Preparación de los minerales	1) Trituración y molienda. 2) Clasificación.	1) Trituración y molienda. 2) Concentración: Flotación.	1) Trituración y molienda. 2) Digestión. 3) Decantación y filtración. 4) Precipitación. 5) Decantación y filtración. 6) Calcinación. <i>Obtención de alúmina.</i>
Extracción del metal	Fusión reductora: 1) Proceso de reducción. 2) Formación de escorias. <i>Obtención de hierro fundido (arrabio).</i>	Fundición: 1) Fusión. 2) Conversión. 3) Refinado.	Electrólisis fundida de la alúmina.
Afino del metal	Soplado con oxígeno puro en medio básico: <i>obtención de acero.</i>	Electrólisis	Electrólisis

Tabla 1. Procesamiento por pirometalurgia de hierro y acero, cobre y aluminio.

Por último, respecto al afinado del metal, en el caso del procesamiento del hierro y el acero se realiza mediante **soplado con oxígeno puro en medio básico** del arrabio fundido, obteniendo finalmente el acero. En el caso del procesamiento del cobre y del aluminio, el afinado se realiza mediante **electrólisis**.

5 Cierre

A lo largo de este documento hemos aprendido cómo se realiza la extracción de metales mediante pirometalurgia, poniendo como ejemplos el caso del procesamiento del hierro y el acero, el cobre y el aluminio, y realizando finalmente una comparación entre el procesamiento por pirometalurgia de los distintos materiales metálicos.



6 Bibliografía

[1] Muñoz-Portero, M.J.: "Principios de Obtención de Materiales", Editorial UPV, 2007.

[2] Groover, M.P.: "Fundamentos de manufactura moderna", Prentice-Hall Hispanoamericana, 1997.

[3] Smith, W.F.: "Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales", McGraw-Hill, 1999.

[4] Shackelford, J.F.; Güemes, A.: "Introducción a la Ciencia de los Materiales para Ingenieros", Pearson Educación, 2010.

[5] Askeland, D.R.: "Ciencia e Ingeniería de los Materiales", Paraninfo, 2001.

[6] William, D.; Callister, Jr.: "Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales", Reverté, 2000.

[7] Ballester, A.; Verdeja, L.F.; Sancho, J.: "Metalurgia extractiva: Volumen I y II", Síntesis, 2000.