



## **CAPÍTULO 2: LA METALURGIA O LA CIENCIA Y EL ARTE DE LOS METALES**

### **2.1. INTRODUCCIÓN**

La Metalurgia es la ciencia y el arte de extraer metales a partir de sus minerales, refinándolos y preparándolos para su uso. La obtención de los metales se realiza a través de una secuencia de pasos o etapas que pueden ser de carácter físico o químico.

Los metales se encuentran en la naturaleza en forma de minerales o mezclas de minerales, los cuales contienen usualmente grandes proporciones de minerales de desecho junto a los minerales de los metales valiosos. Una vez extraída la mezcla mineral de la mina, el primer paso a seguir es, en general, extraer físicamente los minerales valiosos separándolos en gran parte de la ganga. Esto se realiza triturando y moliendo los minerales para separarlos entre sí y luego concentrando aquellos minerales valiosos por procedimientos tales como la concentración por gravedad, flotación por espuma o separación magnética, en los cuales se aprovechan las diferencias de las propiedades físicas de los diferentes minerales. Estas operaciones se caracterizan por no modificar las características químicas de los minerales que han sido separados. Los siguientes pasos en la extracción de los metales a partir de los concentrados y su refinación posterior son necesariamente de naturaleza química, el metal valioso debe ser separado químicamente del compuesto que lo contiene; para esto se requiere la ejecución de una amplia variedad de reacciones químicas en gran escala.

La mayor parte de estos procesos químicos se realizan en hornos de alta temperatura, aunque en algunos casos se utiliza electricidad para producir los cambios químicos tanto a bajas como a altas temperaturas. En general, la obtención de un metal en particular involucra una serie de tales pasos químicos.

Una vez que el metal ha sido extraído y refinado, debe sufrir un tratamiento posterior para adaptarlo al uso que le ha sido asignado. Por medio de las adiciones de otros elementos, las deformaciones mecánicas, los tratamientos térmicos, etc. se le entregan al metal las propiedades que determinan su utilidad posterior.

Este es a grandes rasgos el panorama de la Metalurgia; es por lo tanto, en primera instancia, un conjunto de actividades humanas reunidas con un fin común, la obtención de artículos metálicos. La importancia de unificar estas actividades en una sola cosa objeto de estudio, no es del todo clara y su justificación es más bien histórica; sin embargo, cabe tener presente que en la naturaleza existen alrededor de un 80% de elementos que presentan características metálicas. Si bien el conjunto de operaciones involucradas en la fabricación de un objeto metálico presenta una unidad evidente, de acuerdo con la secuencia de las etapas necesarias para la obtención de un producto metálico, no es igualmente evidente la existencia de una unidad científica, que conteniendo métodos o conocimientos básicos particulares, pueda llamarse “Ciencia Metalúrgica”.

Sólo en los últimos años se ha hecho claridad en el sentido de que al nombre Metalurgia responden dos unidades del conocimiento: la Ingeniería Metalúrgica y la Ciencia



Metalúrgica. Al hablar aquí de la Metalurgia como una ciencia básica que tenga algún método particular o sus propias leyes independientes del resto, queremos decir que ese conocimiento básico no está contemplado en general en otras ciencias o es comprendido en términos diferentes en ellas. La Ingeniería Metalúrgica es una de las profesiones más antiguas del hombre, ha jugado un papel preponderante en el desarrollo de las sociedades humanas llevándolas desde la tenebrosa Edad de Piedra a la Edad de Bronce y posteriormente a la Edad del Hierro; actualmente gran parte del progreso humano se sustenta en el gran desarrollo alcanzado en la elaboración de los metales. Este es un hecho indiscutible. La Ciencia Metalúrgica es relativamente nueva y está en una etapa más bien primitiva de su desarrollo. A continuación se establecen más detalladamente estos conceptos y se muestran las divisiones internas de la Metalurgia así como los nombres usualmente empleados.

## **2.2. INGENIERÍA METALÚRGICA**

La Ingeniería Metalúrgica es el conjunto de operaciones y procesos por medio de los cuales un mineral es reducido a un metal, el cual a su vez es modificado en las formas y con las propiedades requeridas para ser utilizadas por el hombre.

La Ingeniería Metalúrgica se divide en cuatro grandes áreas de acuerdo con la secuencia lógica de los procesos: preparación de minerales, metalurgia de procesos, procesamiento de metales y metalurgia de aplicación. Los dos primeros caen en lo que comúnmente se denomina Metalurgia Extractiva que abarca hasta la obtención de los metales, y los dos últimos en Metalurgia Adaptiva a la cual le competen las modificaciones y el control de las propiedades de los metales y las aleaciones.

La siguiente tabla ilustra la división de la Ingeniería Metalúrgica donde se incluyen los tópicos más comunes que conforman cada campo. Los nombres que aparecen corresponden a procesos unitarios y operaciones unitarias que son comunes para todos los metales; los metales no se distinguen entre sí más que por sus propiedades y por tal razón no aparecen términos clásicos como ferroso y no ferroso, estos términos pueden ser utilizados industrialmente, pero la división de la ciencia o la Ingeniería en virtud de tales líneas no es conveniente, como tampoco es conveniente dividirla de acuerdo con el metal tratado.

En esta tabla aparecen las actividades típicas de un Ingeniero Metalúrgico en cada uno de sus campos de especialización. Esta es una división natural basada en la realidad industrial de todos los países del mundo y no una definición basada en los conocimientos básicos. Este es el amplio objetivo que debe tenerse en cuenta en la formación de un Ingeniero Metalúrgico, ya que es el tipo de labores que desarrolla en el desempeño de su profesión.

A continuación se verá con un poco más de detalle cada campo de la Ingeniería Metalúrgica.



### Metalurgia Extractiva

#### 1- Preparación de Minerales

- a.- Conminución
- b. Concentración
- c.- Lixiviación

#### 2. - Metalurgia de Procesos

- a.- Tostación
- b.- Reducción
- c.- Refinación
- d.- Electrorefinación
- e.- Lingoteado

### Metalurgia Adaptiva

#### 3- Procesamiento de Metales

- a.- Conformado de Metales
- b.- Fundición
- c.- Soldadura
- d.- Tratamiento de superficies
- e.- Metalurgia de Polvos
- f.- Tratamientos Térmicos

#### 4- Metalurgia de Aplicación

- a.- Control de Calidad
- b.- Selección y especificación
- c.- Diseño de Aleaciones

\* Modificado de John Chipman; "What is Metallurgy".



## **2.4. PREPARACIÓN DE MINERALES**

La Ingeniería Metalúrgica comienza con el mineral metálico y las primeras operaciones son las relacionadas con la preparación de minerales. La mayor parte de las actividades involucradas en este campo se caracterizan por no modificar la estructura química de las especies mineralógicas, son "operaciones físicas" cuyo objetivo es separar una especie de otras. Solamente la lixiviación, dentro de este campo, involucra una reacción química y por lo tanto cae dentro del grupo de "procesos químicos". En general, cada elemento metálico se extrae por procedimientos diferentes, sin embargo, todos los procedimientos consisten en pasos que son comunes, es decir, están formados por un número relativamente pequeño de pasos que se combinan en grupos y secuencias definidas. Estos pasos individuales se denominan operaciones unitarias o procesos unitarios, según el caso; la combinación de ellos se conoce con el nombre de "flow sheet".

La siguiente tabla muestra los principales pasos unitarios involucrados en la preparación de minerales.

Existe una marcada semejanza entre las operaciones unitarias contenidas en el tratamiento de minerales metálicos contenidas en el tratamiento de minerales metálicos y aquellas relacionadas con los minerales no metálicos, cerámicos y de combustibles sólidos, todos ellos relacionados íntimamente con la geología económica y la minería. Se ha dicho que este primer segmento de la Ingeniería Metalúrgica constituye también una parte de un campo más amplio denominado Ingeniería Mineral.

### **OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS DE LA PREPARACIÓN DE MINERALES\***

<u>Operaciones Unitarias</u>	<u>Procesos Unitarios</u>
Chancado	Lixiviación
Molienda	Precipitación
Cribado	
Clasificación	
Separación por Gravedad	
Jigging	
Flotación	
Separación Magnética	
Separación Electroestática	
Agitación	
Filtrado	
Manejo de Materiales	

\* Obtenida de R.Schuhmann, Jr. "The Unit Processes of Chemical Metallurgy"

La fundamentación científica de las operaciones unitarias, involucradas en la preparación de minerales que configura el área denominada "Mineralurgia", está basada en tópicos tales como: Cristalografía, termodinámica de superficies, Mineralogía, Mecánica de fluidos y otros de aplicaciones no tan generales, pero si importantes para una operación específica, tales como Química Orgánica, Electricidad y Magnetismo y otras ramas de la



física. Los fundamentos de los procesos químicos de la preparación de minerales, esto es, la lixiviación y la precipitación, son similares a los de otros procesos, contenidos en la Metalurgia de procesos y serán consideradas después.

La importancia de la preparación de minerales en la Ingeniería Metalúrgica es obvia, si se piensa, que ella determina, según su estado de desarrollo, el que un depósito mineral sea explotable o no. La gran parte de nuestro cobre se obtiene a partir de minerales que no tenían ningún valor hace 50 o 60 años atrás. Esto se debe exclusivamente al desarrollo de la flotación que convirtió rocas sin importancia en fuentes naturales. Así, en el futuro, muchos de nuestros metales provendrán de minerales que hoy en día no son convenientes de tratar. Esta es una de las grandes tareas de la Ingeniería Metalúrgica.

## **2.5. METALURGIA DE PROCESOS**

La Metalurgia de procesos es la sucesión de pasos o procesos por medio de los cuales un mineral impuro se reduce a un metal, refinado, aleado y lingoteado en las formas apropiadas como metal primario dispuesto para un procesamiento posterior. Todos los pasos involucrados en este campo, sin excepción, se caracterizan por modificar las propiedades químicas o los estados de agregación de las especies químicas que en ellas participan, son por lo tanto procesos químicos.

La Metalurgia de procesos es muy afín con la Ingeniería Química con la cual tiene muchas ideas y problemas en común; aunque la mayor parte de los procesos unitarios son distintos a los de la Ingeniería Química los principios básicos en que se sostienen son muy semejantes.

En la práctica es muy común encontrar a Ingenieros Químicos que se han especializado en Metalurgia de Procesos y que cubren este campo ocupacional al igual que los Ingenieros Metalúrgicos. Esta práctica es discutible ya que para ser un eficiente metalurgista de procesos, no sólo es necesario contar con un amplio respaldo en los aspectos básicos, lo cual si es común, sino que también debe tenerse una gran familiaridad con los sistemas estudiados. Los metales fundidos, las escorias, la electrólisis de sales fundidas, la solidificación de lingotes, etc., no son conceptos familiares para los Ingenieros Químicos, quienes se desenvuelven siempre con sistemas a temperaturas mucho menores. Sin embargo, hay que destacar que las diferencias entre ambos campos deben buscarse en los tipos de sistemas estudiados y no en los conocimientos básicos utilizados.

Antiguamente era costumbre enseñar la Metalurgia de procesos en términos del metal estudiado, de ahí aparecieron términos tales como, metalurgia del cobre, metalurgia ferrosa, metalurgia del níquel, etc. actualmente tal práctica es anacrónica, en cambio el estudio se lleva a cabo con el concepto de proceso unitario incorporado por Schuhmann; según esto, al igual que en la preparación de minerales, todas las especies minerales sufren una secuencia de procesos comunes para ser convertidos en metales primarios. La siguiente tabla muestra los principales procesos que sufren los minerales y que conforman la Metalurgia de Procesos.



## **PROCESOS UNITARIOS DE LA METALURGIA DE PROCESOS**

Secado	Metalotermia
Calcinación	Carbotermia
Tostación	Destilación y Sublimación
Sinterización	Fusión de Retortas
Fusión simple	Reducción gaseosa
Fusión en alto horno	Refinación a Fuego
Conversión	Electrorefinación
Reducción líquida	Electrorecuperación
Combustión	Electrólisis de sales fundidas
Lingoteado	Procesos Hidrometalúrgicos

Es conveniente aclarar aquí la significación de ciertos términos muy utilizados en el lenguaje de la Ingeniería Metalúrgica como son los de: Piro, Hidro y Electrometalurgia. Este término son generalizados de un conjunto de procesos que no tienen una característica particular, pero que no implican ningún fundamento básico; así la Pirometalurgia es el conjunto de procesos unitarios de la Metalurgia de procesos que implican altas temperaturas, pero que puede ser en sistemas gas-sólido, líquido-líquido, etc. La Hidrometalurgia implica soluciones acuosas y la Electrometalurgia el uso del principio de la electrólisis sea en soluciones acuosas, soluciones metálicas o iónicas. Su uso, por lo tanto, es limitado y no debe formar parte en la definición de la Metalurgia.

Los procesos unitarios de la Ingeniería están, en general, relacionados con reacciones químicas y cambios de estado; las bases fundamentales con que se apoya son, por cierto, la Termodinámica, la Cinética de reacciones, la Electroquímica y la Química Inorgánica, pero aplicada, en ciertos casos, a sistemas muy particulares como son los de sales fundidas, soluciones iónicas, soluciones metálicas y en casos menos frecuentes en sistemas acuosos y gaseosos. Es decir, que en general, la Metalurgia de procesos trata con sistemas heterogéneos y por lo tanto, se apoya en una gran medida en la ciencia de los Fenómenos de Transporte.

La aplicación de estos principios a la Ingeniería Metalúrgica ha permitido mejorar enormemente los procesos introduciendo nuevos métodos tecnológicos, desarrollando nuevos sistemas y mejorando sustancialmente la calidad de los productos con más eficiencia y mayor economía de los procesos.

## **2.6. PROCESAMIENTO DE METALES**

Bajo el nombre de procesamiento de metales están contenidos los procedimientos por medios de los cuales los metales se transforman en objetos útiles. En general, en estos procesos, aunque aquí esta palabra carece del sentido indicado antes, se modifican las propiedades físicas y mecánicas de los metales y sólo raramente sus propiedades químicas.





Una parte de este campo, el conformado de metales junto con el estudio de las propiedades mecánicas de los materiales, lo cual se denomina a veces como Metalurgia Mecánica, ha sido hasta ahora un dominio de la Ingeniería Mecánica; debido al estado de desarrollo de esta área, los problemas relacionados con las fuerzas aplicadas y las respuestas del sistema como medio continuo. La Ingeniería Metalúrgica se preocupa fundamentalmente del comportamiento de los metales bajo diversas sollicitaciones desde el punto de vista de la microestructura, solo recientemente el conformado de metales ha alcanzado un estado de desarrollo en el cual es conveniente estudiar estos problemas.

El proceso que sigue un metal para ser convertido a la forma y con las propiedades deseadas, depende del metal en cuestión y del objetivo perseguido, sin embargo existe un cierto número de pasos únicos a los cuales un metal puede ser sometido. Los más importantes muestran en la siguiente tabla.

### **PASOS UNITARIOS EN EL PROCESAMIENTO DE METALES**

Laminación	Temple y Revenido
Forja	Recocido
Trefilación	Normalizado
Extrusión	Carburización o Cementación
Fusión y Colada	Nitruración
Soldadura	Compactación
Galvanizado	Sinterización
Zincado	Metalurgia de Polvos

Los fundamentos científicos en que se basan los procesamientos de los metales son muchos y muy variados, en ciertas partes son los mismos que en metalurgia de procesos, pero además existe una ancha gama de materias como son la metalografía, cristalografía, física del estado sólido, la teoría de dislocaciones, difusión en el estado sólido, solidificación, reacciones martensíticas, transformaciones de fases, elasticidad, plasticidad, etc. que forman parte de la ciencia básica en que se apoya toda la Metalurgia Adaptiva.

Durante mucho tiempo, la gran mayoría de estos procesos fueron relegados por los Ingenieros Metalúrgicos a un control puramente empírico. Sólo en este último tiempo y en forma parcial se han logrado adelantos al aplicar los conocimientos científicos a ellos, especialmente en la industria de la fundición y en los tratamientos térmicos. Así, "nosotros hemos visto en años recientes doblar la resistencia de las fundiciones grises persuadiendo al grafito a formar nódulos en vez de escamas o láminas".

## **2.7. METALURGIA DE APLICACION**

El saber elegir el metal justo y colocarlo en el sitio justo con las mejores condiciones de costo y de servicios es la última rama de la Ingeniería Metalúrgica. La selección y especificación de los metales y de su tratamiento (térmico, superficial, etc.) es



generalmente una tarea de grandes proporciones que obliga al Ingeniero a utilizar al máximo de su ingenio y su experiencia. Para realizar esto debe tener en cuenta, la complejidad de la estructura, los diversos tipos de metales, la calidad adecuada, los aspectos económicos, etc.

En este campo, las ciencias mencionadas anteriormente, encuentran mejor su aplicación práctica, y además aquí la Metalurgia se sirve de toda la Ingeniería; aquí el Ingeniero Metalúrgico esta constantemente trabajando con otros ingenieros, por lo tanto debe conocer su lenguaje, debe comprender los rendimientos del diseño, la fabricación, inspección y el ensamblado.

Si ningún metal o material conocido es satisfactorio para la tarea dada, una nueva aleación o nuevo material debe ser diseñado para cumplir el objetivo, un programa de investigación y desarrollo será requerido. A medida que se obtengan aleaciones que cumplan con las necesidades, los requisitos aumentan, aún mejores aleaciones son requeridas y el proceso debe continuar. Estamos constantemente en medio de tales desarrollos. Rápido progreso se hace en este momento en el desarrollo de metales útiles a altas temperaturas. El diseño de una aleación nueva para un propósito dado puede ser una tarea muy simple o extremadamente difícil, dependiendo de la disponibilidad de los datos científicos básicos.

Como muchos requisitos no han podido satisfacerse con aleaciones metálicas se ha buscado y encontrado soluciones con materiales no metálicos como son las cerámicas y los polímeros (comúnmente conocidos como plástico) o sus combinaciones – dando lugar a los materiales compuestos o compósitos, que son el interés de una nueva disciplina, la Ciencia de los Materiales. La Ciencia de los Materiales se nutre de todo el conocimiento metalúrgico básico para aplicarlo a todos los materiales y al enriquecerse con la química y física del estado sólido dando nacimiento así a la Ingeniería de Materiales, la natural expansión de la Metalurgia Física.